第九篇

转炉钢的连铸技术

第一章　钢的凝固理论及浇注方法

第一节　钢的凝固理论

钢由液态转变为固态的过程称为钢的凝固。钢的凝固过程也是结晶过程。从微观上来看,它是钢液中无规则的原子集团转变为原子并按一定规则排列的结晶体;从宏观上来看,就是钢液中贮藏的显热和凝固潜热(结晶潜热)传输到外界,使钢液变为固态。为了获得既无外部缺陷又无内部缺陷的钢锭、连铸坯、钢件或各种规格的异型钢等,凝固要求:正确的凝固结构、体内的热应力要少、合金元素分布均匀、最大限度地去除气体和夹杂物、钢液收得率高。凝固是炼钢生产过程中非常重要的环节,凝固过程所发生的各种物化变化将直接影响钢的质量和经济效益。

一、钢的结晶条件和能量起伏

(一)结晶的必要条件

根据热力学第二定律可知,物质在转变过程中用来对外界作功的那部分能量称为自由能。在等温等压条件下,一切自发转变过程都是朝着自由能降低的方向进行,即 $\Delta G < 0$。也就是说,在这个转变过程中,不需要外界作功,而是物质对外界作功。相反,如果转变的结果是使自由能增加,即 $\Delta G > 0$,转变是不能自发进行的。

钢液的结晶过程也是一个等温等压过程。在某一温度下,只有固体钢的自由能小于钢液的自由能时,结晶过程才能发生。由图 9-1-1 可知,当温度高于 T_s 时,钢液的自

由能低于固体钢的自由能，这时固体钢转变为钢液。当温度为 T_s 时，钢液的自由能与固体钢的自由能相等，两种状态同时平衡并存。当温度低于 T_s 时，固体钢的自由能低于钢液的自由能，这时结晶过程才能自发地进行。人们将 T_s 称为理论结晶温度，而把钢液开始结晶的温度称为实际结晶温度，常用符号 T_n 表示。钢液的理论结晶温度与实际结晶温度之差叫做过冷度。即

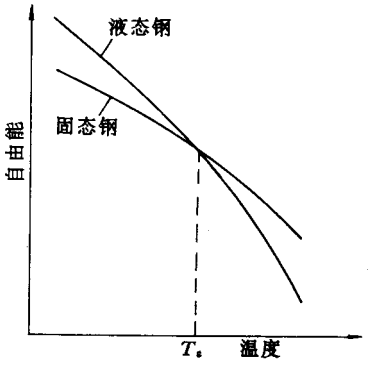


图 9－1－1　钢液与固体钢自由能和温度间的关系

$$\Delta T = T_s - T_s \tag{9-1-1}$$

大量的科学试验和生产实践表明，钢液的结晶总是在过冷的条件下进行，而且过冷度越大，结晶的自发趋势也越大，因此过冷是钢液结晶的必要条件。

(二)结晶的结构条件

所有的金属和合金在固态时都是晶体，内部原子在较大的范围内呈规则排列，并以一定的平衡位置为中心不停地进行热振动。固态金属的这种结构称为远程有序结构。而当加热熔化时，远程有序结构便遭到破坏，出现了原子排列不规则的现象。但由于原子的不断运动及原子间的相互吸引，在液态金属中的某些区域，仍然可能在某一瞬时呈现原子的规则排列。科学实验也证明，液态金属在接近理论结晶温度时，它的内部存在着很多体积微小的有规则排列的原子集团，结构与固态金属相似，但很不稳定。由于原子的热振动，它们倾刻就会分散，同时在别的微小体积内，又会很快的聚合。对应于固态金属的远程有序结构，液态金属的这种结构，通常被认为近程有序结构。液态金属中这种近程规则排列的原子集团的时聚时散现象又叫做结构起伏。

在一定的温度下，结构起伏在液态金属中始终是持续不断地进行，只不过是温度越高，较大尺寸的结构起伏越少；反之则越多。这就是说，温度越低，液态金属的结构越与固态金属的结构相近。因此，结晶离不开结构起伏，结构起伏是结晶的结构条件。钢液

的结晶也必须具备与一定的过冷度 ΔT 相适应的结构起伏才能进行。

(三)能量起伏

在结晶的必要条件中,我们涉及到了钢液的自由能,那是指钢液整个系统中各个微小体积自由能总和的平均值。在一定的温度下,系统自由能的平均值是一定的,但系统中各个微小体积所具有的自由能并不相等,有的高于平均值,有的低于平均值。又由于钢液中存在着结构起伏,因此各个微小体积所具有的能量大小随时都在变化。理论上,我们将系统中各个微小体积所具有能量大小不一、起伏不定、暂短偏离其平均能量的现象叫做能量起伏。在一般情况下,增大过冷度,与之相适应的结构起伏和能量起伏的出现几率也增加。

二、钢液结晶的一般规律

结晶由两个基本过程所构成:(1)在液态金属中产生极小的晶体作为结晶中心,这极小的晶体称为晶核;(2)晶核逐渐长大成较大的晶体。在一定的过冷度下,单位时间内,单位体积的液态金属中所形成的晶核数目称为形核率,单位为晶核数目/($S\cdot mm^3$)。

在一定的过冷度下进行结晶时,液态金属中以一定的形核率产生晶核,且随着时间的延长,晶核的数目越来越多。与此同时,已经产生的晶核按一定的长大线速度(mm/s)长大,这样结晶到所有的液态金属耗尽为止。因此,形核和晶核长大构成了结晶的基本过程。

三、晶核的形成与长大

(一)晶核的形成

晶核的形成有均质形核和非均质形核两种。均质形核是以钢液内的近程有序排列的原子集团为核心直接产生,这样的核心称为晶胚。非均质形核是在钢液内晶核依附于某些未熔的外来微粒或杂质的表面而形成。实际上,钢液的结晶主要是非均质形核,但均质形核概念却是钢液结晶理论不可逾越的重要基础。

1.均质形核

均质形核是以某些原子集团为核心的,这样的原子集团不再是时聚时散,而是稳定的存在并继续长大,由原近程排列转变为远程排列。但不是所有的近程排列的原子集团都能成为均质形核的核心,那么究竟什么样的近程排列的原子集团才能作为均质形核的核心呢?为此,我们从热力学的角度进行分析。

在一定的过冷度下,形成新相晶核时,钢液系统自由能的变化包括液态转变为固态

的那部分体积所引起的自由能(体积能)下降和由于新相晶核表面原子偏离规则排列的位置所引起的自由能(表面能)的增加两部分。设单位体积自由能的变化为 Δf,新相晶核的体积为 V,晶核单位面积的表面能为 σ,如果表面积为 S,则钢液系统自由能的总变化 ΔG 为:

$$\Delta G = -V\Delta f + S\sigma \tag{9-1-2}$$

假定形成的新相晶核为球形,半径为 r,则钢液中出现一个新相时,整个系统中自由能的变化 ΔG 应为:

$$\Delta G = -\frac{4}{3}\pi\gamma^3\Delta f + 4\pi\gamma^2\sigma \tag{9-1-3}$$

从式 9-1-3 中可看出,钢液系统中自由能的变化 ΔG 与新相晶核半径 r 有关,它们之间的关系如图 9-1-2 所示。图中曲线 1 表示表面能随晶核半径 r 的增加而增加,它与 r^2 成比例;曲线 2 表示体积自由能随晶核 r 的增加而降低,它与 r^3 成比例。因此,钢液系统自由能的总变化 ΔG 与晶核半径 r 的关系就如图中曲线 3 所示。ΔG 起初是随晶核半径 r 的增加而增加,当半径 r 大到某一数值以后,ΔG 将随晶坯半径 r 的增加而降低。因此,在某一晶核半径为 r_K 处,ΔG 将存在极大值,用 ΔG_K 表示。

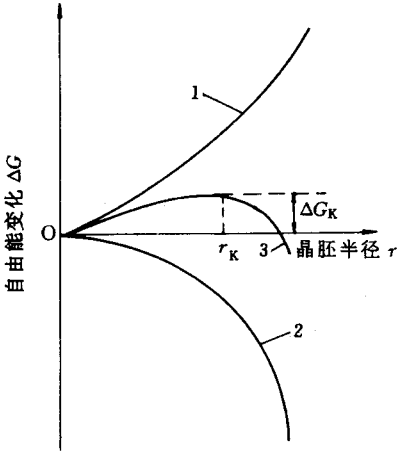


图 9-1-2　新相晶核形成对钢液系统自由能的变化与半径的关系

由图 9-1-2 可知,当晶核半径小于 r_K 时,它的长大将引起钢液系统自由能的增加。显然,这样的晶核不能长大,它们在钢液中不能稳定的存在,即形成后又会溶解,因此结晶过程不能进行,形成这样晶核的晶胚也不能成为均质形核的核心。而当晶核半径大于 r_K 时,它的长大将引起系统自由能的降低,因此半径大于 r_K 的晶核能继续长大,形成这样晶核的晶坯便可作为均质晶核的核心,且能使结晶过程顺利进行。但当晶核半径

正好等于 r_K 时，晶核长大的趋势与消失的趋势相等，这样的晶核称为临界晶核，r_K 称为晶核的临界半径。可以认为，临界晶核就是钢液中起形核作用，而尺寸又是最小的近程排列的原子集团（晶胚）。

根据在 r_K 处 ΔG 有极大值，可求出：

$$r_K = \frac{2\sigma}{\Delta f} \tag{9-1-4}$$

由式 9-1-4 可以看出，临界半径 r_K 值是由表面能 σ 和体积能 Δf 两个因素决定的。已知温度越低，过冷度 ΔT 越大，Δf 值也越大，r_K 就越小，而 σ 值随温度的变化不大，因此 r_K 主要受 ΔT 的影响。临界半径 r_K 与过冷度 ΔT 的关系如图 9-1-3 所示。

由图 9-1-3 可见，原来在过冷度较小时，不能成为晶核的那些尺寸较小的时聚时散的原子集团，在过冷度增大的情况下，就能起着形核作用。因此，过冷度越大，形核几率就越大，形核的数目也就越多。当温度正好为 T_s 时，$\Delta f = 0$，由式 9-1-4 可得 r_K 为 ∞。在这种情况下，任何时聚时散的晶坯都不能形核，结晶过程不可能进行。也就是说，形核必须有一定的过冷度。

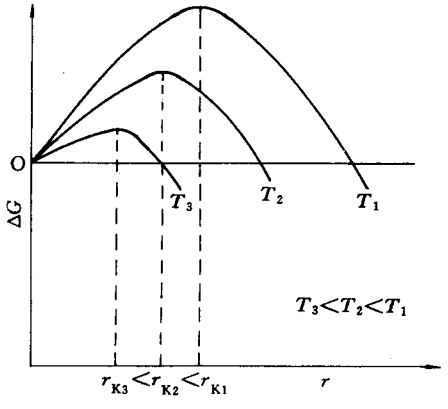


图 9-1-3　晶核的临界半径与过冷度的关系

从图中还可看出，半径超过临界尺寸的晶核长大时，虽然可以引起自由能的降低，但临界晶核本身的自由能仍高于原来液态金属所具有的平均自由能，这说明临界晶核的形成是需要一定能量的。形成临界晶核所需要的能量叫做形核功。用 $r_K = \frac{2\sigma}{\Delta f}$ 代入式 9-1-3 中计算，就可求出形核功的值。设均质形核的形核功为 $\Delta G_{均}$，有：

$$\Delta G_{均} = -\frac{4}{3}\pi\left(\frac{2\sigma}{\Delta f}\right)^3 \Delta f + 4\pi\left(\frac{2\sigma}{\Delta f}\right)^2 \sigma$$

$$= -\frac{2}{3}\frac{16\pi\sigma^2}{\Delta f^2}\sigma + \frac{16\pi\sigma^2}{\Delta f^2}\sigma = = \frac{1}{3}\frac{16\pi\sigma^2}{\Delta f^2}\sigma \tag{9-1-5}$$

临界晶核的表面积 $S_K = 4\pi r_K^2 = \frac{16\pi\sigma^2}{\Delta f^2}$，所以：

$$\Delta G_{均} = \frac{1}{3} S_K \sigma \tag{9-1-6}$$

计算表明，形核功 $\Delta G_{均}$ 等于临界晶核的表面能的 1/3，即形成临界晶核时，钢液系统的自由能要增加$\frac{1}{3} S_K \sigma$，当过冷度增加时，$\Delta G_{均}$ 随着临界半径的缩小而减少。$\Delta G_{均}$ 这部分能量是依靠钢液中的能量起伏来提供的，由于钢液中存在着能量起伏，因此钢液中的均质形核也就有了可能。

2.非均质形核

非均质形核的规律与均质形核的规律是一样的，它也需要过冷。在一定的过冷度下，也有一定的临界晶核尺寸 过冷度越大，晶核的临界半径越小，形核率也越高。所不同的只是非均质形核是依附于杂质的表面，而且与均质形核相比较，所需的表面能较小，所以形核功也较小。因此，在温度稍低于 T_s 时，非均质形核优先于均质形核。

图 9-1-4 是非均质形核的示意图。假设结晶时是依托于固体杂质而形核，并设非均质形核的形核功为 $\Delta G_{非}$，晶核与杂质的接触面积为 S_1，晶核与杂质间的比表面能为 σ_1；晶核与液体的接触面积为 S_2，晶核与液体间的比表面能为 σ_2，可近似地认为：

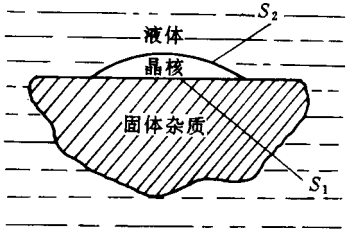


图 9-1-4　非均质形核的示意图

$$\Delta G_{非} = \frac{1}{3} S_1 \sigma_1 + \frac{1}{3} S_2 \sigma_2 \tag{9-1-7}$$

均质形核的形核功 $\Delta G_{均} = \frac{1}{3} S_K \sigma_2$。又因为 $S_K = S_1 + S_2$，所以：

$$\Delta G_{均} = \frac{1}{3}(S_1 + S_2)\sigma_2 = \frac{1}{3} S_1 \sigma_2 + \frac{1}{3} S_2 \sigma_2 \tag{9-1-8}$$

比较式 9-1-7 和式 9-1-8 可以看出，如果 $\sigma_1 < \sigma_2$，$\Delta G_{非} < \Delta G_{均}$。只有晶核与杂

质间的比表面能 σ_1 小于晶核与钢液间的比表面能 σ_2 时，非均质形核的晶核形成功才能小于均质形核的晶核形成功，这样的杂质才能起促进形核的作用。

根据润湿现象理论，非均质形核取决于润湿角，即润湿角越小越易形核。在生产条件下，钢液的形核主要是非均质形核，除模壁表面作为依托形核外，还常含有两类小质点：一类叫活性质点，如铝的夹杂物等，晶体结构与钢的晶体结构相近似，可作为依托而形成核心；另一类是难熔物质的质点，它们的结构虽与钢的晶体结构相差较远，但这些难熔质点表面往往存有细微凹坑和裂纹，也可作为依托而形成晶体的核心。

（二）晶核的长大

晶核一旦形成且能稳定存在后就将迅速长大。晶核长大的实质就是原子由液态向固态的转移。晶核长大的方式与固液交界面处的原子结构有关。目前人们较多倾向于杰克逊的理论，这就是固液交界面处的原子结构取决于结晶潜热 $L_{晶}$、结晶速度 R 与凝固温度 T。当 $L_{晶}/RT>2$ 时，原子排列具有一个光滑的交界面，交界面准确地按结晶方向生长；当 $L_{晶}/RT<2$ 时，原子排列不规则，交界面粗糙而且可向任一方位生长，钢液中晶核的长大方式基本上属于这种情况。

在实际生产中，钢液在锭模（或铸型）中结晶时，热量通过模壁向外散失。固体结晶前沿的液体距固液界面越远温度越高，成为如图 9－1－5a 所示的温度分布，这种情况叫做具有正的温度梯度。这时由于远离固液交界处液体温度很高，固体没有深入液体中向前生长的条件，只好等热量经过固体逐步散失，在固液交界面前获得一定的过冷度后，固体才能向前生长，显而易见，晶体长大的速度完全是由散热条件所控制的。在这种情况下，如果在生长着的晶体表面有一些偶然的凸起伸入到前面过冷度较小的地方，生长速度将立即减慢，而周围的晶体很快地长上来，凸起便随之消失，所以固体表面在宏观上看起来是平滑的。实验室炼制纯铁的结晶颇与此相类似。

如果控制结晶条件，使热量同时通过固体和液体散失，就可能得到如图 9－1－5b 所示的负温度梯度。在这种条件下，固体表面上的偶然凸起便可以伸入到液体中过冷度较大的地方，因而得到更有利的生长条件。这时，固体表面就不再是光滑的而会形成一些伸长的晶柱。在这些晶柱的侧面由于结晶潜热的释放又会造成负温度梯度的分布，于是又会在这些晶柱上生出新的分枝。我们把原来生长的晶柱叫做一次晶轴，在一次晶轴侧面长出的晶柱叫二次晶轴。依此类推，还可从二次晶轴上生出三次晶轴……这些晶轴彼此交错，宛如树枝，故叫做树枝状晶体，简称枝晶。图 9－1－6 为晶核长大成树枝状晶体的示意图。

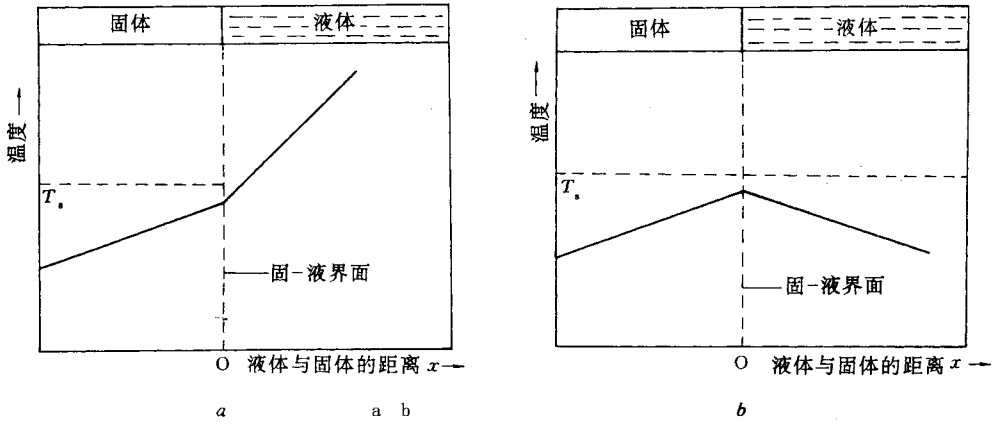


图 9-1-5　结晶前沿的温度分布情况

a—具有正温度梯度；b—具有负温度梯度

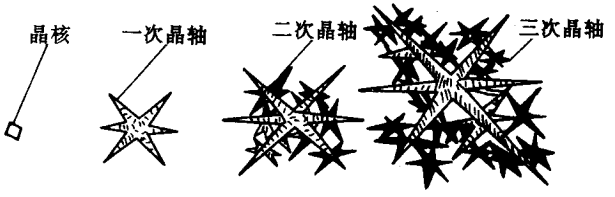


图 9-1-6　树枝状晶体成长示意图

在钢的结晶过程中，由于晶核是按树枝状骨架方式长大的，当发展到与相邻的树枝状骨架相遇时，树枝状骨架才停止发展。但此时的骨架仍处于液体之中，骨架内将不断生长出更高次的晶轴，同时早生长的晶轴逐渐加粗，使液体越来越少，直至完全凝固为止。

四、钢液凝固和冷却的放热

钢液凝固和冷却时能放出大量的热，释放出的热量应包括三部分：

(1)钢液的过热，即从浇注温度冷却到液相线温度放出的热量，以 $c_{p液}(T_{注}-T_{液})$ 表示。

(2)钢液的结晶潜热，以 $L_{晶}$ 表示。一般钢的结晶潜热约为 272.1kJ/kg。

(3)凝固后的显热，即已凝固的钢从固相温度冷却到室温放出的热量，以 $c_{p固}(T_{固}-T_{室})$ 表示。

单位质量钢液放出的热量 Q 为三部分热量之和：

$$Q = c_{p液}(T_{注} - T_{液}) + L_{晶} + c_{p固}(T_{固} - T_{室}) \tag{9-1-9}$$

式中　$c_{p液}$——液体钢质量定压热容 $c_{p液} = 0.88(kJ/kg\cdot℃)$；

$c_{p固}$——固体钢质量定压热容，$c_{p固} = 0.71(kJ/kg\cdot℃)$；

$T_{注}$——浇注温度，℃；

$T_{液}$——液相线温度，℃；

$T_{固}$——固相线温度，℃；

$T_{室}$——室温，℃；

将过热 30℃的 20 钢和纯铁凝固冷却到室温，放出的热量如表 9-1-1 所示。钢液在钢锭模内完全凝固放出的热量，按钢锭大小的不同约为 502.4～628.0kJ/kg；在连铸时，从结晶器到切割站，铸坯放出的热量约为 460.5～502.4kJ/kg；在结晶器内约为 167.5～188.4kJ/kg；二次冷却区约为 230.3～251.2kJ/kg。通过以上论述可知，钢液凝固冷却后的放热由液态转变为固态的放热和完全凝固后钢锭冷却放热两部分组成，前者是控制钢锭结构和内部质量的关键，而后者对于防止钢锭产生裂纹也是非常重要的。

表 9-1-1　钢液和纯铁凝固到室温放出的热量(J/g)

类别	显热	潜热	过热	总热量
20 钢	962.54	329.56	18.09	1310.47
纯铁	1056.08	276.33	24.12	1364.8

五、钢的凝固收缩

液体钢和固体钢的密度是不同的，一般规律是由液态冷凝为固态时都伴随着体积收缩。这种收缩包括：

(1)过热的钢液由高温冷却到液相线温度产生的收缩，以符号 $\Delta V_{液}$ 表示；

(2)由液相线温度到固相线温度产生的凝固收缩，液—固相线温度范围越大，凝固收缩量越大。这种收缩以符号 $\Delta V_{凝}$ 表示；

(3)由固相线温度冷却到室温产生的收缩，以符号 $\Delta V_{固}$ 表示。

设钢的体积收缩的总量为 $\Delta V_{总}$，则：

$$\Delta V_{总} = \Delta V_{液} + \Delta V_{凝} + \Delta V_{固} \tag{9-1-10}$$

钢体积收缩的结果使钢产生了缩孔和疏松。影响钢体积收缩的因素主要是碳和合

金元素的含量。表 9－1－2 和表 9－1－3 列出了碳含量和合金元素含量对钢体积收缩的影响。由表 9－1－2 中可知，$\Delta V_{液}$ 和 $\Delta V_{凝}$ 均随碳含量的增加而增大，而以碳含量为 0.4%～1.0%时增大得最多。在实际生产中，含合金元素较少的弹簧钢、碳素工具钢和轴承钢等的缩孔比较严重，就是因为它们的碳含量在这个范围内。由表 9－1－3 中可见，镍使 $\Delta V_{液}$ 显著减小，而锰和铬却使 $\Delta V_{凝}$ 显著减小，这可能就是 Cr12 钢虽然碳含量大于 2%，但铬含量为 12%左右，而其缩孔并不严重的主要原因。

表 9－1－2　碳含量对钢体积收缩的影响

碳含量/%	$\Delta V_{液}$(降 100℃)/%	$\Delta V_{凝}$/%	$\Delta V_{液}+\Delta V_{凝}$/%	$\Delta V_{总}$/%
0	1.51	1.98	3.49	—
0.10	1.50	3.12	4.62	10.5
0.20	1.50	3.39	4.89	—
0.30	1.59	3.72	5.31	—
0.40	1.59	4.03	5.62	11.3
0.50	1.62	4.13	5.75	—
0.60	1.62	4.04	5.66	—
0.70	1.62	4.08	5.70	12.1
0.80	1.68	4.05	5.73	—
0.90	1.68	4.02	5.70	—
1.00	1.75	3.90	5.65	14.0
1.50	1.96	3.31	5.09	—
2.00	2.11	2.50	4.61	—
2.50	2.33	2.00	4.31	—

表 9－1－3　合金元素对钢体积收缩的影响

合金元素	含量/%	AVO(降 100℃)/%	$\Delta V_{凝}$/%	$\Delta V_{固}$(降到 20℃)/%	$\Delta V_{总}$%
Ni	9.44	0.25	3.40	6.07	9.72
Mn	8.50	2.28	0.44	6.15	8.87
Si	3.60	2.05	1.77	5.95	9.77
Cr	13.70	1.66	0.90	6.14	8.70
W	2.50	1.39	3.20	6.44	11.03

测试表明 40 钢在 1600℃时的密度约为 7.01g/cm^3，而室温时的密度为 7.81g/cm^3，凝固和冷却的总收缩量为 11.3%。液体钢的密度很难准确地测定，尽管如此，它们有一个共同的规律，那就是随着碳含量增高钢的密度更低一些。利用图 9－1－7 可近似地估

计凝固和冷却过程中钢体积的变化为：

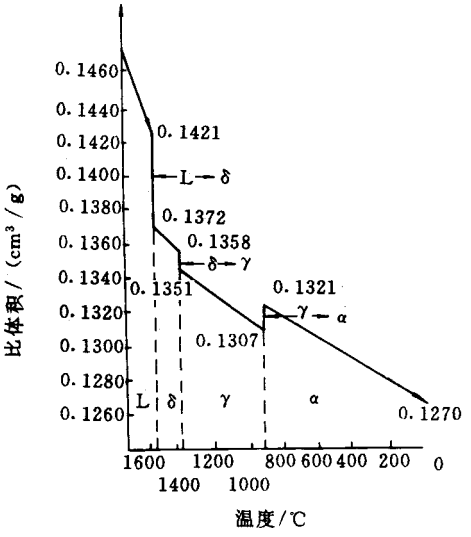


图 9－1－7　纯铁的比体积和温度的关系

过热消失时体积收缩	约 1%
凝固时体积收缩	约 4%
冷却后线收缩	7%～8%

过热消失时所产生的体积收缩较小，可忽略不计，但凝固体积收缩和冷却后的线收缩却较大，且对钢锭质量的影响也大，这一点在钢的凝固过程中万万不可忽视。

六、钢的凝固偏析

钢的凝固发生在一定的温度和浓度范围内，由于溶质元素在液相和固相的溶解度不同和凝固过程中选分结晶作用的结果，各部分的化学成分远不是均匀一致的，这种化学成分不均匀的现象称为偏析。偏析分为显微偏析（树枝偏析）和宏观偏析（区域偏析）两类。显微偏析发生在几个晶粒的范围内或树枝晶空间内，即成分的不均匀性局限于几个微米的区域内。宏观偏析发生在整个固体钢中，这种成分的不均匀性表现在几厘米到几十厘米的距离上。钢中的偏析属于不能完全避免而又允许存在的缺陷，但必须加以控制。

钢的偏析程度常用以下几种方法表示：

$$A = \frac{C_{最大}}{C_{最小}} \qquad (9-1-11)$$

$$\text{偏析系数} = 1 - K \tag{9-1-12}$$

$$K = \frac{C_{固}}{C_{液}} \tag{9-1-13}$$

$$\% = \frac{C_{固} - C_{液}}{C_{固}} \times 100\% \tag{9-1-14}$$

$$\% = \frac{C_{最大} - C_{最小}}{C_{最大}} \times 100\% \tag{9-1-15}$$

式中　A——偏析度；

K——选分结晶系数；

$C_{最大}$、$C_{最小}$——分别为钢中某元素浓度最大和最小值；

$C_{固}$、$C_{液}$——分别为固体钢中和钢液中某元素的浓度。

式 9-1-12 中的 $1-K$ 越大，元素的偏析倾向越大。式 9-1-14 表示偏析量，式 9-1-15 表示相对偏析。偏析度 $A>1$ 为正偏析，$A<1$ 为负偏析。偏析量为正值叫正偏析，负值叫负偏析。

(一)显微偏析

钢在凝固过程中，由于液相和固相成分的不断改变，从而导致了结晶的不平衡。一般先凝固的是含有较多的高熔点合金元素，后凝固的是含有较多的低熔点合金元素，这种成分上的不均匀必然产生组织上的不均匀。这种偏析的结果又常常导致树枝状组织的形成与分布，故又称枝晶偏析或叫树枝状偏析。

树枝状偏析既包括碳和合金元素的偏析，也包括杂质和气体元素的偏析。由于合金元素的扩散系数比碳原子的扩散系数要小很多，所以消除合金元素的枝晶偏析比碳的均匀化要困难得多。合金元素的偏析影响固态相变，也影响固态相变后碳的分布，而初生晶粒内夹杂物的分布与夹杂元素 O、S 的偏析有关。一般说来，氧化物析出的较早，并多处于枝干 硫化物析出的较晚，多处于枝晶。气体元素的枝晶偏析引起在晶轴之间析出气泡。除此之外，显微缩孔也分布在枝晶之间。在热变形过程中，树枝状偏析容易被拉长，塑性夹杂物得到延伸，脆性夹杂物变成点链状，带状组织和力学性能的方向性就是由此而引起的。经过热压力加工后，我们希望树枝状晶能够得到破碎，并且破碎得越彻底越好。

影响枝晶偏析的主要因素有钢的化学成分、凝固期间钢锭内部某点的冷却速度及该点处晶体生长的方式。试验指出，当碳含量增加时，合金元素的偏析度增大。这一点在轴承钢上表现尤为突出，例如冶炼 GCr15 时，碳含量越靠近规格上限，碳化物不均匀性将越增加。除碳外，钢中的其他元素也会对某一元素的枝晶偏析产生影响。试验表明，硫

就能增加铬的枝晶偏析。枝晶偏析还与钢的冷却速度有关。当冷却速度减慢时,结晶的选择程度并不因冷却速度改变而变化,但枝晶偏析的程度却随冷却速度的减慢而变大。试验又指出,枝晶偏析的程度不仅与冷却速度有关,而且还受晶体生长方式的影响。例如,在正常浇注的情况下,当钢的心部按等轴晶方式结晶时,偏析度远高于按柱状晶方式的结晶。

不难得出,钢的浇注重量越小,冷却速度越快,避免粗大的初生晶粒的形成,枝晶偏析的程度就越小。除此之外,还需指出,凝固后对钢进行扩散退火更是减小枝晶偏析的一项极其有利的措施。在生产上,扩散退火的目的不只是要达到钢中碳的均匀化,而更主要的是要取得合金元素的相对均匀。这就是说,无论是在奥氏体状态还是在冷却以后,钢中碳的分布受合金元素支配,没有合金元素的相对均匀化,就不会有碳的均匀化,也就难以消除以后因枝晶偏析而造成的带状组织。扩散退火的效果取决于扩散加热的温度和保温时间,同时也和钢中显微偏析的状况有关。扩散退火既可在锭上进行,也可在坯上进行,而如何选择确定合适的扩散退火方案,应根据生产过程中的许多具体因素来考虑。

(二)宏观偏析

因选分结晶,杂质和合金元素被浓集在枝晶的近旁,但由于在钢液中元素的扩散较快,液相又是可以流动的,于是在凝固速度不是很高的情况下,原枝晶近旁的杂质元素在液相中有可能被转移到很远的地方。随着凝固的进展,杂质元素在最后剩余的钢液中富集,结果使得各种元素在钢中发生了长距离的重新分布。理论上,我们将这种成分上、组织上长距离的不均匀现象称为宏观偏析或叫做区域偏析。钢的宏观偏析一般均通过化学分析或酸浸的方法来显示,并用肉眼或在低于十倍放大镜下可直接观察检验,所以这种偏析又称为低倍偏析。

关于镇静钢的宏观偏析形成的原因,人们提出了不同的说法,但近年来普遍认为是由于凝固时树枝晶间富集的杂质和合金元素的液体在固液两相区的流动造成的。在生产过程中,钢的凝固范围越大,浇注温度越高,浇注速度越快,冷却速度越慢,宏观偏析越严重。

第二节　钢的浇注方法

一、概述

钢的浇注，就是把在炼钢炉中熔炼和炉外精炼所得到的合格钢水，经过盛钢桶及中间钢包等浇注设备，注入到一定形状和尺寸的钢锭模或结晶器中，使之凝固成为钢锭或钢坯。钢锭（坯）是炼钢生产的最终产品，其质量好坏与冶炼和浇注有直接关系。浇注工作正常与否，必将对产品的质量和成本，以及车间的技术经济指标产生重大影响。正确的浇注操作，可以使质量欠佳的钢水得到一定程度的补救，从而得到合格的钢锭（坯）；浇注操作失误，也可导致合格的钢水报废。同时，浇注是衔接炼钢和轧钢之间的一项特殊作业。它的特殊性和重要性在于，当钢水一旦凝固成固体后，在以后的热加工过程中就不能对钢质量有本质上的改进了。因此，钢的浇注是炼钢生产过程中的重要一环，必须给予足够重视。

浇注过程既是一个钢水凝固的物理过程，同时也还发生若干化学变化。此外，浇注操作又要求在相当短的时间内完成，对不同的钢种，应在规定的温度下开始浇注，在钢水具有足够的流动性之前结束，因此，浇注是个复杂而又要求准确迅速进行的过程，要顺利地完成浇注过程，其难度是相当大的。

目前采用萨浇注方法，有模铸法和连铸法两种。模铸法是传统的铸锭方法，产品为钢锭，已有一百多年的历史，在我国仍占主导地位。连续铸钢法是20世纪50年代发展起来的浇注方法，它能直接得到一定断面形状的铸坯，大大简化了由钢液到钢坯的生产工艺和设备，并为炼钢生产的连续化、自动化创造了条件。

二、模铸钢锭法工艺简介

模铸法，是将盛在盛钢桶内的钢水注入具有一定形状和尺寸的钢锭模中铸成钢锭的方法。钢锭还需经过初轧机轧制成钢坯，然后再进一步轧制成各种钢材。

（一）铸锭方法和设备

（1）铸锭方法。模铸法根据浇注系统的摆放位置，可分为坑铸和车铸。坑铸，是将钢锭模摆敛在铸坑内的固定底板上进行浇注，浇铸作业全在铸锭跨内进行。这种方法生产

效率低,劳动条件差和铸锭质量难以保证,因此,国内仅在一些小型、老式炼钢车间采用。车铸,是将钢锭模摆放在固定于铸车上的底板上进行浇注的。车铸除在铸锭跨内进行浇注钢液外,其它作业如脱模、整模等均在另外的厂房内进行,从而克服了坑铸的缺点。但车铸占地面积大,基建投资多,多在大型、新建车间采用。

此外,根据钢液由盛钢桶注入钢锭模的方式不同,又将模铸分为上注法和下注法两种。钢液由钢锭模上口直接注入模内者称为上注(见图 9－1－8a);钢液经中注管、汤道从模底进入模内者称为下注(见图 9－1－8b)。

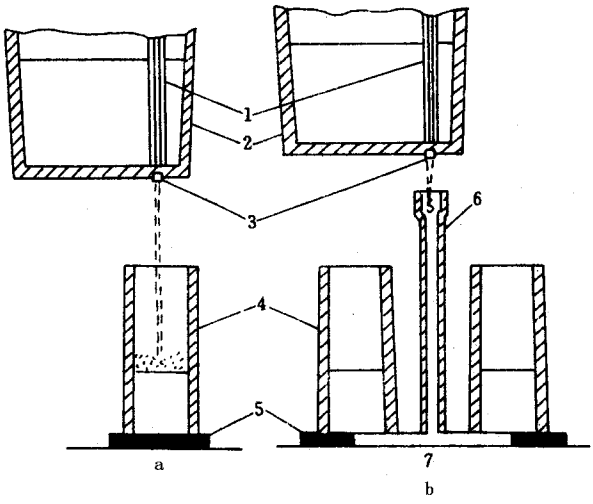


图 9－1－8　上注法和下注法

a—上注法;b—下注法

1—塞棒;2—钢包;3—水口;4—钢锭模;5—底盘;6—中注管;7—汤道

下注法具有如下优点:能同时浇注若干支钢锭;钢液在模内上升平稳,钢锭表面质量好;有利于钢中气体向上排出,因此,国内各厂普遍采用。其缺点是:铸锭准备工作复杂;增加浇注系统耐火材料的消耗量(一般为 25kg/t 钢,汤道金属损失约 4kg/t 钢),导致钢锭成本增加;由于钢液对耐火材料的浸蚀,可能使钢中夹杂物增加;钢锭上部钢液温度低,不利于钢液的补缩,使钢液内部质量不如上注。

上注法的优点是:铸锭准备工作简单;耐火材料消耗少,钢水收得率高,钢锭成本低;由于耐火材料浸蚀产生的夹杂物少,浇注速度比下注快,注温可比下注低;由于模内高温钢液始终位于钢锭上部,并可反复进行添注,因此,有利于减少翻皮、缩孔和疏松等缺陷,钢锭内部质量好。上注法的缺点是:一次只能浇一支或 2～4 支(采用中间罐)钢锭;开浇时易引起飞溅,造成结疤、皮下气泡等缺陷;同时,由于钢水对模底的冲刷,容易烧坏钢锭

模和底板，钢模消耗较高。为减轻上注时钢液的冲压力，可采用中间漏斗或中间盛钢桶，以降低其液面高度，使钢液入模速度下降；为防止钢液飞溅，还可采取将模底做成球形，锭模内表面喷以涂料以及模内放置防溅筒等措施。

采用哪一种浇注方法，应根据钢锭大小、钢种特点和生产条件等合理选择。如对表面质量要求严格的不锈钢、硅钢、轧制薄板的钢等，宜采用下注；对内部质量要求较高的轴承钢、炮钢等宜采用上注；对于高碳钢，因其体积收缩大、线收缩性小，可快速上注；而低碳钢体积收缩小、线收缩性大，因此下注更适宜；小钢锭适于下注；沸腾钢适于下注，半镇静钢适于上注。

(2)铸锭设备。铸锭设备主要包括：盛钢桶、钢锭模、保温帽、中注管和底板等。

1)盛钢桶：是盛钢水以进行浇注的主要设备，又称钢包。盛钢桶的容积，应足够容纳全部钢水和部分保温用渣液，此外，还应有 10% 左右的余量以适应钢水量的波动。

盛钢桶的外壳由钢板焊成，略带锥度，内衬耐火材料；桶壁装有耳轴，供吊运、支撑钢包用；桶侧还装有塞棒升降传动机构，控制钢流的浇注；桶底留有一个镶嵌水口砖用的圆孔。图 9－1－9 为盛钢桶及塞棒系统图。

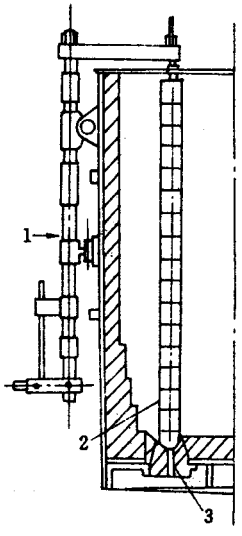


图 9－1－9　盛钢桶及塞棒系统

1—塞棒操纵装置；2—塞棒；3—水口

浇注钢流控制系统有两种类型：塞棒水口和滑动水口。由 9－1－9 可见，塞棒控制系统包括塞棒操纵装置、塞棒和水口三部分。塞棒又由铁芯、袖砖和塞头组成。注钢时，利用塞棒来启闭水口并控制钢流的大小，故要求塞头必须严密堵住水口眼。

近年来,随着钢液在盛钢桶内精炼和脱气处理等新技术的应用,需要提高出钢温度和延长钢液在盛钢桶内的停留时间。在这种情况下,塞棒装置已不能适应要求,生产中已普遍采用滑动水口。

滑动水口装置主要由上、下水口和上、下滑板组成,其工作原理如图 9－1－10 所示。上水口和上滑板均固定在盛钢桶底壳上,下水口和下滑板则固定在滑动盒中。操作时,通过滑动机构错动两块滑板位置来控制水口的启闭和钢流的大小。目前广泛采用的滑动水口有两种类型,一类是滑动作直线运动;另一类是作旋转运动,也称旋转水口。图 9－1－11 为前一种类型滑动水口装置简图

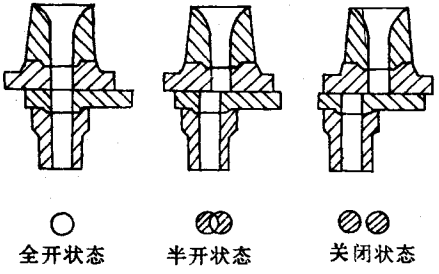


图 9－1－10　滑动水口工作原理

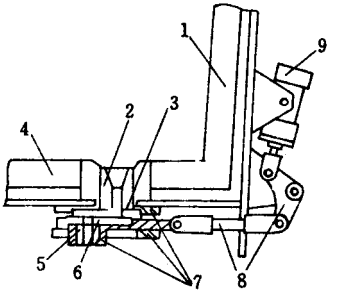


图 9－1－11　滑动水口结构简图

1—盛钢桶衬砖;2—上水口;3—上滑板砖;4—盛钢桶底衬砖;
5—下水口;6—下滑板砖;7—盖板;8—驱动装置;9—油压缸

滑动水口的使用,可以简化盛钢桶的准备工作,改善劳动条件,节约耐火材料,加快盛钢桶的周转,并减少由于塞棒断头等造成的事故,为实现挠注的机械化和自动化创造了条件。

2)钢锭模和保温帽:钢锭模是浇注时承受钢液的模子,大多用铸造生铁铸成。其使用寿命波动较大,常在 60～80 次左右。采用球墨铸铁铸造的钢锭模,使用寿命较长。

钢锭模的尺寸及断面形状，取决于钢种、用途和初轧机能力等。钢锭重量，由几百公斤至几百吨，国外曾浇过 500t 重的钢锭，国内浇注过 200～250t 的钢锭。

从钢锭模纵断面形状来看，钢锭模可分为上大下小和上小下大两大类。上大下小带保温帽、有底的钢锭模（图 9－1－12a），用于浇注镇静钢；上注时在模底孔加钢质底塞，下注时则安装耐火材料质注口砖。上小下大不带保温帽、无底钢锭模（图 9－1－12b），用来浇注沸腾钢。此外，还有瓶口模（图 9－1－12c），用于浇注沸腾钢或半镇静钢。近年来，为了简化铸锭生产工序，一些炼钢车间，在上小下大的钢锭模上部挂装绝热板，用于浇注镇静钢。

钢锭模横断面形状有圆形、正方形矩形、多边形等，而其边形又有直边、凹边、凸边、波纹形等（见图 9－1－13）。正方形锭适于轧制型钢和线材；矩形锭适于轧制板材；多边形锭多用于锻造，圆形锭供轧制钢管、车轮和轮箍等。直边形钢锭模制造容易，钢锭热加工时不易产生折叠，故使用最广；波纹边锭模制造困难，且波峰易烧坏，故实际应用不广。

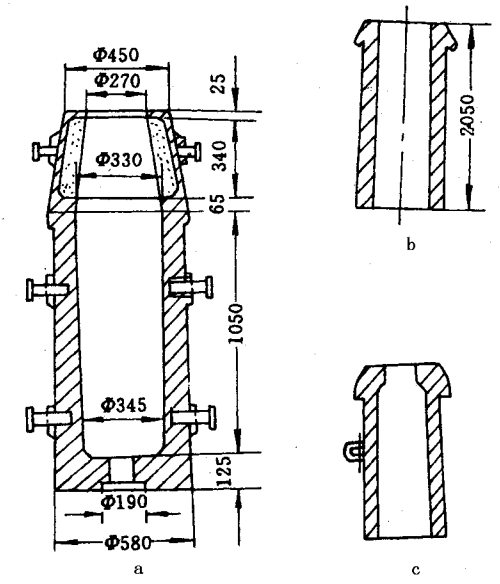


图 9－1－12　三种类型的钢锭模

保温帽的作用是使钢锭头部较长时间处于液态，以便充填钢锭本体因收缩而产生的缩孔，从而得到致密的钢锭。保温帽的容积与钢种、钢水温度、钢锭大小，保温帽形状、内衬的导热性以及保温剂的发热量有关，一般占钢锭重量的 12～20%。

保温帽由生铁外壳和耐火材料内衬构成（图 9－1－14）。为发挥保温帽的补缩作用，减小保温帽容积，以提高钢材质量和成材率，20 世纪 60 年代末以来，保温帽内衬广泛采

用绝热保温性能良好的绝热保温帽或发热保温帽，取代了传统的粘土质耐火砖帽。绝热或发热保温帽，可以制作成整体帽，也可以制成绝热板，由数块绝热板装配成保温帽。绝热板的制作，一般由粉状绝热耐火材料（如高氧化铝质耐火材料等）、纤维绝热材料（如有机或无机纤维）和粘结剂经配制加工成型而得。发热型绝热板还需配入发热材料（如铝粉）及氧化剂（如铁矿粉）等。

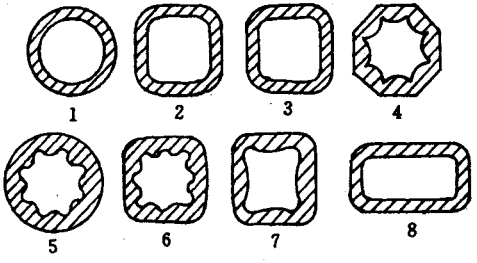


图 9－1－13　钢锭模断面形状

1—圆形；2—凸边方形；3—方形；4—多边形；
5—波纹圆形；6—波纹方形；7—凹边方形；8—扁形

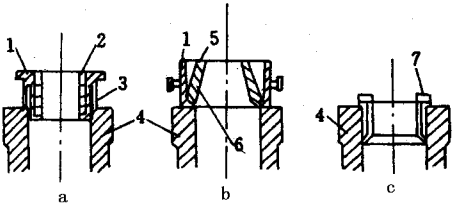


图 9－1－14　保温帽的保温方式

a—耐火砖保温帽；b—发热型保温帽；c—绝热型保温帽；
1—金属框；2—耐火砖；3—木片；4—钢锭模；5—绝热层；6—发热层；7—绝热板

另外，与保温帽内衬相配合，在浇注快结束时，往往还在保温帽顶部加入防缩孔剂，减少钢锭顶端钢液的热损失。防缩孔剂的类别，根据其性能和外形的不同，可分为发热型或非发热型；膨胀型或非膨胀型；粉状或板状等。防缩孔剂的材质组成与绝热板大致相似。

3）底板和中注管：采用下注法浇注时，盛钢桶内钢液通过中注管经由分流砖、流钢砖流入各个钢锭模内（见图 9－1－8b）。中注管由漏斗砖、注管砖和铸铁外壳组成。为保证钢液能注满钢锭模，中注管应比锭模和保温帽高出 400～600mm，以保证浇注时钢液有足够的静压力。

底板用生铁铸成。上注法底板的作用是承托钢锭模,其表面无沟槽。下注法底板铸有下凹的坑槽,以安放分流砖和流钢砖。分流砖上口与中注管相接,侧口与流钢砖相通。流钢砖上面有孔与锭模相通。按底板沟槽的分布可分为树枝形底板(图 9 – 1 – 15)和放射形底板(图 9 – 1 – 16)等类型。前者适用于浇注数量多而重量小的钢锭;后者则适用于浇注数量较少而重量较大的钢锭。

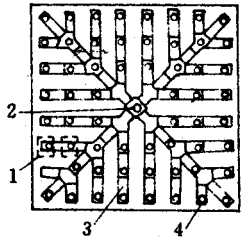


图 9 – 1 – 15　树枝形底板

1—锭模位置;2—中心分流砖;3—流钢砖;4—钢液注入口

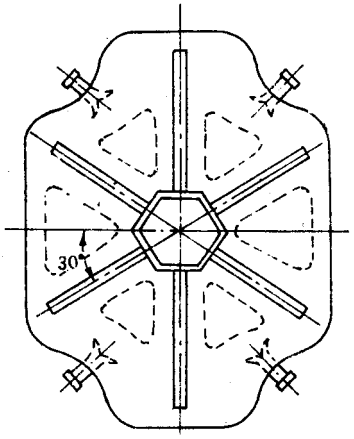


图 9 – 1 – 16　放射形底板

(二)铸锭工艺

铸锭工艺流程由生产准备、浇注钢锭和钢锭处理三个步骤组成。

(1)生产准备。在浇钢前必须将盛钢桶清理干净并烘烤好,特别是刚砌好内衬的钢包,必须充分干燥去除水分;要根据钢种要求选好合适的水口,安装时要使水口孔垂直,塞棒与水口接触紧密,控制机构灵活好用,底板与中注管的修砌要平整、严密,汤道砖内清洁无杂物;钢模使用前要仔细检查,有严重裂纹的不能使用,在底板上摆放位置正确且平稳;安装好保温帽或挂板。一切准备妥当,将铸车开到浇注操作线上等待浇钢。

(2)钢锭的浇注。进行钢锭浇注应首先使钢液镇静,并控制注温、注速,必要时尚需

采取保护措施,严格操作程序。

1)钢液在盛钢桶内的镇静:从出完钢到开始浇注,钢液在盛钢桶内静置的时间,称为镇静时间。镇静的主要作用是;

A　使钢液的脱氧和合金化完全,成分进一步均匀;

B　使脱氧产物和其它外来夹杂物充分上浮排除,以纯净钢质;

C　均匀钢液温度,出钢温度过高时,则可适当延长镇静时间,以降低浇注温度。

镇静时间长短应根据钢种特点、盛钢桶容量、浇注方法、出钢温度等来确定,一般为 5 ~ 10min。

2)注温和注速:浇注温度和浇注速度是浇注工艺的两个基本参数,应严格加以控制。

A　合适的注温是保证钢液顺利浇注成合格钢锭的前提条件,可根据钢种、锭型和浇注方法来确定。一般用下式表示:

$$T_{注} = T_{熔} + \Delta T$$

式中　$T_{注}$——浇注温度(指开浇时钢包内的钢水温度),℃;

$T_{熔}$——钢种的液相线温度即钢的熔点,℃;

ΔT——钢水的过热度,℃。

为使钢水有足够的流动性,开始浇注的温度必须高于钢水的熔点,即必须有过热度 AT,其大小应根据钢种、锭型、浇注方法来选择。如低碳钢(0.1 ~ 0.3%℃)及低合金钢热裂倾向性大,ΔT 应小些;含 Al、Ti、Cr 的钢种,钢水发粘流动性差,ΔT 应高些;高 Si 高 Mn 的钢种流动性好,ΔT 可低一些;大钢锭 ΔT 可低些;小钢锭 ΔT 可高些;下注法 ΔT 高些(高 30 ~ 60℃),上注法 ΔT 可低些(低 10 ~ 20℃)。总之,合适的注温应能保证浇最后一盘钢锭时,模内钢水仍具有等于或高于钢种的液相线温度,使钢水在模内流动正常。根据经验,ΔT 一般波动在 80 ~ 120℃之间。

B　浇注速度是指单位时间注入锭模的钢液量(重量注速,kg/s),或指单位时间内锭模内钢液面上升的高度(浇注线速度,mm/mm)。通常采用后一种表示方法。注速的确定必须综合考虑浇注温度、浇注方法和钢种,其原则是:高温慢注,低温快注;上注快注,下注慢注;裂纹倾向性大的钢种慢注,含易氧化元素的钢种快注。

浇注速度主要通过选择不同的水口直径来控制。浇注过程中可以根据需要通过调节塞棒的启闭程度,在一定范围内进行调节。

3)保护浇注:近年来对钢的质量要求日益提高,炉外精炼得到广泛应用。但大部分经过精炼后的纯净钢液是在大气中浇注,由于钢液的二次氧化和从空气中吸收氢,氮等,使钢水再次受到玷污,几乎使冶炼中所作各种去气、去夹杂的努力前功尽弃。因此,为防

止钢液再次污染，解决各种钢锭的表面质量问题，对从盛钢桶水口流出的注流和钢锭模内上升的钢液面采取保护措施的做法，得到普遍应用。

保护浇注，按所选的保护介质可分为无渣保护和有渣保护浇注。表 9－1－4 中所列各种方法，主要是用在钢锭模内进行的保护浇注。其中，无渣保护是借助可燃材料或气体，在模内造成还原性或惰性气氛保护钢液面不被空气氧化，如图 9－1－17 所示。有渣保护则是用加入模内的各种固体或液体渣料，通过产生还原气隔绝空气，还兼有捕集钢流中浮起的非金属夹杂物的作用，如图 9－1－18 所示。而注流气体保护，则是防止注流的二次氧化，一般是用氮气或氩气密封气流。密封方法很多，如图 9－1－19 所示。

表 9－1－4　保护浇注方法分类

- 保护浇注
  - 无渣保护
    - 可燃材料保护
      - 焦油木框
      - 石腊稻草圈
      - 模壁涂油
    - 气体保护
      - 注流气体保护（氩、氮气）
      - 液体挥发气保护（四氯化碳）
  - 有渣保护
    - 固体保护渣
      - 碳素半熔薄渣保护
        - 石墨＋萤石＋水玻璃（固体）
        - 炉渣粉＋石墨粉＋纯碱
        - 低碳石墨渣
        - 稻草灰或软木屑板
      - 自熔性合成渣保护
        - $CaO+Al_2O_3+SiO_2-CaF_2-Na_2O$ 渣系
        - $CaF_2-SiO_2-Na_2O$ 渣系
        - $SiO_2-Al_2O_3-Na_2O-CaO$ 渣系
    - 液渣保护
      - $CaO-Al_2O_3$ 高碱性渣系
      - $CaF_2-Al_2O_3$ 中性渣系
      - $CaO-Al_2O_3-SiO_2-CaF_2$ 中性渣系
      - $SiO_2-Al_2O_3-CaO$ 酸性渣系

4）浇注操作　不同的钢种，其操作方法亦不相同。

A　镇静钢的浇注　浇注镇静钢可采用上注法或下注法：

上注法　盛钢桶水口中心必须对准锭模中心，使钢流落在两对角线的交叉点上，避免冲刷模壁和减少结疤。开浇后 3～5s 内，将注速均匀地开到满流并保持圆柱形。若注流呈喇叭形，则钢流易被氧化，注流会洒在模壁上，恶化表面质量。当钢液上升到钢锭模与保温帽接口下 100mm 时，应开始缓慢而均匀地减速。保温帽部分应细流填注，使钢液能很好地充填钢锭本体，使缩孔集中到保温帽内。保温帽注满后应及时加入保温剂。

图 9－1－17　模壁涂料的作用

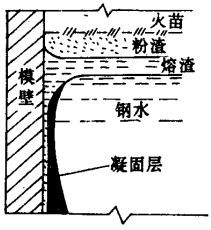


图 9－1－18　下注钢锭粉渣保护层的形成

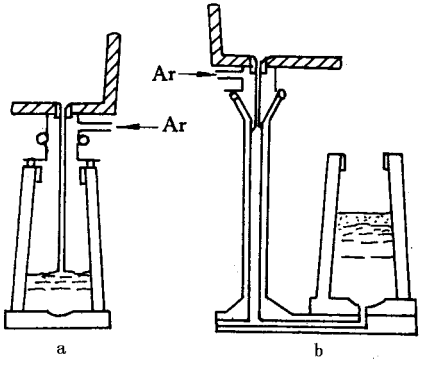


图 9－1－19　氩气保护浇注示意图

a—上注；b—下注

下注法　其操作基本与上注法相同。浇注时，水口中心对准中注管中心，避免注流冲刷中注管砖和造成漏钢事故。开浇要稳，使钢水缓慢充满并充分加热流钢砖的汤道，然后均匀加速，使钢水在模内平稳上升，以避免飞溅。如钢锭模是上大下小，上部应比下部有较快的注速。若用石墨保护剂，应在浇注前用袋装好放入模内。

B　沸腾钢的浇注　其基本特征是钢液在模内沸腾，沸腾强度和持续时间决定了钢

锭结构，从而也就成为影响钢锭质量的重要因素。模内适度的沸腾是获得良好沸腾钢钢锭结构的必要条件，但是，当锭模注满钢水后，模内的持续沸腾不但不会改善钢锭结构，反而会增大钢锭内部偏析。如能及时地封顶，即使钢锭顶面迅速生成一层厚约 40～50mm 的致密层，以封闭气体逸出的道路，则可较好的制止模内沸腾，减少偏析程度。可见，采取适当的注温和注速，调整沸腾强度和封顶操作，是沸腾钢浇注工艺的中心内容。因为模内沸腾在较低温度下才能大量发生，所以浇注温度不能太高。但太低又有形成钢锭上涨和表面不良的危险。所以应严格控制过热度 ΔT。

浇注过程中，应根据不同阶段的特点来控制注速。开浇时，为防止钢液飞溅，应缓流浇注；当模内钢液升至一定高度后，则加快注速；当钢液快注满时，应适当慢注，以利于气体充分排出。

钢液注满后，当模内沸腾已不十分激烈时，即应进行封顶操作，常用的封顶方法有：

机械封顶：浇完经过一段时间的沸腾后，钢液已经凝固成一定厚度的外壳，此时在钢锭顶面压上铁盖，利用铁盖吸热使顶面钢液封顶，此法亦称压盖封顶。还有一种机械封顶叫瓶口模法，即应用瓶口模（图 9－1－12c）浇注沸腾钢。当液面接近瓶口时，停止浇注并压上半球形铁塞，致模内沸腾减弱，钢液上涨，待钢液面与铁塞接触后即冷凝封顶。此外，压盖后还可向钢锭头部喷水加速冷凝。

化学封顶：浇注完毕向模内钢液面加粒状硅铁或铝条等强脱氧剂以抑制沸腾，加速钢锭头部凝固。这种方法，称为化学封顶。采用化学封顶时，浇注速度可以快一些，封顶可以早些。

一般说来，对非金属夹杂要求严、偏析要求小的钢，采用瓶口模法为好；对表面要求较严的钢锭，则采用化学封顶和压盖封顶法为好；对上注或小钢锭，采用瓶口模法操作困难，故采用压盖或化学封顶法为宜。

C　半镇静钢的浇注　半镇静钢多采用上注法浇注，都以低温快注为宜。快注能抑制模内碳氧反应的进行，减轻脱氧和气体含量等对钢锭结构的影响，减少气泡暴露废品；同时，快注还能消除结疤和减少浮渣卷入钢锭内部的机会，从而减少结疤和分层废品。低温则是快注的条件，低温浇注，除能保证快注条件下钢锭不产生裂纹外，还有利于加快钢锭的凝固速度，可加厚激冷层和减轻偏析程度。

一般情况下，半镇静钢浇注完毕后，任其自然封顶。但也可向顶面打水加速冷凝。

(3)钢锭的冷却和退火。浇注完毕后应停歇一定时间，以待钢液在锭模内凝固。凝固后的钢锭温度仍然很高，对于普通镇静钢，当其完全凝固后即可脱模。但对于某些碳素钢或合金钢钢锭，若凝固后的冷却太快，将因内外冷却速度相差悬殊，在钢锭内部产生

很大的内应力而引起开裂。因此，钢锭完全凝固之后，尚需根据钢种特点，采取缓冷或退火措施。其目的在于：消除钢锭的内应力（包括热应力和组织应力），使硬度较高的钢锭软化，便于精整；使钢锭的组织及成分均匀化等。

钢锭的冷却方法，一般可分为模冷、坑冷和热送等几种。对于冷却过程发生相变的钢种，需采取不同方式进行退火。一些钢种的冷却和退火制度见表 9－1－5。

表 9－1－5　部分钢种的冷却和退火制度

冷却方式	钢种	技术要求
模冷	08～35；10～35Mn；15～20Cr；15～20Mo；15CrMo；20CrNi；弹簧钢；奥氏体钢；铁素体钢	钢锭在模内缓冷到 400℃下脱模
坑冷	10～85；40～70Mn；30～50MnB；30～50B；30～50Cr；T_7～T_{13}；40～50CrNi；20～40Mn_2；中碳合金结构钢；调质钢；易淬硬钢种；易产生白点钢种	温度大于 700℃的热钢锭置于缓冷坑内加盖缓冷，钢锭温度低于 300℃后出坑
热送	所有能保证钢锭表面质量的钢种，都可在红热时送入加热炉	送加热炉时，钢锭表面温度应大于 700℃
退火	马氏体高合金钢进行 900±20℃高温退火；马氏体或半马氏体合金钢进行 680±20℃的低温退火；除马氏体外的中、低碳合金钢进行 820±20℃的中温退火	

（4）钢锭的检查及精整。钢锭送往加工车间前，应检查其质量。表面有缺陷的钢锭，需经修整后，才能送去热加工。修整时，应根据钢锭的物理性能和表面缺陷的特征等，选择适当的方法。表面夹杂、结疤和裂纹等缺陷不严重的钢锭，一般用风铲或火焰清理；硬度和韧性大的钢种，用砂轮打磨。用砂轮清理时，要防止产生局部过热现象，以免重新产生裂纹。含 Cr、Ni、Ti、Al 等元素较多、液态时粘度很大的钢种，可在车床上剥去钢锭表皮，以清除表面缺陷和查明皮下裂纹。对于布氏硬度（HB）值大于 265 的钢种，剥皮前应进行软化退火。热送钢锭时，加工前无法对钢锭进行检查和精整，则应在加工之后对钢坯进行检查，包括低倍组织检验、机械性能试验等。

（三）钢锭结构特点及主要缺陷

（1）镇静钢钢锭。镇静钢是完全脱氧钢，钢液在凝固过程中不析出 CO 气体，在模内平静地凝固。因此，钢锭组织致密，无分散气泡，成分比较均匀，轧成的钢材具有较良好和均匀的机械性能。所以对机械性能要求较高和较稳定的合金钢和高、中碳钢以及部分

低碳钢，都冶炼成镇静钢。但镇静钢头部有缩孔，开坯时切头损失大，成材率低。同时，炼钢耗用的脱氧剂较多，浇注时采用带保温帽的锭模，耐火材料消耗增加，钢锭成本高。

1）镇静钢钢锭结构　典型镇静钢钢锭的结构，如图 9－1－20 所示，由下列几个不同结构特点的结晶带所组成。

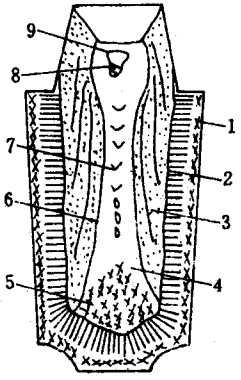


图 9－1－20　镇静钢钢锭结构及偏析示意图

1—细小等轴晶带；2—柱状晶带；3—过渡晶带；4—粗大等轴晶带；

5—负偏析沉积锥体；6—∧形偏析；7—V 形偏析；8—缩孔下正偏析区；9—缩孔

A　钢锭表面的细小等轴晶带（激冷层）　高温钢液注入锭模后，与模壁接触的钢液表层受到锭模的强烈冷却，获得较大的过冷度。同时，模壁表面粗糙处起着结晶核心的作用，因此形成大量晶核，其形核速度远大于晶核长大速度，因而形成不同取向的细小等轴晶粒构成的表面层。此层厚度一般为几毫米。

B　柱状晶带　激冷层形成后，锭模温度升高，特别是凝固的外壳与模壁间产生空隙，使热阻加大，钢液过冷度减小。只有那些垂直于模壁、伸向锭心的晶体树枝主干，热流蹈程最短，散热温度最快，于是形成一个向模壁定向传热而垂直于模壁的柱状晶带。其厚度决定于浇注温度与钢锭尺寸。

C　中心等轴晶带　随着柱状晶的生长，散热速度显著减慢，使中心钢液几乎同时达到同一过冷度而凝固，形成锭心粗大等轴晶带。

D　沉积堆（带）　在钢液凝固过程中，由于对流和重力的作用，使一些最初形成的纯度较高的晶体和一些碎断的枝晶，下沉至钢锭底部，形成圆锥状的沉积堆。其中大部分是细小的等轴晶和非金属夹杂物。

E　缩孔　在钢锭模内，钢液从下向上、由外向里凝固，当下层冷钢液凝固收缩时，上层热钢液向下充填；当表壳凝固后，上部中心钢液仍向下补缩，因此，钢锭头部形成缩孔

和疏松，在缩孔区存在较多较大夹杂物，轧制时不能焊接，必须切除。

2）钢锭的偏析：钢锭内部化学成分的不均匀性，称为偏析。高于钢锭平均成分时，称为正偏析；低于钢锭平均成分时，称为负偏析。

偏析可分为显微偏析和宏观偏析。显微偏析是指树枝晶体的枝干与枝晶间成分的不均匀性，只能通过显微镜才能鉴别，又称为树枝状偏析。宏观偏析是钢锭局部成分不均匀性，可用钻样分析进行鉴定，也可通过硫印、酸浸等低倍检验判断，故又称低倍偏析或区域偏析。

通过硫印枪查钢锭纵断面，可以观察到镇静钢钢锭有三个明显的偏析带（见图 9－1－20），即∧形偏析带、V 形偏析带和底部锥形负偏析带。

∧形偏析带主要是硫、磷、碳的正偏析，分布在柱状晶带和锭心粗大等轴晶带的中间过渡带。V 形偏析是硫、磷的正偏析，分布在锭心等轴晶带，位于缩孔之下。在 V 形偏析区还常常同时形成中心疏松。锥形负偏析带含硫、磷夹杂较少，但含有大颗粒球形硅酸盐和铝酸盐夹杂物，具有细小等轴晶结构，位于钢锭下部 1/3 高区域内。

造成偏析的根本原因是选分结晶。即钢液凝固时，含碳、磷、硫等杂质少、纯度高的金属，由于熔点较高而首先开始结晶，使后结晶的液体含有较多的杂质。同时，由于浇注过程和凝固过程所造成的温度和浓度差等，以及凝固时气体的析出等，使凝固过程的钢液一直处于流动状态，因而将富集了溶质的钢液带到未凝固的区域，结果导致宏观偏析。

钢锭中元素的偏析，会使钢材机械性能不均匀，韧性、耐腐蚀性下降。偏析是一种自然规律，要完全消除是不可能的。但通过改变浇注参数，可以减轻偏析。一般来说，通过加快钢锭冷却速度，适当减少钢锭重量，适当降低浇注温度和浇注速度，细化晶粒等措施，都可以不同程度的抑制偏析的发展。

钢中常见元素中，其偏析倾向大小的顺序为：硫、磷、碳、硅、锰。

3）镇静钢钢锭的主要缺陷：镇静钢钢锭的缺陷可笼统的分为两大类：一类是表面缺陷，一类是内部缺陷。属于表面缺陷的有：裂纹、结疤、重皮、气泡、翻皮、截痕等。在钢锭加工时，这些缺陷会引起表皮开裂现象。此类缺陷比较容易发现，程度较轻时可以清理，只是要消耗人力，占用作业面积，损失金属。属于内部缺陷的有：缩孔、疏松、偏析、夹杂、白点、内裂等。这类缺陷，对钢材性能的危害很大，甚至使钢报废。有的不易发现，将造成后部加工的浪费，甚至潜藏在产品内，遗患于使用过程中，

镇静钢钢锭的主要缺陷及其成因、防止方法见表 9－1－6。

（2）沸腾钢钢锭。沸腾钢是脱氧不完全的钢，钢水的含氧量高于与碳平衡的含量，在浇注时，随温度的降低和结晶的进行，[C] 和 [O] 在凝固前沿发生液析和浓聚，并进行反

应,产生大量 CO 气体,引起模内钢水沸腾,故称这种钢为沸腾钢。

表 9－1－6　镇静钢钢锭的主要缺陷、成因及防止措施

缺陷名称	轧后特征	缺陷成因	防止或减少缺陷的措施
裂纹		钢锭模设计不合理 ;脱模过早	改进锭模设计 ;防止脱模后冷却太快,不用高温锭模
拉裂		锭模与保温帽间或底盘间产生飞边 ;钢锭模内壁不平	改善锭模管理,完善摆模作业
表面夹杂(大型夹杂)		注温、注速低 ;清洁工作不好 ;耐火材料质量差 ;锭模内壁不良	合适的浇注制度 ;改进锭模管理,做好清洁工作 ;改进耐火材料质量
翻皮结疤	裂纹局部分层	模内钢液面氧化膜裸露、注流注入偏心等引起飞溅 ;浇注初期冷溅	合适的液面保护剂 ;正确的浇注操作 ;用防溅筒
皮下气泡	纵裂纹角部裂纹	脱氧不良 ;注速过慢 ;添加物或涂料潮湿 ;钢中气体含量过高	正确脱氧 ;对添加剂和涂料烘烤 ;控制合适注速 ;降低钢中气体含量
截 痕	裂纹	浇注中断事故 ;低温低速浇注	防止各种浇注事故 ;采用合适的浇注工艺
缩孔	严重内裂	锭模设计不合理 ;注速过快,注温不合适,补注不良	改进锭模设计,高宽比 H/D 适当 ;正确补注操作 ;采用合适的绝热板、防缩剂等.
疏松	内裂纹	粗大树枝晶间搭桥,使某些空间得不到补缩,有气体或夹杂物存在	良好补注,采取加速结晶措施,减少钢中气体和夹杂
发纹	沿轧制方向出现细长的裂纹	钢中气体和非金属夹杂物过高	降低钢中气体和夹杂物含量
白点	内部向微裂纹	钢中含氢量过高	使炉料干燥,改进冶炼工艺 ;采用真空处理、氩气搅拌等措施

沸腾钢凝固之后,未排出的气体在锭内形成气泡,可以补偿凝固收缩,所以沸腾钢钢锭没有头部集中缩孔,切头率比镇静钢低 10%。钢水在模内沸腾时,有利于去除气体和夹杂物,减少翻皮缺陷,钢锭表面质量较好。沸腾钢含碳、硅量较低,具有较好的焊接、冲压及冷弯性能。采用上小下大、不带保温帽的锭模浇注,使脱模和整模作业大为简化,有利于提高铸锭的生产能力。沸腾钢金属收得率高,脱氧剂和耐火材料消耗少,故成本较低。由于具有上述优点,广泛用于制造钢管、钢板、软钢丝等大宗产品。但与镇静钢相

比，沸腾钢钢锭的偏析严重，钢材性能不均匀，而且强度较低，时效敏感性较大。为了保证钢水在模内正常沸腾，沸腾钢的含碳量不能高，一般在 0.05～0.30%，含硅量应小于或等于 0.03%，这就使得沸腾钢的钢种受到很大限制。

1）沸腾钢的钢锭结构　沸腾钢的钢锭也是由细小等轴晶、柱状晶及粗大等轴晶等构成。

但沸腾钢在结晶过程中析出大量气体，它们或上浮排出或以气泡形式滞留在钢锭中，使沸腾钢钢锭结构具有与镇静钢不同的特点。通常按气泡分布规律来划分其结构带。典型的沸腾钢钢锭，由表及里分为五个带：坚壳带、蜂窝气泡带、中间坚固带、二次气泡带和锭心带（见图 9－1－21）。

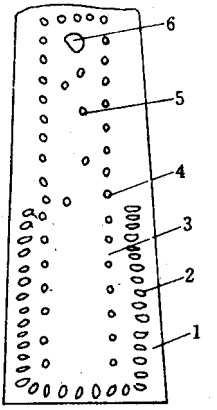


图 9－1－21　典型沸腾钢的钢锭结构示意图

1—坚壳带；2—蜂窝气泡带；3—中间坚固带；4—二次气泡带；

5—中心气泡带；6—头部大气泡

A　坚壳带　钢液注入模内受到模壁的强烈冷却，得到细小等轴晶的激冷层，随后柱状晶开始生长。在此期间钢水静压力很小，碳－氧反应容易进行，生成大量 CO 气泡并迅速上浮，同时钢中析出的氢、氮等气体向气泡内扩散一同逸出，从而形成无气泡坚壳带。

B　蜂窝气泡带　随着柱状晶的发展，结晶速度减慢，[C]、[O]不断在树枝晶体间的母液中富集，继续发生[C]－[O]反应。但由于钢水静压力增加，使气泡长大速度减小。于是，在柱状晶间生成的气泡，有一部分留在晶间随柱状晶的发展而发展，结果串成蜂窝状气泡。由于钢锭上部钢水静压力小，沸腾强度大，因此，在钢锭上部生成的气泡基本上都上浮逸出。故蜂窝气泡带一般只分布在钢锭下部，宽度为 30～70mm。

C　中间坚固带　浇注完毕，钢锭封顶，使钢锭内部形成气泡所需克服的外部压力突

然增加，碳—氧反应受到抑制，现有气泡停止生长，新气泡难于生成。这时，结晶过程仍继续进行，从而形成没有气泡的、由柱状晶构成的中间坚固带。

D　二次气泡带　随着结晶的继续进行，[C]、[O]进一步富集，晶体的凝固收缩在柱状晶之间形成小空隙，从而促使碳-氧反应重新发生。但是，生成的气泡已不能排出，只好按表面能最小规则呈圆形气泡留在钢锭内，形成二次气泡带。二次气泡带距钢锭表面的距离几乎相等，并且自下而上分布在整个钢锭高度。

E　锭心　在锭心结晶时，由于沸腾大体上已经停止，与镇静钢相似，也生成粗大的等轴晶。但是，由于仍有[C]、[O]的富集，使锭心还有分散的气泡生成。这时，锭心温度下降，钢液粘度很大，气泡便留在锭心带，有的可能上浮到钢锭上部，汇集成较大的气泡。

沸腾钢钢锭的气泡可以抵消钢液的冷凝收缩，故钢锭中没有集中缩孔，钢锭头部一般略有上涨。化学封顶的钢锭，因封顶时间较早，以致在钢锭横截面上从表面到中心只出现三个带：坚壳带、蜂窝气泡带和锭心带。

2)沸腾钢钢锭的主要缺陷及防止方法：沸腾钢的主要缺陷有：由于坚壳带过薄造成的钢锭表面气泡暴露或气沟，钢锭头部的上涨和下陷(见图 9-1-22)；以及分层、结疤、偏析等。

沸腾钢钢锭的偏析与镇静不同，它是在二次气泡带之间的钢锭中心部分，沿钢锭整个高度有明显的偏析发展。图 9-1-23 为不同封顶方式的钢锭偏析特征。

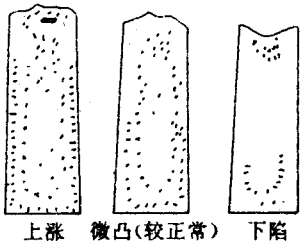


图 9-1-22　三种类型的沸腾钢钢锭

沸腾钢钢锭的严重偏析现象，是过分的模内沸腾造成的。从钢锭的外缘到锭心，从下部到上部，偏析程度将不断增大。因此，沸腾钢钢锭的头、中、尾三段的性能很不一致，以中段较好，头段硫化物较多，尾段则氧化物较严重。

沸腾钢钢锭的主要缺陷及其成因、防止方法，见表 9-1-7。

(3)半镇静钢钢锭。半镇静钢是一种脱氧程度介于镇静钢和沸腾钢之间的钢种，即除了用锰铁脱氧外，也加入少量的硅和铝，硅含量通常为 0.06～0.08%。钢液含氧量接近或略高于与碳相平衡的含量。半镇静钢凝固时，一般只在浇注完后排出少量气体，在

模内进行短时间的微弱沸腾。这样，便有可能使钢锭中气泡的容积与凝固收缩大致相等，不致出现明显的缩孔和上涨。因此，半镇静钢又称平衡钢。

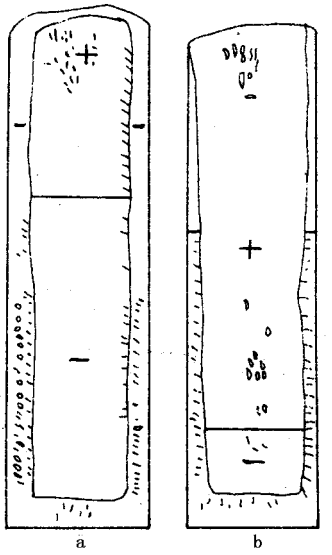


图 9－1－23　沸腾钢钢锭的偏析情况

a—压盖封顶；b—化学封顶

+ －正偏析区内偏析高峰位置；

－ －负偏析区内偏析高峰位置

表 9－1－7　沸腾钢钢锭的主要缺陷、成因及防止措施

缺陷名称	轧后特征	缺陷成因	防止或减少缺陷的措施
气泡暴露或坚壳带气沟	表面裂纹或海绵面	注温过高或过低，模内沸腾不好	控制好注温，钢水含氧量合适
上涨		模内沸腾微弱，温度偏低	控制好钢水的氧化性，封顶时间合适
下陷		钢水氧化性过强，模内沸腾剧烈 注速过快	同上
分层	钢板 < 1mm 的夹层，局部开裂	钢锭头部主要含有较高的硫化物 ;尾部主要含有大型氧化物夹杂	降低钢中硫及非金属夹杂物含量，合适的注温、注速及钢水氧化性

缺陷名称	轧后特征	缺陷成因	防止或减少缺陷的措施
结疤		注流中心偏斜，注流发散，钢永剧烈沸腾飞溅	正确的浇注操作，防止钢水过分氧化，做好清洁工作

半镇静钢钢锭的结构介于镇静钢与沸腾钢之间，其性能与镇静钢相似。用半镇静钢代替镇静钢，由于切头率减少，钢坯收得率可提高 7 ~ 10% ；可节约脱氧用硅铁和铝 1/2 ~ 2/3 ；因其浇注采用沸腾钢锭模，使脱模、整模作业简化，可提高铸锭生产能力。用半镇静钢代替沸腾钢，因其偏析小和轧制废品减少，其成材率可接近沸腾钢，而钢的性能却比沸腾钢好 ；半镇静钢浇注无须封顶，注后静止时间短，特别是大型半镇静钢钢锭，适于快速浇注（注速可达 5 ~ 7m/min），使铸锭生产能力比沸腾钢更高 ；半镇静钢的含碳、锰量没有严格限制（可含 0.05 ~ 0.90% C，0.25 ~ 1.70% Mn 和 < 0.12% Si），还允许含有一定量的合金元素，因而可冶炼的钢种多。综上所述，由于半镇静钢有很多优点，使它的生产和使用得到迅速发展。但是，半镇静钢对脱氧程度要求很严格，含氧量必须稳定在很小的范围内（波动应 < 5ppm），同时也严格要求脱气程度。因此，半镇静钢的生产比较困难，使其发展受到限制。一般来说，半镇静钢也不适于作重要用途的钢。

1）半镇静钢钢锭结构 ：半镇静钢钢锭的结构，介于镇静钢与沸腾钢钢锭之间。根据脱氧方法和脱氧程度的不同，有多种类型。

A　偏镇静型　用锰铁、硅铁和铝在盛钢桶内进行脱氧，脱氧程度应使钢在浇注过程中基本上不发生碳—氧反应，不产生沸腾。钢锭下部，由于钢液静压力大，碳氧几乎不进行反应，所以没有气泡产生 ；钢锭上部，由于钢液静压力减小，富集的碳氧能进行反应而放出气体，并且大部分以气泡状态留在钢锭内，但又不足以补偿钢液的全部凝固收缩，因而形成不同程度的缩孔。此类半镇静钢的切头率虽较沸腾钢有所增加，但仍比镇静钢低得多。其结构如图 9 - 1 - 24 所示。

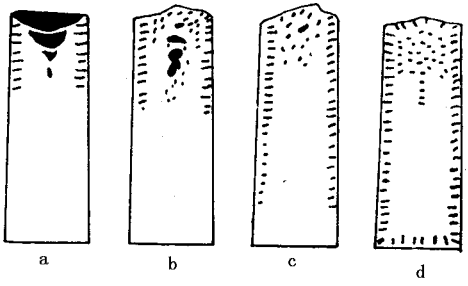


图 9 - 1 - 24　半镇静钢钢锭结构的类型

B　偏沸腾型　用锰铁和硅锰合金在盛钢桶内脱氧，有意控制脱氧不足，然后在浇注过程中加铝调整。钢锭结构与沸腾不良的沸腾钢钢锭相近，没有缩孔，头部稍有上涨，钢锭表面层自下而上分布着蜂窝气泡带（如图 9－1－24d）。这类钢具有与沸腾钢相同的表面和头部，而内部质量又接近于镇静钢。

C　中间型　即所谓正常结构的平衡钢（见图 9－1－24b、c）。钢锭内的气泡基本上抵消了钢液的凝固收缩，故头部没有缩孔或缩孔很小，有一些均匀分散的气泡或气囊，有时在钢锭上部分布有短小的蜂窝气泡或皮下气泡。此类钢切头率最低，但脱氧程度较难控制。

2）半镇静钢钢锭的主要缺陷：

A　缩孔　由于脱氧过度，生成的气泡体积小，不足以抵消钢液凝固收缩量而产生的缩孔。有时，由于脱氧不足，排气量过多，在钢锭头部聚集有类似缩孔的大气囊。

B　偏析　半镇静钢在浇注过程中沸腾微弱，注完后又很快停止沸腾，因此其偏析程度比沸腾钢小得多，但仍比镇静钢偏析大。

C　轧后流渣　钢锭在初轧开坯后，头部钢坯切断口的中心流出低熔点熔融物叫流渣。这种钢坯如在初轧未将溶渣切尽，送大型轧钢厂轧制则容易出现分层缺陷。流渣主要是注速慢、浇注过程中模内出现结膜产生翻皮裹入钢内所至。

第二章　连铸技术的发展

第一节　连铸技术发展概况

一、连续铸钢发展的历程

钢水凝固成型有两种方法：传统的模铸法和连续铸钢法。连续铸钢是一项把钢水直接浇铸成形的新工艺。它的出现从根本上改变了一个世纪以来占统治地位的钢锭—初轧工艺。

液体金属连续铸锭的概念早在19世纪中期就已提出。1840年美国塞勒斯(Sellers)获连铸铅管专利。1846年转炉的发明者贝氏麦(Bessemer)使用水冷旋转双辊式连铸机生产锡箔、铅板和玻璃板。1872年美国戴维尔提出移动结晶器连续浇注的概念。1886—1889年提出垂直浇注的立式连铸机的设计。1921年皮尔逊提出结晶器振动概念，使铸坯与结晶器之间做连续相对运动。

1933年，连铸的先驱者德国人容汉斯(Junghans)建设了第一台1700t/月立式带振动结晶器的连铸机，首先浇注铜铝合金获得成功，使有色金属连续浇铸于30年代就应用于生产。

20世纪40年代，由容汉斯在德国建成第一台浇注钢水的试验性连铸机(1943年)。其原理如图9－2－1所示。由图可知，当时就已提出振动的水冷结晶器、浸入式水口、结晶器上部加保护剂等技术，这些为现代连铸机奠定了基础。随后，在美国、英国、奥地利、

日本等国相继建成了中间性试验连铸机，钢水量为 150kg ~ 7.5t。

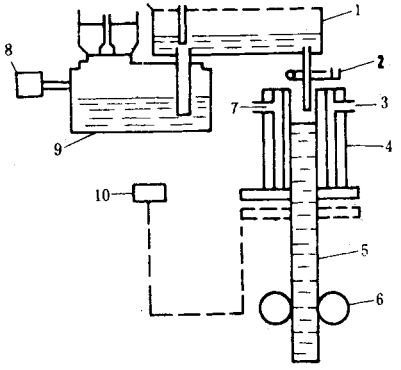


图 9 - 2 - 1　容汉斯专利原理图

1—中间包；2—加保护剂；3—入水口；4—结晶器；5—铸坯；
6—拉辊；7—出水口；8—压缩机；9—钢包；10—振动机构

20 世纪 50 年代，连续铸钢进入工业应用阶段，有多台连铸机相继建成。其中有代表性的钢厂有：

1951 年在前苏联的红十月冶金厂建立了第一台不锈钢板坯连铸机，生产断面 180 × 800mm，产量为 36000t/a。

1952 年在英国的巴罗(Barrow)工厂，建成第一台小方坯连铸机，浇注碳钢和低合金钢，断面为 50 × 50 ~ 100 × 100mm。与此同时，德国人斯莎贝尔(O. Schacber)提出了弧形连铸机的专利。容汉斯和斯莎贝尔提出了连铸电磁搅拌的设计。

1954 年第一台浇注圆坯的 4 流连铸机在德国曼内斯曼公司(Mannesmann)建成。同时在北美加拿大的阿特拉斯(AtlasSteel)厂建成不锈钢板坯连铸机，断面为 165 × 620mm，每炉浇注 27 ~ 45t 钢水。

1956 年在英国的巴罗钢厂建成了立弯式连铸机，大大降低了立式铸机的高度。瑞士的金(C. Kung)获弧形结晶器专利。

1958 年第一代 8 流小方坯连铸机在意大利的工业和电业公司投产。

20 世纪 60 年代，连续铸钢进入工业性推广阶段，不少钢厂都相继建设连铸机。其中代表性钢厂有：

1961 年第一台立弯式单流板坯连铸机在德国梯林根钢厂(Dillinger Steelwork)建成，浇低碳钢，断面为 200 × 1520mm，钢包容量 33t。

1963 年第一台弧形结晶器的小方坯连铸机在瑞士建成投产。据当时调查指出，全世界已有 61 台连铸机生产，44 台连铸机在建设之中。

1964 年第一个全连铸钢厂在英国的谢尔顿(Shelton)钢厂投产。该厂有 4 台连铸机共 11 流,生产低碳钢和低合金钢,断面为 140 × 140 ~ 432 × 632mm,钢包容量 62t。

1964 年第一台弧形板坯连铸机在德国梯林根钢厂投产,断面最大为 250 × 1600mm。与立式连铸机比较,弧形连铸机高度降低了 50%。

1965 年 4 流圆坯弧形连铸机在德国埃斯维特尔钢厂(Eschweiter)建成投产。

1967 年高生产率的板坯连铸机在美国的盖里(Gary)钢厂建成投产,并与在线轧制相联。

1968 年第一台弧形结晶器 4 流板坯连铸机在美国的国家钢公司(Notiollal Stcel)建成,用于生产镀锡板。同年,加拿大阿尔果马钢厂投产一台工字梁连铸机。

1969 年有 4 台板坯连铸机投产。第一台离心旋转连铸机由法国的瓦卢埃克公司(Vallourec)建成投产。20 世纪 70 年代以后为连铸大发展时期。连铸机已具备与大型氧气转炉相配合进行工业生产的可能性。连铸设备和工艺技术日益完善,促进厂连铸的迅速发展。其中有代表性技术有:

钢包回转台以实现多炉连浇;

快速更换中间包以提高连铸生产率和连浇炉数;

纵向切割板坯,以把更换结晶器的次数减到最少以提高生产率;

结晶器液面控制以保持稳定浇注速度;

结晶器在线调宽技术,以提高生产率;

多点弯曲和矫直技术,以提高铸坯质量;

钢包→中间包→结晶器全程保护浇注;

冷中间包的应用;

电磁搅拌的应用;

汽水冷却以改善冷却的均匀性,提高铸坯质量;

压缩浇注技术,以适应高速浇注,改善铸坯内部质量;

轻压下技术,改善铸坯中心偏析;

整个浇注过程用计算机控制。

从 20 世纪从 80 年代以来,世界各产钢国家连铸技术的发展非常迅速。1964 年全世界仅有 80 多台连铸机,总生产率为 700 万 t/a;1970 年有 325 台连铸机,生产能力 2600 万 t/a;1974 年有 550 台连铸机,生产能力 1.4 亿 t/a;1985 年有 1318 台连铸机,生产能力 3.3 亿 t/a;1990 年 1360 台连铸机,生产能力 5.58 亿 t/a。据 1991 年统计,全世界已有 26 个国家和地区钢产量的连铸比超过 90%。全世界钢产量的平均连铸比由 1981 年的

33.8%增到 1991 年的 62.9%。

近年来，连续铸钢在特殊钢厂也得到广泛应用。据报道，1991 年日本普通钢连铸比为 68.6%。特殊钢连铸比为 81.6%，其中不锈钢连铸比接近 100%。

应该指出，从世界主要产钢国家发展连铸的历程来看，前苏联在连铸技术的研究方面起步较早，对连铸理论、工艺、设备和品种质量等进行了大量研究工作，在 20 世纪 70 年代以前是居世界领先地位。然而，由于前苏联炼钢生产一直以平炉为主，氧气转炉炼钢发展迟缓，因此限制了连铸的发展。在 70 年代后，日本、美国。法国、德国等工业发达国家后来居上。尤其是日本，在 20 世纪 60 年代后期才从前苏联等国引进连铸技术，由于重视消化和开发研究，促进了连铸技术的应用。日本在 70 年代以前，连铸机主要设置在电炉钢厂，以生产小方坯为主。1970 年连铸比仅为 5.6%。但 70 年代后的两次能源危机，促使连铸技术得到了迅速发展。1980 年日本连铸比增加到 59.5%，1991 年达到 94.4%。1991 年日本四家最大钢铁公司连铸比达到：新日铁 98.9%；日本钢管 98.7%；川崎 97.7%；住友 94.9%，基本上实现了全连铸。目前日本的连铸设备已趋近饱和程度。

美国的连铸技术是与瑞士康卡斯特公司和日本厂家合作发展起来的，20 世纪 80 年代以前发展缓慢。1980 年连铸比为 20.3%。1980 年以后，增加了连铸投资，把重点放在大型钢厂建设板坯、大方坯及组合式连铸机，到 1991 年连铸比提高到 75.1%。随之也出现了一些全连铸工厂。

据统计，1992 年全世界产钢国家中，已有 30 多个大型钢厂实现了全连铸。

还应特别注意到，近年来接近于成品尺寸的薄板坯连铸连轧工艺技术有了重大突破，人们认为这是当前钢铁工业发展中的一项重大高新技术。传统的生产热轧薄板的工艺是连铸板坯(厚 150～250mm)⟶粗轧机组(轧成 40～70mm)⟶精轧机组⟶板卷(2～10mm)。而薄板坯连铸连轧工艺是薄板坯(40～70mm)⟶精轧机组⟶板卷。与传统工艺相比，这种新工艺流程短、设备简化，建设投资低，成材率高、能耗降低，生产成本大幅度下降，经济效益十分明显。国外现已有多家公司竞相研究开发如德国的西马克(SMS)公司开发的 CSP(Compact Strip Production)工艺，曼内斯曼·德马克(MDS)公司开发的 ISP (InlineStrip Production)工艺，意大利的丹涅利(Danieli)、奥地利的沃斯特、阿尔卑里(Voest－Alpine)等公司各自开发出新的工艺。美国的纽柯(Nucor)公司，意大利的阿维第(Arvedi)公司已采用此种新工艺建成了完整的生产线，取得很好的效果。人们预计采用熔融还原、超高功率电炉(直流电弧炉)、炉外精炼、薄板坯连铸和紧凑式热轧机组曲新型的钢厂将在世界上不断涌现。

二、我国连铸技术的发展

我国于 1957 年就开始连续铸钢的试验研究。1958 年在重钢三厂建成了立式双流连铸机，用以浇注 175 × 200mm 铸坯，并首先采用 500t 飞剪剪切铸坯。1960 年在唐山钢厂建成 140 × 140mm 方坯立式连铸机。1964 年 6 月 24 日在重庆第三钢厂建成第一台弧形板坯和方坯兼用连铸机，这是世界上最早用于工业生产的弧形连铸机之一。首先采用 1500t 摆式剪机来剪切铸坯。1967 年在重钢建成了一台半径为 10m 的弧形连铸机，是当时世界上最大的弧形连铸机之一。它既能浇注 250 ~ 300 × 1500 ~ 2100mm 板坯，又能浇注 3 流 300mm 及 4 流 250mm 大方坯。以上四台连铸机至今仍在正常生产。

从 1964 年到 1974 年十年间，我国中小企业建成了 40 多台弧形连铸机，但由于基础技术工作没有跟上，工艺问题研究不深，铸机设备又偏于简陋，致使铸机不能正常持久生产。为此，原冶金部和一机部于 1973 ~ 1976 年期间，在上钢一厂组织了联合攻关，解决了板坯纵裂等质量问题，推广了浸入式水口和保护渣浇注工艺，促进了连铸生产，坚定了发展连铸的信心。

从改革开放以来，我国政府对钢铁工业发展连续铸钢技术非常重视。冶金部于 1983 年提出了“钢铁工业以发展连铸为中心提高成材率措施”的战略决策，确定了全国钢铁企业发展连铸的规划，并贯彻到钢铁厂的建设和技术改造中去。在总结经验的基础上，提出了以“连铸为中心、炼钢为基础、设备为保证”搞好连铸生产的技术指导方针，有力促进了我国连铸的发展。

从 1980 年以来，为改变我国中小钢厂小钢锭浇注的落后面貌及开坯能力不足的矛盾，从国外引进了不同类型的小方坯连铸机，并进行消化移植改进，在中小钢厂得到广泛应用。我国已有连铸机的钢铁厂分布很广，有 25 个省（自治区）70 多个钢厂都建成了连铸机。到 1992 年共有 146 台（板坯 34 台，方矩圆坯 105 台，水平连铸 7 台）连铸机投入生产，设计能力，为 3119 万 t/a。连铸产品结构向合理方向发展，连铸坯产量的分配：板坯 47%，大方坯（圆坯）10%，小方坯（矩形坯）43%。

新建或扩建钢铁厂在炼钢生产流程中一律采用连续铸钢工艺取代钢锭模浇注工艺。如上海宝山建成了现代化的钢铁厂，有 3 × 300t 顶底复吹转炉，有铁水三脱处理、钢水精炼和喷粉等现代化的装备。有 2 台 4 流大型板坯连铸机，年产板坯 400 万 t，浇注板坯尺寸为厚度 210、230、250mm、宽度 900 ~ 1930mm、长度 12000mm。连铸机采用多点矫直、电磁搅拌、结晶器在线调宽和高频率小振幅的振动。对漏钢预报、二冷配水、定尺长度、压缩浇铸、质量异常及判定等均由计算机控制，可生产无缺陷铸坯实现热送。

1978 年武钢二炼钢厂建成与 3 × 50t 顶吹氧气转炉相匹配的 3 台弧形板坯连铸机，年产量 150 万 t，浇注断面为 170、210、250 × (700 ~ 1600) mm。1986 年连铸机产量超过设计能力 41%，是我国第一个实现全连铸的钢厂，为我国发展连铸树立了样板。

连铸坯热送热装已成为钢铁厂进一步节能、提高产品质量、获得综合经济效益的重要措施。武钢二炼钢厂 1989 年连铸坯热送率 90.8%、热装率 77.6%，平均装炉温度 448℃。与冷装相比，热装缩短了铸坯在加热炉的加热时间，能耗降低约 6kg/t 坯重油，小时产量提高了 44.4t。

首钢二炼钢厂建成与 220t 氧气转炉相匹配的 8 流小方坯连铸机，创造了大转炉配小方坯连铸机的生产经验，取得了很好的效果。1992 年产量达到 141.17 万 t 吨，超过设计能力；铸机作业率 77.75%；平均连浇炉数 4.6 炉；中间包寿命 600min；铸坯合格率 99.45%。

老炼钢厂的技术改造必须由连铸取代传统的小钢锭模浇注工艺。我国中小钢厂的特点是‘三小’，即小转炉(15 ~ 30t)、小电炉(5 ~ 10t)和小轧机。以 1991 年为例，全国钢产量为 7100 万 t，其中转炉钢 4280 万 t，小转炉(容量小于 30t)产钢量约占 50%。过去都是浇注 8in 或 10in 的小钢锭，金属损失大、消耗高、劳动条件差，成为炼钢生产的薄弱环节。现在基本上都改造为采用小方坯弧形连铸机(R = 5.25m 或 6m)，浇注断面为 90 × 90 ~ 150 × 150mm 的方坯，供小型轧机一火成材。

在国外都是‘电炉—小方坯连铸机—小型轧机’组成所谓小钢厂(Mini—Mill)。而我国小方坯连铸机都是与小转炉配合生产的。由于转炉容量小、稳定性差，给连铸生产带来一定的困难。近年来很多钢厂在改进转炉操作，为连铸提供质量合格钢水以及生产管理方面都积累了丰富经验，使小方坯连铸机的生产达到了新的水平。如韶关钢厂与 10tLD 转炉相配合 150 × 150mm 小方坯连铸机，创造连浇达 101 炉、59h、浇注铸坯长 9605m 的记录。昆钢生产 70 × 70mm、90 × 90mm 的小方坯，一火成材比小钢锭成材率提高 13%，150 × 150mm 方坯经开坯再成材比钢锭提高 6%，经济效益显著。

年为例，全国粗钢产量为 7100 万 t，其中平炉钢为 1278 万 t，占 18%。根据我国国情，平炉还要存在相当一段时间，短期内不可能淘汰。由于平炉冶炼时间长，不易实现多炉连浇，给生产带来了困难。目前我国平炉厂建成了 6 台连铸机共 14 流，主要是浇注 115 × 115 ~ 255 × 255mm 的方坯。如鞍钢二炼钢厂是年产 240 万 t 的平炉钢厂，建成 3 台 6 流小方坯连铸机，1992 年钢厂连铸比达到 26.51%，形成了模铸与连铸并存局面。

积极建设合金钢连铸机。我国合金钢厂特点是电炉容量小(5 ~ 10t)、品种多，不少钢厂几乎八大类钢都生产，批量小，产品规格繁多，钢锭成材率低。1991 年钢产量 7100 万 t

中，电炉钢产量约占 21%。近几年来，我国合金钢厂建成了 16 台连铸机，其中有立式、立弯式、弧形和水平等四种机型。构成了“电炉－炉外精炼（LF、VOD、AOD）－连铸机”的生产工艺流程。浇注断面有方坯（120×120～200×200mm）、圆坯（ϕ60～ϕ200mm）、板坯（140～200×900～1630mm），生产能力约 140 万 t/a。浇注钢种有不锈钢、结构钢等几十个品种。

从 1980 年以来，我国连铸有较大的发展，连铸比的增长是：1980 年 6.5%；1985 年 10.3%；1990 年 22.4%；1991 年 26.2%；1992 年 20.4%。但与世界先进水平相比还有较大差距。目前我国钢产量居世界第 4 位，而连铸比在产钢国家中居第 34 位。

目前我国钢铁工业正处于兴旺发展时期，连铸技术从设计、制造、工艺和管理等方面都积累了丰富的经验，现在正是我国连铸高速发展时代。

第二节　连铸技术的优越性

一、节省工序缩短流程

如图 9－2－2 所示，与钢锭—初轧工艺相比，连铸最大的特点是省掉了模铸的脱模、整模、钢锭均热和开坯等工序。基建投资可节约 40%，占地面积减少 30%，劳动力节省 75%。

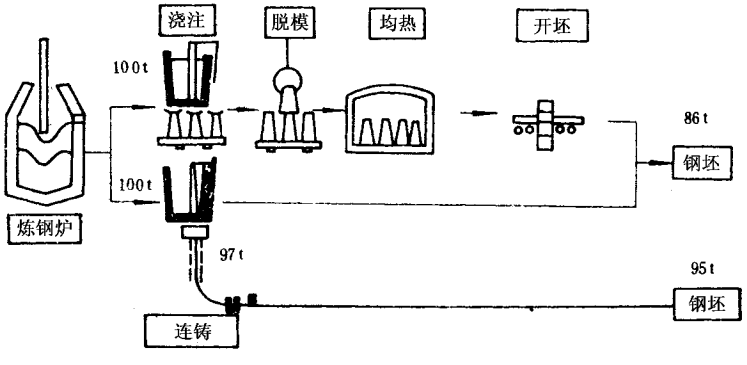


图 9－2－2　连铸与模铸流程比较

近年来薄板坯连铸机的出现，进一步简化了工序流程。与传统板坯连铸（厚度 150～

300mm)相比,薄板坯(厚度 40～70mm)连铸省去了粗轧机组,厂房面积减少约 48%,连铸机设备重量减少 50%,热轧设备重量减少 30%。从钢水到薄板生产周期大大缩短,传统板坯连铸约需 40h,而薄板坯连铸仅为 1～2h。纽柯(Nucor)钢厂 CSP(紧凑式带钢生产)生产线实践证实 采用薄板坯连铸,能源费用减少 50%,生产成本下降 20%,吨钢投资费用节省 20%～30%。

二、提高金属收得率

钢锭—开坯工艺的切头切尾损失达 10%～20%,而连铸的切头切尾损失为 1%～2%,故可提高金属收得率 10%～14%(板坯 10.5%,大方坯 13%,小方坯 14%)。如果以提高 10%计算,年产 100 万 t 钢钢厂,采用连铸工艺,就可增产 10 万 t 钢,带来的经济效益是相当可观的。

就从钢水到薄板流程而言,采用传统连铸金属收得率 93.6%,而薄板坯连铸为 96%。如以年产 80 万 t 钢厂采用薄板坯连铸工艺就可多生产约 2.4 万 t 热轧板卷。

三、降低能量消耗

采用连铸省掉了均热炉的再加热工序,可使能量消耗减少 1/2～1/4。据日本资料,生产 1t 钢坯,连铸比模铸一般可节能平炉炼钢厂建设连铸机。目前我国还有 16 个平炉厂,以 1991(41.8～25.4)$\times 10^4$kJ,相当节重油 10～30kg/t 坯。

连铸坯采用热送和直接轧制工艺,进一步开辟了节能新途径。据介绍,1989 年日本连铸坯热装率达 60%～80%。热装比冷装能耗降低是:板坯温度 500℃降低 30%,板坯温度 800℃降低 50%。板坯热装温度提高 100℃,可使加热炉燃料消耗降低 80～120MJ/t 坯。

采用铸坯直接轧制工艺,能耗还可进一步降低。工厂试验指出,不同工艺的能耗是:冷坯加热轧制为 1260$\times$10kJ/t 坯,热装轧制为 840$\times 10^3$kJ/t 坯,铸坯直接轧制为 420kJ/t 坯。

热送和直接轧制不仅节能效果好,而且缩短了加工周期,从钢水到轧制成品沿流程所经历的时间是:冷装 30h,热装 10h,直接轧制 2h。

四、生产过程机械化和自动化程度高

炼钢厂铸锭车间劳动环境恶劣,手工劳动多,是炼钢生产中最落后的工序。尤其是对于氧气转炉的发展而言,铸锭已成为提高生产率的限制性环节。采用连铸后,由于设

备和操作水平的提高以及采用全程计算机控制和管理，劳动环境得到了根本性的改善。连铸操作自动化和智能化已成为现实。

五、连铸钢种扩大，产品质量日益提高

目前几乎所有的钢种都可用连铸生产。连铸的钢种已扩大到 500 多个。就钢种而言，超纯净度钢（1F 钢）、高牌号硅钢、不锈钢、Z 向钢、管线钢、重轨、硬线、工具钢以及合金钢都可用连铸生产。

总的来说，镇静钢连铸不存在什么问题，而沸腾钢连铸时，由于结晶器产生沸腾而不易控制，因此开发了沸腾钢的代用品种，其中有美国的 Riband 钢，日本的准沸腾钢，德国的低碳铝镇静钢，与适当的炉外精炼（如 RH）相配合，保证了连铸坯生产冷轧板的质量。

第三节　传统连铸技术的发展

连铸取代模铸是炼钢生产流程中一次巨大技术变革。在 1965 年前绝大部分连铸机比较简单且为立式连铸机，在 1975 年 80％板坯、70％大方坯和小方坯采用弧形连铸机生产，到 1984 年已有 30％板坯、20％大方坯采用连续弯曲矫直的立弯式连铸机生产。

目前世界上有不少产钢国家连铸比已接近饱和程度。连铸机机型已基本定型化。目前改进的方向是使连铸机的结构和辅助设备具有更高的综合性能，操作过程自动化、可控性和安全性达到更高的水平。其目的在于进一步发挥连铸机的生产潜力和进一步提高铸坯质量。

提高连铸机生产率。在过去 10 年间，连铸机平均年产量显著提高。据统计，1989 年西欧各国连铸机每流平均产量 板坯 0.72Mt/a，大方坯 0.12Mt/a，小方坯 0.07Mt/a。而每流最高产量 板坯 1.75Mt/a，大方坯 0.22Mt/a，小方坯 0.13Mt/a。即使同一类型连铸机，年产量还是相差较大。这说明提高连铸机生产率还是大有潜力的。提高连铸机生产率主要的措施有：

1）提高浇注速度。浇注速度增大，铸机产量增加。据统计，过去 10 年间西欧国家连铸机平均浇注速度增加幅度是 板坯 35％，大方坯 65％，小方坯 10％。目前连铸机是向高拉速方向发展。如西欧 11 台板坯连铸机平均浇注速度大于 2.5t/min，每流产量超过 1mt/a。日本福山厂 5 号铸机 220×1650mm 平均拉速 2.2m/min，最高达 2.7m/min。

2)提高连铸机作业率。连铸机作业率是与浇注时间、铸机装备水平、良好的组织管理和产品需求等因素有关的。据报道,日本连铸机作业率平均达 70% ~ 80%,西欧达 60% ~ 70%。世界上有不少工厂连铸机作业率达 90%以上(如新日铁八幡厂 3 号板坯连铸机达 88.8%,名古屋厂 93.4%,奥钢联林茨厂 3 号铸机 92%)。结晶器采用液面自动控制和漏钢预报系统,快速整块更换铸机部件,结晶器在线调宽技术,快速更换中间包,上装引锭杆等,都是提高连铸机作业率的有效措施。

3)提高连浇炉数。连浇炉数对铸机生产率和产品成本起决定性作用。过去 10 年间连浇炉数大大增加。据统计,西欧各钢厂板坯和大方坯连铸机平均连浇炉数为 9 炉,小方坯为 5 炉。世界上有不少钢厂连铸机连浇炉数已达到很高的水平。如日本住友和歌山厂连浇炉数 :板坯 500 炉 ;大方坯 1015 炉,连浇 16 万 t 钢水 ;小方坯 800 炉,连浇 12 万 t 钢水。川崎水岛厂 1991 年 5 号连铸机连浇炉数 927 炉,浇注 822h08′的纪录。英国钢铁公司兰韦恩厂的双流板坯连铸机于 1992 年 5 月 14 日至 6 月 11 日创 997 炉连浇世界纪录。连浇总钢水重量约为 18.2 万 t,铸坯长度达 90km。浇注钢种 85%深冲钢,10%为包晶钢,5%为超低碳钢。

提高质量生产无缺陷铸坯。20 世纪 60 年代有的连铸产品表面质劣于钢锭产品,尤其是深冲冷轧板要求钢质软、成型性好和表面质量高(表面要求受喷漆、镀层、扩瓷等),连铸坯生产的冷轧板不如沸腾钢。但连铸沸腾钢困难很大,故开发了沸腾钢连铸的代用钢种(如准沸腾钢,铝镇静钢,Riband 钢)。采用长水口 + 覆盖剂和浸入式水口 + 保护渣的全程保护浇注,以及控制浇注过程中稳定性(如钢包、中间包的下渣,结晶器液面自动控制),进一步改善了铸坯清洁度,使铸坯中总氧量不大于 20ppm,满足了生产高级冷轧薄板(如 IF 钢)表面质量的要求。

就提高连铸坯质量而言,主要是集中解决以下问题:

1)改善工艺控制生产无缺陷的连铸坯 :为实现直接热送和直接轧制创造条件。如法国索拉克(Sollac)厂热装率达 80%以上,日本不少工厂热装率达 90%以上。

2)获得内部极为均质的连铸坯,以保证产品性能的均匀性。对特殊用途钢种的连铸坯(如海洋平台用结构钢、管线钢、高碳硬线等),关键是改善铸坯内部结构和减少宏观偏析。近几年来开发的技术(如轻压下,低温浇注、电磁搅拌、铸坯强冷等)解决铸坯内部质量取得了明显效果。

3)浇注过程的自动监控和计算机跟踪以及与铸坯质量在线统计分析相结合,是保证连铸坯质量的主要手段。这些技术有结晶器嵌入热电偶提供漏钢预报信息,结晶器传热摩擦振动的测试提供识别表面缺陷的信号,结晶器液面精确控制以实现稳定浇注,应用

光、温度和电磁效应原理实现在线的表面缺陷检测，连铸机设备的监控技术（如结晶器形状、磨损、振动、辊缝检测等），铸坯质量在线识别模型等。

第四节　新连铸技术的开发

以连铸取代模铸是炼钢生产流程中一场革命，而接近最终产品形状的连铸又是对传统连铸工艺的一次重大革新。

对于厚断面产品接近最终产品形状连铸技术早已实现。1968 年首先在阿尔戈马（Algoma）钢厂开始连铸工字梁的异形坯，这一技术最近又获得新的应用。

铸坯断面接近于最终产品尺寸的板带材方面的研究开发是当前研究的热点技术。最终产品尺寸可分为三种类型：薄板坯为 80～40mm，带材为 25～1.5mm，薄带材小于 1.5mm。薄板坯连铸连轧生产线已首次在纽柯公司投产，而带钢连铸目前还处于半工业试验阶段，而极薄带材还处于实验室试验阶段。

薄板坯连铸配合直接轧制生产流程。这样有利于节能，减少铸坯储存和缩短生产时间。连铸和轧钢的联结可组成新的紧凑式带钢生产流程，也是最经济的生产流程。目前正在开发的薄板坯连铸连轧生产流程模式有：

1）薄板坯连铸连轧工艺（CSP 工艺）：一台浇注 50mm 厚薄板坯连铸机，其后是很长的辊底式加热炉（160m 长），4 机架精轧机组，层流冷却段和卷取机，机组总长 250m。成品厚度为 2.5～12mm 的板卷。这种工艺已在纽柯公司克劳福兹维莱厂投产。年产 80～100 万 t。

2）薄板坯—液芯挤压—轧制工艺（ISP 工艺）：从结晶器出来 60mm 厚的薄板坯，带液芯压下到 40mm，然后由固相轧制成 15～20mm 的带材再轧成 5mm 的板卷。这种工艺已于 1991 年在意大利阿尔维第公司的科姆拉（Cremona）厂建成投产，年产 50 万 t。另外 SMS 蒂森（Thyssens）和沙希洛（Sacilor）公司正在试验另一种连铸—挤压—轧制工艺，主要特点是从结晶器出来的 50mm 带液芯的薄板坯，由两对辊挤压减薄到 15mm，再加热在 4 辊轧机上轧成 6mm 板卷。

3）薄板坯连铸连轧直接生产薄带流程：豪格文斯（Hoogovens）提出的流程是：薄板坯 45mm（5m/min，11000℃）⟶粗轧 15mm（15m/min，1120℃）⟶精轧 1.5mm（3.3m/s，880℃）⟶铁素体区精轧 0.7mm（7m/s，100℃）。

在各类生产流程中要实现在线轧制首先要解决好生产无缺陷的薄板坯和钢的清洁度问题。因此要把传统连铸的有效技术(如无氧化浇注、浸入式水口保护渣、结晶器润滑和液面控制等)成功应用于薄板坯连铸。在连铸生产线上进行热轧板带产品合理流程的开发,以及技术上的解决方法仍在不断发展之中。

总之薄板坯连铸连轧工艺的出现,对传统的钢铁工业生产模式提出了新的挑战。目前世界上许多国家的大型钢铁联合企业年产 200～400Mt 钢厂,配套大型氧气转炉、大型板坯连铸机和热轧带钢设备,生产厚度从 25mm 到 1.25mm、宽度 600mm 到 2000mm 的不同钢种的板带产品。这一传统流程增加了轧制设备的复杂性和操作成本。而对年产百万吨级钢厂,采用电炉(熔融还原)－炉外精炼－薄板坯连铸－紧凑式轧机的流程,生产板带产品将是一个新的发展趋势。据统计,世界上已建成投产和正在建设的薄板坯连铸连轧生产线已有 20 多条,可以预见,薄板坯连铸连轧工艺将在工业上推广应用。

第三章　连铸机机型及主要设计参数

连铸设备必须保证连铸工艺过程的顺利进行。承接一包钢水浇注的全套连铸装置称作一台连铸机。凡是具有独立的拉矫和传动系统，可以单独运行的一组连铸设备，称作为连铸机的一机。由一个钢水包下的一个（个别情况下二个）中间包内的钢水可以同时浇注的铸坯根数（结器数）称作连铸机的流数。如果一台连铸机的各流都能单独运行，这台连铸机便称作几机几流连铸机，如双机双流，四机四流，八机八流等等 如果某些流不能单独运行，就需把能够单独运行的机数和每机所带的流数分别注明，如一机双流，二机四流等等。

第一节　连铸机的机型及特点

连铸机机型直接影响铸坯的产量、质量、基本建设投资和生产成本。所以，世界各国都非常重视对连铸机型的研究。从 20 世纪 50 年代连铸工业化开始，50 年来，连铸机机型的发展经历了一个由立式、立弯式到弧型的演变过程。

一、连铸机机型的分类

连铸机可以按多种方法来分类：

（1）按铸坯运行的轨迹（或者说按铸机结构的外形）可把连铸机分为立式、立弯式、多点弯曲的立弯式、直结晶器的弧型、弧型、多半径弧型（椭圆形）和水平型等。图 9－3－1

表示这几种用于工业生产的连铸机型简图。近年来，随着连铸技术的发展，又开展了轮式连铸机的研究。

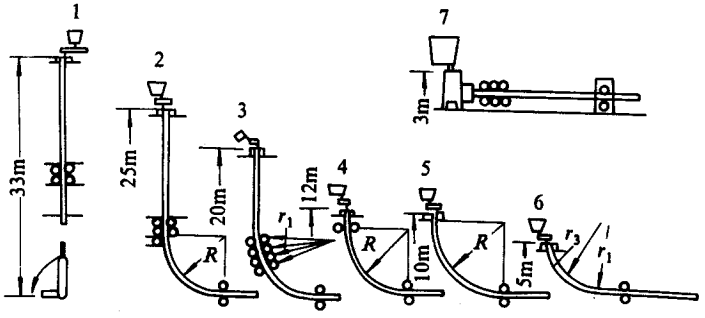


图 9－3－1　连铸机型简图

1—立式；2—立弯式；3—直结晶器多点弯曲；4—直结晶器弧型；5——弧型；6—多半径弧型(椭圆形)；7—水平式

(2)按铸坯断面的大小和形状可分为板坯、大方坯、小方坯、方一板坯复合式连铸机、圆坯、异形坯和薄板坯连铸机等。各种机型所能浇注的铸坯断面尺寸列于表 9－3－1。

(3)按铸坯所承受的钢水静压头，即铸机垂直高度 H 与铸坯厚度 D 比值的大小，可将连铸机分为高头型、标准头型、低头型和超低头型四种。各种机型的分类特征见表 9－3－2。

表 9－3－1　各种机型浇注的铸坯断面(mm × mm)

机型	最大断面	最小断面	经常浇注断面
板坯	300 × 2640 310 × 2500	130 × 250	180 × 700 ~ 300 × 200
大方坯	600 × 600	200 × 200	250 × 250 ~ 450 × 450 240 × 280 ~ 400 × 560
小方坯	160 × 160	55 × 55	90 × 90 ~ 150 × 150
圆坯	ϕ450	ϕ100	ϕ200 × ϕ300
异形坯	工字型 460 × 460 × 120 中空坯 ϕ450/ϕ100	椭圆型 120 × 140	

表 9－3－2　各种机型按钢水静压头分类特征

机型	H/D	结晶器型式	铸机型式
高头	> 50	直型	立式或立弯式
标准头	40 ~ 50	直型或弧型	带直线段的弧型或弧型
低头	20 ~ 40	弧型	弧型或椭圆型
超低头	< 20	弧型	椭圆型

随着炼钢和炉外精炼技术的提高。浇注前及浇注过程中对钢水纯净度的有效控制，低头和超低头连铸机的采用逐渐增多。

据 1988 年 1 月统计，全世界连铸机总台数为 1396 台。其中板坯连铸机 347 台，占 24.86%；大方坯连铸机 353 台，占 25.3%；小方坯连铸机 696 台，占 49.9%。按连铸坯的年产量算，板坯占 54%，大方坯占 16%，小方坯占 30%。各种机型所占的比例是：立式为 15%，弧型为 62%，多点弯曲弧型 10%，直结晶器弧型 6%，椭圆型 6%，其它如水平连铸机，轮式连铸机和旋转式连铸机占 1%。近年来新建的板坯、大方坯连铸机数量增多，小方坯连铸机相对减少。

二、各种连铸机的特点

(1)立式连铸机。立式连铸机结构如图 9－3－2 所示。它的主要设备有结晶器、二冷段和全凝固铸坯的剪切等均设置在同一垂直方向上。从连铸工艺上看，因垂直段很长，有利于钢水中夹杂物的上浮，铸坯各方向冷却条件较均匀，成分和夹杂物偏析较小。并且铸坯在整个凝固过程中不受弯曲、矫直等变形作用，即使裂纹敏感性高的钢种也能较顺利地连铸。但缺点是铸机设备高，钢水静压力大，设备较笨重，维修也不方便，安装立式连铸机需要很高的厂房或地坑，基建费用亦高。

(2)立弯式连铸机。立弯式连铸机是铸机机型演变过程中的一种过渡机型。它具有立式连铸机垂直浇注和凝固的特点，在结晶器下方一定距离，即在铸坯全凝固或接近全凝固时定点进行弯曲，把铸坯顶弯 90 度，最后定点矫直，使铸坯沿水平方向出坯。这种铸机既具有立式铸机夹杂物上浮条件好的优点，又比立式连铸机高度低，为它高度的四分之三，而且水平出坯，铸坯定尺长度不受限制，铸坯的运送也较方便。

立弯式只适用于浇注断面较小的铸坯，对于大断面铸坯来说，冶金长度很长，立弯式连铸机在降低设备高度方面的优点已不明显。这种铸机的铸坯在顶弯和矫直点内部应力较大，当铸坯变形率超过允许限度时容易产生内部裂纹。

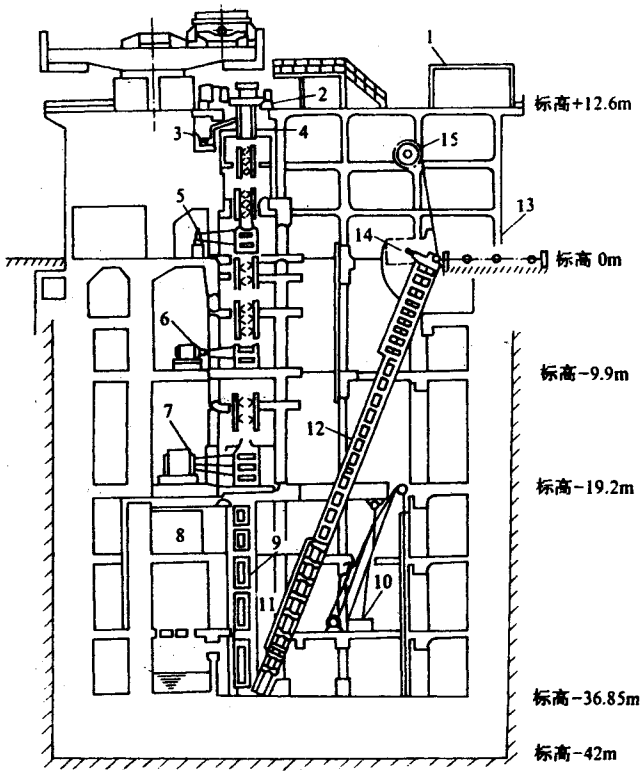


图 9－3－2　立式连铸机结构

1—浇注操作室；2—结晶器；3—结晶器振动装置；4—前导向段；5—驱动马达(第 4 导向段)；6—驱动马达(第 7 导向段)；7—驱动马达(拉矫机)；8—火焰切割机操作室；9—升降机导向机构；10—升降小车用卷扬机；11—倾翻装置；12—斜桥提升机桥架；13—斜桥提升机用卷场机；14—倾翻装置；15—出坯辊道

(3)弧形连铸机。弧形连铸机是国内外最主要的铸机型式。因结晶器形状不同,又分为弧形结晶器和直结晶器两种弧形连铸机。面椭圆形连铸机是一种多半径的弧形连铸机。

1)弧形结晶器弧形连铸机 其结构如 9－3－3 所示。由于结晶器是弧形的,它和二冷段夹辊均配置在四分之一圆弧段上,铸坯在垂直中心线切点位置被矫直,然后切割成定尺,从水平方向出坯。这种连铸机的特点是:铸机的高度基本上等于圆弧半径,通常把连铸机的外弧半径称作连铸机的圆弧半径。所以铸机高度低,仅为立式连铸机高度的三分之一;设备也较轻,安装和维护方便,相应的基本建设投资亦较低,因而得到广泛应用。铸坯在被矫直前,整个凝固过程沿着圆弧移动,没有附加的弯曲变形,并且设备高度低,坯壳承受钢水静压力小,铸坯不易产生鼓肚和内裂;但是钢水在凝固过程中,非金属夹杂物的上浮条件不好,有向铸坯内弧侧聚集的倾向,造成铸坯内部夹杂物分布不均,因此必须提高钢水的纯洁度。

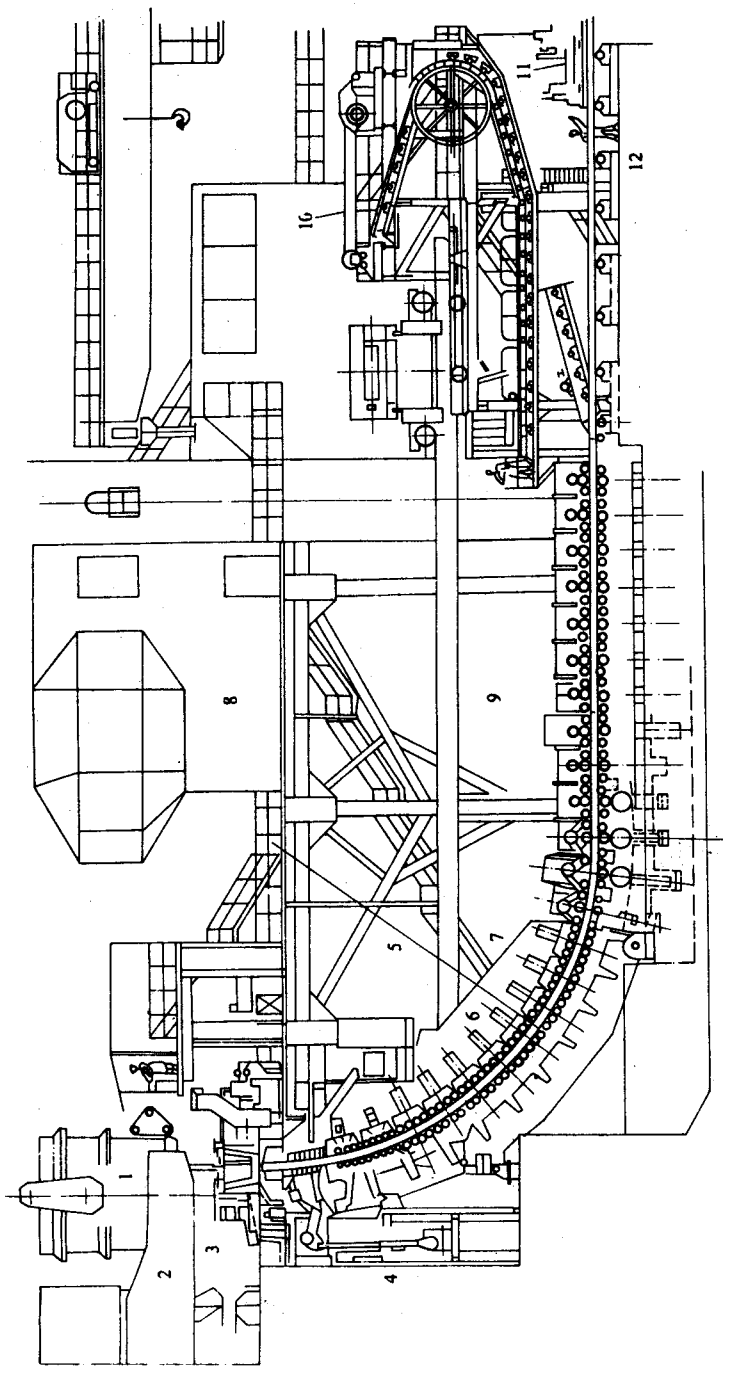


图 9-3-3　弧形连铸机结构图

1—钢水包;2—回转台;3—中间罐;4—振动装置;5—弧形半径;6—扇形段;
7—拉矫机;8—浇注平台;9—水平夹辊区;10—引锭杆存放装置;11—切割机;12—出坯辊道

2)直结晶器弧形连铸机 其结晶器是直的,在结晶器下面有一垂直直线段,带液心的铸坯经直线段后连续弯曲成弧形,然后把已凝固或带有液心的弧形铸坯矫直,再切割成定尺,从水平方向出坯。

这种铸机的特点是 钢水在直结晶器和二冷直线段凝固,有利于非金属夹杂物的上浮,防止夹杂物向内弧侧的富集,改善铸坯质量。但是,比弧形结晶器的铸机高,设备亦较复杂 铸坯在凝固过程中受弯曲和矫直两次变形,产生裂纹的可能性增加,因此,必须采用多点弯曲,多点矫直和压缩浇注等新技术,以保证铸坯在两相区不产生裂纹。这种机型多用来浇注板坯。

3)椭圆形连铸机 为了进一步降低铸机高度,把弧形连铸机的一个圆弧半径,变为多个圆弧半径 使四分之一圆弧变成四分之一椭圆弧,即从结晶器向下圆弧半径逐渐变大,将结晶器和二冷段夹辊都布置在四分之一椭圆弧上,所以称为椭圆形连铸机。其高度比弧形铸机低,又称它为超低头连铸机。这种机型除了圆弧区采用变半径,高度有所降低外,基本特点与弧形结晶器的铸机相同。但是在结晶器内的夹杂物几乎没有上浮机会,浇注优质钢种时,钢水必须充分净化 而且由于是多半径的,铸机的安装、对弧调整均较复杂,弧度的检查和铸机的维护也比较困难。

(4)水平连铸机。为了最大限度地降低铸机高度,把铸机的主要设备(中间包、结晶器、二冷段、拉坯机和切割设备)均布置在水平位置上,这种铸机称为水平连铸机,如图 9-3-4 所示。

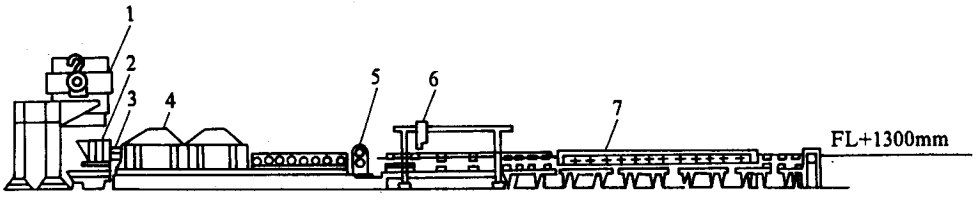


图 9-3-4　水平连铸机示意图

1—钢水包;2—中间罐;3—结晶器;4—二次冷却区;5—拉坯装置;6—同步切割机;7—冷床

钢水的水平连铸是近几年才应用于工业生产的。这主要是解决了钢水水平连铸的三大技术难题,它们是:

1)拉坯方式 由于水平连铸的中间包与结晶器是密封连接的,不能象普通连铸机那样使结晶器振动,若将铸坯从结晶器内连续拉出,将使坯壳拉断,并产生拉漏。通过不断的试验,终于找到了一种与结晶器振动相反的,使铸坯振动的拉坯方式。其振动曲线如

图 9－3－5 所示。拉坯方式是 :拉—停—反推—停。在一个拉坯周期内,坯壳的形成过程如图 9－3－6。

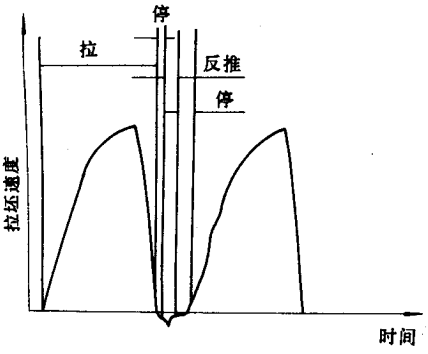


图 9－3－5　拉坯振动曲线示意图

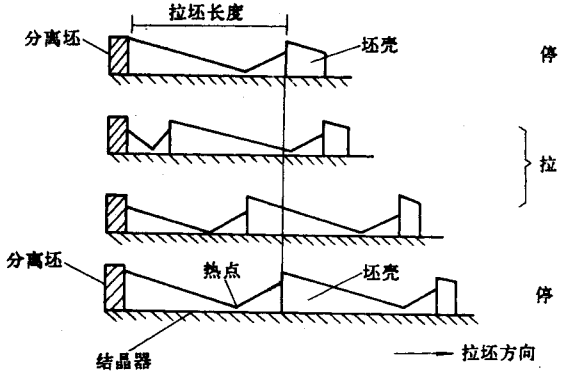


图 9－3－6　坯壳形成示意图

在一个拉坯行程后,形成了铸坯外壳。拉坯开始,坯壳从分离环拉出,新流入的钢水不仅在分离环处,而且在已凝固了的坯壳上结晶,因为这两处具有分别向结晶器和分离环或坯壳的两维传热 ;而中间只有向结晶器的一维传热,所以形成了坯壳最薄的热点。通过在一个拉坯周期中的反推和停拉,可使热点处坯壳增厚,形成稳固连接。下一个拉坯行程,整个新坯壳又从分离环处拉出。

通过拉坯装置,对拉坯长度、拉坯速度、反推量、反推时间和间歇时间都能单独调节,保证了水平连铸机拉坯工艺的需要。

2)结晶器 :结晶器如图 9－3－7 所示。采用较长的多级结晶器,将‘一冷’和‘二冷”结合在起,从而取消向铸坯喷水冷却。这种结晶器较长,结晶器内套分为多段,第一段为铜套段,带有锥度。其后是石墨套段,一般石墨套按工艺需要可分成三至五段。钢水进

入结晶器铜套段，坯壳迅速形成，然后，坯壳在石墨套段内继续生长，石墨套具有减缓冷却速度和减少拉坯阻力的双重作用，石墨套的锥度比铜套小。

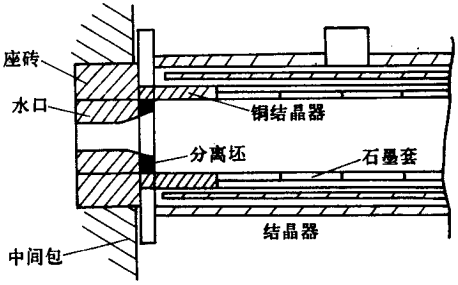


图 9－3－7　结晶器示意图

3）分离环：分离环是水平连铸所特有的，它安装在与水口相毗邻的结晶器入口处（见图 9－3－7）。在一般连铸中钢水凝固的起点是在结晶器弯月面处，沿结晶器内壁凝固，形成均匀的坯壳前沿。而水平连铸是全封闭浇注，在结晶器入口处安置分离环的作用是起到“人工液面”的功能，即钢水的凝固起点是在钢水与分离环的接触面上。凝固壳既要在分离环上开始生长，又要易于与分离环分离。所以，分离环的质量是保证铸坯质量和铸机产量极为重要的部件。分离环必须具有高的抗热性、耐磨耐浸蚀性和可加工性能。目前工业生产用得较好的是氮化硼基陶瓷分离环。

水平连铸机与弧形连铸机相比较，有以下特点：

A. 设备高度低、投资省、建设快，适合于现有炼钢车间的改造。

B. 中间包与结晶器全封闭，实现无氧化浇注，铸坯质量好。不需要结晶器钢液液面检测和控制系统。

C. 铸坯在凝固过程无弯曲和矫直，对于用弧形连铸机浇注有困难的合金钢和特殊钢可用水平连铸机浇注。

D. 所有设备安装在地面上，操作、事故处理和维护都较方便。

水平连铸机存在的主要问题是：所浇注的铸坯断面较小，它受拉坯时的惯性力限制。结晶器的石墨套和分离环价格较高，增加了铸坯成本。

（5）旋转式连铸机。旋转式连铸机（图 9－3－8）又称立式旋转离心连铸机，浇注圆坯。在浇注过程中结晶器、二冷段和拉坯机都与铸坯一起绕垂直中心线旋转。这种机型的主要技术特点是：

1）中间包钢水用弯曲长水口（图 9－3－9），从旋转切线方向上，注流偏心注入在结晶器半径三分之一弯月面处：结晶器和钢液同时旋转产生的离心力，使初生坯壳紧贴着结

晶器,从而改善一次冷却,有利于初生坯壳形成和组织细化;同时旋转形成的凹液面,使夹杂(渣)聚集在钢水表面的中心,便于清除;改善钢的纯净度和表面质量。

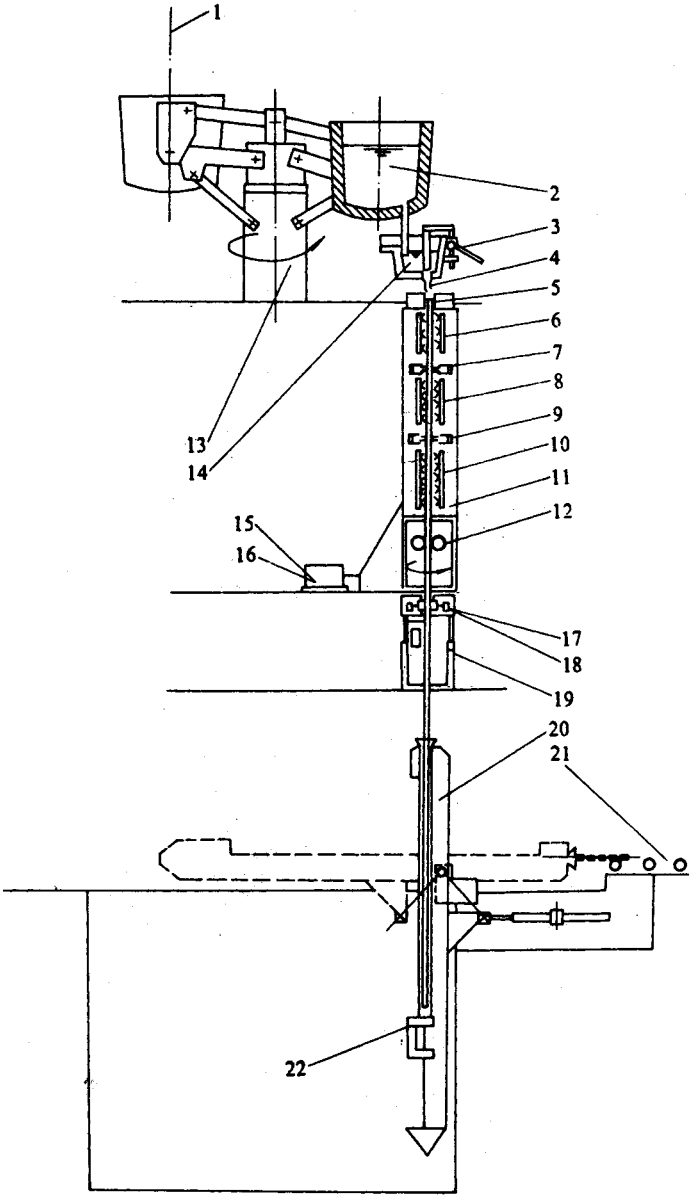


图 9-3-8　旋转式连铸机

1—用天车运送钢包;2—钢包;3—旋转塞棒;4—浇注管;5—结晶器;6—1 区;7—导辊;8—2 区;9—导辊 2;10—3 区;11—机架框;12—拉坯机;13—回转台;14—中间罐;15、16—旋转和拉坯用马达;17、18—剪切装置和飞锯;19—滑动千斤顶;20—翻倒机;21—输出场地;22—小车

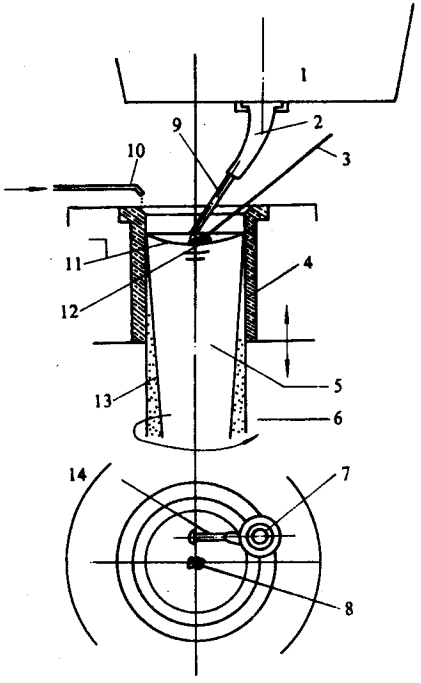


图 9－3－9　旋转结晶器的浇注

1—中间包；2—浇注管；3—用于捞渣的铁杆；4—旋转振动结晶器；5—液相穴；6—圆坯；7—浇注弯管；8、12—浮在中心的渣；9、14—切向注流；10—菜籽油；11—旋转凹液面；13—凝固壳

2)铸坯在旋转过程中凝固,钢水冲击凝固中的柱状晶,使其断裂游离,从而扩大铸坯的等轴晶区,减轻铸坯的中心疏松。

3)铸坯在随结晶器旋转的同时向下拉出,铸坯表面的振动痕迹轻。

旋转连铸法适用于浇注无缝钢管坯和其它圆坯。铸坯可以不经过表面清理就直接穿孔轧制钢管。

(6)轮带式连铸机(图 9－3－10)。这种铸机的结晶器是由冷却钢带和轮缘为槽形的铸造轮(冷却轮)组成,钢水从中间包注入弧形结晶器内形成坯壳,当铸造轮转过 90°时,坯壳随铸造轮转动的同时继续冷却和凝固,并将铸坯送出结晶器外。,为了使铸坯从铸造轮脱出,在结晶器出口处用平滑的导板把铸坯引出,铸坯通过由几组辊道组成的预矫区后,进入拉矫机被矫直。

由于轮带式连铸机结晶器与凝固壳之间无相对滑动,不仅能使铸坯稳定凝固和冷却,结晶器也不用振动,因而能得到无振痕的表面光滑的铸坯。通过对铸造轮直径的合理设计,可使其与冷却钢带组成的结晶器达到足够的长度,可以实现高拉速。铸坯可直

接轧制，实现连铸连轧。尤其是用弧型连铸机难以浇注的钢种，用轮带式连铸机生产能取得好的效果。

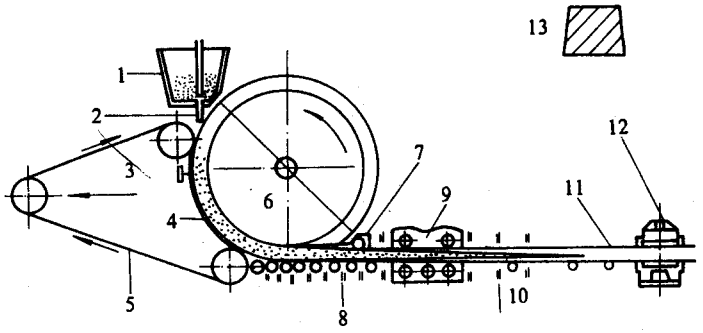


图 9－3－10　轮带式连铸机示意图

1—中间罐；2—水口；3—液面控制器；4—冷却钢带；5—驱动钢带；6—冷却轮；7—导板；8—导向辊和矫直辊；9—拉矫机；10—喷水冷却；11—铸坯；12—立轧机架；13—典型的铸坯横断面

第二节　连铸机的主要设计参数

连铸机的主要设计参数有：铸坯断面、拉坯速度、圆弧半径和冶金长度等。这些设计参数是决定铸机设备和总体尺寸的主要依据。

一、铸坯断面

在确定浇注的钢种之后，铸坯断面的尺寸和形状是首先要解决的问题。铸坯的断面尺寸是确定铸机机型和功能的设计依据。确定铸坯断面主要是根据连铸机浇注的实际可能和轧机对坯料断面的要求。目前连铸机生产的铸坯形状和尺寸范围见表 9－3－3。确定铸坯断面尺寸的原则是：

(1)根据轧材需要的压缩比确定：铸坯断面积与轧材断面积的比值称为压缩比。对某些钢材其最小压缩比可以是 3(例如用连铸板坯轧制厚板时)。为了使轧材内部组织致密，具有较好的物理性能，对碳素钢和低合金钢一般取最小压缩比为 6，对不锈钢及耐热钢等一般取最小压缩比为 8，对高速钢及工具钢等一般取最小压缩比为 10。不同产品要

求的压缩比是不同的,考虑到一定的安全系数一般取 8 ~ 10。

表 9 – 3 – 3　铸坯断面与轧机的配合

轧机规格	铸坯断面 mm × mm
高速线材轧机	方坯:100 × 100 ~ 140 × 140
400/250 轧机	方坯:90 × 90 ~ 120 × 120 扁坯:< 100 × 150
500/350 轧机	方坯:120 × 120 ~ 150 × 150 扁坯:< 150 × 180
650 轧机	方坯:140 × 140 ~ 200 × 200 扁坯:< 160 × 280
2300 中板轧机	板坯:(120 ~ 200) × (700 ~ 1000)
4200 中厚板轧机	板坯:300 × (1900 ~ 2200)
4800 中厚板轧机	板坯:350 × 2400
1700 热连轧机	板坯:(200 ~ 250) × (700 ~ 1600)
2050 热连轧机	板坯:(210 ~ 250) × (900 ~ 1930)

(2)根据炼钢炉容量和铸机生产能力的匹配来考虑:铸坯断面和轧机的合理配合见表 9 – 3 – 3。对于大型炼钢炉一般要配大断面的连铸机或多流连铸机。

(3)要适合连铸工艺的要求:例如采用浸入式水口浇注时,方坯尺寸应在 150mm 以上,小板坯的厚度应在 120mm 以上。矩形坯的宽度与厚度的比值一般为 1.2 ~ 1.4,轧制时坯端产生的鱼尾状切头长度和用方坯轧制时相当,由于矩形坯的最终凝固区是集中在一条线上,所以中心缩孔及中心偏析程度都比方坯有所改善。

一般来说,铸坯断面尺寸越大,越容易保证质量;断面尺寸越小,对减少投资及操作费用越有利;应寻求保证铸坯质量的最小的经济断面。

二、冶金长度

铸机的冶金长度是指从结晶器内钢液面到拉矫机最后一对辊子中心线的实际长度,即铸机长度。它标志着铸坯液相穴深度的最大极限位置。因此,铸机的冶金长度与铸坯的液心长度密切相关。铸坯的液心长度是铸坯从结晶器内钢液面到钢液全部凝固时铸坯的长度。液心长度可根据凝固定律计算,铸坯完全凝固的厚度 δ 为:

$$S = \frac{D}{2} = K\sqrt{L} = K\sqrt{\frac{L_{液}}{V_{拉}}} \quad (\text{mm}) \tag{9-3-1}$$

整理后得到液心长度 $L_{液}$：

$$L_{液} = \frac{D^2 \cdot V_{拉}}{4K^2} \quad \text{m} \tag{9-3-2}$$

式中　$L_{液}$——铸坯液心长度，m；

D——铸坯厚度，mm；

$V_{拉}$——拉坯速度，m/min；

K——综合凝固系数，mm/$\sqrt{\text{min}}$。

铸机的综合凝固系数(即平均的凝固系数)是包括结晶器在内的全区域的平均凝固系数。对于板坯来说，结晶器内的凝固系数 $K_{结} = 13 \sim 20$，而综合凝固系数 $K = 25 \sim 29$。水雾强冷时(铸坯表面温度为 825℃) $K = 28 \sim 29$，弱冷时(铸坯表面温度 950℃) $K = 25 \sim 26$，气—水雾化冷却时 $K = 26 \sim 27$。宝钢板坯连铸机的综合凝固系数 $K = 26.5$。

式(9-3-2)表明，液心长度和铸坯厚度的平方及拉坯速度成正比。

在连铸机设计时，不仅要考虑铸坯可能达到的最大拉速，还要考虑到投产后连铸技术的发展，进一步提高拉坯速度的可能性。因此，根据所能浇注的最大铸坯厚度和最大拉坯速度计算得到的液心长度就是连铸机的冶金长度。即：

$$L = \frac{D_{max}^2 \cdot V_{max}}{4K^2} \quad (\text{m}) \tag{9-3-3}$$

式中　L——铸机的冶金长度，m；

D_{max}——最大的设计铸坯厚度，mm；

V_{max}——最大的设计拉坯速度，m/min；

K——综合凝固系数，mm/$\sqrt{\text{min}}$。

冶金长度从本质上讲，就等于液心长度。由于实际拉坯速度一般都低于最大设计拉速，因此液心长度总是小于铸机的冶金长度。另外，浇注时拉坯速度是经常发生变化的，因而液心长度也随之变化，拉坯速度越快，液心也就越长，反之则短；而铸机的冶金长度是不变的，是一定值。

三、圆弧半径

铸机的圆弧半径是指铸坯弯曲时的外弧半径(m)。圆弧半径是决定弧形连铸机的总高度和可能浇注的最大铸坯厚度的一个重要参数。铸机圆弧半径的大小可根据理论计

算和经验来确定。

(1)按铸坯进入拉矫机前要完全凝固来确定：对于不采用多对拉矫辊的连铸机，铸坯在进入拉矫机之前必须完全凝固。冷却区的总长度(从结晶器内钢液面至第一对拉矫辊间的弧线长度)根据图 9－3－11，可按下式计算：

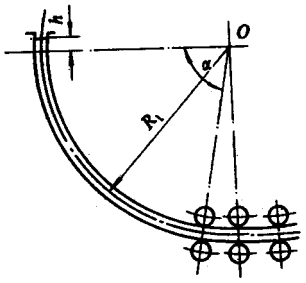


图 9－3－11　冷却区长度计算简图

$$L_{冷}=\frac{2\pi R_1\alpha}{360}+h \qquad \text{m} \tag{9-3-4}$$

式中　R_1——铸坯中心圆弧半径，m；

α——铸机圆弧中心水平线与第一对拉辊中心线的夹角，度；

h——圆弧中心水平线至结晶器内钢液面之间的距离，m。当采用弧形结晶器时 $h=\frac{L}{2}-0.1$，L 为结晶器的长度(m)；当采用直结晶器时 $h=h_1+L-0.1$，h_1 为二冷区直线段的长度(m)。

弧形连铸机的圆弧半径应保证冷却区总长度等于或大于液心长度，即：

$$\frac{2\pi R_1\alpha}{360}+h\geqslant\frac{D^2}{4K^2}V$$

$$R_1\geqslant\left(\frac{D^2}{4K^2}V-h\right)\times\frac{57.3}{\alpha} \qquad \text{m} \tag{9-3-5}$$

当铸坯采用‘液心矫直’时，允许铸坯液心延伸到拉矫机内。此时，在计算冷却区总长度时应把拉矫区的长度计算在内。

(2)按铸坯矫直时所允许的表面延伸率来确定：弧形连铸机浇注出的弧形铸坯在进行矫直时内弧表面受拉伸，外弧表面受压缩。当受拉伸面的延伸变形率超过铸坯表面允许的延伸率时，就会产生裂纹。因此，矫直时的延伸率必须小于允许的延伸率值。

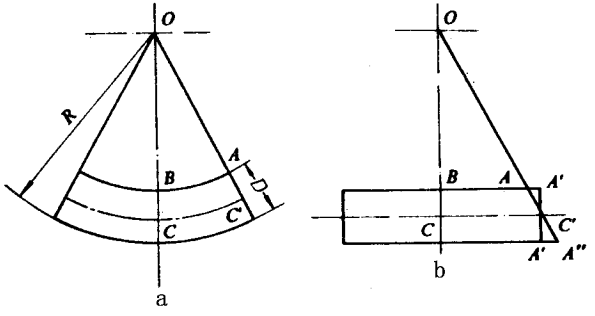


图 9－3－12　铸坯矫直变形示意图

a—矫直前；b—矫直后

由 9－3－12 表示铸坯矫直前后的变形情况。矫直时内弧表面延伸 AA'，外弧表面压缩 $A'A''$。则铸坯内弧表面延伸率 ε 为：

$$\varepsilon = \frac{A'B - AB}{AB} \times 100\% = \frac{AA'}{AB} \times 100\%$$

因为 $\triangle OAB$ 与 $\triangle AA'C'$ 相似，所以：

$$\varepsilon = \frac{A'C}{OB} \times 100\% = \frac{0.5D}{R - D} \times 100\%$$

由于 $R \gg d$，所以可近似写成：

$$\varepsilon = \frac{0.5D}{R} \times 100\% \qquad (9-3-6)$$

为保证铸坯在矫直时不产生裂纹，铸坯的内弧表面延伸率必须小于允许的表面延伸率 $[\varepsilon]_{表}$，即：$\varepsilon \leqslant [\varepsilon]_{表}$，所以铸机的圆弧半径应为：

$$R \geqslant \frac{0.5D}{[\varepsilon]_{表}} \qquad (9-3-7)$$

$[\varepsilon])_{表}$ 主要取决于浇注钢种，铸坯温度以及对铸坯表面质量要求。对普碳钢和低合金钢的允许延伸率 $[\varepsilon]_{表} = 1.5 \sim 2.0\%$。

总之，连铸机圆弧半径的确定，通常根据以上计算的结果，结合实际使用的要求，使其大于或等于其中最大值。

铸机的圆弧半径通常还可以按铸坯厚度（D）的若干倍数来确定：

$$R = (30 \sim 50) \times D \qquad \text{m} \qquad (9-3-8)$$

对于生产普碳钢、低合金钢的方坯连铸机：$R = (30 \sim 40) \times D$（m）。对于生产优质钢、高合金钢的大方坯和板坯连铸机：$R = (40 \sim 50) \times D$（m）。

第四章　弧形连铸机设备

第一节　盛钢桶及其运载设备

一、盛钢桶

盛钢桶又称为钢包、钢水包、大包等；它是用于盛接钢液并进行浇注的设备，也是钢液炉外精炼的容器。

1. 盛钢桶尺寸的确定

盛钢桶的容量应与炼钢炉的最大出钢量相匹配；考虑到出钢量的波动，留有 10% 的余量和一定的炉渣量；大型盛钢桶的炉渣量应是金属量的 3% ~ 5%，小型盛钢桶的渣量为 5% ~ 10%；除此之外，盛钢桶上口还应留有 200mm 以上的净空；作为精炼容器时要留出更大的净空。

为了减少热量的损失和便于夹杂物的上浮，盛钢桶的高宽比（砌砖后深度 H 和上口内径 D 之比）一般取 1∶1 ~ 2∶1；为了吊运的稳定，耳轴的位置应比满载重心高 200 ~ 400mm；为便于清除残钢残渣，盛钢桶桶壁应有 10% ~ 15% 的倒锥度；大型盛钢桶桶底应向水口方向倾斜 3% ~ 5%。

盛钢桶各部位尺寸标志和计算可参照图 9 - 4 - 1 和表 9 - 4 - 1。

2. 盛钢桶的结构

盛钢桶由外壳、内衬、和注流控制机构三部分组成。如图 9 - 4 - 2 所示。

表 9－4－1　盛钢桶各部位尺寸关系

$D_b = H_b = 0.667\sqrt[3]{P}$	$D_H = 0.567\sqrt[3]{P}$	$V = 0.673D_b^3$
$D_1 = 1.14D_b$	$H_1 = 1.1D_b$	$\delta_c = 0.01D_b$
$D_2 = 1.16D_b$	$H_2 = 1.112D_b$	$\delta_b = 0.012D_b$
$D_3 = 0.99D_b$	$T_c = 0.07D_b$	$W_1 = 0.533D_b$
$D_4 = 1.01D_b$	$T_d = 0.1D_b$	$W_2 = 0.376D_b$
$Q = 0.27P + W + W'$	$Q' = 1.535P + W + W'$	$y_0 = 0.539D_b$
$d = 200 \sim 400$		

注：(1)表中符号：P—正常出钢量；V—总体积；Q—盛钢桶重，Q'—超载 10% 时的总重；W_1—衬重；W_2—壳重；W—注流控制机械重；W—腰箍及耳轴重 符号与图 9－4－1 相对应。

(2)表中单位 物质质量为 kg，尺寸为 mm。

(3)本表为简易计算。

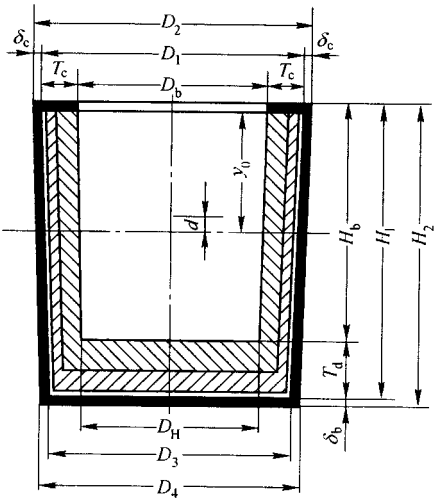


图 9－4－1　盛钢桶各部位尺寸

盛钢桶的外壳一般由锅炉钢板焊接而成，桶壁和桶底钢板厚度分别为 14～30mm 和 24～40mm 之间，为了保证烘烤时水分顺利排出，在盛钢桶外壳上钻有一些直径为 8～10mm 的小孔。大型盛钢桶还安有底座。盛钢桶外壳腰部焊有加强箍和加强筋，耳轴对称地安装在加强箍上。

盛钢桶内衬与高温钢水、炉渣长时间接触，受到注流冲刷和炉渣侵蚀，尤其是用于炉外精炼的盛钢桶，受到的侵蚀更严重，内衬被侵蚀不仅降低了盛钢桶的寿命，还增加了钢

液中的夹杂物含量。因此盛钢桶的内衬选用合适的耐火材料对改善钢的质量、稳定操作、提高生产效率有着重要的意义。

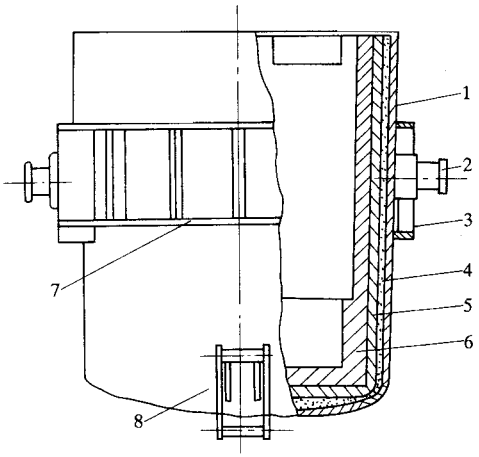


图 9－4－2　盛钢桶结构

1—桶壳；2—耳轴；3—支撑座；4—保温层；
5—永久层；6—工作层；7—腰箍；8—倾翻吊环

盛钢桶内衬一般由保温层、永久层和工作层组成。

保温层紧贴外壳钢板，厚约 10～15mm，主要作用是减少热损失，常用石棉板砌筑；永久层厚约 30～60mm，为了防止盛钢桶烧穿事故，一般由有一定保温性能的粘土砖或高铝砖砌筑；工作层直接与钢液、炉渣接触，受到化学侵蚀、机械冲刷和急冷急热作用及由其引起的剥落。因此可根据盛钢桶工作环境砌筑不同材质、厚度的耐火砖，可使内衬各部位损坏同步，这样从整体上提高盛钢桶寿命。

如盛钢桶的桶壁和桶底可砌筑高铝砖、蜡石砖或铝碳砖，其耐蚀性能良好，还不易挂渣。盛钢桶的渣线部位，用镁碳砖砌筑，不仅耐熔渣侵蚀，其耐剥落性能也好；当然还可以使用耐蚀性能更好的锆英石砖，但价格贵些。盛钢桶内衬若使用镁铝浇注料整体浇灌，在高温作用下 MgO 与 Al_2O_3 反应生成铝镁尖晶石结构，改善了内衬抗渣性能和耐急冷急热性，提高了盛钢桶使用寿命。目前盛钢桶内壁还有用镁铝不烧砖砌筑，使用效果也不错。

盛钢桶使用前必须经过充分烘烤。

3. 滑动水口

盛钢桶通过滑动水口开启、关闭来调节钢液注流。

滑动水口由上水口、上滑板、下滑板、下水口组成，如图 9－4－3。靠下滑板带动下水

口移动调节上下注孔间的重合程度控制注流大小 驱动方式有液压和手动两种。

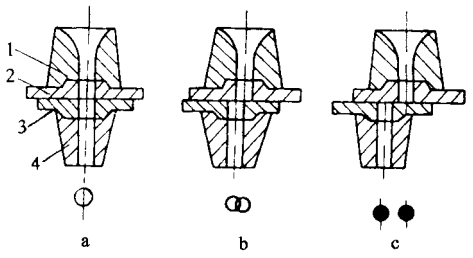


图 9－4－3　滑动水口控制原理图

a—全开 ;b—半开 ;c—全闭

1—上水口 ;2—上滑板 ;3—下滑板 ;4—下水口

为了防止注流在上水口和上滑板孔中冻结,提高盛钢桶水口自开率,可以采用两种方式 即在下滑板上安装透气砖,通过吹氩搅动钢液防止冻结 这种方法效果较好,并具有促进夹杂物上浮的作用。另一种是预先在上水口和上滑板注孔中填充镁砂、硅钙合金粉等材料或专门的引流砂以防止冻结,但有时仍不能自开。此外,填料也造成钢水的污染。

滑动水口由于承受高温钢渣的冲刷、钢液静压力和温度急变的作用 因此耐火材料要耐高温、耐冲刷、耐急冷急热、抗渣性能好,并具有足够的高温强度 从外形看必须平整、光滑。目前使用的耐火材料种类较多,如 :高铝质、镁质、镁铝复合滑板等,还有其他新型耐火材料 也有通过沥青浸煮滑板来提高滑板寿命的。

滑动水口在盛钢桶外安装,改善了劳动条件,安装速度快,可实现‘红包’周转。滑动水口可连续使用 3 ~ 5 次,节省了耐火材料,降低了夹杂物含量,也有利于炉外精炼。滑动水口有时也发生水口结瘤、缩径、断流等故障。

4. 长水口

长水口又称保护套管,用于盛钢桶与中间罐之间保护注流不被二次氧化,同时也避免了注流的飞溅以及敞开浇注的卷渣问题。

目前长水口的材质有熔融石英质和铝碳质两种。

熔融石英质长水口主要成分是 SiO_2 这种水口导热系数小,有较高的机械强度和化学稳定性,耐酸性渣的侵蚀 可以不烘烤使用。用于浇注一般钢种,含锰高的钢种不宜使用。

铝碳质长水口是用刚玉和石墨为主要原料制做的,主要成分是 Al_2O_3。对钢种的适

应性较强，尤其适合浇注特殊钢种。耐侵蚀性能好，对钢液污染小。

长水口需烘烤后使用。目前在铝碳质长水口表面复合防氧化涂层，在 700～900℃范围内可形成釉层，防止了碳的氧化，提高了使用寿命。现在还有一种不经烘烤就可以使用的铝碳质长水口。

长水口的安装主要饲用杠杆固定装置。可以先将长水口放入杠杆机构的托圈内（图 9－4－4），然后与中间罐同时烘烤。当盛钢桶注流引流正常以后，旋转长水口与盛钢桶下水口紧密连接，并接吹氩密封管对长水口接口氩封。

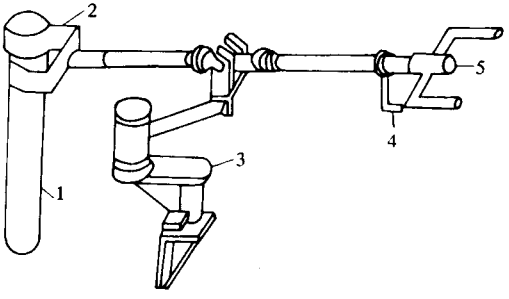


图 9－4－4　长水口的安装示意图

1—长水口；2—托圈；3—支座；4—配重；5—操作杆

二、盛钢桶运载设备

供给连铸用的合格钢液经吹氩调温或精炼处理后，将盛钢桶送到中间罐上方进行浇注。目前承托盛钢桶的方式主要有盛钢桶回转台和盛钢桶支架等。

盛钢桶回转台能够在转臂上同时承放两个盛钢桶，一个用于浇注，另一个处于待浇状态。回转台可以减少换桶时间，有利于实现多炉连浇；而转台本身即可完成钢液的异跨运输，对连铸生产进程的干扰也少，并且占地面积小。

盛钢桶回转台有直臂式和双臂式两种。

图 9－4－5 是直臂式回转台。两个盛钢桶座落在同一直臂的两端，同时作回转和升降运动；图 9－4－5b、9－4－5c 是双臂式回转台，双臂可以单独回转 90°，单独升降；盛钢桶转台均设有独立的称量系统；为了适应连铸工艺的要求，目前盛钢桶回转台趋于多功能化，增加了吹氩、调温、倾翻倒渣、加盖保温等功能。

盛钢桶回转台的驱动装置是由电动机构和事故气动机构组成。正常操作时由电力驱动；发生事故时，启动气动马达工作，以保证生产安全。转臂的升降可用机械或液压驱动。

为了保证回转台定位准确，驱动装置还设有制动和锁定机构。还有一种可承放多个盛钢桶的支撑架，也称为盛钢桶移动车。

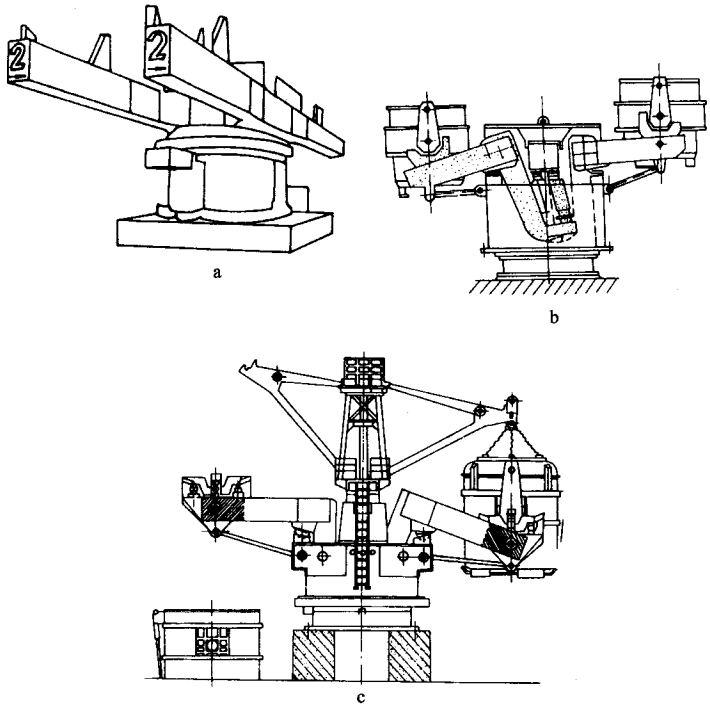


图 9－4－5　盛钢桶回转台

a—直臂式；b—双臂单独升降式；c—带钢水包加盖功能

第二节　结 晶 器

结晶器是一个水冷的钢锭模，是连铸机非常重要的部件，称之为连铸设备的“心脏”。钢液在结晶器内冷却、初步凝固成型，且形成一定的坯壳厚度。这一过程是在坯壳与结晶器壁连续、相对运动下进行的。为此，结晶器应具有良好的导热性和刚性，不易变形；重量要小，以减少振动时的惯性力；内表面耐磨性要好，以提高使用寿命；结晶器结构要简单，以便于制造和维护。

一、结晶器的构造

按结晶器的外形可分为直结晶器和弧形结晶器。直结晶器用于立式、立弯式及直弧形连铸机，而弧形结晶器用在全弧形和椭圆形连铸机上。从其结构来看，有管式结晶器和组合式结晶器，小方坯及矩形坯多采用管式结晶器，而大型方坯、矩形坯和板坯多采用组合式结晶器。

1. 管式结晶器

管式结晶器的结构如图 9－4－6 所示。其内管为冷拔异形无缝铜管，外面套有钢质外壳，铜管与钢套之间留有约 7mm 的缝隙通以冷却水，即冷却水缝。铜管和钢套可以制成弧形或直形。铜管的上口通过法兰用螺钉固定在钢质的外壳上，见图 9－4－6，铜管的下口一般为自由端，允许热胀冷缩，但上下口都必须密封，不能漏水。结晶器外套是圆筒形的。外套中部有底脚板，将结晶器固定在振动框架上。

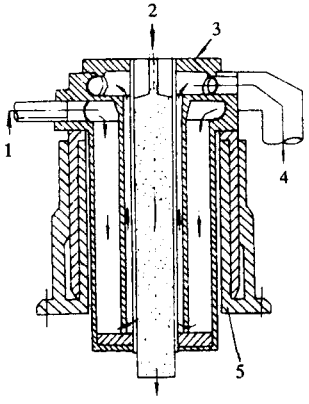


图 9－4－6　管式结晶器

1—冷却水入口；2—钢液；3—夹头；

4—冷却水出口；5—油压缸

带锥度弧形结晶器的铜管可用仿弧形刨床加工成型，也可在带内芯的外模中压力成型或爆炸成型。

管式结晶器结构简单，易于制造、维修，广泛应用于中小断面铸坯的浇注，最大浇注断面为 180mm × 180mm。

另外有的管式结晶器取消水缝，直接用冷却水喷淋冷却，如图 9－4－7 所示。

结晶器铜管壁厚为 10 ~ 15mm，磨损后可加工修复，但最薄不能小于 3 ~ 6mm。考虑铸坯的冷却收缩，在铜壁的角部应有一定的圆角过渡。

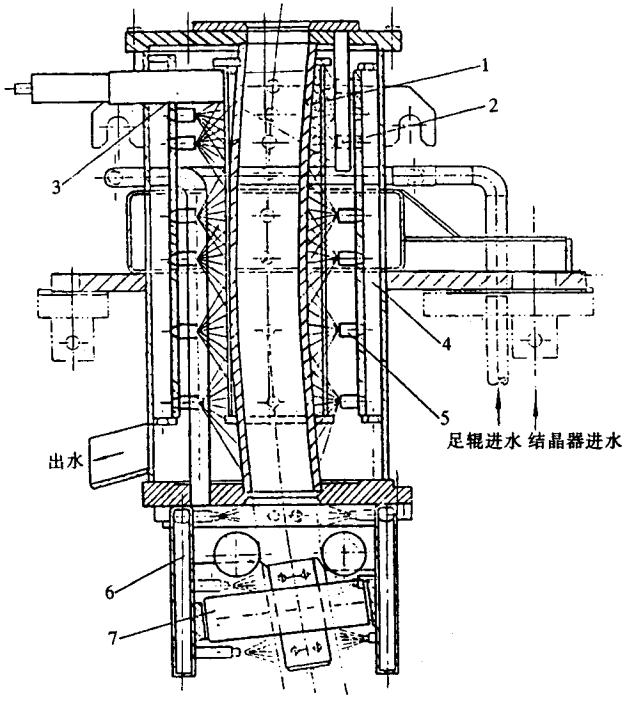


图 9－4－7　喷淋式管式结晶器

1—结晶器铜管；2—放射源；3—闪烁计数器；

4—结晶器外壳；5—喷嘴；6—足辊架；7—足辊

2. 组合式结晶器

组合式结晶器是由 4 块复合壁板组合而成。每块复合壁板都是由铜质内壁和钢质外壳组成。在与钢壳接触的铜板面上铣出许多沟槽形成中间水缝。复合壁板用双螺栓连接固定，见图 9－4－8、9－4－9。冷却水从下部进入，流经水缝后从上部排出。4 块壁板有各自独立的冷却水系统。

在 4 块复合壁板内壁相结合的角部，垫上厚 3～5mm 并带 45°倒角的铜片，以防止铸坯角裂。

现已采用在线宽度可调的板坯结晶器。可用手动、电动或液压驱动调节结晶器的宽度。

内壁铜板厚度在 20～50mm，磨损后可加工修复，但最薄不能小于 10mm。

对弧形结晶器来说，两块侧面复合板是平的，内外弧复合板做成弧形的。而直形结晶器四面壁板都是平面状的。

3. 漏钢检测装置

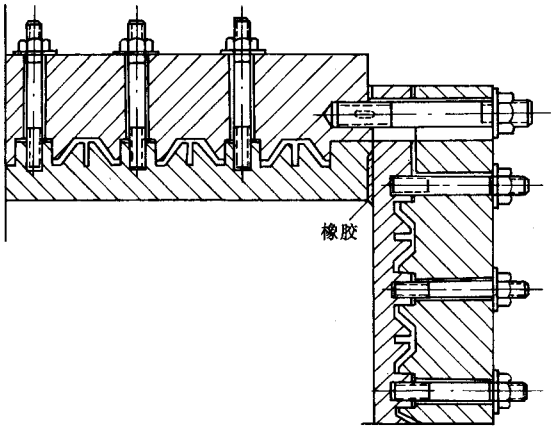


图 9－4－8　铜板和钢板的螺钉连接形式

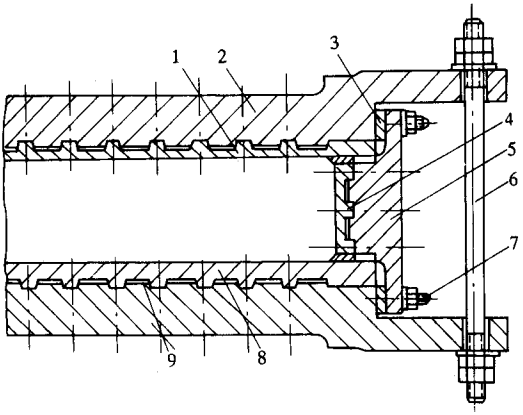


图 9－4－9　组合式结晶器

1—外弧内壁；2—外弧外壁；3—调节垫块；4—侧内壁；
5—侧外壁；6—双头螺栓；7—螺栓；8—内弧内壁；9—一字型水缝

为了能够预报结晶器漏钢事故，在结晶器四面铜壁外通过均布的螺栓埋入多套康铜热电偶，热电偶测到的温度数据输入计算机或在仪表上显示，若某一点温度突然升高，说明这一点附近出现了漏钢。热电偶的套数越多，检测也越精确，热电偶安装部位及装置如图 9－4－10 所示。

也有根据结晶器内壁与铸坯坯壳间摩擦力的大小来测定结晶器内坯壳是否有漏钢。

4. 多级结晶器

随着连铸机拉坯速度的提高，出结晶器下口的铸坯坯壳厚度越来越薄，为了防止铸坯变形或出现漏钢事故，采用多级结晶器技术。它还可以减少小方坯的角部裂纹和菱形

变形。

多级结晶器即在结晶器下口安装足辊、铜板或冷却格栅。

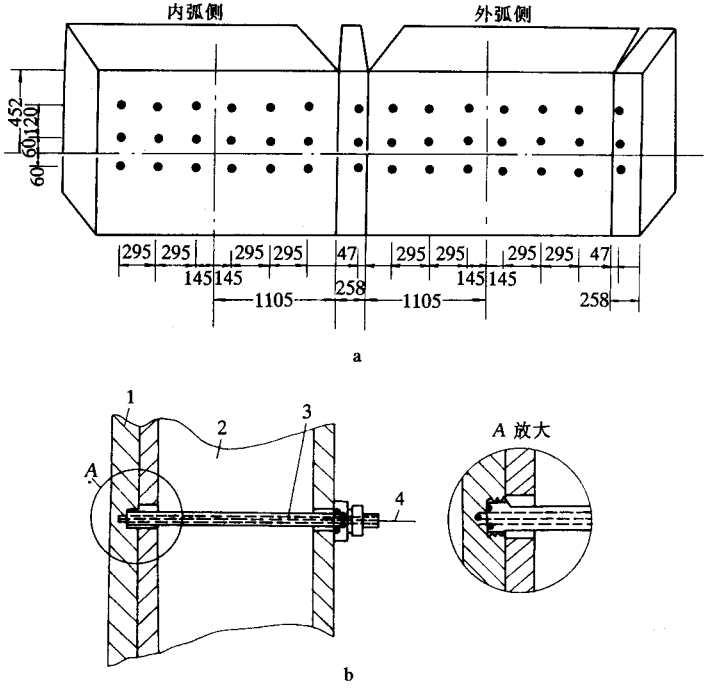


图 9－4－10　结晶器热电偶检测漏钢装置

a—结晶器热电偶安装位置(单位 mm)；b—热电偶安装图

1—铜板；2—冷却水；3—螺栓；4—热电偶

(1)足辊

在结晶器的下口四面装有多对密排夹辊，其直径较小且具有足够的刚度，辊间安有喷嘴喷水冷却，这些小辊称为足辊，见图 9－4－11a。为了防止足辊对铸坯造成横向应力，足辊的安装位置应与结晶器对中。这种装置拉坯阻力较小，但冷却效果欠佳，足辊若发生变形会造成铸坯鼓肚或菱变。

(2)冷却板

在结晶器下口海面安装一块铜板，且在铸坯角部喷水冷却，铜板靠弹簧支撑紧贴在坯壳表面，保证了铸坯的均匀冷却，如图 9－4－11b。这种装置拉坯阻力稍大，但冷却效果很好，主要用在小方坯连铸机管式结晶器上。有的结晶器在冷却板下还安装 1～2 对足辊。

(3)冷却格栅

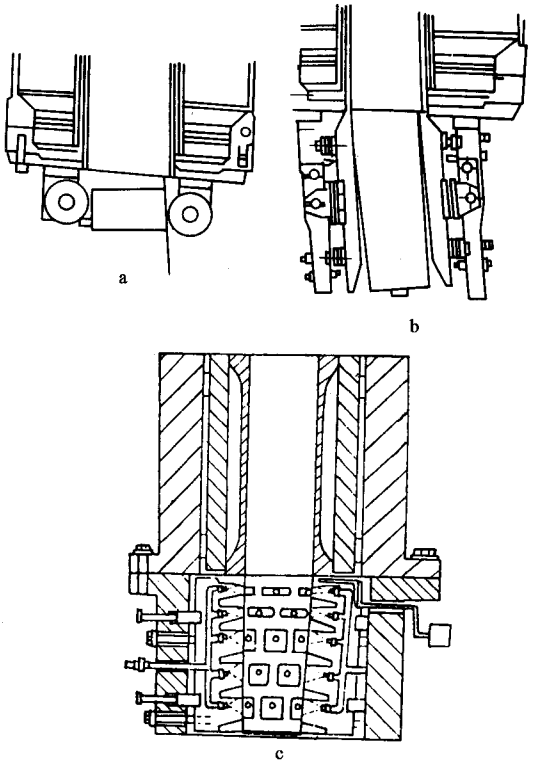


图 9－4－11　多级结晶器结构示意图

a—足辊；b—冷却板；c—冷却格栅

这是一种带有许多扁方孔的铜板，也叫格板或格栅。冷却水通过方孔直接喷射在铸坯表面。结晶器下口每面安一块冷却格板，格板背面有加强筋板。为了便于清除氧化铁皮和其他杂质，筋板略呈倾斜，见图 9－4－11 所示。这种装置冷却效果较好，拉坯阻力略大，发生漏钢后清理困难。

二、结晶器的重要参数

1. 结晶器断面尺寸

冷态铸坯的断面尺寸为公称尺寸，结晶器断面尺寸应根据铸坯的公称尺寸来确定。由于铸坯冷却凝固收缩，尤其弧形铸坯在矫直时还会引起铸坯的变形，为此要求结晶器的内腔断面尺寸应比铸坯公称尺寸略大些。

通常是根据经验公式确定结晶器断面尺寸，参见以下公式。

(1)圆坯结晶器

$$D_{下} = (1 + 2.5\%) D_0 \qquad (9-4-1)$$

式中　$D_{下}$——结晶器下口内腔直径，mm；

D_0——铸坯公称直径，mm。

(2)方坯和矩形坯结晶器

考虑到铸坯可能压缩与宽展：

$$D_{下} = (1 + 2.5\%) D_0 + c \tag{9-4-2}$$

$$B_{下} = (1 + 1.9\%) B_0 - c \tag{9-4-3}$$

式中　$D_{下}$——结晶器下口内腔厚度，mm；

D_0——铸坯公称厚度，mm；

$B_{下}$——结晶器下口内腔宽度，mm；

B_0——铸坯公称宽度，mm；

c——增减值，按断面尺寸大小选取。

断面 $< 160\text{mm} \times 160\text{mm}$ 时，$c = 1\text{mm}$；

断面 $> 160\text{mm} \times 160\text{mm}$ 时，$c = 1.5\text{mm}$；

方坯结晶器内腔尺寸厚度与宽度尺寸相同可用下式确定：

$$D_{下} = (1 + 2.5\%) D_0 \tag{9-4-4}$$

$$B_{下} = (1 + 2.5\%) B_0 \tag{9-4-5}$$

管式结晶器内腔应有合适的圆角半径。铸坯断面 $< 100\text{mm} \times 100\text{mm}$，圆角半径为 8mm 铸坯断面在 $141\text{mm} \times 141\text{mm} \sim 200\text{mm} \times 200\text{mm}$ 之间，圆角半径为 12mm；在铸坯断面 $> 201\text{mm} \times 201\text{mm}$，圆角半径为 15mm。

(3)板坯结晶器

结晶器宽边

$$B_{上} = [1 + (1.5\% \sim 2.5\%)] B_0 \tag{9-4-6}$$

$$B_{下} = [1 + (1.5\% \sim 2.5\\%) - \varepsilon_{宽}\%] B_0 \tag{9-4-7}$$

式中　$B_{上}$——结晶器上口宽度，mm；

$B_{下}$——结晶器下口宽度，mm；

B_0——铸坯公称宽度，mm；

$\varepsilon_{宽}$——结晶器宽面锥度，%。

结晶器窄边

$$D_{上} = (1 + 1.5\%) D_0 + 2 \tag{9-4-8}$$

$$D_{下} = (1 + 1.5\% - \varepsilon_{\%}) D_0 + 2 \tag{9-4-9}$$

式中　$D_{上}$——结晶器上口厚度，mm；

$D_{下}$——结晶器下口厚度，mm；

D_0——铸坯公称厚度，mm；

$\varepsilon_{窄}$——结晶器窄面锥度，%。

2. 结晶器长度

确定结晶器长度的主要依据是铸坯出结晶器下口时的坯壳最小厚度。若坯壳过薄，铸坯就会出现鼓肚变形，甚至拉漏。对于大断面铸坯，要求坯壳厚度大于 15mm；小断面铸坯为 8～10mm。结晶器长度一般在 700～900mm 比较合适；但也有 1200mm 长的；现在大多数倾向于把结晶器长度增加到 900mm，以适应高拉速的需要。理论计算表明，结晶器热量的 50% 是从上部导出的，结晶器下部只起到支持作用；因而过长的结晶器无益于坯壳的增厚，所以没有必要选用过长的结晶器。结晶器长度也可用公式进行核算。

3. 倒锥度

钢液在结晶器内冷却凝固生成坯壳，进而收缩脱离结晶器壁，产生气隙。因而导热性能大大降低，由此造成铸坯的冷却不均匀；为了减小气隙，加速坯壳生长，结晶器的下口要比上口断面略小，称结晶器倒锥度。常见有两种表示方法：

$$\varepsilon_1 = \frac{S_{下} - S_{上}}{S_{上} l_m} \times 100\% \tag{9-4-10}$$

式中　ε_1——结晶器每米长度的倒锥度，%/m；

$S_{下}$——结晶器下口断面积，mm^2；

$S_{上}$——结晶器上口断面积，mm^2；

l_m——结晶器的长度，m。

结晶器倒锥度 $\varepsilon_1 < 0$。计算 ε_1 时应按结晶器宽、厚边尺寸分别考虑。

倒锥度绝对值过小则气隙较大，可能导致铸坯变形、纵裂等缺陷；倒锥度绝对值太大又会增加拉坯阻力，引起横裂甚至坯壳断裂。倒锥度主要取决于铸坯断面、拉速和钢的高温收缩率。

方坯结晶器的倒锥度推荐数值见表 9-4-2。

表 9-4-2　方坯结晶器的倒锥度

断面边长/mm	倒锥度/%·m^{-1}
80～100	0.4

断面边长/mm	倒锥度/%·m^{-1}
110～140	0.6
140～200	0.9

浇铸 $w(C)<0.08\%$ 的低碳钢的小方坯结晶器，其倒锥度为 $-0.5\%/m$；对于 $w(C)>0.40\%$ 的高碳钢，倒锥度在 $(-0.8\sim-0.9)\%/m$。

板坯的宽厚比悬殊很大，厚度方向的凝固收缩比宽度方向收缩要小得多。一般板坯结晶器宽边设计成平行的。其锥度按下式计算：

$$\varepsilon_1=\frac{B_{下}-B_{上}}{B_{上}\,l_m}\times 100\% \tag{9-4-11}$$

式中　$B_{下}$——结晶器下口宽度，mm；

$B_{上}$——结晶器上口宽度，mm。

板坯结晶器宽面倒锥度在 $(-0.9\sim-1.1)\%/m$，窄面则为 $0\sim\sim0.6\%/m$。

采用保护渣浇注的圆坯结晶器，倒锥度通常是 $-1.2\%/m$。

例如：某厂弧形连铸机，结晶器上口断面为 250mm×250mm，下口断面为 249mm×249mm，结晶器长度为 0.82m，这个结晶器的倒锥度是：

$$\varepsilon_1=\frac{249^2-250^2}{250^2\times 0.82}\times 100\%=-0.97\%/m$$

有的结晶器做成双倒锥度结构，即在结晶器上部倒锥度大于下部倒锥度，更符合钢液凝固体积的变化规律；也有将结晶器内壁做成抛物线形的，但加工困难，应用甚少。

4. 结晶器的水缝面积

结晶器水缝总面积通常根据下式计算：

$$Q_{结}=\frac{35F_v}{10000} \tag{9-4-12}$$

则：

$$F=\frac{10000\,Q_{结}}{36v} \tag{9-4-13}$$

式中　$Q_{结}$——结晶器的耗水量，m^3/h；

F——水缝总面积，mm^2；

v——水缝内冷却水的流速，m/s。

方坯结晶器水流速取 6～9m/s，板坯取 3.5～5m/s。

结晶器冷却水量也是根据经验，按结晶器周边长度计算的。小方坯结晶器冷却水量，周边供水量约为 2.0～3.0L/min·mm，对于板坯结晶器的宽面供水量约 2.0L/min·

mm，窄面约为 1.25L/min·mm。对于裂纹敏感的低碳钢种，结晶器采用弱冷却，冷却水量取下限；对于中、高碳钢可用强冷却，冷却水量取上限。冷却水进水压力为 0.39～0.9 MPa；结晶器进出水温度差为 3～8℃。

三、结晶器材质与寿命

1. 结晶器内壁材质

正确选择结晶器内壁的材质是保证铸坯质量的关键。由于结晶器内壁直接与高温钢液接触，要求其内壁材质导热系数要高，膨胀系数要低，在高温下有足够的强度和耐磨性；塑性还要好，易于加工。目前使用铜合金做结晶器内壁。在铜中加入含量为 0.08%～0.12%的银，就能提高结晶器内壁的高温强度和耐磨性。在铜中加入含量为 0.5%的铬或加入一定量的磷，可显著提高结晶器的使用寿命。还可以使用铜—铬—锆—砷合金或铜—锆—镁合金制作结晶器内壁，效果都不错。在结晶器的铜板上镀 0.1～0.15mm 厚的镀层，能提高耐磨性；目前，单一镀层主要用铬或镍，复合镀层用镍、镍合金和铬三层镀层，比单独镀镍寿命提高 5～7 倍；还有镍、钨、铁镀层，由于钨和铁的加入，其强度和硬度都适合高拉速铸机使用。

另外，在结晶器弯月面处镶嵌低导热性材料，减少传热速度，可以改善铸坯表面质量，称为热顶结晶器。镶嵌的材料有镍、碳铬化合物和不锈钢。如图 9－4－12 所示。

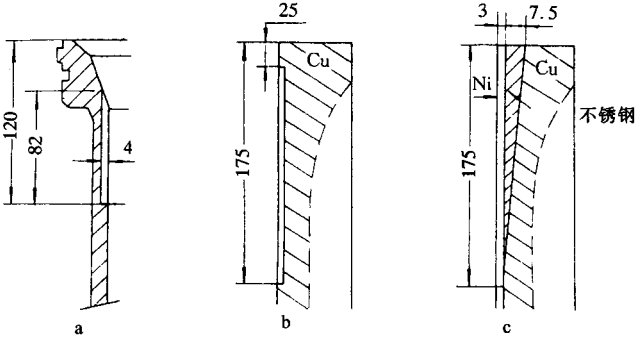


图 9－4－12　板坯结晶器的镶嵌件

a—镶嵌 Ni；b—碳铬化合物；c—不锈钢

2. 结晶器寿命

结晶器使用寿命实际上是指结晶器内腔保持原设计尺寸、形状的时间长短。只有保持原设计尺寸、形状，才能保证铸坯质量。

结晶器的寿命，可用结晶器浇铸铸坯的长度来表示。在一般操作条件下，一个结晶

器可浇铸板坯 10000 ~ 15000m 长。也有用结晶器从开始使用到修理前所浇铸的炉数来表示,其范围为 100 ~ 150 炉。

提高结晶器寿命的措施有:提高结晶器冷却水水质;保证结晶器足辊、二次冷却区的对弧精度;定期检修结晶器;合理选择结晶器内壁材质及设计参数等。

四、结晶器断面调宽装置

为了适应生产多种规格铸坯的需要,缩短更换结晶器的时间,采用可调宽度的板坯结晶器。

结晶器可离线或在线调宽。

离线调宽是将结晶器吊离生产线调节结晶器宽面或窄面的尺寸。

结晶器在线调宽就是在生产过程中完成对结晶器宽度的调整;即结晶器的两个侧窄边多次分小步向外或向内移动,一直调到预定的宽度要求。其移动顺序如图 9 - 4 - 13 所示。调节宽度时,铸坯宽度方向呈现 Y 形,故称为 Y 形在线调宽。这种调宽装置不仅能调节结晶器宽度,还能调节宽面倒锥度。每次调节量为初始锥度的 1/4,调节速度是 20 ~ 50mm/min。调节是由每个侧边的上下两套同步机构实现的,用计算机控制,液压或电力驱动。它可在不停机的条件下改变铸坯断面;设备比较复杂,调整过程中要防止发生漏钢事故。

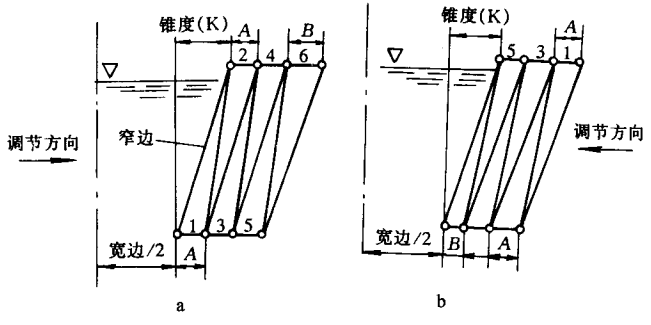


图 9 - 4 - 13　结晶器 Y 形在线调宽原理图

a—由窄调宽;b—由宽调窄

五、结晶器的润滑

为防止铸坯坯壳与结晶器内壁粘结,减少拉坯阻力和结晶器内壁的磨损,改善铸坯表面质量,结晶器必须进行润滑;目前的润滑手段主要有以下两种。

1. 润滑油润滑

结晶器加油润滑装置如图 9－4－14 所示，润滑剂可以用植物油或矿物油，目前用植物油中的菜籽油者居多。通过送油压板内的管道，润滑油流到锯齿形的给油铜垫片上，铜垫片的锯齿端面向着结晶器口，油就均匀地流到结晶器铜壁表面上，在坯壳与结晶器内壁之间形成一层厚 0.025～0.05mm 的均匀油膜和油气膜，达到润滑的目的。这种装置主要应用在小方坯连铸机上。

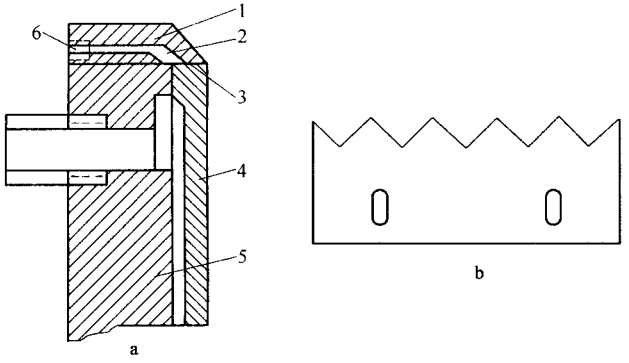


图 9－4－14　结晶器给油装置

1—送油压板；2—油道；3—给油垫片；4—结晶器铜壁；

5—结晶器钢壳；6—润滑油管

2. 保护渣润滑

采用保护渣同样可以达到润滑的目的，保护渣可人工加入，也可用振动给料器加入，其装置如图 9－4－15 所示。这改善了劳动条件，且加入量控制准确。

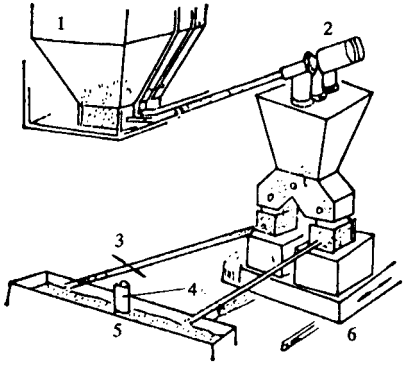


图 9－4－15　结晶器保护渣自动加入装置

1—保护渣罐；2—振动管式输送机；3—给料管；4—浸入式水口；5—结晶器；6—料仓车

六、结晶器液面自动控制

连铸机结晶器液面控制是连铸设备实现自动化的关键性环节。通常是操作人员凭肉眼观察结晶器液面并作出判断，然后调节拉速来实现液面控制。目前采用磁感应法、热电偶法、红外线法和同位素法等来监测并控制液面。

红外线法是对结晶器液面进行红外摄像，再经计算机做出图像处理和分析，判断结晶器液面，它配有直观的图像显示。但由于液面有油雾遮挡、保护渣影响和捞渣的干扰，这一方法还需进一步完善。

同位素法是由放射源、探测器、信号处理及输出显示等部分组成。该法用 Cs—137 或 Co—60 做放射源；放射源与探测器分别装在结晶器的两侧，放射源放出的 γ 射线穿过水冷结晶器被对面的闪烁计数器所接收；若钢液面低于 γ 射线区时，被闪烁计数器接收的射线强度为最大；当结晶器内液面上升，使射线区部分或全部遮挡，这时被闪烁计数器接收的射线强度随液面的增高成比例减弱。这样就测得液面高度，根据液面的高度来调节拉速。同位素法是精度高、稳定性强的方法，我国的很多厂家都采用了 Cs－137 同位素控制方法，其结构如图 9－4－16。在装有放射源的结晶器壁上，加 1 块活动保护板；放射源的贮存和运送必须在随设备供货的专门屏蔽桶内，进一步提高了安全性。

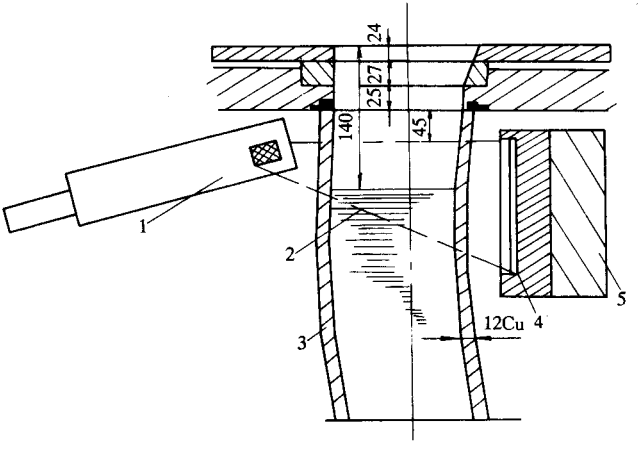


图 9－4－16　结晶器液面自动控制原理图

1—闪烁记数器；2—液面理想控制高度；

3—结晶器铜管；4—放射源；5—铅筒

用热电偶控制结晶器液面，其精确性也较强，但测量值的滞后时间较长。

第三节　结晶器的振动装置

一、结晶器振动的目的

在连铸过程中，如果结晶器是固定的，就可能出现坯壳被拉断造成漏钢。图 9－4－17a 表示结晶器内坯壳的正常形成过程。如果不发生意外，铸坯就被连续拉出结晶器。倘若由于润滑不良，坯壳的 A 段与结晶器壁粘连，而且 C 处坯壳的抗拉强度又小于 A 段的粘结力和摩擦力，则在拉坯力的作用下，C 处的坯壳被拉断。A 段粘在结晶器壁不动，B 段则继续向下运动，此时钢水将填充在 A、B 段之间形成新的坯壳，如图 9－4－17b 所示。把 A、B 两段连接起来。倘若新坯壳的连接强度足以克服 A 段的粘结力和摩擦力，A 段随铸坯被拉下，坯壳断裂处便可愈合，拉坯即可继续进行。但是在新坯壳的生长过程中，B 段是在不断向下运动，而且新生坯壳的强度又较弱，这就无法使 A、B 两段牢固地连接起来；当铸坯 B 段被拉出结晶器时，便会发生漏钢事故，如图 9－4－17 所示。

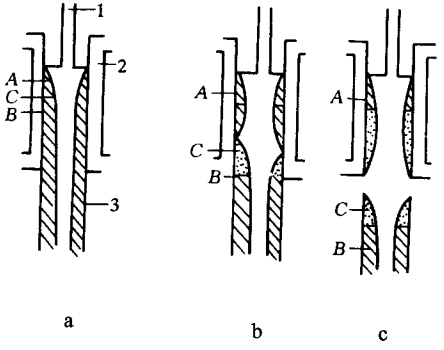


图 9－4－17　坯壳拉断和粘结消除过程

1—钢水注流；2—结晶器；3—坯壳

倘若铸坯已与结晶器壁发生粘结时结晶器向上振动，则粘结部分和结晶器一起上升，坯壳被拉裂，未凝固的钢水立即填充到断裂处，开始形成新的凝固层；等到结晶器向下振动，且振动速度大于拉坯速度时，坯壳处于受压状态，裂纹被愈合，重新连接起来，同时铸坯被强制消除粘结，得到“脱模”。由于结晶器上下振动，周期性地改变着液面与结晶器壁的相对位置，有利于润滑油和保护渣向结晶器壁与坯壳间渗漏，因而改善了润滑

条件，减少了拉坯摩擦阻力和粘结的可能，所以连铸得以顺行。

二、结晶器的振动方式

目前结晶器的振动有正弦振动和非正弦振动两种方式。

正弦波式振动的速度与时间的关系为一条正弦曲线，如图 9－4－18 虚线表示。正弦振动方式的上下振动时间相等，上下振动的最大速度也相同。在整个振动周期中，铸坯与结晶器之间始终存在相对运动，而且结晶器下降过程中，有一小段下降速度大于拉坯速度，因此可以防止和消除坯壳与结晶器内壁间的粘结，并能对被拉裂的坯壳起到愈合作用。另外，由于结晶器的运动速度是按正弦规律变化的，加速度则必然按余弦规律变化，所以过渡比较平稳，冲击较小。

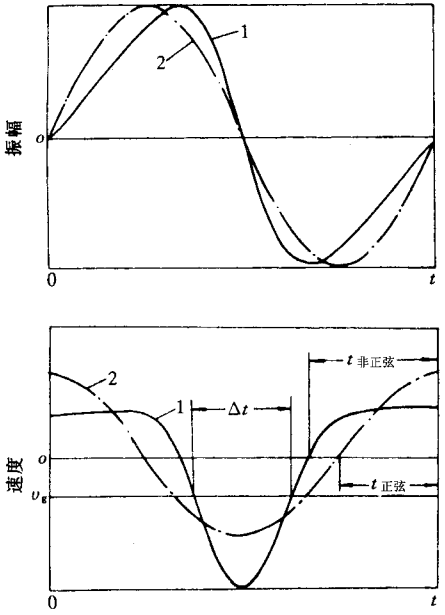


图 9－4－18　正弦振动和非正弦振动曲线

1—非正弦振动；2—正弦振动

正弦振动用一简单的偏心轮连杆机构就能实现。可以提高振动频率、减小振痕，改善铸坯质量。正弦振动方式在连铸机上被广泛应用。

随着高速铸机的开发，拉坯速度越来越快，造成结晶器向上振动时与铸坯间的相对运动速度加大，特别是高频振动后此速度更大。由于拉速提高后结晶器保护渣用量相对减少，坯壳与结晶器壁之间发生粘结而导致漏钢的可能性增加。为了解决这一问题，除

了使用新型保护渣外，另一个措施就是采用非正弦振动，使得结晶器向上振动时间大于向下振动时间，以缩小铸坯与结晶器向上振动之间的相对速度，见图 9－4－18 实线。

结晶器振动的参数有：

(1)振幅

结晶器从最高位置下降到最低位置，或从最低位置上升到最高位置，所移动的距离称“振幅”。振幅小则结晶器液面稳定，浇注易于控制，铸坯表面也较平滑。振幅小还有利于减少坯壳被拉裂的危险性。

(2)负滑脱量

在结晶器下振速度大于拉坯速度时，称为“负滑脱”。负滑脱量 α 的定义为：

$$\alpha = \frac{v_{\max} - v_{拉}}{v_{拉}} \times 100\% \tag{9-4-14}$$

式中　a——负滑脱量，%；

$v_{\max}$——结晶器下振时的最大速度，m/min；

$v_{拉}$——拉坯速度，m/min。

负滑脱能帮助“脱模”，有利于拉裂坯壳的愈合。正弦振动的 α 选 30% ~ 40%时效果较好。

(3)频率

结晶器上下振动一次的时间称为振动周期 T，s；1min 内振动的次数即为频率，次/min。

从总的情况来看：正弦振动方式采用高频率、小振幅、较大的负滑脱量的振动较为有利。

三、振动机构

结晶器按一定的运动轨迹振动。例如弧形结晶器需按弧线运动，而直结晶器需按直线运动。轨迹不正确，不仅会降低结晶器使用寿命，还会增加铸坯表面缺陷甚至引起漏钢事故。

目前国内连铸机振动机构应用较多的有短臂四连杆式振动机构、四偏心轮振动机构和差动齿轮式振动机构。

1. 短臂四连杆式振动机构

短臂四连杆振动机构广泛应用于小方坯和大板坯连铸机上，只是小方坯连铸机振动机构多装在内弧侧，而大板坯连铸机振动机构安装在外弧侧。如图 9－4－19 和 9－4－20 所示。

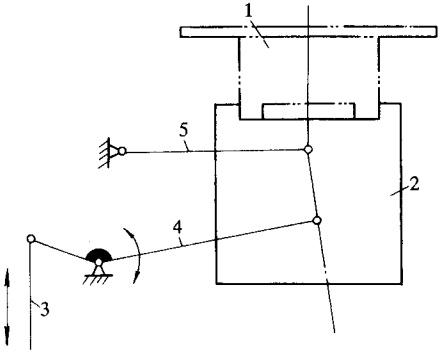


图 9－4－19　短臂四连杆式振动机构(外弧侧)

1—结晶器；2—振动架；3—拉杆；4、5—连杆

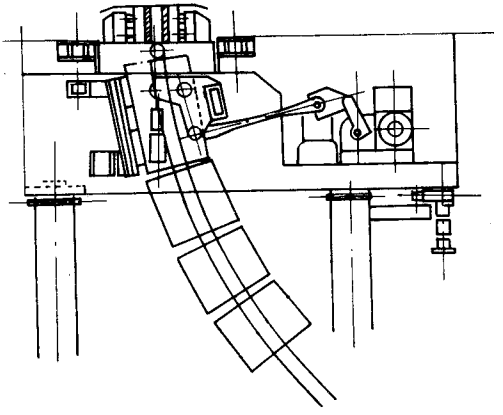


图 9－4－20　短臂四连杆振动机构(内弧侧)

短臂四连杆振动机构的结构简单，便于维修，能够较准确地实现结晶器的弧线运动，有利于铸坯质量的改善。

四连杆机构工作原理可参看图 9－4－19，由电机通过减速机经偏心轮的传动，拉杆 3 作往复运动，拉杆 3 带动连杆 4 摆动，连杆 5 也随之摆动，使振动框架 2 能按弧线轨迹振动。

2. 四偏心振动机构

图 9－4－21 是近些年来发展起来的四偏心振动机构，仍属于正弦振动。电机 1 带动中心减速机 3，通过万向轴带动左右两侧的减速机 4，每个减速机各自带动偏心轮 6 和 7，偏心轮 6 和 7 具有同向偏心点，但偏心距不同；结晶器弧线运行是利用两条板式弹簧 8，一头连接在快速更换台框架 9 上，另一头连接在振动头恰当位置上，来实现弧形振动。这种板式弹簧使得振动台只能作弧线摆动，不会前后移动，由于结晶器振幅不大，两根偏心轴的水平安装，不会引起明显的误差。

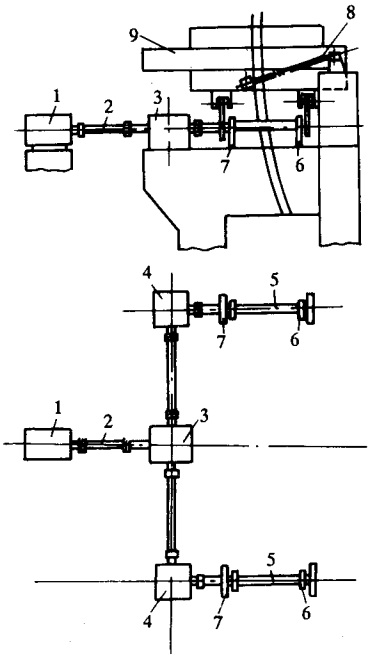


图 9－4－21　四偏心振动机构

1—电动机；2—万向接手；3—中心减速机；4—角部减速机；
5—偏心轴；6,7—偏心轮；8—弹簧板；9—振动台框架

四偏心振动机构的优点是：结晶器振动平稳，无摆动和卡阻现象，适合高频小振幅技术的应用，但结构较复杂。

3．差动齿轮式振动机构

该振动机构如图 9－4－22 所示。结晶器放在弹簧支撑的振动框架上，凸轮或偏心轮拉杆机构带动一对啮合的扇形齿轮 3 和 5，而扇形齿轮分别安装在小齿轮 2 和 4 的轴端，齿轮 2 和 4 具有相同的节圆半径；当扇形齿轮摆动时，小齿轮就推动固定在框架内外弧两侧的齿条做上下往复运动，从而实现结晶器的振动。若扇形齿轮的节圆半径不相等时，结晶器产生弧线振动；扇形齿轮节圆半径相等时，结晶器做直线运动。

差动齿轮振动机构的基本特点是：强迫下降、弹簧的压力使其回升。当结晶器下降时，可实现负滑脱。具有设备紧凑、刚性好等优点。

四、结晶器快速更换台架

结晶器、结晶器振动装置及二次冷却区零段三部分设备安装在一个台架上，这个台架称为结晶器快速更换台架，见图 9－4－33。这种快速更换台架，设备可整体更换，保证

了结晶器、二次冷却区零段的对弧精度。实现离线检修，可大大提高铸机的生产率。

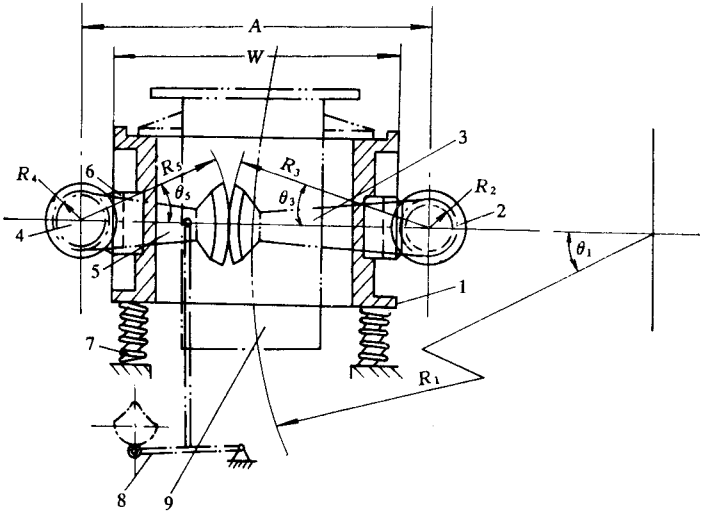


图 9－4－22　差动齿轮式振动机构

1—振动框架；2、4—小齿轮；3、5—扇形齿轮；6—齿条；7—弹簧；8—凸轮或偏心轮一拉杆式机构；9—结晶器

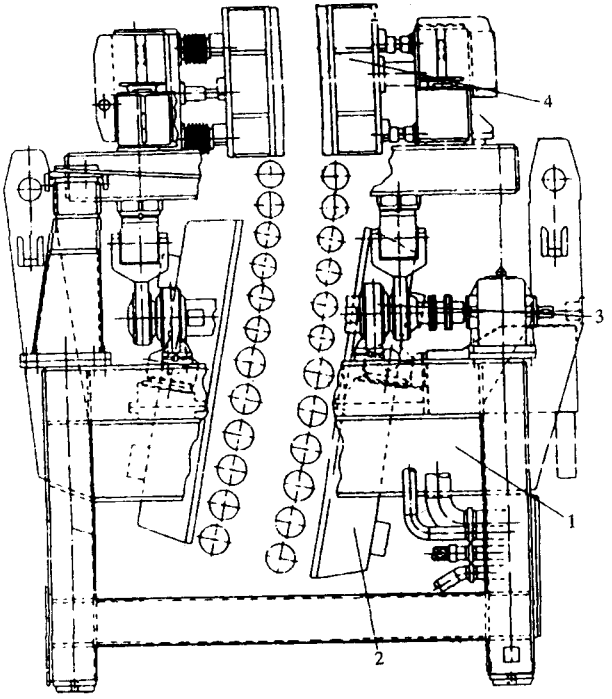


图 9－4－23　结晶器快速更换台

1—框架；2—零段；3—四偏心振动机构；4—结晶器

第四节　二次冷却系统装置

二次冷却系统装置又称为二次冷却段或二次冷却区，简称二冷区。

一、二次冷却的作用及二次冷却装置的结构形式

1. 二次冷却的作用

二次冷却的作用是：

(1)带液心的铸坯从结晶器中拉出后，需喷水或喷气水直接冷却，使铸坯快速凝固，以进入拉矫区；

(2)对未完全凝固的铸坯起支撑、导向作用，防止铸坯的变形；

(3)在上引锭杆时对引锭杆起支撑、导向作用；

(4)倘若是采用直结晶器的弧形连铸机，二冷区的第一段还要把直坯弯成弧形坯；

(5)如果采用多辊拉矫机时，二冷区的部分夹辊本身又是驱动辊，起到拉坯作用；

(6)对于椭圆形连铸机，二冷区本身又是分段矫直区。

弧形连铸机的二次冷却装置的重要性不亚于结晶器，它直接影响铸坯的质量、设备的操作和铸机作业率。

2. 二次冷却装置的结构形式

二次冷却装置的主要结构形式分为箱式及房式两大类。

(1)箱式结构

图 9－4－24 是板坯连铸机二次冷却装置的早期箱式结构。机架的型式是箱体。整个二冷区是由五段封闭的扇形段箱体(第一段未画出)连接组成的。所有支撑导向部件和冷却水喷嘴系统都装在封闭的箱体内 封闭的目的是便于把喷水冷却铸坯时所产生的大量蒸汽抽掉，以免影响操作。

箱体沿铸坯中心弧线分割为内外弧两个部分，即箱盖 1 和箱座 4。箱座固定在水泥基础上，箱座与箱盖之间有一条弧形侧面水箱 2，它兼作固定侧向导辊 3 和调节夹辊的开口度用。整个箱体都是由铸钢件组成。

箱式结构刚性较好，所占空间小，所需抽风机容量小。检修和处理事故还算方便。

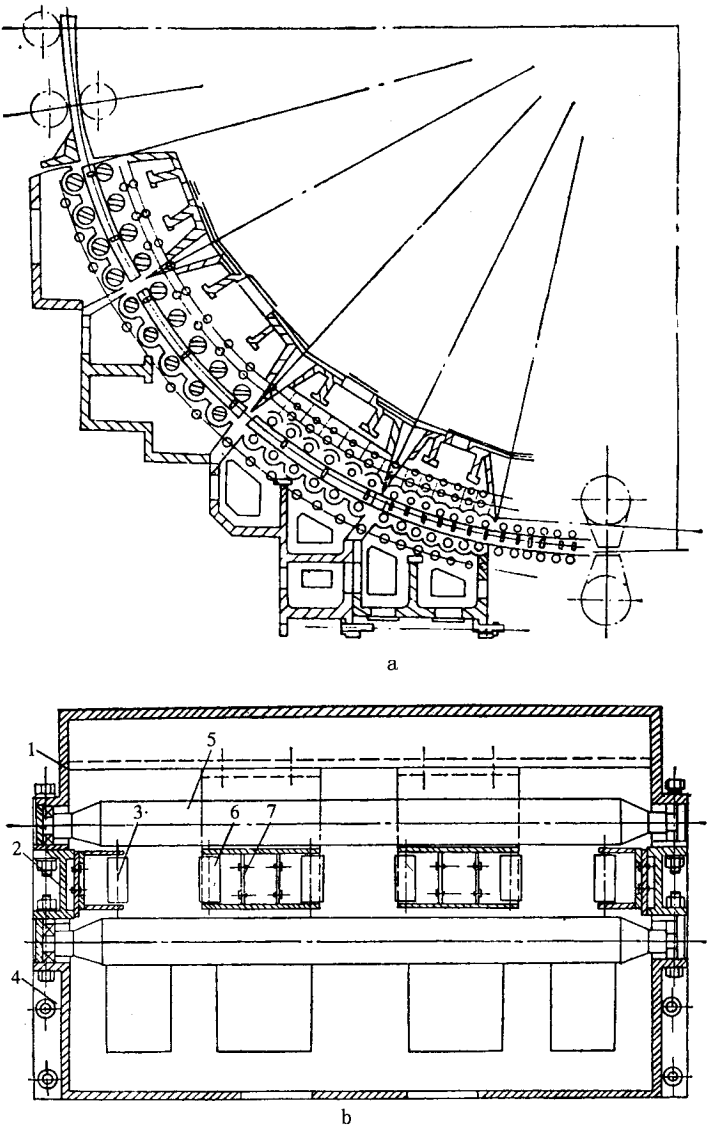


图 9－4－24　箱式结构

a—纵向剖视图；*b*—横向剖视图

1—箱盖；2—侧面水箱；3—侧向导辊；4—箱座；5—夹辊；

6—中间侧向导辊；7—中间侧面水箱喷嘴

(2)房式结构

房式结构的夹辊全部布置在敞开的牌坊结构的支架上，整个二冷区是由一段或若干段开式机架组成。在二冷区的四周用钢板构成封闭的房室，故称为房式结构，见图 9－4

－25。具有结构简单，观察设备和铸坯方便等一系列优点。问题是风机容量和占地面积较大。目前新设计的连铸机均采用房式结构。

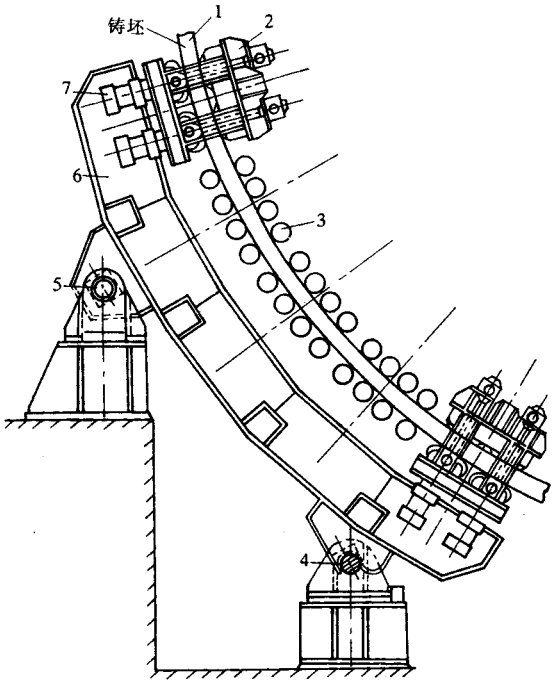


图 9－4－25　二冷区支导装置的底座

1—铸坯；2—扇形段；3—夹辊；

4—活动支点；5—固定支点；6—底座；7—液压缸

由于二次冷却装置底座长期处于高温和很大拉坯力的作用下，因此二冷支导装置通过刚性很强的共同底座安装在基础上（见图 9－4－25），图中 5 为固定支点，4 为活动支点，允许沿圆弧线方向滑动，以避免抗变形能力差导致的错弧。

二、方坯铸机二次冷却装置

1. 小方坯铸机二次冷却装置

小方坯铸坯断面小，在出结晶器时已形成足够厚度的坯壳，一般情况下，不会发生变形现象。因此很多小方坯连铸机的二次冷却装置非常简单，如图 9－4－26 所示，通常只在弧形段的上半部喷水冷却铸坯，下半段不喷水 1 在整个弧形段少设或不设夹辊。其支撑导向装置是用来上引锭杆的，所以，有的小方坯连铸机的二次冷却区只有 4 对夹辊、5 对侧导辊、2 块导板和 14 个喷水环。用垫块调节辊距以适应不同断面的浇注。象康卡斯

特小方坯连铸机在结晶器的出口处安装了一个能够移动的托板。在装引锭杆和开浇阶段,托板起支撑作用;当铸坯通过托板后,托板可以后移一段距离,以防止漏钢损坏,也便于处理事故。再如罗可普小方坯连铸机,采用刚性引锭杆,二次冷却装置更可以简化。

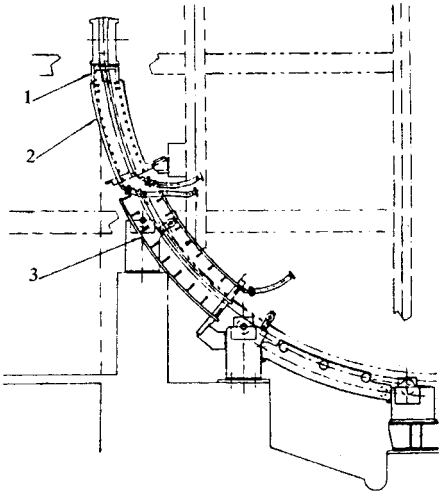


图 9－4－26　大方坯铸机二次冷却装置

1—足辊段;2—可移动喷淋段;3—固定喷淋段

2. 大方坯铸机二次冷却装置

大方坯铸坯较厚,出结晶器下口后铸坯有可能发生鼓肚现象,其二次冷却装置分为两部分。上部四周均采用密排夹辊支撑,喷水冷却;二冷区的下部铸坯坯壳强度足够时,可像小方坯连铸机下部那样不设夹辊。

三、板坯铸机二次冷却装置结构

1. 二冷零段

板坯连铸机由于铸坯断面很大,出结晶器下口坯壳较薄,尤其是高速连铸机,冶金长度较长,直到矫直区铸坯中心仍处于液态,容易发生鼓肚变形,严重时有可能造成漏钢。所以结晶器下口一般安有密排足辊或冷却格栅。铸坯进入二冷区后首先进入支撑导向段。支撑导向段一般与结晶器及其振动装置安装在同一框架上,能够同时整体更换。结晶器足辊以下的辊子组称为二冷零段,见图 9－4－23。一般是 10～12 对密排夹辊,可以用长夹辊,也可以用多节夹辊,见图 9－4－27。

2. 扇形段

从零段以后的各扇形段的结构、段数、夹辊的辊径和辊距,根据铸机的类型,所浇钢

种和铸坯断面的不同有很大差别。扇形段(图 9－4－28)由夹辊及其轴承座、上下框架、辊缝调节装置、夹辊的压下装置、冷却水配管、给油脂配管等部分组成。

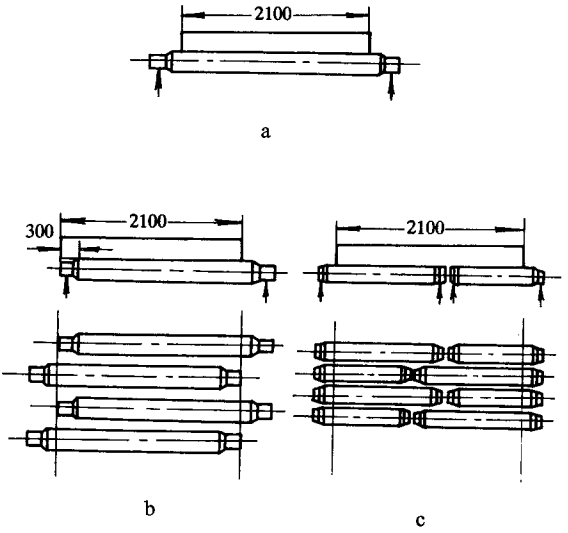


图 9－4－27　各类夹辊

a—全长夹辊；b—短夹辊；c—多节夹辊

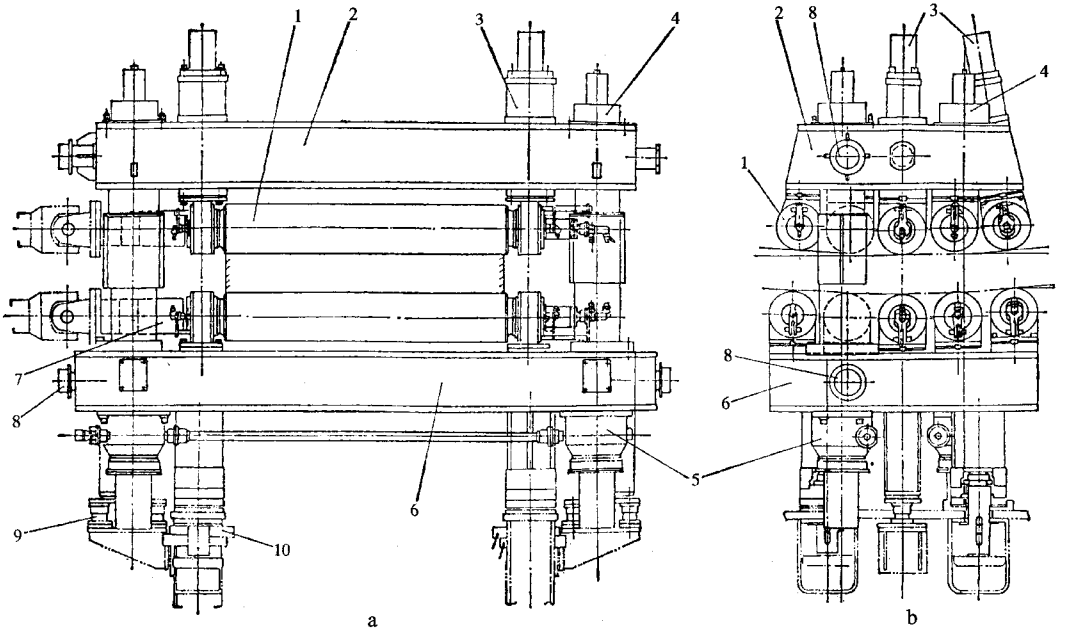


图 9－4－28　扇形段

1—辊子及轴承支座；2—上辊架；3—压下装置；4—缓冲装置；5—辊间隔调整装置；6—下框架；7—中间法兰；8—拔出用导轮；9—管离合装置；10—扇形段固定装置

扇形段可以有动力装置,起拉坯和矫直作用。一般采用直流电机通过行星齿轮减速箱带动。扇形段的辊缝调节装置一般采用液压机构。结晶器、二冷零段、各扇形段必须对中。

四、铸坯的二次冷却装置

在结晶器内只有 20% 的钢液凝固,铸坯仅仅形成 8 ~ 15mm 的薄坯壳,从结晶器拉出后,带液心的铸坯在二冷区内边运行边凝固。需控制铸坯表面温度沿浇注方向均匀下降,使之逐渐完全凝固,保证铸坯的质量。

二次冷却有用水喷雾冷却和气喷雾冷却两种方法。主要根据铸坯断面和形状,冷却部位的不同要求,选择喷嘴类型。

1. 喷嘴类型

好的喷嘴可使冷却水充分雾化,水滴小又具有一定的喷射速度,能够穿透沿铸坯表面上升的水蒸汽而均匀分布于铸坯表面。同时喷嘴结构简单,不易堵塞,耗铜量少。

(1)压力喷嘴

压力喷嘴是利用冷却水本身的压力作为能量将水雾化成水滴。

常用的压力喷嘴喷雾形状有实心圆锥形喷嘴,空心圆锥形喷嘴,扁喷嘴和矩形喷嘴等,如图 9 - 4 - 29。

从喷嘴喷出的水滴以一定速度射到铸坯表面,靠水滴与铸坯表面之间的热交换,将铸坯热量带走。研究表明:当铸坯表面温度低于 300℃时,水滴与铸坯表面润湿,冷却效率高达 80% 左右;若铸坯表面温度高于 300℃时,水滴与铸坯不润湿,水滴到达铸坯表面破裂流失,冷却效率只有约 20%。

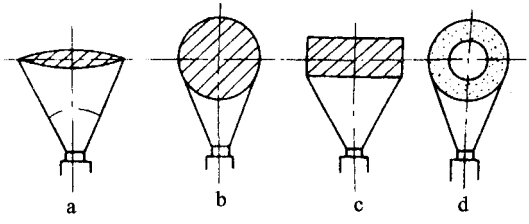


图 9 - 4 - 29　几种雾化喷嘴的喷雾形状图

a—扇平形;b—圆锥形(实心);c—矩形;d—圆锥形(空心)

生产中,在二冷区铸坯表面的实际温度远高于 300℃;虽然提高冷却水压力,增加供水量,但冷却效率与供水量不成正比;同时雾化水滴较大,平均直径在 200 ~ 600μm,因而

水的分配也不均匀，导致铸坯表面温度回升太大，在 150 ~ 200℃/m ；虽然压力喷嘴存在这些问题，由于它的流量特性和结构简单，运行费用低，仍被使用。为了铸坯冷却的均匀性，还叮采用压力广角喷嘴，见图可 9 – 4 – 30 所示。

(2)气—水雾化喷嘴

气—水雾化喷嘴是用高压空气和水从不同的方向进入喷嘴内或在喷嘴外汇合，利用高压空气的能量将水雾化成极细小的水滴 ；这是一种高效冷却喷嘴，有单孔型和双孔型两种，见图 9 – 4 – 31。

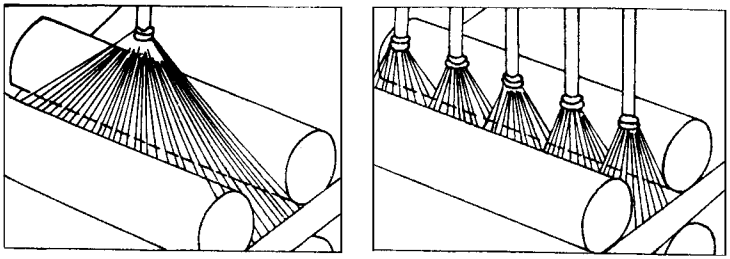


图 9 – 4 – 30　压力广角喷嘴

a—二冷区单喷嘴系统 ；b—二冷区多喷嘴系统

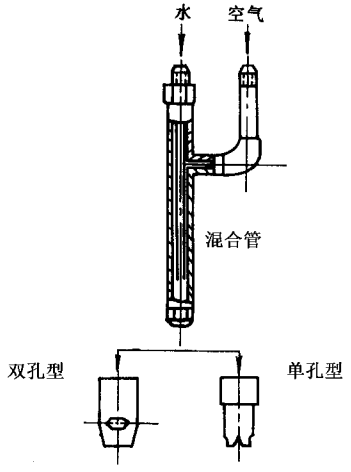


图 9 – 4 – 31　气—水雾化喷嘴结构示意图

气—水雾化喷嘴雾化水滴的直径小于 50μm。在喷淋铸坯时还有 20% ~ 30% 的水分蒸发，因而冷却效率高，冷却均匀，铸坯表面温度回升较小为 50 ~ 80℃/m ；所以对铸坯质量很有好处，同时还可节约冷却水近 50% ；但结构比较复杂。由于气 – 水雾化喷嘴的冷

却效率高，喷嘴的数量可以减少。因而近些年来在板坯连铸机上得到应用。

2. 喷嘴的布置

二冷区的铸坯坯壳厚度是随时间的平方根而增加，而冷却强度则随坯壳厚度的增加而降低。当拉坯速度一定时，各冷却段的给水量应与各段距钢液面平均距离成反比，也就是离结晶器液面越远，给水量也越少。生产中还应根据机型、浇注断面、钢种、拉速等因素加以调整。

喷嘴的布置应以铸坯受到均匀冷却为原则，喷嘴的数量沿铸坯长度方向由多到少。

喷嘴的选用按机型不同布置如下：

(1)小方坯连铸机普遍采用压力喷嘴。其足辊部位多采用扁平喷嘴；喷淋段则采用实心圆锥形喷嘴；二冷区后段可用空心圆锥喷嘴。其喷嘴布置如图 9－4－32。

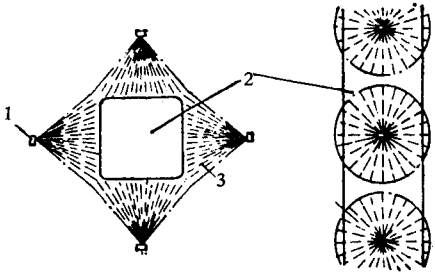


图 9－4－32　小方坯喷嘴布置图

1—喷嘴；2—方坯；3—充满圆锥的喷雾型式

(2)大方坯连铸机可用单孔气—水雾化喷嘴冷却，但必须用多喷嘴喷淋。

(3)大板坯连铸机多采用双孔气—水雾化喷嘴单喷嘴布置如图 9－4－33。

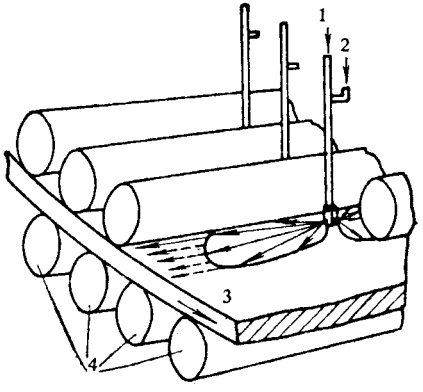


图 9－4－33　双孔气—水雾化喷嘴单喷嘴布置

1—水；2—空气；3—板坯；4—夹辊

板坯连铸机若采用压力喷嘴，其布置见图 9－4－30b。

对于某些裂纹敏感的合金钢或者热送铸坯，还可采用于式冷却，即二冷区不喷水，仅靠支撑辊及空气冷却铸坯。夹辊采用小辊径密排列以防铸坯鼓肚变形。

五、二冷区扇形段更换装置

为了便于结晶器漏钢后的处理和检修，在大型连铸机都设有二冷区快速更换装置。

二冷区的零段常常随同结晶器及结晶器振动机构整体更换。

二冷区扇形段的整体更换方式有：利用导向滑槽更换、扇形段更换小车及专用吊车等。

扇形段更换小车见图 9－4－34。在连铸机的一个侧面设置弧形轨道和小车，小车沿轨道上下滑动，小车上装有液压装置以便拉出要更换的扇形段，然后将小车开至平台上，用吊车将旧扇形段吊走，再将新扇形段吊入小车，仍用小车移至相应位置将扇形段压入。

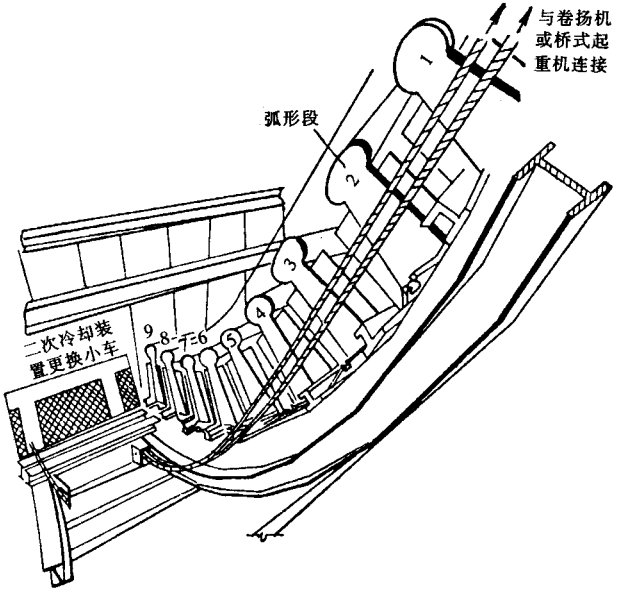


图 9－4－34　扇形段更换小车

专用吊车吊运扇形段，这种方式适用于大型板坯连铸机。

第五节　拉坯矫直装置

所有的连铸机都装有拉坯机。因为铸坯的运行需要外力将其拉出。拉坯机实际上是具有驱动力的辊子,也叫拉坯辊。弧形连铸机的铸坯需矫直后水平拉出,因而早期的连铸机的拉坯辊与矫直辊装在一起,称为拉坯矫直机,也叫拉矫机。

现代化板坯连铸机采用多辊拉矫机,辊列布置‘扇形段化”,驱动辊已伸向弧形区和水平段,实际上拉坯传动已分散到多组辊上,所以拉矫机已不是原来的含义了,由一对拉辊变成了驱动辊列系统。

弧形连铸机弧形铸坯的自重产生下滑力,但它不能克服铸坯的阻力自动运行,仍需拉坯辊拉坯;立式连铸机是垂直布置的,铸坯自重产生的下滑力很大,足以克服铸坯的运行阻力;为了平衡下滑力和控制铸坯拉出速度,也设置了拉坯辊,是用来产生制动力以平衡铸坯的下滑力。

对拉坯矫直装置的要求有:

(1)应具有足够的拉坯力,以在浇铸过程中能够克服结晶器、二次冷却区、矫直辊、切割小车等一系列阻力,将铸坯顺利拉出。

(2)能够在较大范围内调节拉速,适应改变断面和钢种的工艺要求,快速送引锭杆的要求;拉坯系统应与结晶器振动、液面自动控制、二次冷却区配水实现计算机闭环控制。

(3)应具有足够矫直力,以适应可浇铸的最大断面和最低温度铸坯的矫直,并保证在矫直过程中不影响铸坯质量。

(4)在结构上除了适应铸坯断面变化和输送引锭杆的要求外,还要考虑使未矫直的冷铸坯通过,以及多流连铸机在结构布置的特殊要求;结构要简单,安装调整要方便。

小方坯和小矩形坯的铸坯厚度较薄,凝固较快,液相深度也较短,当铸坯进入矫直区已完全凝固。而对大方坯、大板坯来说,铸坯较厚,等铸坯完全凝固后再矫直,就会增加连铸机的高度和长度,因而采用带液心多点矫直。

带液心铸坯矫直多采用多点连续矫直;即铸坯在矫直区内连续变形,应变力和应变率分散变小,极大地改善了铸坯受力状况,有利于提高铸坯质量。

一、小方坯铸机的拉矫装置

图 9 – 4 – 35 是结构最简单的四辊拉矫装置;从图可以看出,它由工作机座和传动系

统组成。工作机座则是由 1 个钳式机架和 4 个辊子组成的拉矫辊系。辊 1 和 2 是拉坯辊,布置在弧形区内,拉辊 1 又兼作矫直辊,与矫直辊 7 和 8 一起组成一个最简单矫直辊系。下矫直辊 8 在铸坯的切点,也是铸机的切点。拉辊 1 和 2 是驱动辊,可以正向拉坯,也可以反向送引锭杆。矫直辊 7 和 8 也是驱动辊。

拉辊 2 布置在液压缸 3 上,拉辊 1 与 2 之间的开口度可用压下螺丝 11 来调节,并用拉辊间的垫块来保持。当弧形铸坯通过时,矫直辊 7 借助压下力将铸坯矫直。矫直辊 7 的上下移动可通过曲柄连杆机构 4 和 5 来调节。也可以用液压缸完成。

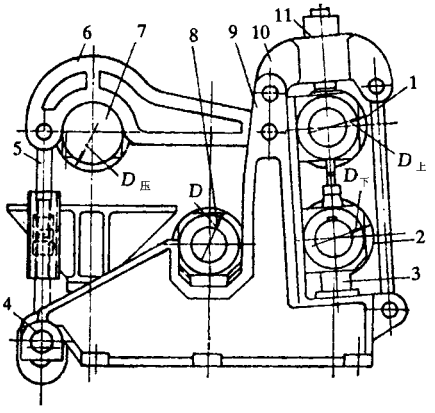


图 9－4－35　四辊拉矫机结构

1、2—拉辊;3—液压缸;4—偏心轴;5—拉杆;6—矫直臂;
7—上矫直辊;8—下矫直辊;9—钳式机架立柱;10—横梁;11—压下螺丝

由于拉辊 1、2 布置在弧形区内,因而上下辊的辊径也稍有不同,上拉辊辊径 $d_{上}$ 比下拉辊辊径 $d_{下}$ 略小,即:

$$d_{上} = \frac{R - D}{R} d_{下} \tag{9-4-15}$$

式中　R——铸机的圆弧半径,m;

D——铸坯厚度,当铸坯厚度变化不大时,可按最小坯厚考虑,m。

上矫直辊 7 的下面有一块支撑板,也可以用辊子代替,用以支承引锭杆。它的工作面应比下矫直辊 8 的辊面低 10mm 左右。拉矫机后面的输送辊道又应比支承板工作面低 10mm 左右。在拉矫机后面安装一个直径较大的保护辊,防止矫直铸坯负荷传到输送辊道上。保护辊用链条与矫直辊 8 的轴头相联,进行驱动。

图 9－4－36 是五辊拉矫机,用在多流小方坯连铸机上,是由 1 台拉坯机、1 台矫直机和 1 个独立的中下辊组成。它的特点是拉矫机布置在水平段上,拉坯辊的下辊表面与连

铸机圆弧相切，通过上辊来调节上、下辊间的距离，以适应铸坯断面的变化。因而上、下拉辊辊径大小一样，便于拉矫机的全部辊子通用。传动系统放在拉矫机上方，采用立式电机，拉矫机布置紧凑，可缩小多流连铸机流间距离；此外，拉矫机采用整体快速更换机构，缩短检修时间，提高连铸机生产率。

在多炉连浇时，拉矫机长时间处于高温状态下工作，各部件需要冷却，其冷却系统共有 4 路，分别冷却机架的立柱和横梁、上辊轴承、下辊的轴套和减速机油箱。

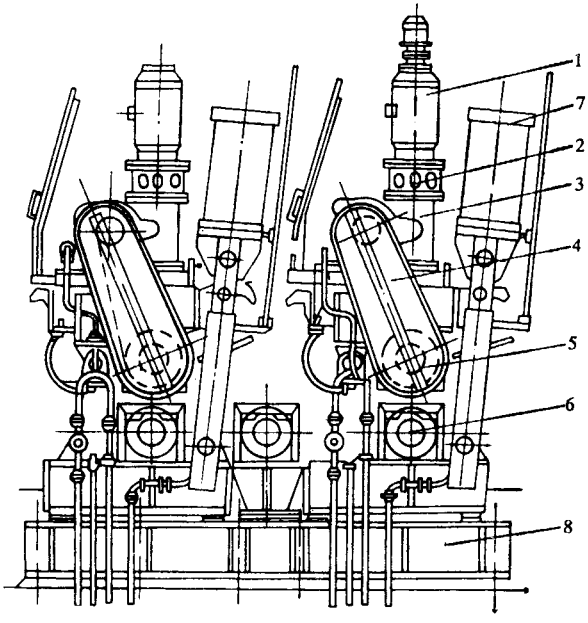


图 9－4－36　五辊拉矫机

1—立式直流电机；2—制动器；3—齿轮箱；4—传动链；5—上辊；6—下辊；7—压下气缸；8—底座

拉矫机上辊的摆动是由气缸完成，常用气压为 0.4～0.6MPa，采用压缩空气系统造价低、易维护，避免漏油带来的危险。

二、一点矫直、多点矫直和连续矫直

1. 一点矫直和多点矫直

对弧形连铸机，从二次冷却段出来的铸坯是弯曲的，必须矫直；若通过一次矫直铸坯，称一点矫直；经过二次以上的矫直称多点矫直。

小断面弧形铸坯是在完全凝固后一点矫直。由图 9－4－37a 看出，一点矫直是由内

弧 2 个辊和外弧 1 个辊共 3 个辊完成的；无论是四辊拉矫机还是五辊拉矫机均为一点矫直。

对大断面铸坯来说，则应采用多点矫直，如图 9－4－37b 所示（其中只画出矫直辊、支撑辊未画）。每 3 个辊为一组，每组辊为 1 个矫直点，以此类推；一般矫直点取 3 至 5 点。采用多点矫直可以把集中 1 点的应变量分散到多个点完成，从而消除铸坯产生内裂的可能性，可以实现铸坯带液心矫直。

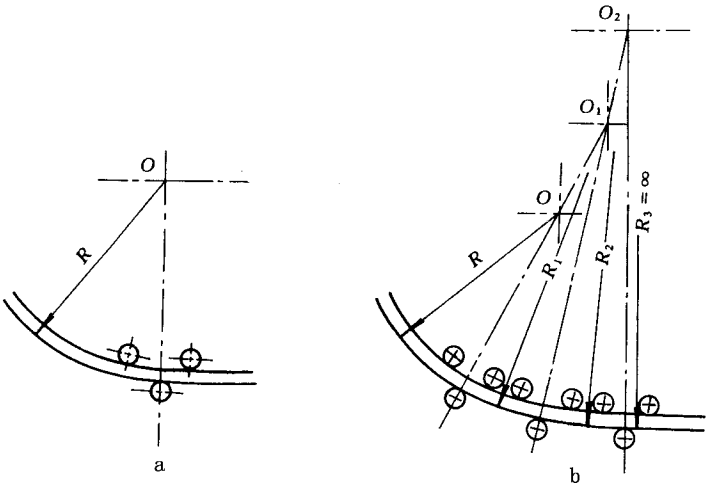


图 9－4－37　矫直配辊方式

a—一点矫直；b—多点矫直

多辊拉矫机增加了辊子数目（图 9－4－38），有 12 辊、32 辊甚至列多辊，对铸坯进行多点矫直。由于拉辊多，每对拉辊上的压力小，因而拉矫辊的辊径也小，这有利于实现小辊距密辊排列，即使带液心铸坯进行矫直，也不致产生内裂，从而能够提高拉坯速度。

2. 连续矫直

多点矫直虽然能使铸坯的矫直分散到多个点进行，降低了铸坯每个矫直点的应变力；但每次变形都是在矫直辊处瞬间完成的，应变率仍然较高，因而铸坯的变形是断续进行的，对某些钢种还是有影响的。

连续矫直是在多点矫直基础上发展起来的一项技术。基本原理是使铸坯在矫直区内应变连续进行，那么应变率就是一个常量，这对改善铸坯质量非常有利。

连续矫直辊的配置及铸坯应变见图 9－4－39。图 9－4－39 中 A、B、C、D 是 4 个矫直辊，铸坯从 B 点到 C 点之间承受恒定的弯曲力矩，在近 2m 的矫直区内铸坯两相区界面的应变值是均匀的。这种受力状态对进一步改善铸坯质量极为有利。

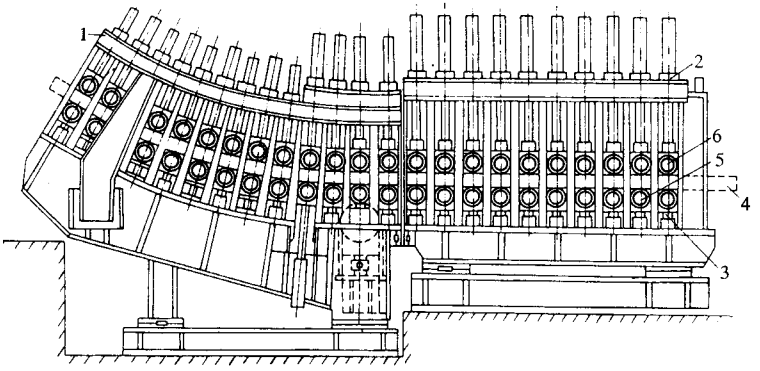


图 9－4－38　多辊拉矫机

1—牌坊式机架；2—压下装置；3—拉矫辊及升降装置；4—铸坯；5—驱动辊；6—从动辊

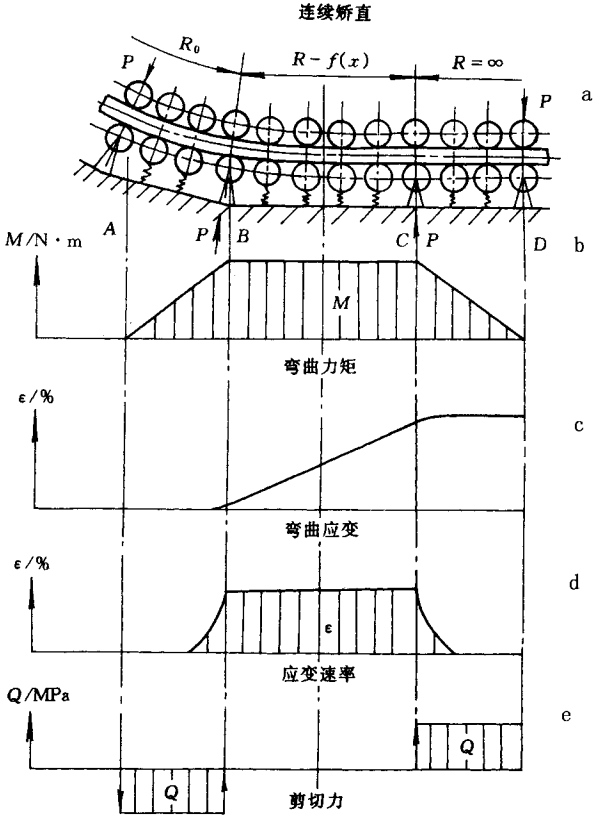


图 9－4－39　连续矫直

a—辊列布置；b—矫直力矩；c—矫直应变；d—应变速率；e—剪应力分布

3. 压缩浇铸

压缩浇铸的基本原理是：在矫直点前面有一组驱动辊给铸坯一定推力，在矫直点后面布置一组制动辊给铸坯一定的反推力；(见图 9－4－40)，铸坯在处于受压状态下矫直。图 9－4－40a 是驱动辊列与制动辊在铸坯中产生的压应力，b 是矫直应力，c 是合成应力；从图可以看出铸坯的内弧中拉应力减小。通过控制对铸坯的压应力可使内弧中拉应力减小甚至为零。能够实现对带液心铸坯的矫直，达到铸机高拉速，提高铸机生产能力的目的。

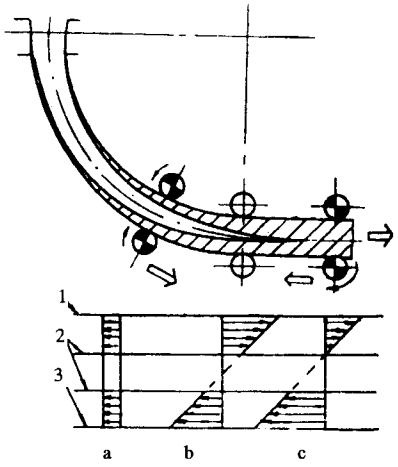


图 9－4－40　压缩浇铸及坯壳应力图

1—内弧表面；2—两相界面；3—外弧表面

第六节　铸坯切割装置

连铸坯需按照轧钢机的要求切割成定尺或倍尺长度。铸坯是在连续运行中完成切割，因此切割装置必须与铸坯同步运动。

目前连铸机所用切割装置有：火焰切割和机械剪切两种类型。

一、火焰切割装置

火焰切割是用氧气和燃气产生的火焰来切割铸坯。燃气有乙炔、丙烷、天然气和焦炉煤气等，生产中多用煤气。切割不锈钢或某些高合金铸坯时，还需向火焰中喷入铁粉、

铝粉或镁粉等材料，使之氧化形成高温，以利于切割。

火焰切割装置包括有切割小车、切割定尺装置、切缝清理装置和切割专用辊道等。

1. 切割小车

火焰切割小车由割炬，同步机构，返回机构，电、水、燃气、氧气等管线组成。

(1)同步机构

火焰切割的同步机构是为了切坯过程与铸坯同步运行以保证铸坯切缝整齐。同步机构多用夹钳式。

夹钳式同步机构结构简单、工作可靠，应用最多。它是由切割小车上的一对夹钳夹住铸坯的两侧，铸坯带动小车实现同步运动(图 9－4－41)。切割完毕，夹头松开，小车返回原位，完成一个切割循环，夹钳可用气动或液压驱动。

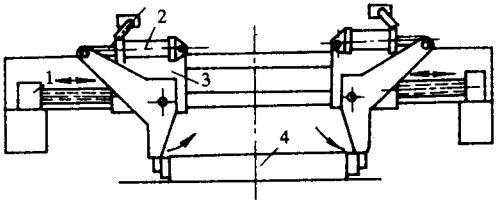


图 9－4－41　夹钳式同步机构

1—螺杆传动装置；2—气缸；3—夹钳架；4—铸坯

(2)割炬

割炬又称为切割枪，是火焰切割的重要部件。切割枪是由枪体和切割嘴组成。而切割嘴是它的核心部件。

图 9－4－42 为外混式切割枪。它形成的火焰焰心为白色长线状，切割嘴可距铸坯 50～100mm 内切割；外混式切割枪具有铸坯热清理效率高，切缝小，切割枪寿命长等优点。

切割枪是用铜合金制造，并通水冷却。

一般当铸坯宽度小于 600mm 时，用单枪切割；宽度大于 600mm 的铸坯，用双枪切割。但要求两支切割枪在同一条直线上移动，以防切缝不齐。切割时割枪应能横向运动和升降运动。当铸坯宽大于 300mm 时，切割枪可以平移，见图 9－4－43a，当坯宽小于 300mm 时，割枪可做平移或扇形运动，如图 9－4－43b，割枪的扇形运动的一个优点是切割先从铸坯角部开始，使角部得到预热有利于缩短切割时间，同时在板坯切割时先做约 5°的扇形运动，割枪转到垂直位置后，再做快速平移运动，如图 9－4－43c 所示。

火焰切割装置的优点是：设备轻，加工制造容易；切缝质量好，且不受铸坯温度和断

面大小的限制，设备的外形尺寸较小，对多流连铸机尤为适合。目前，厚度在 200mm 以上的铸坯几乎都采用火焰切割。缺点是金属损失大，约为铸坯重的 1% ~ 1.5%；切割速度较慢；在切割时产生氧化铁、废气和热量，需必要的运渣设备和除尘设施；当切割短定尺时需要增加二次切割，消耗大量的氧和燃气。

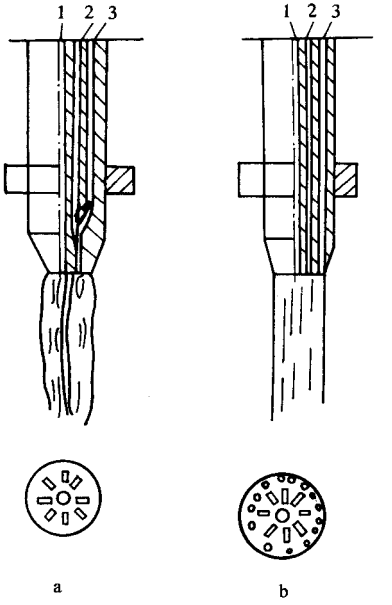


图 9 - 4 - 42　切割嘴的型式

a—内混式；b—外混式

1—切割氧；2—预热氧；3—燃料气体

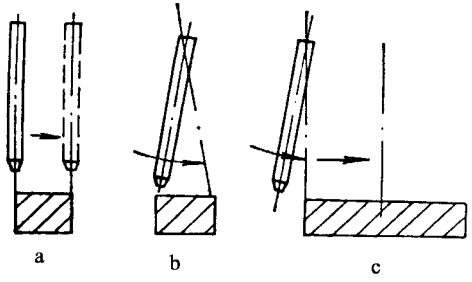


图 9 - 4 - 43　割枪运动

2. 铸坯自动定尺装置

图 9 - 4 - 44 是铸坯一种自动定尺装置的原理图。辊子 2 通过气缸 4 与铸坯接触，铸坯带动辊子转动并发出脉冲信号，由计数器按定尺发出信号开始切割。

二、机械剪切装置

机械剪切设备又称为机械剪或剪切机；由于是在运动过程中完成铸坯剪切的，因而也称为飞剪。

机械剪切按驱动方式不同又分为机械飞剪和液压飞剪。前者通过电机、机械系统驱动；后者涌讨液压系统驱动。机械飞剪（图 9－4－45）和液压飞剪（图 9－4－46）都是用上下平行的刀片作相对运动来完成对运行中铸坯的剪切，只是驱动刀片上下运动的方式不同。随着铸坯断面的加大，机械剪切所需的动力也增大。例如剪切 300mm × 2100mm 的板坯，需用 4500t 的飞剪，这样大的飞剪若用电力驱动，其设备总重超过 400t，所需电功率也在 3000kW 以上。将如此大的设备用到连铸机上显然是不现实的。用液压飞剪，本体设备虽然简单，但液压控制系统较为复杂。

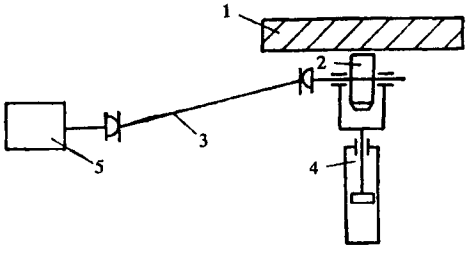


图 9－4－44　自动定尺装置原理示意图

1—铸坯；2—辊子；3—万向接轴；4—气缸；5—脉冲发生器

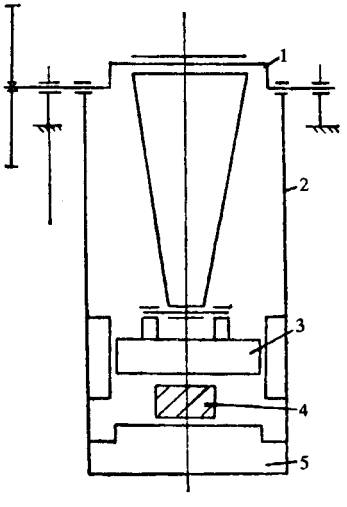


图 9－4－45　机械飞剪工作原理图

1—偏心轴；2—拉杆；3—上刀台；4—铸坯；5—下刀台

从图 9－4－46 可知，剪切机构是由曲柄连杆机构，上、下刀台是由偏心轴带动，在导槽内沿垂直方向运动。偏心轴是由电机通过皮带轮及开式齿轮传动。当偏心轴处于 0° 时，剪刀张开；当其转动 180°，剪刀进行剪切；当转动 360°时，使上、下刀台回到原位，完成一次剪切。在剪切过程中拉杆摆动一个角度才能与铸坯同步，因而拉杆长度应从摆动角度需要来考虑，但不宜过大。这种剪切机称为摆动式剪切机；剪切可以上切，也可以下切。上切式剪切，剪切机的下刀台固定不动，由上刀台下降完成剪切，因此剪切时对辊道产生很大压力，需要在剪切段安装一段能上下升降的辊道。

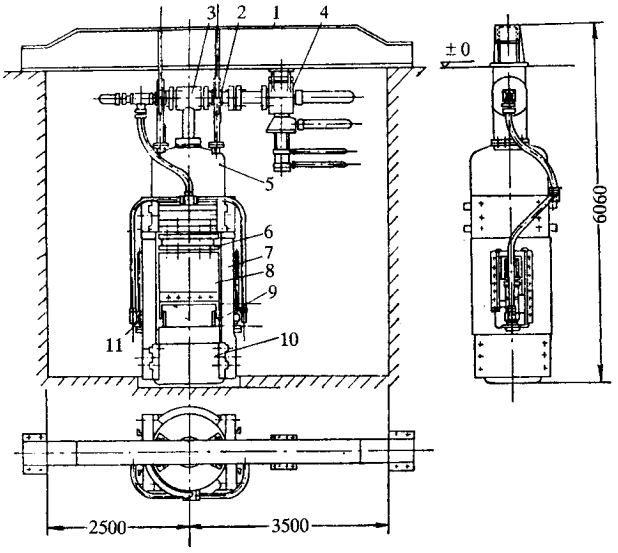


图 9－4－46　液压剪切机

1—横梁；2—销轴；3—活动接头；4—充液阀；5—液压缸；6—柱塞；7—机架；8—活动刀台；9—护板；10—下刀台；11—回程液压缸

另外将剪切机装在小车上，通过小车的运行与铸坯同步，称为平移式剪切机。具有剪切机高度较低的优点。

剪切机的公称能力可以根据铸坯断面大小估算，铸坯剪切温度一般在 750～800℃之间，根据钢种不同，其剪切阻力大致在 68.6～98MPa。若剪切 100mm×150mm 铸坯，剪切机吨位为 150t。

液压剪切装置是刀台与主液压缸安装在一起，通过液压塞柱来驱动上刀台或下刀台完成剪切任务。剪切机通过下刀台上移完成剪切铸坯任务，即下切式；此方式应用较为广泛。

机械剪切的优点在于剪切铸坯时间短；便于剪切短定尺；没有切缝金属损失；操作安

全可靠,劳动强度低,工作环境好,维护也容易,生产成本低。但设备重、制造要求精度高,消耗功率也比较大 ;铸坯剪口 100mm 内受弯曲应力作用易发生变形。

第七节　电磁搅拌装置

电磁搅拌技术简称 EMS。它有助于纯净钢液、改善铸坯凝固结构、能提高铸坯的表面质量和内部质量,扩大品种。

一、电磁搅拌的原理

当磁场以一定速度切割钢液时,钢液中产生感应电流,载流钢液与磁场相互作用产生电磁力,从而驱动钢液运动。

二、电磁搅拌的分类

电磁搅拌装置的感应方式有两种,一是基于异步电机原理的旋转搅拌(图 9 – 4 – 47 中的 1 图),二是基于同步电机原理的直线搅拌(图 9 – 4 – 47 的 2 图),而两类搅拌方式迭加可得到螺旋搅拌(图 9 – 4 – 47 中的 3 图)。螺旋搅拌既能使钢液作水平方向旋转,也可作上下垂直运动,无疑搅拌效果最好,但机构复杂 ;目前生产中小方坯多使用旋转搅拌,板坯直线搅拌和螺旋搅拌都使用。

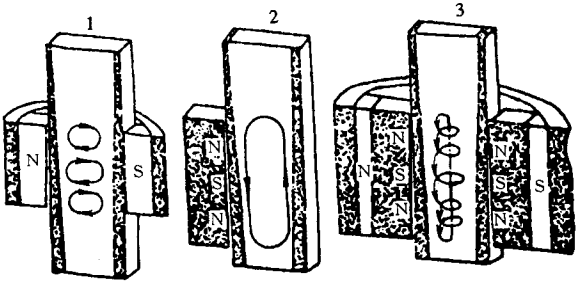


图 9 – 4 – 47　电磁搅拌的形式

1—旋转搅拌 ;2—直线搅拌 ;3—螺旋搅拌

在连铸机上电磁搅拌器安装的位置一般有三处 :即结晶器电磁搅拌(M – EMS 或 E – MBR)、二冷区电磁搅拌(S – EMS)和凝固末端电磁搅拌(F – EMS)。

1. 结晶器电磁搅拌

M－EMS 搅拌器安装在结晶器铜壁与外壳之间，为了防止旋转钢流将结晶器表面浮渣卷入钢中，线圈安装位置应适当偏下；有些结晶器还在电磁搅拌器的搅拌线圈上安装一个能使钢流向相反方向转动的制动线圈。为保证足够的电磁力穿透结晶器壁，使用低频电流，采用不锈钢或铝等非铁磁性物质做结晶器水套；结晶器一般采用旋转搅拌的方式。M－EMS 能够均匀钢水温度，减少钢水过热，促进气体租夹杂物的上浮，增加等轴晶晶核。M－EMS 装置如图 9－4－49 所示。

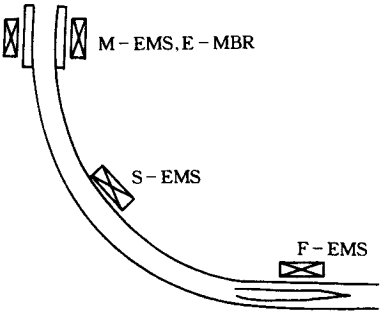


图 9－4－48　电磁搅拌线圈安装位置

2. 二冷区电磁搅拌

S－EMS 搅拌器装在二冷区铸坯柱状晶“搭桥”之前，即坯壳厚度是铸坯厚的 1/4 处；其搅拌效果最好，也有利于减少中心疏松和中心偏析。一般情况下小方坯搅拌器安放在结晶器下口 1.3～4m 处，采用旋转搅拌方式较多；大方坯和厚板坯可装在离结晶器下口 9～10m 处，采用直线搅拌或旋转搅拌方式。当采用旋转搅拌时，为了防止在钢中产生负偏析白亮带，可采用正转—停止—反转的间歇式搅拌技术。S－EMS 主要用来获得中心宽大的等轴晶带，使晶粒细化，减少中心疏松和中心偏析，使夹杂物在横断面上分布均匀，从而使铸坯内部质量得到改善。S－EMS 装置如图 9－4－50 所示。

3. 凝固末端电磁搅拌

F－EMS 安装在连铸坯凝固末端，可根据液心长度计算出具体的安装位置。F－EMS 可使铸坯获得中心宽大的等轴晶带，消除或减少中心疏松和中心偏析。对于高碳钢效果尤其明显。

4. 结晶器电磁制动

在板坯连铸中，结晶器内向下的流股将夹杂物带入铸坯液相穴深处难于上浮；同时热中心下移易造成坯壳重熔和发生角裂，水口外壁附近钢液容易凝结，保护渣不能均匀

流动等。为此在结晶器宽面加两个恒定磁场，产生与注流方向相反的电磁力，对流股起到制动作用，即 E－MBR 技术。

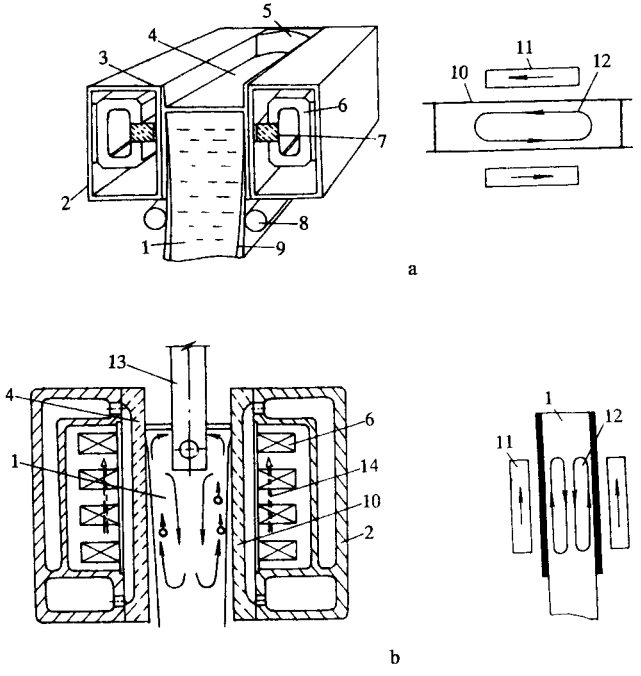


图 9－4－49　结晶器电磁搅拌 M－EMS

a—水平旋转搅拌；b—上下直线搅拌

1—钢液；2—冷却水套；3—铜板(宽面)；4—保护渣；5—铜板(窄面)；6 绕组；7—铁芯；8—支撑辊；9—坯壳；10—结晶器；11—搅拌器；12—流动方向；13—水口；14—直线磁场方向

三、电磁搅拌的应用

在实际生产中，为获得最佳的效果，改善铸坯质量，可根据产品质量要求，选择应用单一搅拌方式或是组合搅拌方式。常见的组合搅拌方式有 $S_1 + S_2$－EMS、M＋F－EMS、S＋F－EMS；M＋S＋F－EMS；M＋F－EMS 既能保证良好的表面质量，也能保证良好的内部质量，受到广泛应用。

应根据以下几个方面选择电磁搅拌的类型：

(1)钢种：合金钢特别是不锈钢搅拌强度需要大些。可选择 S＋F－EMS。

(2)产品质量：中厚板主要应克服中心疏松和偏析，可采用 F－EMS；薄板主要克服皮下气泡和夹杂物，可采用 M－EMS。

(3)连铸坯断面：连铸坯断面影响拉坯速度和液相穴长度，影响到搅拌器的安装位置。小方坯连铸选择 S－EMS 或 M＋F－EMS。

在高温环境和电磁感应涡流作用下，为防止电磁搅拌装置被烧坏，应有独立的水冷系统，大部分采用去离子水冷却，也有采用油冷却线圈，再通水对油冷却的。

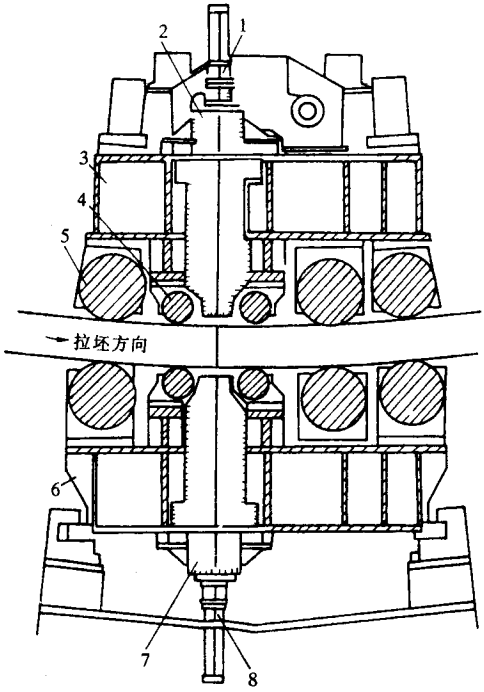


图 9－4－50　二冷区电磁搅拌 S－EMS 安装示意图

1—配线接头；2—内弧侧搅拌器；3—上框架；4—不锈钢小辊；5—连铸机夹辊；6—下框架；7—外弧侧搅拌器；8—配线接头

第五章　连铸坯凝固结构

第一节　连铸坯的凝固

连铸坯冷凝的过程，实质上是一个强制传热、尽快地加速钢液冷凝的过程。连铸过程中铸坯的冷凝由结晶器冷却区、二次冷却区、空气冷却区三个区域组成。

一、钢液在结晶器内的凝固

在结晶器冷却区内，冷却铜结晶器的水，迅速带走钢液大量的热，使铸坯尽快形成均匀、且具有一定厚度的坯壳，以抵抗钢水的静压力，保证铸坯在拉出结晶器时有足够的强度，而不致发生拉漏事故。

1. 结晶器内钢液的凝固　钢液注入结晶器后，即与铜壁接触，以 100℃/s 的速度激剧冷却，很快形成了钢液—凝固壳、凝固壳—铜壁交界面。从结晶器竖直的方向可将钢液凝固的过程分为弯月面区、紧密接触区、气隙区三个区域，如图 9－5－1 所示。

(1)弯月面区。注入到结晶器内的钢液，由于表面张力的作用，在表面上很快形成了一层具有弹性薄膜性能的弯月面。弯月面的形状决定于钢液的表面张力和钢液—铜壁接触的温度场。

在钢液静压力作用下，弹性薄膜不断贴向结晶器壁，并逐渐铺展，形成新的凝固壳。如果弯月面的曲率半径越大，则它贴向结晶器壁时的变形就越小，产生裂纹的可能性就越渐减弱。如果裸露的钢液面上有上浮的 Al_2O_3 夹杂，则会使钢液的表面张力由 1300 ×

10^{-3} N/m 减少到 640×10^{-3} N/m，弯月面的曲率半径减小、弹性遭到破坏，造成弯月面破裂，从而导致铸坯表面结疤或表面粗糙，亦或使铸坯产生裂纹、夹渣缺陷的产生。

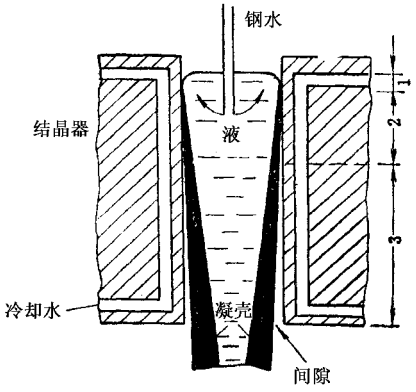


图 9－5－1　钢液在结晶器内的凝固

1—弯月面区；2—紧密接触区；3—气隙区

钢液面在有保护渣的情况下，弯月面上的夹杂将会被吸附、吸收。同时，保护渣的存在还会使弯月面的曲率半径、比钢液存在于大气中时的曲率半径要大，所以弯月面更加容易向结晶器铺展，从而大大减少了因薄膜破裂而形成的铸坯裂纹缺陷。为了能使钢液在结晶器上部良好地凝固，尽快形成满意的新凝固壳，应当在钢液面上保持有适宜厚度的保护渣粉层，以防止保护渣粘附在铜壁上形成渣环、产生挂渣现象，从而使液渣能顺利地渗漏，提高铸坯质量，维持连铸生产正常进行。

(2)紧密接触区和气隙区。如图 6－5－1 所示，弯月面下部的新凝固壳，在与铜壁紧密接触时，由于受到强烈的冷却而迅速形成了初生坯壳。坯壳则以传导传热的方式，将热量传输给铜壁。因此，愈往接触区的下部，坯壳也愈厚。

紧密接触区的下端是气隙区。气隙区是坯壳凝固到一定厚度时，发生 $\delta\rightarrow\gamma$ 相转变，坯壳产生体积收缩向内弯曲，因为结晶器角部的冷却速度最快，所以首先形成了气隙，然后逐渐向结晶壁的中部扩展。气隙形成后，由于坯壳的过热和钢液静压力的作用，又使气隙消失。接近紧密接触区的部分坯壳，实际上是处于气隙形成和消失的平衡过程之中。当坯壳厚度达到足以抵抗钢液静压力作用时，气隙稳定存在，根据测定，方坯的气隙宽度为 1mm，板坯的气隙宽度为 2～3mm。气隙形成后，坯壳与铜壁之间以辐射和对流的方式进行热传输。

前面已叙及，在钢液—凝固坯壳—气隙—铜壁—冷却水这五个传热环节中，气隙的热阻最大，它是这个传热体系中的限制性环节。通过在 $200\times200mm^2$ 方坯坯壳内放置

Fe—W 热电偶，测定坯壳表面温度的变化如图 9－5－2 所示。由图中温度变化曲线上的拐点，可以估计气隙约在 17s 时开始形成。此处约在结晶器钢液面下 24.7cm 左右。结晶器不同高度上热流变化表明，在弯月面下几厘米处热流最大，再往下、则由于坯壳厚度的增加而形成了气隙，所以热阻增加，热流逐渐减小。约在钢液面下 150～200mm 处，热流变化达到极大值，这也表明结晶器铜壁与坯壳间的气隙，是在钢液面下 200mm 左右处开始形成的。

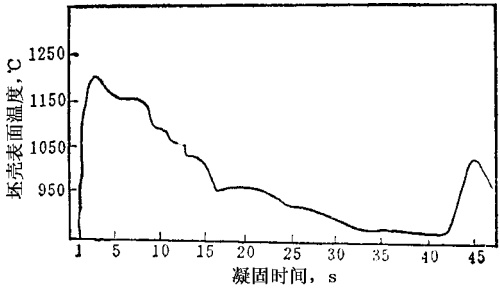


图 9－5－2　结晶器内坯壳温度变化

2. 影响结晶器内钢液凝固的因素分析　气隙的形成及其演变，决定于凝固壳的收缩、坯壳的高温强度、结晶器的润滑和几何形状等因素。而结晶器的传热速率主要取决于气隙形成的动力学。因此，减少气隙热阻是改善结晶器传热所要讨论的首要问题。

(1)结晶器的锥度。由于钢的相态不同，故其比容不等，上大下小的结晶器内腔形态，应与坯壳冷凝收缩相适应，以减小气隙，增加热流和坯壳厚度，提高拉速。

表 9－5－1 列出不同锥度结晶器的传热效果。由表可见，结晶器的锥度大、导出的热流多。但是，随着锥度的增大，拉坯的阻力也随之增加，过大的锥度还可能导致坯壳出现横裂纹，严重时甚至会使铸坯卡在结晶器内。

表 9－5－1　结晶锥度与导出热量的关系

结晶器锥度(%m^{-1})	0	1.5	2.2	2.6
导出热流(×4.2kJ/m^2·min)	15008	16704	19575	铸坯被卡

表 9－5－2　板坯厚度方向结晶器上、下口尺寸控制

板坯厚度(mm)	170	210	250
上口尺寸(mm)	+0.3 −0.0	+0.3 −0.0	+0.3 −0.0

板坯厚度(mm)	170	210	250
下口尺寸(mm)	+0.0 -0.5	+0.0 -0.6	+0.0 -0.8

板坯结晶器的锥度,在宽度方向取 $0.9\%\,m^{-1}$。在厚度方向采取表 9-5-2 所示的控制上、下口尺寸公差的办法,以保证这个方向上的锥度。对于方坯结晶器的锥度,根据经验取 $0.5\sim1.0\%\,m^{-1}$。小方坯结晶器的锥度取 $0.7\%\,m^{-1}$。大方坯结晶器的锥度可取 $0.9\%\,m^{-1}$。

(2)结晶器冷却水的流速。结晶器中的冷却水,将钢液凝固时放出的绝大部分热量带走。因此,维持结晶器内冷却水的合理流动,是形成健全凝固壳的必要条件。由对流传热原理可知,流体呈层流状态时的换热条件差、传热效果不佳。冷却水在结晶内呈强制性的紊流状态,是较为良好的传热条件。结晶器的结构不同,达到紊流状态时水的流速也不相同。一般情况下,流速为 2m/s 的水就呈现紊流状态。在强烈的紊流条件下,铜壁与冷却水所进行的热交换可用下式表示:

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.3} \cdot Pr^{0.4} \tag{9-5-1}$$

$$Nu = h \cdot D/\lambda \qquad Re = \rho u D/\mu \qquad Pr = \mu C/\lambda$$

式中　ρ——水的密度,kg/m^3;

u——水的流速,m/s;

D——水流通道的水力学当量直径,m;

μ——水的动力粘度系数,在 20℃时为 0.00101Pa·s;

λ——水的导热率;

C——水的热容;

h——对流传热系数。

由(9-5-1)式可知,冷却水与铜壁的对流传热系数(h),与水流速度(u)的 0.8 次方成正比。因此,提高冷却水的流速可以提高传热效率。但是,影响结晶器传热的限制性环节在于坯壳与结晶器壁间的气隙,因此,在一定条件下过分提高冷却水流速,对结晶器总的传热效果反而影响不大。

$1/h$ 也称冷却水对铜壁对流传热的热阻。冷却水流速与热阻的关系如图 9-5-3 所示。冷却水的流速大于 6m/s 时,热阻变化很小。之所以如此,是因为冷却水的流速对结晶器壁的温度有影响,特别是在弯月面以下 150mm 范围内,铜壁的温度随冷却水流速的降低而升高,在水流速不足 11m/s 时,冷却水出现沸腾现象、使铜壁与冷却水间传热的界面状态恶化、导出热流量出现下降趋势。

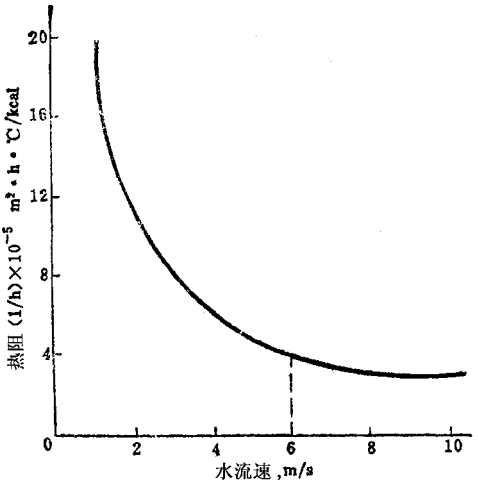


图 9－5－3　水流速对热阻的影响

(3)铜壁与冷却水间传热的界面状态。铜壁与冷却水之间的传热良好，保证了铜壁温度不会升高，结晶器不会产生永久性变形。铜壁与冷却水间的界面状态、对于钢水—坯壳—铜壁这个传热过程影响较大。按其界面状态的不同，热传输有三种不同的形式、图 9－5－4 表示铜壁与冷却水间传热的热流曲线、而这些曲线将这些传热形式分成以下三个传热区域：

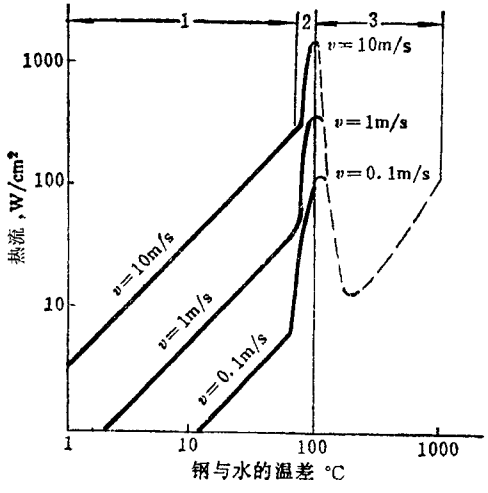


图 9－5－4　结晶器铜壁与水的界面状态和热流的关系

1)强制对流传热 这种传热靠强制流动的高速冷却水将铜壁上的热量带走，热流与铜壁温度成线性(见图小之 1)关系。这种对流传热的传热系数可用式(9－5－1)进行计算。

2)核沸腾区(见图中之 2) 这个区域内的铜壁,局部处于高温状态,靠近铜壁表面过热酌水层中,有水蒸气产生并形成沸腾。当气泡离开铜壁表面、在较冷的水流中凝结时,便产生搅拌作用,从而加强结晶器与冷却水之间的热交换。这时的传热不仅决定于冷却水的流速,而且还决定于铜壁表面的过热,冷却水的压力和液体本身的性能。

3)模态沸腾区 在这个区域内,热流超过某一极限值,导致铜壁表面的温度突然升高,因而使热流出现下降趋势(见图中之 3)。这种情况会使结晶器发生永久性变形,应当予以避免。

(4)浇注工艺因素。浇注高碳钢时,采用敞开浇注比使用保护渣浇注时导出的热流大。而浇注低碳钢时情况则刚好相反。原因在于高碳钢的坯壳表面平整,而低碳钢的坯壳表面粗糙不平,采用保护渣浇注时,在坯壳面上形成的渣膜,改善了坯壳与铜壁接触的状况,提高了低碳钢凝固时导出的热流,使坯壳得到较好的凝固条件。

含碳为 0.21%的钢凝固时正好处于包晶区,在 δ 向 γ 转变时产生很大的体积收缩,坯壳与铜壁之间的气隙出现较早,妨碍热量的传输。而含碳为 0.4%的钢凝固时热流最大,两者之间几乎相差 35%左右。

钢水过热度增加 10℃,对敞开浇注时的最大热流增加 7.5%,对采用保护渣浇注增加 4%。但是,过热度对平均热流的影响不大。

使用保护渣的粘度过低,会使铸坯表面的渣膜厚度减薄,而且还不能均匀连续分布于铸坯表面。保护渣的粘度过高,使渣膜厚度增加,分布不连续。上述两种现象虽然都能增加热流,但却会造成铸坯表面质量恶化的不良后果。

总之,在一定的条件下,结晶器内钢液凝固的快慢,取决于结晶器在水平方向上铜壁传输给冷却水热流量的大小。而这个热流量的大小,主要取决于钢液—凝固壳—铜壁—冷却水传热系统中各个环节的热阻。其中,凝固壳与铜壁之间的气隙热阻为总热阻的 71~94%,因此,它对结晶器内钢液凝固的快慢起决定性作用。铜壁与冷却水间的界面状态也是决定热流量大小的重要因素,对于结晶器来说应力求避免后两种情况的传热,为了保证有第一种传热状态,除了结晶器应具有合适的锥度以外,同时还要有下列保证措施:

1)结晶器水缝中冷却水的流速,应当大于 6m/s。若再增大水的流速对热流的影响不大。

2)控制结晶器冷却水的进水和出水温度差在 5~6℃,不得超过 10℃。

3)结晶器的设计、结构合理:

A. 结晶长度 钢液在结晶器内冷凝时,50%以上的热量是在结晶器上部释放的。结

晶器下部则主要对铸坯壳起支承作用。显然,短结晶器有利于热量的传输,减少设备费用,增加结晶器的使用寿命。但是,短结晶器应当以不增加铸坯拉漏的危险性为原则。目前,结晶器长度一般以 700 ~ 900mm 为宜。

B. 结晶器壁厚度 :方坯结晶器壁厚为 8 ~ 10mm,对热量传输的影响不大。板坯结晶器壁厚度由 40mm 减少到 20mm 时,传输的热流仅增加 10%。

C. 结晶器内表面状态 :前苏联曾采用波浪式内表面结晶器,使有效传热面积增加了 8 ~ 9%,减小了气隙,传热状况有所改善。结晶器内表面光洁度增加,会使冷却水在结晶器周围水缝中的分布均匀,这对热量的传输也有重要影响。

D. 结晶器材质 :选用 Cu – Cr、Cu – Ag、Cu – Zn 合金制作结晶器,可以增加其使用寿命。但是,铜合金的导热系数比纯铜低,影响结晶器的传热能力。

二、连铸坯在二冷区的冷却凝固

钢的凝固潜热,在结晶器内是不能全部释放出来的。从结晶中拉出的带着液相隙的铸坯进入二冷区,经过喷水或喷雾冷却,使铸坯完全凝固 ;而且还要求铸坯表面温度分布均匀。在这一过程中,铸坯接受喷水或喷雾冷却的效率要高。

由上可知,在其它工艺条件相同时,铸坯的产量和质量直接受到二冷区喷水或喷雾冷却的控制。所以二冷区的喷水强度对连铸机饷生产率影响很大。

铸坯通过传导传热,将中心部分的热量传输到铸坯表面,经喷水或喷雾使得表面温度突然降低,从而在铸坯的表面和中心之间形成较大的温度梯度,给铸坯的冷却造成了动力。铸坯在二冷区内,通过冷却水的加热和蒸发、铸坯表面辐射传热、支承辊传导传热的方式,将铸坯的热量传输出去。对于方坯,由支承辊带走的热量少于板坯带走的热量。在设备和工艺条件一定时,铸坯辐射传热和辊道导走的热量基本上变化不大,因此,二冷区冷却水的传热效率就决定了铸坯完全凝固所需时间的长短。

二冷区的喷水冷却,是一个复杂的传热过程。喷水冷却的效率,可用拉坯方向上铸坯表面温度的变化、传热系数来评价。铸坯的表面温度梯度越大,则冷却的效果愈好。从一个冷却区到另一个冷却区,铸坯表面温度变化一般可达 100 ~ 200℃。但是,由于铸坯表面不可能完全被水、雾覆盖,铸坯还会以辐射、传导的方式进行热量的传输,铸坯表面温度尚在回升,所以铸坯表面温度降低范围波动较大。

1. 喷水冷却方式　要提高二冷区喷水冷却效率,必须提高铸坯表面与冷却水之间的传热系数(h)。而 h 值的大小不仅取决于铸坯的拉速、铸坯的表面温度、冷却水量和水压、水滴尺寸、水流密度、冷却水的喷射角度和喷射距离等,同时还应该控制好冷却水滴

的形成、蒸发、水滴的聚合脱离。在其它条件一定时，二冷区内铸坯的冷却主要取决于冷却水喷嘴的结构，冷却水流量和压力、冷却水的喷射距离。

目前，连铸机普遍采用压力喷嘴，使高压冷却水通过喷嘴时能被破碎为液滴。高压喷嘴有扁平喷嘴、圆锥形喷嘴、矩形喷嘴等，它们的水雾形状如图 9－5－5 所示。扁平喷嘴喷水的范围几乎是一条直线，锥形喷嘴喷水覆盖的圆面积较大。根据钢种、铸坯断面的大小和形状的不同，对所采用的冷却水喷嘴应当进行合理的选择。

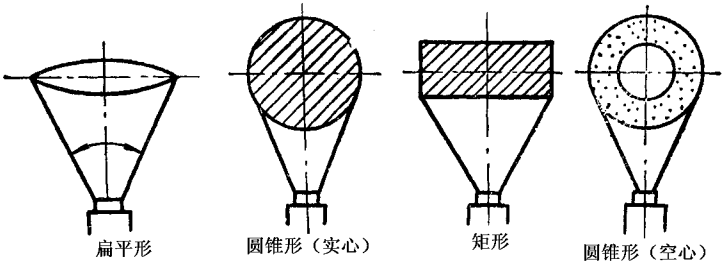


图 9－5－5　不同喷嘴的喷雾形状示意图

要提高二冷区冷却水的传热效率，应当有合理的喷嘴结构。因为喷嘴结构直接影响水流密度、水滴喷射速度、水滴直径等喷雾冷却状态特性参数。

(1)水流密度。如图 9－5－6 所示，增加水流密度，铸坯表面被带走的热量增加，当水流密度大于 $20m^3/(m^2 \cdot s)$ 时，水流密度对铸坯表面传热的影响不大。这是因为水流密度增加，单位体积水滴数目增加，它与喷射在铸坯表面而被反弹回来的液滴相撞失去了能量，使得水滴不能穿透蒸气膜而到达铸坯表面，所以传热量增加不多。

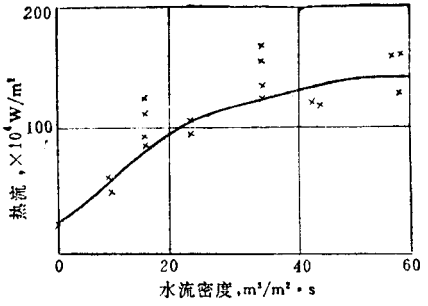


图 9－5－6　水流密度与热流的关系

(2)水滴喷射速度。水滴喷射速度决定于喷水压力、喷孔直径、水的清洁度等。水滴喷射速度增加，穿透蒸气膜而到达铸坯表面上的水滴数增加，则传热效率提高。水滴的

喷射速度可用高速摄影测定，也可以由伯努利方程导出其出口速度（u_0）为：

$$u_0 = \sqrt{\frac{(P_1 - P_0)\frac{2}{\rho} + \left(\frac{Q}{15\pi D^2}\right)^2}{1 + \xi}}$$

式中　$P1$——喷水压力；

P_0——大气压力；

ρ——水的密度；

Q——水流量；

D——喷嘴的水管直径；

ξ——阻力系数。

水滴在空气中的运动状态，若处于牛顿阻力区（$Re > 500$）时，水滴喷射到任一位置的速度可由下式计算：

$$u_i = u_0 \exp\left[-0.33\left(\frac{\rho_a}{\rho}\right)\frac{s}{d}\right] \tag{9-5-3}$$

式中　ρ_a——空气密度；

d——水滴直径；

s——水滴喷射距离。

（3）水滴直径。水滴直径是冷却水雾化程度的标志。在冷却水量一定时，水滴尺寸愈小、则水滴个数越多，水的雾化程度愈好，越有利于铸坯的冷却均匀和传热效率的提高。然而，水滴的尺寸实际上不可能是均匀的。为此，定义水滴的平均直径（d_{ms}）如下：

$$d_{ms} = \frac{\sum_{i=1}^{n} n_i d_i}{\sum_{i=1}^{n} n_i} \tag{9-5-4}$$

水滴尺寸的算术平均值，代表水滴的线性尺寸。增大喷水压力则水滴尺寸减小，有利于水的雾化。如果要计算单位面积上所具有的水滴体积，则应计算水滴的特性直径（d_s）：

$$d_s = \frac{\sum_{i=1}^{n} n_i d_i^3}{\sum_{i=1}^{n} n_i d_i^2} \tag{9-5-5}$$

式中　n——水滴个数；

d——水滴直径。

（4）喷嘴的布置。如果喷嘴布置不合理，会造成铸坯表面局部冷却强度的差异，使铸

坯经历反复的强冷和回热，容易造成铸坯表面和内部裂纹的产生。为了使铸坯承受最小的热应力，必须对铸坯均匀冷却，要求：

1）喷雾水滴要小，而且是均匀地喷射到铸坯的表面；

2）喷射到铸坯表面的水滴，在其表面上停留的时间应当很短，在铸坯与导辊接触的部分不能有积水；

3）喷射到铸坯表面的水滴要大量的蒸发，以达到高冷却效率。

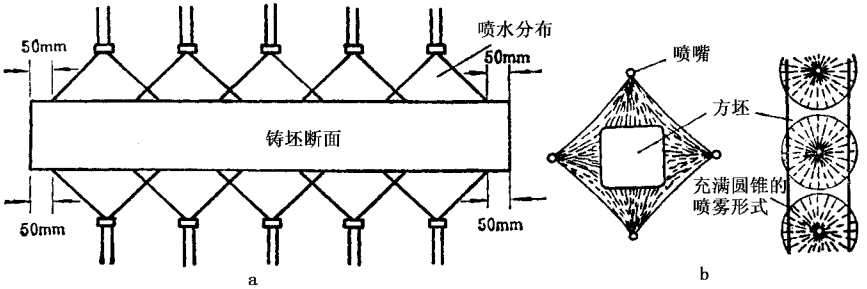


图 9－5－7　板坯和方坯在二冷区冷却水喷嘴布置方式

a—板坯宽度方向的喷水冷却布置方式；b—方坯雾化冷却（即圆锥形喷雾形式）

常见的方坯和板坯的冷却水喷嘴布置如图 9－5－7 所示。由于连铸坯、特别是板坯在角部的散热条件较好，冷却强度大，所以在靠近角部的喷水量应当少些。有的板坯在靠近角部 50mm 处不直接喷水冷却。也有用加强角部冷却，以防止角裂纹产生的冷却水喷嘴布置方式。由于喷嘴在覆盖边缘冷却强度较弱，所以边缘处采用覆盖重叠的布置法。

使用压力喷嘴，事实上是难以对铸坯实现高效、均匀冷却的。采用平行于铸坯表面喷水的办法，可以避免水滴聚集，而使冷却水进一步雾化，根据这种想法将压缩空气和水从两个不通的方向通入喷嘴的混合室汇合，或者在喷嘴外面汇合，借助于压缩空气的能量，将水进一步雾化成为细小水滴，再高速喷射到铸坯表面对铸坯进行冷却。这种气水喷嘴使水滴的平均直径，由原先的（压力喷嘴）200～600μm，减小到 20～60μm。如果水滴的平均直径由 120μm 减小到 60μm，则水滴的表面积与体积的比值从 0.05m^{-1} 增加到 0.1m^{-1}。使用压力喷嘴时，一升水能有 1.1×10^9 个水滴，其水滴面积为 50m^2。而使用气水喷嘴时一升水有 8.89×10^9 个水滴，水滴的总面积为 100m^2。可见气水喷嘴的雾化性能好，冷却效率高。采用气水雾化喷嘴的单喷嘴布置，对弧形板坯的内外弧面冷却，已经收到良好的效果。

2. 二冷制度确定的原则　对弧形连铸机的铸坯，在二冷区要求在矫直点前全部凝

固,铸坯表面的温度均匀分布,接受喷水冷却的效率高。要达到上述要求,从传热的观点出发,在制定二冷区的冷却制度时,就是要增加传热系数 h,以便把铸坯中的热量迅速带走,从而提高二冷区的冷却效率,增加连铸坯的产量;从冶金质量的观点出发,二冷区冷却水的布置,就是要提高冷却效率,切实保证铸坯质量的提高。为此,对确定二冷制度时如何考虑上述两点分别进行讨论:

(1)冷却水量的布置。在二冷区喷水冷却时,铸坯壳的导热为:

$$\Phi = \frac{\lambda_m (T_l - T_s)}{e}$$

凝固前沿放出的凝固潜热为 $L_f \rho_m \frac{de}{dt}$。凝固前沿放出的凝固潜热,应等于铸坯壳的传导传热:

$$L_f \rho_m \frac{de}{dt} = \frac{\lambda_m (T_l - T_s)}{e}$$

积分上式可得:

$$e = \sqrt{\frac{\lambda_m (T_l - T_s)}{L_f \rho_m}} \sqrt{t}$$

$$\therefore \qquad e = K\sqrt{t} \qquad (9-5-6)$$

上式中　T_l——钢的液相线温度;

T_s——铸坯的表面温度;

m——钢的导热系数;

L_f——钢的结晶潜热;

e——铸坯壳厚度;

t——凝固时间;

K——钢的凝固系数。钢液在结晶器中凝固时 $K = 20 \sim 25\text{mm}(\text{min})^{-\frac{1}{2}}$,在二冷区内凝固时 $K = 22 \sim 33\text{mm}(\text{min})^{-\frac{1}{2}}$。

铸坯壳导走的热流,是由喷射到铸坯表面的冷却水滴带走,所以:

$$\frac{\lambda_m (T_l - T_s)}{K\sqrt{t}} = h(T_s - T_w)$$

而 $h \propto 1/\sqrt{t}$;h 与冷却水量 Q 成正比($Q \propto h$),所以:

$$Q \propto 1/\sqrt{t}$$

而

$$t = \frac{H}{u}$$

故：

$$Q \propto \frac{1}{\sqrt{\frac{H}{u}}} \tag{9-5-7}$$

式中　H——液相隙长度；

u——拉坯速度。

铸坯表面的热量，或表面的温度，在二冷区内是从上到下逐渐减少的，因此，冷却水的喷水量也应该沿铸机的高度，从上到下递减，如图 9-5-8 所示。但是，要完全做到这点在技术上是难以实现的，然而将二冷区分成若干个冷却段，在一个段内保持相同的冷却水量，让铸坯在二冷区内的温度被动不大，这依然是可行的。

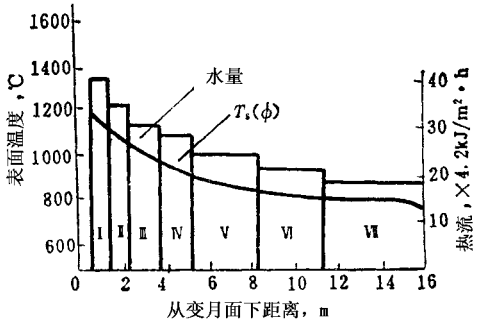


图 9-5-8　二冷区分段冷却

(2)铸坯冷却温度的确定。从铸坯的质量考虑，二冷区的冷却制度，应根据钢种、钢的延性来决定。处于凝固过程中的连铸坯，是由液相区、液固两相区、固相区三个区域组成，而钢的高温延性区分为以下三个区域：

1)高温区：在这个区域内钢的温度为 1300℃到固相线温度以下 50℃。钢的高温塑性和强度都比较低，延伸率仅为 0.2～0.3%，强度仅为 0.49N/mm²。尤其是磷、硫等偏析元素，在枝晶间以液相薄膜的形式析出时，更增加了钢的脆性。这也是造成固液界面容易产生裂纹的根本原因。

2)中温区(1300～900℃)：在这个温度区间，钢处于奥氏体相变范围内，其强度取决于晶界上析出的硫化物、氧化物的数量与形状。如果析出物由串状变为球状时，则强度明显提高。

3)低温区(700～900℃)：这个区域是钢的脆性区。在这一区域内，不仅存在着 $\gamma \rightarrow \alpha$ 的相变，而且在晶界上有 AlN 和碳化物沉淀出来，使钢的延性降低，加剧了裂纹的形成秘扩张。

钢种不同，相应的高温拉伸特性参数曲线亦不相同。700～900℃是钢的延性最低的

“口袋区”。钢成分中的 Al、Nb、V 会使‘口袋区’发生移动。对于圆弧式铸机生产的碳素钢坯,要求铸坯在矫直点前的表面温度应控制在钢的延性最高的 900～1100℃区域内,从而避开‘口袋区’。这是因为在‘口袋区’内不仅钢的延性最低,而且在矫直铸坯时铸坯表面产生拉力,容易形成铸坯裂纹。

(3)二冷制度的选择方案。根据前面的讨论,二冷制度的选择方案有:

1)热行 :是在二冷区内,维持铸坯表面有较高的温度,使其在矫直点高于 900℃以上。这种冷却方式采用弱冷,冷却水用量一般为 0.5～1.0 l/kg。

2)冷行 :是在二冷区内,维持铸坯表面较低的温度,使其在 700～600℃温度范围内矫直,以避开脆性‘口袋区’。这种冷却方式采用强冷,冷却水用量一般为 2～2.5 l/kg。

2)混行 :在二冷区内维持铸坯表面温度在一定范围内,通过二冷区后,再让铸坯温度回升,以保持铸坯的矫直温度大于 900℃。

在生产中,一般都采用第一种方案。当铸坯总的冷却水量确定之后,根据选择的铸坯表面温度,就可以将冷却水合理地布置在二冷区内。对于方坯,在二冷区的长度范围内,冷却水量一般是均匀分布。对于板坯则是从上到下水量逐渐减少。

三、连铸坯凝固冷却的冶金标准

铸机的产量和铸坯的质量,受铸坯冷凝过程中传热状态控制。为了得到高产、优质的连铸坯,应当认真执行以‘连铸为中心,炼钢为基础,设备为保证’的技术方针。

1. 在保证最大拉速的前提下,要求拉出结晶器时坯壳有足够的厚度,而且厚度均匀,以防止拉漏,确保操作安全,生产正常。

2. 要求铸坯表面冷却速度不超过 200℃/m,表面温度回升速度不超过 100℃/m 为宜,以确保铸坯表面温度的均匀性。

3. 连铸坯的凝固过程,实际上是铸坯沿液相隙方向的热加工过程,如果凝固前沿承受的应力,超过了 $T_s - T_{z_0} = \Delta T$ 温度范围内的强度和塑性变形的能力,就有可能导致铸坯内部裂纹的产生。因此,应当限制凝固过程中铸坯的变形,特别是圆弧式连铸机铸坯的液相隙,应限制在矫直点前全部凝固。

4. 圆弧式连铸机生产的铸坯,在内弧侧的振动波谷处,常常出现细小的表面裂纹,这与铸坯矫直时处于 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变过程和钢的高温延性有关。因此,铸坯矫直的温度应当避开‘口袋区’的温度范围。

5. 铸坯产生鼓肚的严重程度,决定于坯壳的高温机械性能和温度的分布。铸坯鼓肚严重,会导致中心偏析和中心裂纹的产生。因此,对于鼓肚极限应当严格加以限制。

在设备一定的条件下，坯壳厚 e、液相隙长度 H、铸坯表面温度 T_s，受工艺条件如浇注温度 T_c、结晶器冷却水量 Q_m、二冷区冷却水量 Q_s、二冷区水温度 T_w、拉坯速度 u 等的强烈影响，它们之间的关系可表示为：

$$e \cdot H \cdot T_s = f(T_c \cdot Q_m \cdot Q_s u \cdot T_w、铸坯断面、钢种\cdots\cdots)$$

为了保证铸机高产、优质，应对不同的钢种确定合适的控制参数，以满足上述冶金标准的要求。因此，应当在连铸生产中不断试验研究，探索合适的经验数据用以指导生产，亦或用铸坯凝固传热的数学模型优化计算，确定适合冶金标准的工艺参数，以便逐步在生产实际中加以应用。

第二节　连铸坯的凝固结构

连铸坯的凝固，相当于一个高、宽比特别大的钢锭的凝固。由于铸坯凝固时受到强烈的喷水强制冷却，所以，凝固时的温度梯度、冷却强度都比钢锭大得多。为此就连铸坯凝固特点讨论如下：

一、连铸坯的凝固特点

钢的导热性能差，采用传统的模铸工艺时，钢液往往需要几十分钟到几个小时才能完全凝固。连续浇注时，为了保证连铸机具有一定的生产能力，采用冷却水强制冷却，温度梯度很大，连铸坯的冷却强度比钢锭的大得多，几分钟或几十分钟内即完全凝固。而且，还能够通过改变冷却制度，在一定程度上控制连铸坯的结构。

由于钢的导热性能差，所以，连铸机适合于浇注高（长度）、厚比很大的连铸坯。连铸坯的凝固过程，实际上可以认为是沿液—固界面，将液相钢液不断转变成固相钢的热加工过程。从结晶器拉出来带有液芯的铸坯，一边运行、一边凝固，形成了一个很长的锥形液相隙。处于凝固过程中的铸坯所承受的应力和变形，直接影响着铸坯裂纹的形成。

在正常的操作情况下，铸坯是在大体上相同的凝固条件下凝固的。而且，是连续地从结晶器中拉出，所以其液相隙的形状和位置也基本上保持不变，即使铸坯在长度方向位置不同，但凝固也能在相同的条件下进行。因此，整个铸坯除了开始浇注时的‘头’和浇注完毕时的‘尾’之外，在铸坯整个长度方向上的结构基本上是相同的。

连铸坯凝固的断面较小，而且首先从侧面优先凝固，在内部有可能形成深达几十米

的液相隙，容易造成因钢液填补不足而出现的中心缩孔等缺陷。同时，还由于在液相隙内，钢液的自然对流微弱，所以，要求弧形连铸坯液相隙内的钢液，能呈弧形移动。因此，这就严重的影响着弧形连铸机的铸坯壳的良好形成，以及铸坯结构、成分的均匀性和夹杂物的排除。

二、连铸坯的凝固结构

连铸坯与钢锭的凝固条件虽然差别很大，但其低倍结构与钢锭相比，仍然没有本质的差别，只不过连铸坯的柱状晶比较发达，树枝晶更细一些而已。如图 9－5－9 所示，连铸坯结构可分为下列三个结构带：

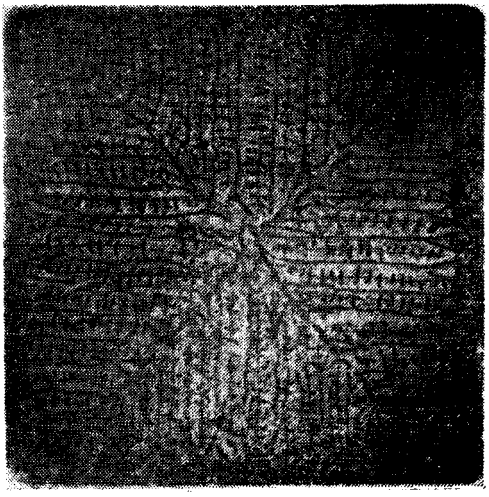


图 9－5－9　连铸坯凝固结构示意图

1. 表面细小等轴晶带　钢液注入结晶器以后，受到结晶器壁的急剧冷却，围绕结晶器的周边形成了细小的等轴晶带。这个晶带的厚度一般为 2～5mm。如果浇注温度高，细小等轴晶带的厚度减薄。浇注温度低，细小等轴晶带的厚度增加。

2. 柱状晶带　在已形成的细小等轴晶的基础上，一些在散热方向上具有优先成长方位的晶体将继续长大。如果在结晶前沿液相中成分过冷度很大，则晶体即呈树枝状发展，从而形成了大体上平行于散热方向的树枝晶集合组织（柱状晶）。当铸坯中心形成了等轴晶带、阻止了柱状晶的成长时，柱状晶停止生长。

（1）连铸坯柱晶的凝固特点。当铸坯拉出结晶器后，由于使用冷却水直接冷却，所以其凝固速度比模铸钢锭大得多。如果以 G 表示液—固相中、液相的温度梯度，以 R 表示凝固速度，则对同一成分钢液的 G/R^n 越小，就越容易形成成分过冷，所以对于 G/R^n 比

普通钢锭小的连铸坯，易于形成树枝状的凝固组织。另外，由于连铸坯的坯厚比普通钢锭小，因此，柱状晶的成长，有时会贯穿铸坯中心，形成所谓桥的穿晶结构。特别是方坯，常常会出现每隔 5～10mm 有规则的凝固桥，并伴随有疏松、缩孔的小钢锭结构出现，如图 9－5－10 所示。图中所示的形成过程Ⅰ，是有规则生长的柱状晶；Ⅱ是不稳定生长的柱状晶所导致的局部区域的某些树枝晶的更快生长；Ⅲ是局部区域两边相对生成的树晶相互连接，或是由于等轴晶核下落到凝固前沿，被柱状晶捕集而形成的桥，Ⅳ是液相内的钢液被凝固隔开，在桥下面的残余刨液凝固时，未能得到钢液填补收缩而形成了缩孔和疏松，在缩孔和疏松形成的同时，伴随着有严重的中心偏析产生。小方坯中的小钢锭结构的形成，加剧了钢液中溶质元素 S、P、Mn、C 的轴向偏析，致使铸坯在热加工时会产生脆性和断裂。

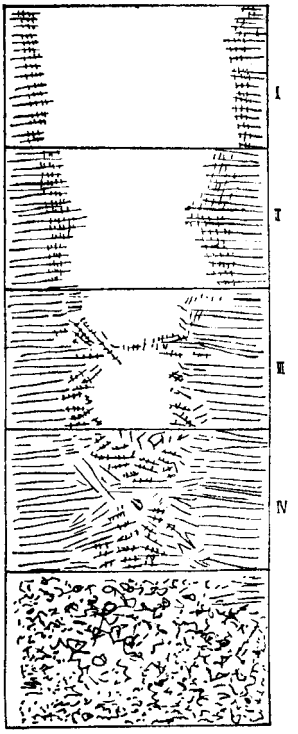


图 9－5－10　小钢锭结构形成示意图

从连铸坯的纵剖面看，柱状晶并不完全垂直铸坯表面，而是向上有一定的倾斜角度（约 10°）。从横断面看则树枝呈竹林状。经研究发现，柱状晶总是迎着钢液流动的方向发生倾斜，而且钢液的流速越大，倾斜愈严重。这是由于钢液在结晶过程中，溶质不断富集，在成长着的晶体表面存在着一个妨碍凝固继续发展的界面层。但是，在迎着流动钢

液冲刷的部分界面晶体会被破坏，于是，该部分晶体得以优先成长，造成柱状晶向钢液流动的方向发生偏转。研究表明，以 0.03～0.3cm/s 的速度流动的钢液，会使含碳 0.5～0.65%的钢液旋转并凝固。根据对偏转角度详细测定的结果，偏转角不随凝固距离而发生连续变化，只在树枝晶成长的某段距离内，其偏转角不变。图 9－5－11 是对偏转角度（θ）、钢液凝固速度（R）、钢液流动速度（u）之间关系的测定。偏转角与凝固速度的对数成直线关系，并随钢液流动速度的增加而增大。最近，许多研究指出，钢液流动对夹杂、偏析有很大的影响。因此，可以根据测定的树枝晶偏转角来推澜钢液流动的状况，进而研制出适当的水口形式，以调整钢液在液相隙内的运动，从而达到减少夹杂、偏析和改善铸坯质量的目的。

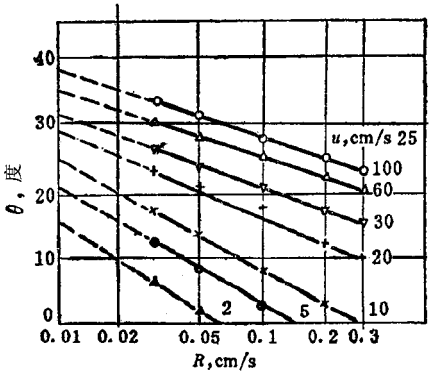


图 9－5－11　凝固速度 R、钢液流动速度 u 对树枝晶偏转角 θ 的影响

（2）影响连铸坯柱状晶宽度的因素分析。柱状晶带与等轴晶带的相对宽度，主要取决于浇注温度。浇注温度越高，则液—固相区的温度梯度越大，保持定向传热的时间就越长，有利于柱状晶的生长，柱状晶带的宽度增加。如 C0.08～0.12%，Mn1.15～1.3%，拉速为 0.6～1.1m/min，二冷的比水量为 0.7～0.951/kg，中间包钢水过热度与柱状晶和等轴晶的关系如图 9－5－12 所示。柱状晶宽度的增加，使形成凝固桥的可能性增加，轴向偏析加重。浇注温度低，能够为钢液的结晶提供大量的等轴晶晶核，较早地阻止柱状晶的生长，使等轴晶带加宽。因此，扩大等轴晶带最有效的手段，是尽可能在该钢种的液相线温度进行浇注。但是，钢液的过热度太低，会使水口冻结。通常，中间包钢水的过热度应控制在 20～30℃。如果钢水过热度过大，还可以在结晶器内加入铁粉，或在钢包、中间包内加入清洁的小废钢、薄钢等进行调整。

二冷区的冷却水量大，则铸坯表面温度低、断面上的温度梯度大，有利于柱状晶的生长，柱状晶带变宽。降低二冷水量，可以减少柱状晶的宽度，使等轴晶带的宽度增加。如

图 9－5－13 所示。因此，可以通过控制二冷水量抑制柱状晶的生长。但是，二冷水量的多少，会影响液相隙的深度、铸坯鼓肚、铸坯表面温度的分布、铸机的生产率等，所以确定二冷水量时应予以综合考虑。

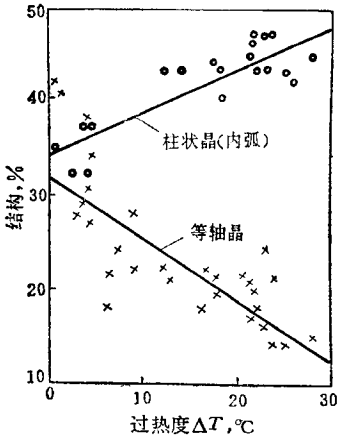


图 9－5－12　过热度与铸坯的等轴晶与柱状晶的关系

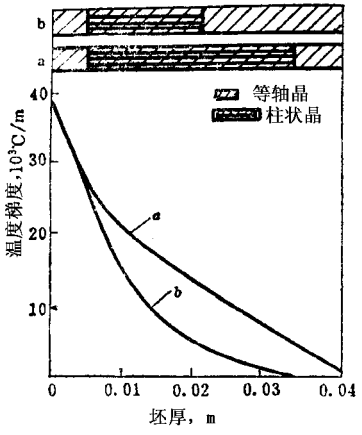


图 9－5－13　二冷水量与铸坯结构的关系

a—正常冷却；b—冷却强度减少

拉速对铸坯结构无显著影响。如 180 × 180mm² 方坯，在拉速为 1.32m/min 和 3.4m/min 时，结构基本相同。从理论上讲，拉速增加，钢液在结晶器内停留的时间减少，从而使得转移钢液过热度所需要的时间增加，推迟了中心等轴晶的生长，增加了柱状晶的宽度和轴向偏析。拉速增加，还使得液相隙深度增加，因而凝固桥和中心缩孔更加容易形成。

立式连铸机的铸坯结构对称。但圆弧式连铸机的铸坯，内弧侧的柱状晶长，外弧侧的柱状晶短，其差别情况如图 9－5－14 所示，130mm^2 方坯的内弧侧柱状晶长 50mm，而外弧侧柱状晶长仅为 25mm。形成这种内、外弧侧柱状晶长度差的原因，是由于注流流股所引起的强制流动，冲刷凝固前沿，打碎树枝晶，在重力的作用下，沉积到外弧侧的柱状晶上面，从而阻止柱状晶生长的结果。此外，水口注流流股的不对称运动，也会阻止外弧侧柱状晶的生长。

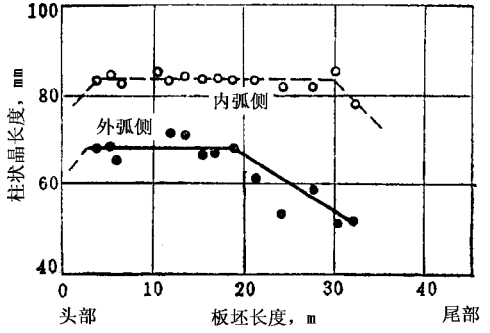


图 9－5－14　板坯内外弧侧柱状晶长度的变化

C＝0.11%；Si＝0.22%；Mn＝0.42%；P＝0.022%；

S＝0.022%；溶解 Al＝0.038%

液相隙内注流流股的运动，会影响钢液过热度的消失、晶核的形成以及铸坯的结构。根据放射性同位素的测定结果表明，液相隙内钢液的流动分为强制性对流循环区（结晶器以下），强制对流向自然对流的过渡区、以及自然对流区。强制对流区决定于注流混合冲击深度，它主要与水口类型、铸坯拉速、铸坯断面有关。有人曾提出，水口注流冲击的深度是铸坯宽度的 4～6 倍。在自然对流区，钢液已接近于液相线温度，能够生成大量晶核形成等轴晶。

3．中心等轴晶带　中心等轴晶带由细小无规则排列的等轴晶组成。等轴晶所占比例的大小，是衡量连铸坯宏观质量的标准之一。本段只阐述连铸坯内打碎了的树枝晶片形成等轴晶的问题：

就圆弧式连铸机而言，即使是在内、外弧侧冷却速度相同的情况下，被打碎了的树枝晶片也会在铸坯的圆弧外侧沉积。由于沉积下来的树枝晶片没有被溶解的高温条件，加之温度梯度越来越小，所以这些沉积下来的树枝晶片，就有可能成长为等轴或分叉的柱状晶。浇注温度越低，温度梯度越小，成分过冷范围越宽，越容易生成等轴晶。由于连铸坯是从周围进行强制冷却的单方向凝固的，所以，在结晶将要结束的中心部位，必然聚集

着富集了溶质的钢液。如果这些钢液被凝固桥隔开，桥下残余钢液凝固时产生的收缩，就会由于得不到钢液的补充，形成中心缩孔和疏松，在缩孔和疏松的周围出现严重的偏析。

不难看出：由于结晶器的冷却强度比模铸大，铸坯的激冷层比钢锭的激冷层厚，晶粒更细，而且还可以得到没有侧枝的细柱状晶。由于铸坯始终处于强制冷却的过程，所以柱状晶比较发达，容易形成凝固桥，在凝固桥下部有中心缩孔和疏松形成。连铸坯液相内钢液的流动，形成了有明显倾角的柱状晶。连铸坯组织比钢锭致密，低碳钢连铸坯的密度一般为 $7.6g/cm^3$，然而同钢种钢锭的密度仅为 $7.4g/cm^3$。

第六章　连铸工艺

第一节　连铸钢水的准备

连续铸钢是在钢水处于运动状态下，采取强制冷却的措施成型并连续生产铸坯的过程。连铸的工艺特点决定了它对钢水质量—温度、成分、脱氧程度和纯净度等都有极为严格的要求。关于钢水纯净度，在本书第五部分有专节讨论。本节着重讨论钢水在钢包中的温度控制、成分控制和脱氧控制。

一、钢水在钢包中的温度控制

连铸钢水必须具备稳定而合适的温度，不得过高或过低。钢水温度过低，会在钢包或中间包中结瘤冻结，导致浇注中断并恶化铸坯表面质量。钢水温度过高，会使铸坯柱状晶发达，这将促进中心偏析、疏松和裂纹等缺陷的发展。同时会加剧钢水自身的二次氧化及对钢包包衬、水口耐火材料的熔损，从而污染钢水。温度过高还会引起水口失控，并使坯壳厚度减薄而产生漏钢事故。此外，温度过高时，只能采用低速浇注，这将降低铸机的生产率。因此，连铸钢水具备合适的温度既是保证连铸正常生产的前提，又是获得良好铸坯质量的基础。

在连铸生产中，由于增加了中间包，其水口直径小、浇注时间长，使钢水的热损失增加，因此对同一钢种来说，采用连铸比模铸时的钢水温度要高 20 ~ 50℃，连铸连浇时，第一包的钢水温度比第二包要高 10 ~ 15℃。此外，在整个浇注过程中，钢水温度必须稳定

均匀，其波动范围应小于 10～20℃。不仅一炉钢在钢包内的上、下温差要小，而且相邻炉次之间温差也要小。

为了满足连铸钢水温度的上述要求，首先，必须根据冶炼钢种严格控制出钢温度，使其在较窄的范围内变化；其次，要最大限度地减少从出钢、钢包中、钢包运送途中以及进入中间包的整个过程中的温降。影响温降的因素很多，加上必须保证钢包中钢水温度均匀，所以实际生产中采取在钢包内调整钢水温度的措施。一方面对包内钢水温度的不均匀性进行调整，如吹氩调温；另一方面当钢水温度偏高或偏低时，进行相应的调整，如加废钢降温或加热升温等。

(1)钢包吹氩调温。钢包内的钢水，受到包衬材料的吸热、散热以及表面的热辐射散热作用，钢包内底层及四周钢水的温度比中心部位低，其最大温差可达 30～70℃。这样的钢水如直接浇注会出现开浇温度偏低，而浇注中期温度又偏高。因此，连铸生产中已广泛向钢包中吹入氩气来搅拌钢水，使钢包内温度均匀。

通常有两种钢包吹氩方式。一种是上吹法，通过插入与塞棒外形相似的吹氩棒，其中空部分用于吹氩，头部采用透气砖，氩气由吹氩棒经透气砖吹入钢水之中；另一种是底吹法，氩气由钢包底部的透气砖吹入。两种吹氩方法示于图 9－6－1。上吹法与底吹法相比，后者搅拌范围大，均匀温度的效果较好，而且省去了插入钢水的吹氩棒。

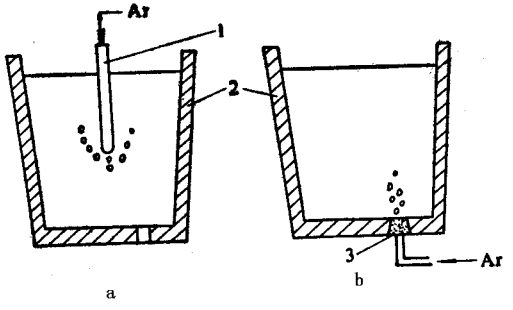


图 9－6－1　钢包吹氩示意图

a—上吹法；b—底吹法

1—吹氧棒；2—钢水包；3—透气砖

除了钢包吹氩以外，在钢包中进行的其它精炼措施，如喷吹搅拌、电磁搅拌、真空搅拌等，都能获得均匀温度的效果。因此，如采用这些方法，则不必采用单一的吹氩搅拌。

吹氩搅拌不仅具有明显的均匀钢水温度的效果(见图 9－6－2)，而且还能促进钢中的氮和氢以及钢中非金属夹杂物上浮排除。根据国内某厂对 25t 钢包吹氩结果表明，吹氩后的钢水，浇注前期和中期的平均温差为 3℃；而未吹氩的钢水浇注前期和中期的平均

温差为 14℃，即吹氩以后温差减少了 11℃。同时还用浓差电池定氧法测定了钢中含氧量，多数炉次吹氩后，钢中含氧量有所降低（大约降低 15ppm）。此外，吹氩后还可使钢中含氮量降低（大约平均降低 4ppm），脱氮率在 8% 左右。图 9－6－3 为钢包吹氩时，脱氢和脱氮量与氩气消耗量的关系。图 9－6－4 为吹氩对去除夹杂物的影响。

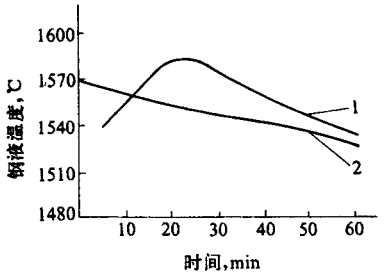


图 9－6－2　中间包内钢水温度变化示意图

1—钢包不吹气；2—钢包吹气

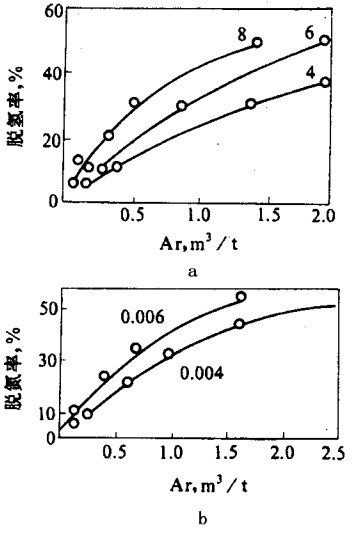


图 9－6－3　钢包吹氩时的脱氢和脱氮量与氩气消耗量的关系

a—脱氢；b—脱氮

生产实践表明，吹氩搅拌的气体消耗量一般在 0.1～0.5Nm³/t 钢，吹氩时间在 3～5min 时，即可满足均匀钢水温度的要求。

(2)加废钢调温。当钢水温度偏高时，可在吹氩搅拌的同时，向钢包内加入纯净的轻型废钢，降低钢水温度，生产实践表明，加入量为钢水质量百分之一的废钢，可使钢包内

钢水温度降低约 14℃。这相当于使钢水温度每下降 1℃，每吨钢水需加废钢 0.7kg。采用在钢包中加废钢降低钢水温度的措施，冷却效果稳定，并能提高钢水收得率。

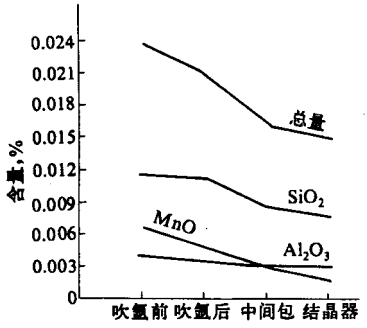


图 9－6－4　吹氩对去除夹杂的影响

(3)在钢包中加热钢水技术。从出钢到连铸，钢水经过的环节多，有较大的温降。为适应连铸需要，通常多采用高温出钢的办法加以补偿。但是这不仅会延长冶炼时间、恶化钢水质量、加剧对炉衬的熔蚀，而且使连铸溢漏率增加、铸坯质量下降，显然这是不可取的。

另一方面，由于操作不当或设备故障等种种原因，钢水温度偏低而无法连铸时，对于全连铸车间，只能将低温钢水回炉；对于还有模铸的车间，只能改为模铸。这不但会打乱连铸的作业计划，而且还会造成一定的经济损失。

如能在钢水包中对钢水加热升温，则有可能降低出钢温度，减轻炼钢炉的负担；可以精确地控制钢水温度和成分；对于事故造成的低温钢水也可以应急补救，从而可以均衡地组织炼钢和连铸生产。20 世纪 80 年代初，国外开发了简易的钢包加热技术，如 Cas－OB、IR－UT 以及氧燃加热等。

国内外的生产实践表明，使用一些简易的钢水升温装置，不但操作简单，投资费用少，而且升温速度快。如 Cas－OB 法，升温速度一般为 5～10℃/min，最高可达 19℃/min。升温处理过程中，对钢中元素及夹杂物含量的变化影响甚小。当吹氧加热时间约为 5min，总的处理时间在 15min 左右时，能使钢水升温 25～30℃。由于钢包加热钢水技术显示出明显的优越性，正在成为炼钢高效、均衡、稳定生产的重要措施，逐渐得到推广应用。

(4)钢水包的保温。减少和稳定钢水从出钢到浇注过程的温降，是保持和稳定钢水合适浇注温度的一项重要措施。影响钢水过程温降的一个主要因素是钢包的保温性能，它取决于钢包容量、包衬材质、使用次数、间歇时间及烘烤温度等。对钢包采取的保温措

施通常有：

1)钢包上加耐火材料砌筑的包盖,以减少钢水表面的辐射热损失。钢包加盖除对钢水表面和其上的熔渣保温外 还可减少包衬散热,有利于提高包衬温度,从而缩短钢包烘烤时间。

2)采用轻质散状浇注料浇灌钢包的整体永久层,可减少包衬的散热损失,达到良好的保温效果。

3)加快烘包的升温速度和加速钢包的周转,减少间歇时间,实现‘红包出钢”。“红包出钢’可使钢包内温降减少到 0.3～0.4℃/min 以下。例如某厂烘烤 70t 钢包采用快速烘烤装置,平均升温速度为 21℃/min,烘烤 15min,包衬温度达到 850℃以上。烘烤后的钢包,从出钢至吹氩前的温降由未烘烤包的平均温降 80～90℃减少到 50～60℃。图 9－6－5 示出钢包温度对热流速度的影响。

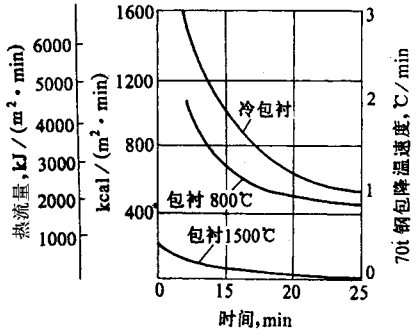


图 9－6－5　包衬温度对热流速度的影响

4)在钢包的液面上加保温材料进行绝热保温。生产实践中应用的炭化稻壳、蛭石、多孔硅岩等都有良好的保温效果。表 9－6－2 列出各种钢水表面覆盖剂对表面散热的影响,数据表明,以炭化稻壳的保温效果为佳。

二、钢水成分的控制

为了获得质量优良的铸坯并能顺利浇注,要求连铸用钢水的化学成分应符合钢种规定,并在较窄的范围内变化,还要根据不同钢种对连铸过程影响铸坯质量的主要成分进行控制。对各元素的具体要求如下：

碳 碳是钢中最基本的对钢的组织性能影响最大的元素,特别是直接影响铸坯的热裂纹倾向性。例如连铸板坯时,碳在 0.14～0.16%时,板坯表面纵裂纹明显增大 ;碳在 0.1～0.16%、锰在 0.7%以下时,裂纹发生率最高。据我国宝钢炼钢厂连铸板坯的实践,

含碳量在 0.09～0.14%的纵裂发生率最高，为减少纵裂的出现，在符合钢种标准的前提下，对钢水的碳和锰应给以适当的调整。为此，根据连铸工艺要求，规定钢水含碳量应尽量避开 0.18～0.23%的范围，这是因为在此范围的钢凝固时发生包晶反应，产生较大的相变应力，使凝固壳纵向厚薄不均匀，容易产生横向温度梯度而导致铸坯表面纵裂。此外，对多炉连浇的钢水，要求上下两炉含碳的差别不超过 0.02%。

硅和锰　钢中的硅和锰既能控制脱氧程度、又影响钢的机械性能和钢水的可浇性。按照钢种规定适当提高锰含量（按中上限控制）能提高钢的机械强度并改善钢水的流动性（即可浇性）。硅在钢中起强脱氧作用，但其脱氧产物（SiO_2）的析出会增加钢水的粘度而恶化钢水的可浇性，因此应按钢种规定适当降低硅含量（按中下限控制），即控制钢水有较高的 Mn/si 比。例如连铸三号钢时，控制 Mn/si 在 4.0 左右，可以避开碳的热裂纹敏感区，并得到液态的硅酸锰脱氧产物，使钢水有较好的流动性。此外，还应将硅锰控制在较窄的范围并做到上下两炉相对稳定。

硫和磷　硫和磷是影响钢的裂纹敏感性的重要元素，特别是连铸坯在成型过程中，一方面受到强制冷却产生的热应力，另一方面又受到拉坯和矫直产生的机械应力，增强铸坯对裂纹的敏感性，从而使硫、磷的有害作用更加突出。以连铸板坯为例，当硫含量在 0.025～0.030%时的表面裂纹增多，这是因为硫使钢的延伸率显著降低的缘故。因此，必须最大限度地去除钢中的硫和磷。目前连铸技术发展的趋势是通过铁水预处理以及各种精炼技术，尽量降低钢中硫和磷的含量。通常连铸钢水中硫和磷应分别低于 0.03%，硫加磷应低于 0.055%，而对于某些特殊钢种，要求硫磷含量分别控制在 0.005%以下。

除了对上述常规元素进行控制以外，对钢中残余元素也应加以控制。如对易增加钢的脆性的铜和锡应限制在 0.02%以下。其它元素如砷和锑的含量也不得超过 0.05%。

三、钢水脱氧程度的控制

目前连铸只能浇注镇静钢，一般是加铝作为终脱氧剂。因此连铸钢水的脱氧控制实质上就是钢中残铝量的控制。生产实践证明，当钢中〔Al〕小于 0.0015%时，铸坯容易产生皮下气孔和表面缺陷；而当钢中〔Al〕大于 0.006%时，则易引起水口堵塞，并使铸坯中夹杂物增多。因此应根据浇注钢种适当控制钢中残铝量。为了提高脱氧效率并使脱氧产物成为液态，以改善钢水的流动性，通常采用 Mn－Si－Al 综合脱氧。图 9－6－6 示出 1550℃时 Mn－Si－Al 脱氧平衡下的 Al－O 关系。

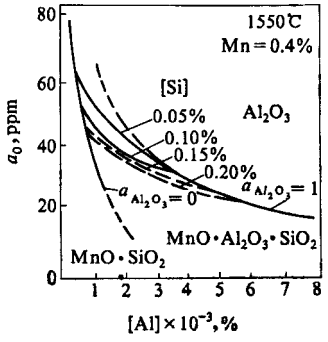


图 9－6－6　钢中〔Si〕〔Mn〕含量对〔Al〕－O 关系的影响

(1)Si 和 Mn 的加入,降低了与〔Al〕平衡的〔O〕,即提高了 Al 的脱氧能力。当〔Si〕小于 0.1%时,Si 能显著提高 Al 的脱氧能力;〔Si〕大于 0.15%时,Si 提高 Al 的脱氧能力减弱。

(2)含〔Si〕量相同的情况下,Si 提高 Al 脱氧的能力是随着含〔Al〕量的增加而减弱的。图中 $a_{Al_2O_3}=1$ 的曲线以上的区域,是指脱氧产物是纯 Al_2O_3,在该区硅已不参加脱氧反应了。

(3)在一般低碳钢含〔Si〕、〔Mn〕的范围内,钢中〔Al〕大于 0.006%时,Al 的脱氧产物将是纯 Al_2O_3。因此,一般低碳钢连铸时,应严格控制〔Al〕含量小于 0.006%,以免形成纯 Al_2O_3 堵塞水口。

此外,通过平衡计算得到,在含〔Si〕相同的情况下,随着 Mn/Si 比的提高,Al 的脱氧能力明显提高。

必须指出,Ca 具有较强的脱氧能力,通常把钙制成 Ca－Si、Si－Ca－Al－Fe、Si－Ca－Ba－Al－Fe 等合金材料用于钢的脱氧,一方面可提高钙的利用率(当铁液中含有 10%的 Si 时,钙在铁中的溶解度可达 0.35%);另一方面 Si、Ca 与〔O〕反应形成的液态硅酸钙产物,易于上浮排除,从而可避免水口结瘤和堵塞。因此,用 Si－Ca 合金代替部分 Al 用于低碳钢水的脱氧,已成为防止小方坯连铸中水口堵塞的重要措施。而 Ca－Si－Al－Ba－Fe 正作为良好的脱氧剂和清洁剂被推广使用。

关于加铝脱氧的操作,由于铝比钢水的密度小得多,如直接投入钢包,难于进入钢水深处,影响脱氧效率。为了提高和稳定铝的收得率,严格控制钢中的〔O〕和〔Al〕含量,生产中应用如图 9－6－7 所示的三种方法。

图中 a 为芯管加铝法,它是将铝浇注到钢管内,称为铝芯管。在出钢之前,预先将铝芯管放入钢包之中,防止出钢时铝与渣直接接触,以提高铝的脱氧效率。

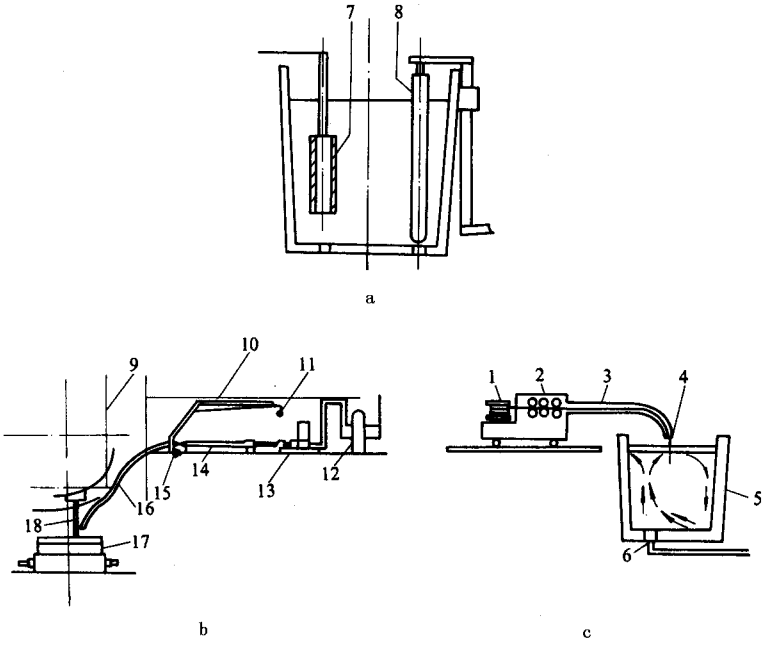


图 9－6－7　钢水包内加铝方法示意图

a—铝芯管加铝法；b—铝弹发射装置；c—铝丝添加法；

1—铝盘线；2—夹送辊；3—导管；4—铝丝；5—钢水包；6—多孔塞；7—铝芯管；

8—塞棒；9—LD 转炉；10—曲射导管升降装置；11—绞车；12—储气罐；

13—添加铝弹发射装置；14—固定导管；15—导管连接器；16—曲射导管；17—盛钢桶；18—出钢流

图中 b 为铝弹发射法，它是通过发射装置将弹形铝块以很高的速度射入钢包深部，在出钢过程中边出钢、边射入。铝弹从钢水深部向表面上浮的过程中，完成溶解和脱氧的任务。

图中 c 为喂铝丝法。出钢后向钢水包或结晶器中加入铝丝，大多用于钢包中加铝之后对钢水含铝量的调整。该法还可用于向钢中添加稀土及钙等特殊元素。

为了稳定脱氧操作，提高脱氧元素收得率，控制钢中含氧量，还须注意在出钢过程中的挡渣操作。转炉出钢的挡渣方式有挡渣帽、挡渣球和挡渣棒等多种。其中以挡渣球应用最普遍，这种方法简便易行、效果明显。据我国中、小转炉的统计资料，使用直径为 220～250mm，密度为 4.6～4.7g/cm^3 内充型砂的铸铁挡渣球挡渣，可使钢包内渣层厚度波动在 30～70mm 的范围，比未用挡渣球时的渣层厚度减少 80～120mm，脱氧元素硅和锰的收得率分别提高约 10%和 5%。同时钢中〔Si〕含量更趋稳定，并增加了钢包的使用次数。

在电炉出钢过程中，为防止炉渣进入钢包，近年来已研制出多种除渣技术，如真空除渣法、虹吸除渣法、偏心炉底出钢等。其中偏心炉底出钢技术已得到推广应用。根据我国 10t 电炉试验结果，采用偏心炉底出钢，不但可以有效地防止炉渣进入钢包，而且可以缩短冶炼时间，降低电耗和耐火材料消耗。

第二节　中间包钢水温度控制

一、浇注温度的确定

为了保证铸坯的质量和连铸操作的正常进行，必须控制合适而稳定的浇注温度。在连铸生产中浇注温度即中间包钢水温度，它取决于所浇钢种的液相线温度 $T_{液}$ 和适宜的过热度 ΔT，即：$T_{浇注} = T_{液} + \Delta T$。可见，控制浇注温度即控制中间包内钢水的过热度 ΔT。

中间包内钢水的过热度 ΔT 取决于钢种、铸坯断面及浇注条件等因素。如钢中含碳低，铸坯断面小，过热度应大些；钢中碳、硅、锰含量高，铸坯断面大，过热度可取低值。浇注条件主要指钢包及中间包的热工状况，即钢水在钢包及中间包内因热量损失引起的温降。

$$\Delta T = t_{出钢} - \Delta t_{过程} - t_{液} \tag{9-6-1}$$

式中　$\Delta t_{过程}$ 是从出钢到开始浇注的过程温降，其表达式如下：

$$\Delta t_{过程} = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 \tag{9-6-2}$$

式中　Δt_1 ——出钢过程中钢水的温降；

Δt_2 ——出钢后到钢包处理前钢水的温降；

Δt_3 ——钢包处理过程中钢水的温降；

Δt_4 ——处理后至钢包开浇前钢水的温降；

Δt_5 ——钢水从钢包注入中间包的温降。

钢水过程温降状况示于图 9-6-8。

(1)出钢过程中钢水温降 Δt_1。出钢过程中，钢流自身因辐射、对流散热，加入铁合金的吸热以及钢包内衬的吸热，引起钢水温度降低 Δt_1。它和出钢温度、出钢时间，加入铁合金的种类、数量以及钢包的使用状况等因素有关。其中影响较大的是钢包的使用状

况，例如包衬烘烤温度、包底是否有残钢、钢包上是否加盖等。我国目前中、小转炉钢厂使用的 20～70t 钢包，由于使用状况不同，Δt_1 波动在 40～70℃的范围内。

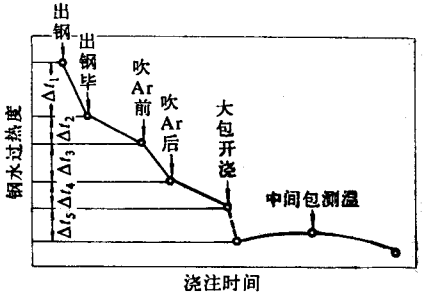


图 9－6－8　钢水温度变化示意图

(2)出钢后到钢包处理前钢水的温降 Δt_2。Δt_2 主要取决于钢包的容量、包衬材质及温度，同时和钢包运输的距离(时间)有关。正常生产条件下，Δt_2 波动不大，对 $\Delta t_{过程}$ 影响较小。

(3)钢包处理过程中的温降 Δt_3。Δt_3 取决于处理方式及时间。例如向钢包吹氩，由于氩气的搅拌强化了对流传热，同时氩气本身又吸热，随着吹氩时间的延长、吹氩量的增加，Δt_3 增大。吹氩引起的温降，可由氩气上浮过程中温度的升高及氩气吹入量进行计算。

(4)处理后至钢包开浇前的温降 Δt_4。Δt_4 取决于钢包中的温降和钢包运送到中间包以上的时间，其影响因素与 Δt_2 相同。但因包衬在此之前已得到充分加热，故包衬吸热引起的温降减少，因此 Δt_4 小于 Δt_2。

(5)钢水从钢包注入中间包的温降 Δt_5。Δt_5 与中间包的容量、材质、烘烤温度及保温措施等有关。

通过上述对过程温降的分析，必须最大限度地减少和稳定过程温降，才能保证连铸生产稳定并获得良好的铸坯质量。为此，除了在设计上合理布局，使各工序之间紧凑衔接之外，主要是减少钢包和中间包中的温降。为了保证正常开浇，我国有关工厂根据实践经验，按照钢种、铸坯断面及浇注条件，在操作规程中对最大过热度 ΔT_{max} 做了规定，现将 ΔT_{max} 列于表 9－6－1 中。

按照表 9－6－1 选取 ΔT 时，应充分考虑浇注系统的热工状况，热工状况好时，可取低值；反之则取高值。由于我国目前小方坯连铸生产中钢包及中间包的热工状况均较差，因此选取的 ΔT 值均高于表 9－6－1 中的推荐值。

表 9－6－1　中间包钢水过热度选取值

浇　注　钢　种	板坯、大方坯	小　方　坯
高碳钢、高锰钢	+10℃	+15～20℃
合金结构钢	+5～10℃	+15～20℃
铝镇静钢，低合金钢	+15～20℃	+25～30℃
不锈钢	+15～20℃	+20～30℃
硅　　钢	+10℃	+15～20℃

二、中间包的保温及 Al－Mg 环的应用

由于中间包容量小，水口直径小、浇注时间长，钢水从表面幅射的热损失很大。据有关测定，无覆盖或覆盖不良的中间包，钢水表面幅射热损失占包内总损失的 80～90%。因此，连铸中间包普遍采用表面保温措施，如用绝热板做内衬、加合成渣或炭化稻壳覆盖液面。表 9－6－2 列出几种钢水表面覆盖剂对表面散热的影响。

表 9－6－2　各种钢水表面覆盖剂对表面散热的影响

覆盖剂种类	无　覆　盖	保　护　渣	绝热板＋保温剂	炭化稻壳
钢液表面散失热流 $kJ/m^2 \cdot min$	17263～11326	10450～6897	7520	627

此外，对待用的中间包进行烘烤，减少包衬的散热损失，也有良好的效果。例如对某厂四流小方坯中间包包衬吸热的计算结果是：浇注前期中间包烘烤良好的吸热量比烘烤差的要少三分之一。说明烘烤中间包能明显减少浇注前期的钢水温降。同时，中间包包衬砌筑性能良好的保温层，则可缩短包衬的烘烤时间并减少包衬的散热。

开浇是连铸操作的一个重要环节，特别对于采用绝热板的冷中间包的开浇，由于水口区域的吸热，钢水温度急剧下降，导致中间包水口堵塞或粘棒头。为了保证顺利开浇，连铸工厂通常多采用开浇前在浇口填充 Si－Ca 粉作引发剂，利用 Si－Ca 粉燃烧发热加热钢水。但是这种方法既耗费昂贵的合金又不易控制。近年来国外开发了用 Al－Mg 环作浇口发热剂的新技术，我国武钢二炼钢和武汉冶金研究所共同试制成功 Al－Mg 环。图 9－6－9 示出 Al－Mg 环的安放位置。表 9－6－3 给出其主要技术性能参数。与 Si－Ca 粉发热剂比较，它具有易于燃烧、加热部位集中，热利用率高及材料消耗少等优点。在 10t 中间包共 715 炉试验，结果表明，使用 Al－Mg 环后，出钢温度可降低 10℃左右，连浇炉数增加 1.14 炉，中间包绝热板消耗量降低 87.15t，转炉炉令提高 73 炉。因此，在冷中

间包中推广使用 Al－Mg 环具有重要意义。

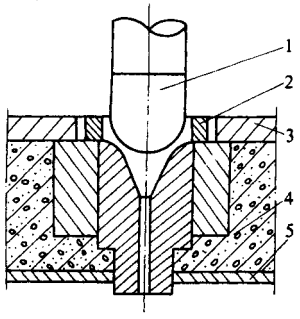


图 9－6－9　Al－Mg 环的安放示意图

1—塞棒头；2—Mg－Al 环；3—绝热板；4—永久层；5—钢壳

表 9－6－3　Al－Mg 合金引流环的主要技术参数

熔　点（℃）	燃烧温度（℃）	发热值（kJ/g）	化　学　成　分　（%）			
			Mg	Al	Fe	其它
427	2000	26.58	65 ± 3	35 ± 3	~0.5	~1.6

三、中间包加热钢水技术

我国一些中小转炉钢厂，因钢水量少，散热量大，在不提高出钢温度的情况下常发生低温事故。目前采用的钢包吹氩工艺，对于稳定中间包钢水温度，虽有一定的作用，但是在连铸过程的不稳定期，如浇注开始、换钢包或中间包以及浇注结束时，中间包中钢水温度仍有较大的波动。因而采用加热技术，调控中间包钢水的温度使之“恒定”，并最大限度减少过热度是十分必要的。

(1)中间包加热钢水的技术，是近十余年来随着连铸生产的发展而兴起的一种新技术。与钢包加热技术相比，都具有降低炼钢炉出钢温度、补充钢水热量之不足的作用。不同的是，钢包加热不能解决连铸不稳定期钢水温度的波动，而中间包加热可根据要求直接调控浇注温度，达到“恒温”浇钢；钢包加热要占用工序时间，而中间包加热可以在线进行，可以边浇钢边加热；钢包容积大，加热装置相应也大，加热后运行中仍在降温，而中间包加热装置小，并在浇注过程中加热，相应升温也低，其热效率也高一些。由于中间包加热技术具有上述种种优越性，国内外不少厂家已在连铸生产中加以应用。

(2)中间包加热技术发展概况。表 9－6－4 列出近几年开发的中间包加热装置概况，从加热方式看，有感应加热和等离子加热两种，其中以等离子加热应用较多。

表 9－6－4　中间包加热装置一览表

序号	国家	公司(厂家)	加热方式	功率(MW)	容量(t)	钢水加热速度(℃/min)	启用日期
1	美国	查帕拉尔钢公司	等离子加热	2.0	15		1988 年 8 月
2	美国	第一密西西比钢公司	等离子加热	1.5	15		1989 年 5 月
3	美国	纽科尔钢公司	等离子加热	1.0	15		1992 年 7 月
4	德国	萨尔钢公司	等离子加热	1.25	18		1991 年 9 月
5	德国	曼内斯曼	等离子加热	1.0			
6	意大利	奥斯塔厂	等离子加热	1.2～1.3	9	5～6	
7	日本	新日铁名古屋厂	等离子加热	2×2.0	60		1992 年 5 月
8	日本	住友金属	等离子加热	1.2	14		1993 年 2 月
9	日本	新日铁广畑厂	等离子加热	1			1987 年
10	日本	爱知钢公司名古屋厂	等离子加热	0.32			1988 年
11	日本	神户加古川厂	等离子加热	5.0	80		
12	日本	钢管东滨厂	等离子加热	2×1.4	35		1989 年
13	日本	钢管福山厂	等离子加热	1.1			1990 年
14	日本	钢管东滨厂	等离子加热	2×1.4	35		1990 年
15	英国	*BOC*	等离子加热	2；1.25；1	35		
16	澳大利亚	格拉厄姆集团	等离子加热	0.30	14		
17	德国	德马克济根厂	等离子加热		6		1991 年 9 月
18	中国	衡阳钢厂	等离子加热	0.8			1992 年
19	中国	唐山钢铁公司	等离子加热	1.0	16		1993 年
20	日本	新日铁宝兰厂	感应加热				
21	日本	川崎钢铁公司	感应加热	10.7			
22	法国		感应加热	7.0	5	2.5	研制中
23	德国	Krupp 公司	无铁芯感应加热		1.3～3 5～8		

(3)感应加热技术。电磁感应加热法是基于电磁感应原理,当交流电流通过初级线圈(感应器)时,环绕着线圈产生交变磁场,交变磁场在次级线圈上(金属炉料)产生感应电动势。由于此感应电动势的作用,在闭合的线圈(被加热的金属)中产生感应电流使金属加热。图 9－6－10 为中间包侧面感应加热装置。该装置中的感应器由铁芯、线圈和引入钢水的通道组成。当线圈中通入交流电后,钢液中产生的感应电流放出焦耳热使钢

水加热。在浇注初期,因中间包耐火材料吸热,应供以较大的功率使钢水迅速升温。当中间包容量为 10t 时,最大功率约为 1000kW。

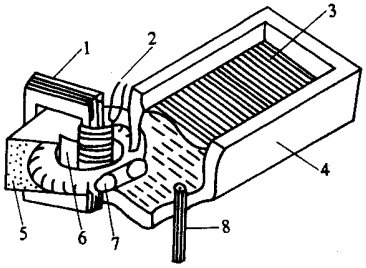


图 9-6-10　中间包侧面感应加热

1—铁芯;2—线圈;3—钢水;4—中间包;
5—耐火材料;6—冷却水套;7—钢水通道;8—水口

采用中间包加热技术后,如图 9-6-11 所示,可使中间包中钢水温度相对稳定;而且利用电磁感应加热钢水时,由于电磁搅拌作用,可使钢中夹杂物上浮。

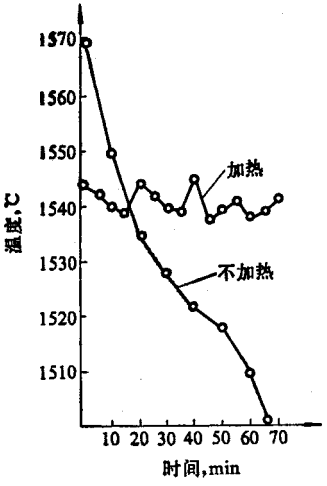


图 9-6-11　中间包钢水加热与不加热钢水温度波动情况

据资料介绍,在 5t 中间包中采用电磁感应加热技术,当功率为 1000kW 时,升温速度可达 25℃/min,热效率为 90%,可控制钢水温差在 ±2.5℃范围内。其成本为,耐火材料 50%,电设备 30%,其他 20%。

(4)等离子加热技术。等离子技术已有悠久的历史,早在 20 世纪初就已应用于工业上,但主要是化工工业。近年来,这一技术在冶金领域的应用也日益扩大。据最近美国

PEC 和英国 TRD 研究等离子加热设备公司提供的资料，截至目前已向世界各地出售了等离子加热设备近 80 套，其中有 20 多套用于中间包的加热。德国的德马克也拥有等离子研究室，向外提供等离子加热设备。我国对等离子技术的研究也有较长的历史，建成过 500kg 级的等离子感应炉，在切割方面应用也较多，用于连铸中间包加热的开发工作正在筹划和起步。

等离子加热的原理是用直流或交流电（中间包加热主要是用直流放电）在两个或多个电极之间放电、使气体（中间包加热可用氩气或氮气，以氩气为好）电离，离子化程度愈高，所产生的温度也愈高。电离的气体形成的离子流能发出明亮的弧光，称其为等离子弧，产生等离子弧的装置称为等离子枪或等离子矩。等离子弧具有很高的温度，中心可达 3000℃以上，因而可加热钢水。图 9－3－12、图 9－6－13 分别示出等离子矩简图及中间包等离子加热设备。

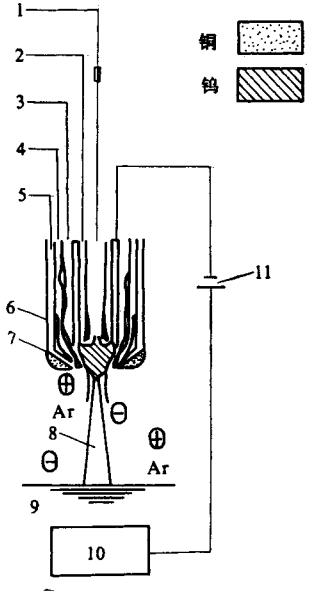


图 9－6－12　等离子矩简图

1—阴极冷却水入口；2—阴极冷却水出口；3—等离子气（氢气）；
4—喷嘴冷却水入口；5—喷嘴冷却水出口；6—喷嘴；7—阴极；8—等离子弧；
9—钢水；10—阳极；11—电源

使用等离子流加热钢水可使中间包钢水温度波动在 ±5℃以内，从而使浇注温度仅在液相线以上 15～20℃成为可能。图 9－6－14 示出等离子加热的效果。等离子加热钢水能量集中，加热温度高，而且由于采用惰性气体作为工作气体，不会污染钢水。此外，

等离子加热操作灵活平稳、不会产生废气。

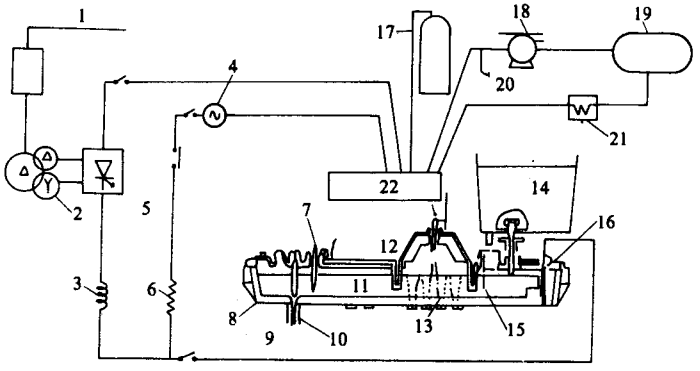


图 9－6－13　中间包等离子弧加热设备简图

1—高压开关箱；2—变压器；3—直流电抗器；4—高频发生器；5—可控硅整流器；6—电阻；7—热电偶；8—中间罐；9—结晶器；10—潜入式水口；11—钢水；12—加热室；13—底吹气体；14—钢包；15—热电偶；16—阳极；17—氩气罐；18—泵；19—铁水罐；20—水冷电缆；21—热交换器；22—等离子矩

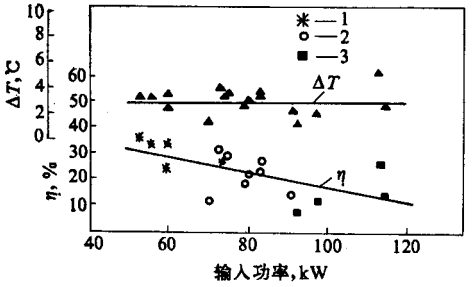


图 9－6－14　等离子加热的效果

等离子弧长度：1—100～200mm；2—200～300mm；3—300～500mm 电流 500A；Ar 流量 0.75l/min；ΔT—中间包钢液温降，℃；η—热效率

第三节　拉速的确定和控制

拉坯速度是指连铸机每一流单位时间拉出铸坯的长度(m/min)，或每一流单位时间

拉出铸坯的重量(t/min),后者也有称为浇注速度的。显然,在铸坯断面一定的情况下,提高拉坯速度(或浇注速度)可以提高连铸机的生产能力。

拉坯速度是连铸机的重要工艺参数之一,其大小直接影响到钢水的凝固速度及铸坯的内部质量。为了提高连铸机的生产能力,通常要提高拉坯速度。但是,拉速过高会造成结晶器出口处坯壳厚度不足,坯壳过薄的铸坯,不足以承受拉坯力和钢水的静压力,以致坯壳被拉裂而产生漏钢事故。即使未漏钢,也会造成铸坯鼓肚和裂纹等缺陷。因此,提高拉速应以获得良好的铸坯结构和保证正常操作为前提,在这一前提下,尽可能提高拉速,以增加连铸机的生产能力。通常在一定工艺条件下,拉坯速度有一最佳值,过大过小都是不利的。

一、拉速的确定

拉速是根据铸坯断面尺寸、浇注钢种和浇注温度来确定的,确定拉速时可按照铸坯出结晶器时要求的最小坯壳厚度计算,也可按照铸机冶金长度计算。此外还可以按照经验公式选取。

(1)按结晶器出口处坯壳厚度计算。由凝固定律可知

$$\delta = k_{结}\sqrt{t_{结}} \quad \text{mm} \tag{9-6-3}$$

式中　δ——结晶器出口处坯壳厚度,mm;

$k_{结}$——结晶器内凝固系数,$\text{mm}/\sqrt{\text{min}}$;

$t_{结}$——铸坯在结晶器内停留时间,min。

若在结晶器出口处要求的最小坯壳厚度为 $\delta_{最小}$,当结晶器有效长为 L(对于 700mm 长的结晶器,L 取 650mm),V 为计算的最大拉速。

$$\delta_{最小} = k_{结}\sqrt{\frac{L}{V}}$$

则

$$V = L\left(\frac{K_{结}}{\delta_{最小}}\right)^2 \tag{9-6-4}$$

通常 $\delta_{最小}$为 10~15mm(小方坯连铸机取下限,板坯连铸机取上限)。$k_{结}$ 取 20($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1/2}$)。

(2)按铸机冶金长度计算。由凝固定律可知,当铸坯全凝时可得:

$$\left(\frac{1}{2}D\right) = k\sqrt{\frac{l}{V'}} \tag{9-6-5}$$

式中　D——铸坯厚度,mm;

k——平均凝固系数($mm \cdot min^{-\frac{1}{2}}$),板坯可取 27,方坯取 30;

l——冶金长度(m)或液心长度(m);

V'——最大理论拉速,m/min。

由式(9-6-5)可得

$$V' = \frac{4k^2 l}{D^2} = 4l\left(\frac{k}{D}\right)^2 \tag{9-6-6}$$

(3)按以下经验公式计算。

$$V_1 = f\frac{L'}{A} \tag{9-6-7}$$

式中　V_1——工作拉速,m/min;

A——铸坯横断面积,mm^2;

L'——铸坯断面周长,mm;

f——是和钢种、铸坯形状、结晶器参数、冷却制度等因素有关的系数。对于方坯取 45~60,对圆坯取 35~45 小断面铸坯取上限,大断面铸坯取下限。

计算拉速的另一经验公式为:

$$V = \frac{0.118(1+B)}{d \cdot B} \tag{9-6-8}$$

式中　V——拉速,m/min;

d——铸坯厚度,m;

B——铸坯宽厚比(宽/厚)。

二、影响拉速的因素

(1)钢种的影响。不同的钢种有不同的高温塑性、高温强度和导热性能。例如奥氏体不锈钢,一般条件下无晶形转变,高温塑性好、高温强度高,可以用较大的拉速。反之高碳钢、铁素体不锈钢、低合金钢则应用较低的拉速。对于导热性差、凝固范围宽,对裂纹敏感性强的轴承钢、高速钢、硅钢等则应采用更低的拉速。这是因为导热性差的钢种,冷却中产生的热应力大,为避免裂纹的产生,只能用较小的冷却强度,所以必须降低拉速。同样的道理,凝固温度范围宽的钢种,凝固收缩大,容易因补缩不足而产生缩孔和中心疏松,因此应采用较低的拉速以保证铸坯的内部质量良好。

(2)断面形状和尺寸的影响。不同断面形状的铸坯,单位质量的周边尺寸不同,因而冷却的比表面不同。圆形断面比方形和矩形的比表面小,冷却慢,故拉坯速度要小一些;

矩形与方形比，矩形坯在结晶器中凝固时，窄边比宽边凝固快，凝固壳脱离器壁形成气隙的时间早，使凝固速度降低。故矩形坯比方坯的拉速应小一些。另一方面，不同断面形状的铸坯有不同的结晶凝固特点，例如圆形坯的拉速过快时，易产生中心疏松和裂纹，因而圆坯的拉速一般要低于方坯和扁坯。对于相同钢种的铸坯，断面大的冷却“比表面”小，因而大断面铸坯的拉速一般低于小断面的。表 9－6－5 和表 9－6－6 列出不同钢种在不同断面情况下对拉速的影响。

表 9－6－5　碳素钢和低合金钢方坯的拉速与断面的关系

拉速，m/min 公司名称	方坯断面尺寸，mm^2						
	80×80	90×90	100×100	120×120	130×130	150×150	200×200
德马克（前联邦德国） Demag		3.5～4.0		2.5～2.8		1.75～1.60	
康卡斯特（瑞士） Concast		3.8～4.2	3.6～3.8	2.6～2.8	1.8～2.3	1.5～1.80	1.0～1.3
奥立森 Olessen	4.2～5.0	3.5～4.7	3.0～4.1	2.3～3.2	2.3	1.4～1.8	1.2～1.6
奥钢联（奥地利） Voest	3.7	3.7	3.0	2.5	2.0	2.0	1.5
丹尼尔（意大利） Danieli		2.7～4.4					

表 9－6－6　不锈钢、耐酸钢方坯断面与拉速的关系

铸坯断面，mm^2	拉速，m/min	铸机半径，m	最终产品	公司名称
100×100	2.7	6.0	棒材、线材	鲁萨里亚加厂
120×120	2.0	4.0	棒材	圣托斯泰法诺
125×125	1.8～2.2	8.0	角钢	日本不锈钢公司
150×150	1.5	立式	棒材	阿特拉斯钢公司/韦兰厂
150×200	1.4～1.8	8.0	棒材	日本不锈钢公司
160	1.3	6.0	棒材	鲁萨里亚加厂
165	1.3	立式	角钢	斯塔万格钢厂
178	1.0～1.2	12.2		卡彭特/雷丁厂
210	1.0～1.2	立式	线材、无缝管	新日铁新日本制铁（材）
210×250	1.0～1.2	立式	无缝管	桑德维肯（瑞典）
265	0.65～1.0	10.0	线材	卡彭特/雷丁厂
124×124	2.7～2.8	12.2	棒材、线材	丁结纳厂
250×250	0.5～0.65	立式		

(3)注温及钢中硫磷含量的影响。注温高时,延长凝固时间,拉速应减慢,反之亦然。在连铸生产实践中要根据中间包中钢水温度来调整拉坯速度。当注温偏高或钢水中硫、磷较高时,都要适当降低拉速。工厂实践中允许注温偏差在一定范围内,如最佳温度偏差小于±5℃时,可按正常拉速拉坯;若温度偏差在±(5~10)℃时,则拉速应相应降低或提高10%左右;若温度偏差大于±10℃时,就不应进行拉坯。当钢中含硫量超过0.025%或硫磷之和超过0.045%时,拉速应按低限控制。表9-6-7给出不同注温对板坯连铸机的影响。由于连铸设备和操作工艺的进步,实际拉速可高于表9-6-7给出的数据。

表9-6-7　不同注温下板坯的拉速

板坯尺寸,mm	中间包不同注温下的拉坯速度,m/min		
	>1550℃	1550~1530℃	<1530℃
150×1000	1.2	1.3	1.4
220×1000	0.9	1.05	1.10
220×1100	0.9	1.00	1.10
220×1200	0.9	1.00	1.10
220×1300	0.9	1.00	1.10
220×1400	0.9	1.00	1.10
220×1500	0.9	1.00	1.10
320×1650	0.45	0.5	0.55

除了上述影响因素外,其他如冶金长度、结晶器振动、保护渣性能等对拉速也有一定影响,因而应根据工厂实际情况确定适当的拉速。

三、拉速的控制

连铸生产中,拉速应和中间包向结晶器中浇注钢水的速度相适应。为此除了中间包水口直径应和钢水的流量相适应以外,中间包内的钢水还应保持合适的高度(即钢水量稳定)。液面过高,钢水动压头过大,不易保持注流圆整,而且冲击力较大,造成钢流在结晶器中飞溅和冲击初生坯壳,影响凝固坯壳的均匀性;包内液面过低,注流不易稳定,如果液面低于临界高度时,在水口上方的液面上会出现漏斗形旋涡,从而会将钢水面上覆盖的渣层卷入结晶器,严重影响铸坯的质量。因此,为了保证铸坯的质量和顺利地进行连铸操作,各工厂根据铸坯断面、钢种、中间包容量、注温等因素使中间包钢水高度(钢水量)保持稳定,以获得稳定的拉速。为此,现代连铸机都有自动控制中间包钢水面高度

(钢水量)的装置,当浇注参数发生波动时,可自动控制钢水包滑动水口的开启程度,使中间包钢水量始终不变,为稳定拉速创造条件。

另一方面,拉速的控制还和中间包钢流控制装置有密切的关系。现从工艺角度分析三种主要控制方式的工艺特点。

(1)塞棒式。塞棒控制是通过塞棒的升降来控制钢流大小的。其结构有组合式和整体式两种,前者由多节袖砖和塞头组合而成。组合式塞棒在使用过程中,钢水易从接缝中浸入而引起塞棒断裂和掉塞头事故。因而使用铝碳质由等静压成型的整体塞棒,效果较好。塞棒控制的优点是开浇时控制方便,常能做到一次开浇成功。此外,悬于水口上方的塞棒,能够有效地防止钢水发生旋涡,从而可避免把渣子带入结晶器。但是塞棒方式不便于自动控制且控制精度较差。

(2)滑动水口式。滑动水口通过滑板的滑动控制钢流的大小。其优点是行程较长,能精确调节钢水流量,且易于实现自动控制。对于一机多流铸机和组合式铸机更为适用。

(3)定径水口式。定径水口控制系统主要用于小方坯。因为浇注小断面铸坯的拉速高,用塞棒控制钢流容易造成结晶器内液面大幅度波动,而定径水口流量较稳定。一般情况下,只要中间包中钢水液面稳定,流量即可稳定。但是为稳定流量,定径水口的直径必须保持恒定。因而选用耐钢水熔蚀的锆质耐火材料制造定径水口。但是目前定径水口在我国的使用还不够理想。这一方面在于锆质耐火材料还不能完全满足连铸要求;另一方面钢水质量也常不合格。使定径水口孔径在使用过程中不稳定,难以控制稳定的拉速,使连铸溢漏率增加,严重影响小方坯连铸机达产。所以不少工厂在铸机允许情况下,已将定径水口控制改为塞棒控制注流。

还应指出,生产实践中控制拉速时通常开浇注流要小,使钢水在引锭装置上凝固,便于顺利拉坯。从开浇到启动拉坯的时间即起步时间(又称出苗时间),小方坯约为 20s、大方坯约 40s、板坯需 1min,如开浇时钢流过大,起步时间不足,很易出现铸坯和引锭头脱开,造成开浇漏钢事故。如果开浇钢流过小也会造成钢水在水口中冻结。通常开浇时的起步拉速应低于工作拉速,对于小方坯约为工作拉速的 60 ~ 80%,对于大断面铸坯约为 50 ~ 60%。拉矫机启动后,钢水要注满中间包并保持稳定的液面高度。拉速要平稳地由小到大达到正常拉速即工作拉速,同时从中间包进入结晶器的注流也相应地由小到大并达到恒定。当钢包内钢水已注完时,随中间包液面降低拉速也逐渐减小,中间包中钢水注完以后仍保持起步拉速拉坯,以利于铸坯尾部的封顶凝固。

第四节　铸坯冷却的控制

铸坯冷却的控制，包括结晶器冷却（一次冷却）和二冷区冷却两部分。结晶器冷却的作用是保证坯壳在结晶器出口处有足够的厚度，以承受钢水的静压力，防止拉漏。同时又要使坯壳在结晶器内冷却均匀，防止表面缺陷的发生。而一次冷却能否满足这些要求，主要是由结晶器的冷却能力、热流分布、结晶器参数（长度、锥度、材质、厚度等）以及冷却水质量、流速、流量等因素决定。

铸坯从结晶器拉出后，其心部仍为液体。为使铸坯在进入矫直点之前或者在切割机之前完全凝固，就必须在二冷区进一步对铸坯进行冷却。为此在连铸机的二冷区设置有铸坯冷却系统。前已述及，铸坯在二冷区的散热量约为总散热量的 16 ~ 27%，因而连铸坯在凝固过程中，控制二次冷却是连铸工艺中的重要环节。这不仅影响到铸坯的质量，也影响到铸机的生产率。二次冷却控制的主要内容有冷却方式的选择、冷却强度的确定，用水量的分配以及二冷控制的方法等。

一、冷却强度的确定

（1）确定冷却强度的原则。

1）由结晶器拉出的铸坯进入二冷区上段时，内部液心量大，坯壳薄，热阻小，坯壳凝固收缩产生的应力也小。此时加大冷却强度可使坯壳厚度迅速增加，并且在较高的拉速下也不会拉漏。当坯壳厚度增加到一定程度以后，随着坯壳热阻的增加，则应逐渐减小冷却强度，以免铸坯表面热应力过大产生裂纹。因此，在整个二冷区应当采取自上到下冷却强度由强到弱的原则。

2）为了提高铸机的生产率，应当采取高拉速和高冷却效率，但在提高冷却效率的同时，要避免铸坯表面局部降温剧烈而产生裂纹，故应使铸坯表面横向及纵向都能均匀降温。通常铸坯表面冷却速度应小于 200℃/m。铸坯表面温度回升应小于 100℃/m。

3）700 ~ 900℃的温度范围是铸坯的脆性温度区，如铸坯表面温度在此范围内矫直时，易于产生横裂纹。所以应控制二次冷却强度，使铸坯表面温度降至 900℃以上，即高于脆性温度区进行矫直。此外，为了保证铸坯在二冷区支承辊之间形成的鼓肚量最小，在整个二冷区应限定铸坯表面温度，通常控制在 1100℃以下。同时在铸坯进行热送和直

接轧制时，又要控制切割后铸坯表面温度高于 1000℃。

4)在确定冷却强度时要必须适应不同钢种的需要，特别是裂纹敏感性强的钢种，要采用弱冷，例如低合金钢管钢比薄板钢(如全铝镇静低碳钢)需要更为轻微的二次冷却。

(2)冷却强度的选择。二次冷却强度可用‘比给水量’来表示。其含义是单位时间冷却水耗量(升)和通过二冷区铸坯质量(kg)的比值，其单位为 1/kg。也可用单位时间、单位铸坯表面接受的冷却水量，即水流密度来量度，其单位为 $1/m^2 \cdot s$。提高水量或水流密度时，由喷咀喷出的水量增加，水滴射到铸坯表面，大部分被蒸发而将热量带走，使综合传热系数 h 增大，从而改善冷却效果。但是过分提高水流密度时，将会使单位体积内的水滴过多，以致射到铸坯表面的水滴与从铸坯表面返回的水滴发生碰撞，从而损失部分动能。同时，大量水滴在铸坯表面形成蒸汽膜，阻止了其余水滴与铸坯表面的接触，反而降低了冷却效果。据研究，水流密度大于 $201/m^2 \cdot s$ 时，提高水流密度，对传热影响甚小。

二次冷却强度随着钢种、铸坯断面尺寸、铸机型式、拉坯速度等参数不同而变化，通常波动在 0.5～1.5l/kg 之间。表 9－6－8 列出不同钢种类别冷却强度的变化情况。

表 9－6－8　不同钢种类别的冷却强度

钢　种　类　别	冷　却　强　度，l/kg
普碳钢、低合金钢	1.0～1.2
中高碳钢，合金钢	0.6～0.8
裂纹敏感性强的钢	0.4～0.6
高速钢	0.1～0.3

具体选择二冷强度时，除考虑钢种、拉速等因素外，还要考虑铸坯矫直温度以及是否热送直接轧制等，因而有图 9－6－15 表示的三种方案。

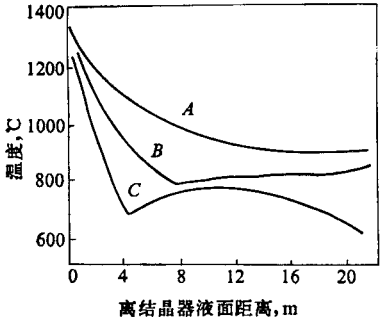


图 9－6－15　不同冷却方式

1)‘热行’，也称软冷却，图 9－6－15 中 A。在整个二冷区内铸坯表面温度缓慢下

降，铸坯矫直以前表面温度达到900℃以上，这种方案冷却强度较小，一般为0.5～1.01/kg。当铸坯出拉矫机后，表面温度较高，便于热送。

2)“冷行”，也称硬冷却，图9－6－15中C。在较大的冷却强度下，整个二冷区铸坯表面维持较低的温度，使铸坯中奥氏体完全转变为铁素体($\gamma\rightarrow\alpha$)，在700～650℃的范围内矫直，从而避开脆性区。这种方案的冷却强度一般为2～2.5 l/kg，目前已较少采用这种方案。

3)“混行”，冷却强度介于“热行”与“冷行”之间，图9－6－15中B。在二冷区使铸坯表面温度保持在一定水平，出二冷区后铸坯表面温度有所回升，并使铸坯在脆性温度区以上的温度进行矫直。

以上三种方案，在实际生产中以采用第一种较好，它符合前述确定冷却强度的原则。

二、二次冷却方式的类别

二次冷却区可采用水喷雾冷却、气水喷雾冷却及干式冷却三种方式。

(1)水喷雾冷却。采用专门的喷嘴将冷却水雾化后喷向铸坯表面对铸坯进行冷却。按照喷出水雾的形状不同，雾化喷嘴分为：实心圆锥、空心圆锥、矩形、扁平型四种。图9－6－16示出上述四种型式的喷嘴。冷却方坯时普遍采用圆锥形喷嘴，冷却板坯时多采用矩形或扁平型喷嘴。

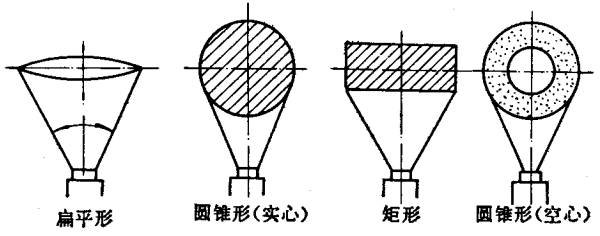


图9－6－16　水喷嘴类型

水喷嘴冷却具有供水管路简单、维修方便、操作成本低等优点。目前我国小型连铸机二冷系统广泛采用水喷嘴冷却。但是水喷雾冷却有以下缺点：

1)喷孔节流部分(缩颈部分)的直径很小，在水不清洁时易被其中的杂质和污物堵塞 如喷嘴前的配管不用不锈钢管，管路中的铁锈也易堵塞喷嘴。

2)传统水喷嘴的流量(Q)大致与喷嘴内外压差(P)的平方根成正比，即$Q=K\sqrt{P}$(K为比例常数)。因此，通过增加水压的办法来提高冷却强度效果很差，只有更换大流量的喷嘴才能达到目的。说明水喷嘴调节流量的范围不大。

3)冷却不均匀,冷却水利用率不高。喷射到铸坯表面的水,小部分被蒸发,大部分集存在铸坯表面与辊子接触处的尖角内并向两边横流,而后通过铸坯两侧边缘下流,使铸坯边角部区域过冷。特别是弧形连铸机,内弧面导辊处容易积存水(板坯连铸机更突出),造成内外弧冷却不均匀。

(2)气—水喷雾冷却。水冷却铸坯的效率取决于小水滴穿透蒸汽界面的能力,只有具有穿透能力的小水滴才具有强的冷却效应。用压缩空气在喷嘴中将水滴进一步雾化,使喷出水滴直径变小,速度增大,从而喷出雾化程度很好的高冲击力的广角流股,达到很高的冷却效果和均匀程度。

气—水喷嘴可按气和水相交的方式不同分为外混式和内混式两种结构。外混式是气和水在喷口处混合,或者是在喷口外靠气和水射流的冲击力混合;内混式是气和水在喷口以前的混合管内混合。

气—水喷雾冷却的优点如下:

1)气—水喷嘴的喷孔口径较大,喷嘴堵塞事故的发生率很低。可降低对水质的要求,节约水处理费用和维护检修工作量。

2)可改变压缩空气和水的压力以及气水比,有效地扩大水流量调节范围。

3)气—水喷嘴使水的雾化程度高,水滴很细小(直径为 0 ~ 200μm,多为 50 ~ 60μm,而水喷嘴的水滴直径为 0 ~ 400μm,多为 100μm 以上),冲击力大,被蒸发的水量多,冷却效率高,未蒸发的水相对减少,对改善铸坯边角过冷有明显效果。

4)气—水喷嘴冷却的覆盖面大,铸坯表面冷却均匀。而且压缩空气还能吹扫蒸汽和辊子接触区尖角内的积水,从而使铸坯表面温度波动范围缩小到 50 ~ 80℃,而水喷雾冷却温度波动在 200 ~ 300℃。铸坯表面温度比水喷雾冷却高 50℃左右,使冷却中的热应力减少并有利于铸坯的热送直接轧制。

5)单位耗水量下降,约为水喷雾冷却的一半左右。

气—水喷雾冷却虽有上述种种优点,但管路复杂,拆卸维修不方便,生产成本及投资费用较高。因此,气—水喷雾冷却目前主要用于板坯及大方坯连铸机上。

(3)干式冷却。干式冷却是在二冷区不向铸坯表面喷水,而是依靠导辊(其中通水)间接冷却的一种弱冷方式。在一般冷却方式中,导辊对铸坯的冷却作用很小,但在干式冷却时,其导辊为螺旋焊辊,冷却水从辊身与辊套之间流过,间接冷却铸坯(见图 9 - 6 - 17)。这种方式比水冷喷嘴或气—水喷嘴的冷却能力差,使用时相应地要降低拉坯速度。由于铸坯表面温度高,将会增大铸坯的鼓肚量,所以要选用较小的辊距和采用多支点的导辊。

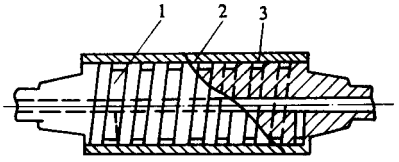


图 9－6－17　螺旋焊管冷却示意图

1—螺旋焊辊；2—辊套；3—冷却水道

干式冷却冷却速率低，能使铸坯表面得到均匀的冷却，从而改善铸坯表面质量，因此适于浇铸裂纹敏感性强的钢种和采用热送直轧的工艺。此外，干式冷却省去了水喷雾系统，使得二冷区的管路设施得以简化。这种冷却方式已成功地应用于超低头板坯连铸机。

三、二次冷却水的分配

二次冷却区的耗水量可按下式计算：

$$Q = f \cdot Q_{时} \tag{9－6－9}$$

式中　Q——二次冷却耗水量，m^3/h；

f——冷却强度，m^3/t 钢；

$Q_{时}$——铸机理论小时产量，t/h。

在整个二冷区内，沿铸坯长度方向随着距结晶器距离的增加，坯壳厚度增大，通过铸坯表面散失的热量逐渐减少，相应二冷段的喷水量也逐渐减少。铸坯在二冷区凝固时，$h \propto \frac{1}{\sqrt{t}}$（$h$ 为二冷区传热系数、t 为凝固时间），而 h 是随冷却水耗量的增加而增大的（见图 9－6－18），即 h 与冷却水耗量呈正比，从而得到 $Q \propto \frac{1}{\sqrt{t}}$。

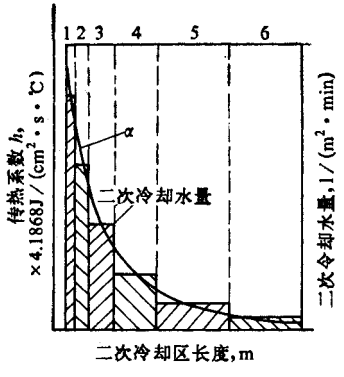


图 9－6－18　传热系数与二冷水量的关系

由于二次冷却水量是分段控制的，如分为 n 段，则总水量为 n 段之和，即：

$$Q_{总} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \cdots Q_n = \sum Q_i \tag{9-6-10}$$

而任一段的水量均符合 $Q_i \propto \frac{1}{\sqrt{t}}$。

又因 $t = \frac{H}{V}$（H 为结晶器中弯月面到二冷区某一点的距离、V 为拉速），由此可得：

$$Q \propto = \frac{1}{\sqrt{H/V}} \tag{9-6-11}$$

由式(9-6-11)可以确定二冷区不同位置的供水量，即：

$Q_1 : Q_2 : Q_3 : \cdots\cdots Q_n = \frac{1}{\sqrt{H_1}} : \frac{1}{\sqrt{H_2}} : \frac{1}{\sqrt{H_3}} : \cdots\cdots \frac{1}{\sqrt{H_n}}$，由 $Q = \sum Q_i$ 可得：

$$\sum \frac{1}{\sqrt{H_i}} = \frac{1}{\sqrt{H_1}} + \frac{1}{\sqrt{H_2}} + \frac{1}{\sqrt{H_3}} + \cdots\cdots \frac{1}{\sqrt{H_n}}$$

因此，

$$Q_1 = Q \frac{1}{\sqrt{H_1} \times \sum \frac{1}{\sqrt{H_i}}}、Q_2 = Q \frac{1}{\sqrt{H_2} \times \sum \frac{1}{\sqrt{H_i}}}、Q_3 = Q \frac{1}{\sqrt{H_3} \times \sum \frac{1}{\sqrt{H_i}}} \cdots\cdots$$

式中　Q_1、Q_2、Q_3……——二冷区第一、第二、第三……段的冷却水量；

H_1、H_2、H_3……——结晶液面到第一、第二、第三……段冷却中心点的距离，见图 9-6-19。

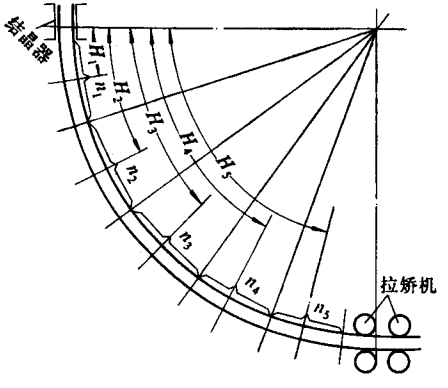


图 9-6-19　二次区冷却水分段

以上关系式说明，整个二冷区自上至下的喷水量是递减的。实际生产中对二冷水量的分配有以下几种方案：

(1)等表面温度变负荷给水。铸坯一进入二冷区，即加大冷却强度以加快铸坯的凝

固速度，使铸坯表面温度迅速降至出拉矫机的温度，即 900～1100℃。然后逐段减少给水量，使铸坯表面温度不变。这种方案的优点是上部冷却强度大，铸坯凝固快，收缩也均匀，有利于减少铸坯的内部缺陷及形状缺陷。但是为了保持铸坯表面的等温度，必须及时获取表面温度的反馈信息，以便及时调整给水量。这一方案仅靠仪表检测和人工控制是难以实现的。

(2)分段按比例递减给水量。将二冷区分成若干段，各段有自己的给水系统，可分别控制给水量，按照水量由上至下递减的原则进行控制。这种方案的优点是冷却水的利用率高、操作方便，并能有效控制铸坯表面温度的回升，从而防止铸坯鼓肚和出现内部裂纹。目前我国多数连铸机采用这一配水方案。图 9－6－20 是板坯连铸机二冷区分段按比例递减给水量的实例。

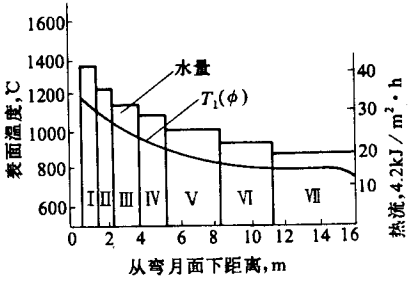


图 9－6－20　二冷区分段冷却

(3)等负荷(等传热系数)给水。在二冷区的各段采用相同的给水量，保持传热系数不变。这种方法配水简单、操作方便。目前国内有部分小方坯连铸机采用这种方案。此方案的缺点是上段冷却强度不够而下段又过大，造成上段凝固时间延长而下段铸坯表面温度又偏低，使大量冷却水未得到有效利用。

四、二次冷却水的控制方法

目前二次冷却水的控制方法有仪表控制及计算机控制两大类别。

(1)仪表控制系统。早期投产的连铸机多采用仪表控制二冷水量。它是将二冷区分成若干段，每段装设电磁流量计，根据工艺要求(如拉速、钢种、铸坯断面)设定每一段的给水量，通过调节器按比例调节。生产中，当工艺参数发生变化时，由人工及时改变调节器的设定值，相应地改变各段的给水量。图 9－6－21 示出二冷水仪表控制系统。这种较低档次的控制方式多用于铸坯品种和尺寸单一的连铸机。

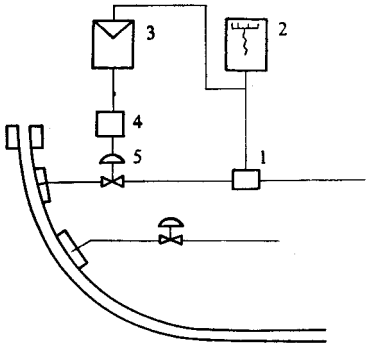


图 9－6－21　二冷水仪表控制系统

1—电磁流量计；2—流量记录仪；3—*PI* 调节器；4—伺服放大器；5—调节阀

(2)动态控制法。根据二冷区铸坯冷却的实际情况及时改变二冷水量的自动控制法，叫做动态控制法。现代连铸机多采用这种先进的计算机自动控制二冷水量的方法。

1)水表控制法：将生产实际中多次合格铸坯的工艺参数(如钢种、铸坯断面、拉速)及冷却水量等数据收集后归纳分类，得出同一钢种、同一断面不同拉速下合适的冷却水量，再将不同钢种、不同断面、不同拉速下所需二冷水量进行汇总，并归纳列表存入计算机。实际生产中，只需将钢种、断面、拉速等输入计算机，计算机即可按存入的数据找出合适的二冷水量进行自动控制。

2)表面温度控制法：表面温度控制法即按照铸坯表面的温度在二冷区的各段应达到所规定的范围，以此为目标来控制给水量。为了实现按表面温度控制给水量，必须及时准确测出铸坯不同部位的表面温度。而铸坯表面由于水蒸汽及氧化铁皮的影响，使测温困难且误差大。另外如果某点局部过冷或因喷咀堵塞水量偏小，引起测温偏低或偏高都会影响测温效果。同时也不可能在二冷区设置很多的测温点。因此仅仅根据测定铸坯表面温度来控制给水量是不科学的。为避免测温误差及其他因素的影响，需借助凝固数学模型。即将钢种、铸坯尺寸、钢水过热度、拉速等数据输入计算机，计算出二次冷却区内各段铸坯的表面温度，通过调整二冷区各段的给水量，使铸坯表面温度达到设定的最佳温度范围。然后再由铸坯表面测温数据进行对照并加以修正，如此反复多次的计算、调整和修正即可达到理想的控制效果。

这种控制系统的优点是当超越一定的浇注条件(例如拉速突破时)，也能保持预先设定的最佳表面温度。因此即使操作条件不够稳定，也能得到较为稳定的铸坯质量，从而提高铸机的生产率。对于采用铸坯热送或直接轧制高效节能的新工艺，此系统被认定为必不可少的核心技术。

第五节　连铸保护渣

在连铸生产中，除了浇注断面较小的铸坯外，大都使用保护渣（配合浸入式水口）。实践证明，这一工艺是保证铸坯质量和操作正常的重要条件之一。20 世纪 70 年代初我国把该工艺成功地用于板坯连铸，解决了板坯纵裂问题，随后逐步得到推广应用。近几年又相继建立了保护渣系列，并研制了一些连铸特殊钢的保护渣，为我国进一步发展连铸创造了必要的条件。

一、保护渣在结晶器中的行为和作用

（1）保护渣在结晶器中的行为。图 9－6－22 示出保护渣（配合浸入式水口）应用于板坯的连铸过程。当粉状（或粒状）保护渣加入结晶器后，吸收高温钢水提供的热量，迅速地在钢水面上形成液渣层。液渣层之上是烧结层（亦称过渡层，其中包括半熔层），最上面则是松散的粉状层，这就是常说的三层结构（见图 9－6－23）。

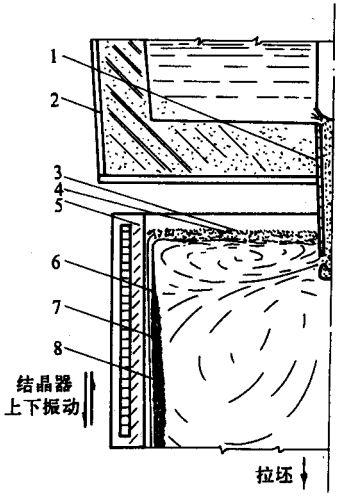


图 9－6－22　浸入式水口保护渣连铸板坯过程

1—浸入水口；2—中间罐；3—粉渣层；4—熔渣层；5—结晶器；6—凝壳；7—液态渣膜；8—凝固渣皮

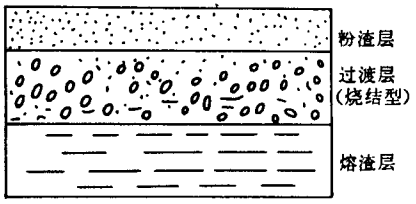


图 9－6－23　三层结构示意图

在连铸过程中,保护渣随着结晶器的振动,从弯月面处流入结晶器和坯壳的气隙中。由于结晶器的冷却作用,熔渣沿着结晶器壁在初生坯壳表面形成凝固的渣皮。浇注初期拉速较低,渣皮随着结晶器向下振动而被带到下方。在坯壳与结晶器壁之间形成了保护渣层。当拉速提高以后,结晶器中钢水与器壁之间的热交换加强,坯壳表面温度升高,靠近坯壳一侧的保护渣被加热而形成熔融状态的渣膜,其厚度通常在 0.1～1.5mm 之间。

随着拉坯连续进行,结晶器上下振动,保护渣连续地被带出结晶器。相应要持续、分批地向结晶器中添加新保护渣,如此循环进行。一般保护渣的消耗量每吨钢为 0.5～0.7kg。

还应指出,连铸保护渣要达到良好的使用效果,各渣层必须有符合实际需要的厚度。首先是熔融层的厚度,若厚度不足,渣层中沿结晶器壁形成的渣圈,随着结晶器振动而向下运动时,将会把熔渣经弯月面向下的通道局部堵死。熔融层越薄,局部堵死的部位就越多,时间也越长。对连铸板坯来说,就会在局部被堵死的表面处产生纵向裂纹。而熔融层过厚,则其稳定性降低,同时也影响到粉状层和过渡层的厚度。不稳定的熔融层,同样也会引起板坯表面纵裂。因此,连铸保护渣的熔融层应有一个合适的厚度,而合适的厚度值需要通过浇钢试验来确定。

同样,粉状(或粒状)层和过渡层也应有合适的厚度。当熔融层达到合适值,而且稳定后,只要结晶器中钢水面能够精确控制,添加新保护渣做到勤加少加,则粉状层和过渡层的厚度就可保持稳定。如果采取手工控制钢水面高度,操作又不够精心,则很难保持液面的稳定,各渣层的厚度也就很难保证了。

(2)保护渣的作用。

1)绝热保温　位于结晶器液面最上层的粉状层,结构松散,具有良好的绝热保温作用。可以防止结晶器中钢水表面结壳、或避免添加的保护渣形成熔渣后又固结成盖,并可防止浸入式水口周围结渣。保护渣的绝热保温作用在于保持保护渣上层粉状层有一定的厚度。

2)隔绝空气、防止钢水二次氧化　覆盖于钢水面上的液渣层,隔绝空气与钢水表面的

接触，保护钢水表面不受空气的二次氧化。为了更好地起到保护作用，液渣层应均匀覆盖于钢水面上，渣中不应含有使钢氧化的成分，如应限制渣中氧化铁的含量，熔渣的透气性要低，对钢液的润湿性要好。

3）净化钢渣界面、吸附钢液中夹杂物：上浮至结晶器液面上的氧化物，随着注流在结晶器中的对流，有可能在弯月面被卷入凝固壳，造成铸坯的皮下或表面夹杂物等缺陷。因此，保护渣的液渣层应具有良好的吸收和溶解夹杂物的能力。为此保护渣的熔渣应有低的粘度，对氧化物夹杂的润湿性好，吸收夹杂物以后自身性能要稳定。目前所用保护渣属硅酸盐，不能溶解钢中的氮化物，同时连铸保护渣只能起钢渣界面净化剂的作用。要提高铸坯的纯净度，主要还是靠提高钢水的清洁度和防止浇注过程中钢水的二次氧化。保护渣只能吸收到达钢渣界面的氧化物夹杂。

4）润滑凝固坯壳并改善凝固传热：充填于气隙中的渣膜对凝固坯壳能起到良好的润滑作用，减少拉坯阻力，从而可防止坯壳与结晶器壁的粘结。此外熔渣进入坯壳与结晶器壁之间，使气隙不再存在，热阻减少，凝固坯壳向结晶器壁的传热得到改善，使坯壳均匀生长，有利于减少铸坯裂纹的形成。

二、保护渣的组成和性能

在考虑保护渣的组成时，首先要保证能获得三层结构，以实现保护渣的各种作用。其次要从当地的资源情况出发，降低保护渣的成本。此外，对于一些特殊钢种，还要配制专用的保护渣。

（1）组成。连铸用保护渣组成的选取，普遍是以 $SiO_2-CaO-Al_2O_3$ 系中的低熔点、低粘度区为基础，见图 9-6-24。图中有一个以硅灰石（$CaO\cdot SiO_2$）形态存在的低熔点区，该区域内 CaO 大致为 30～50%，SiO_2 为 45～60%，$Al_2O_3\leqslant 20\%$，熔点大致在 1300～1500℃之间。通常保护渣是 $SiO_2-Al_2O_3-CaO$ 系中含有适当的 Na_2O、CaF_2 的五元系。

连铸保护渣一般由三部分物料组成。一是基料部分，即提供 SiO_2、CaO 和 Al_2O_3 的基本造渣材料；二是辅助材料，为调节熔渣的熔化温度及粘度而提供 Na_2O、CaF_2 等成分或提供 LiO_2、K_2O、BaO_2、NaF、AlF_3、B_2O_3 等成分的物料，这些辅助材料是起助熔作用的；三是为调剂熔化速度而配入能提供碳粒子的材料，称为熔速调节剂。

各组分的大致范围是，SiO_2 和 CaO 约占总重量的 50～70%。为了保持渣的中性和弱酸性，通常控制 CaO 和 SiO_2 总量之比$\left(\frac{\sum CaO\%}{\sum SiO_2\%}\right)$在 0.6～1.2 的范围内。这种渣对氧化物夹杂有较好的润湿能力，SiO_2 还具有易于吸收难溶浮渣 TiO_2 的作用；CaO 也能较好

地吸收 Al_2O_3 及 Cr_2O_3。为了降低保护渣的熔点，要控制 Al_2O_3 的含量，一般在 5～15%，以控制在低限为好。此外为了降低熔渣的氧化性，应限制渣中氧化铁的含量，一般限制在 5%以下。

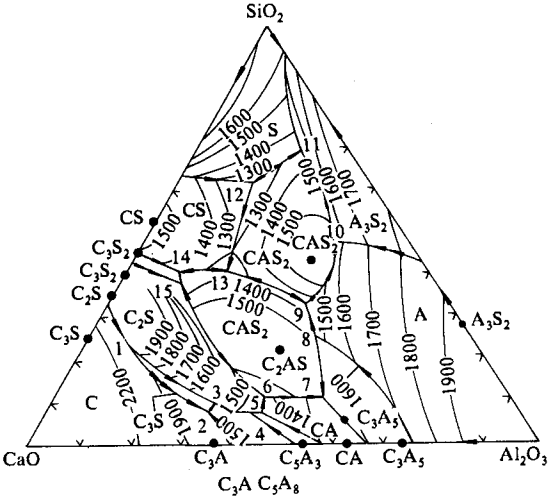


图 9－6－24　$CaO-Al_2O_3-SiO_2$ 系统相图

做为控制保护渣熔化速度的碳质材料，由于碳粒子对造渣材料粒子具有分隔能力并对熔融炉渣的流动有阻滞作用，从而能控制炉渣的熔化速度。碳质材料分为碳黑及石墨两类，碳黑为无定型结构，颗粒很细，对熔渣的分隔能力及阻滞熔体流动的能力都很强。但是，它开始氧化的温度较低，氧化速度较快，一粒碳黑完全烧尽的时间较短。因此碳黑在渣层中温度较低的区域里，控制熔速的效率很高。与碳黑相反，石墨有完备的晶型结构，颗粒粗大，其分隔作用和阻滞作用都很差，但开始氧化的温度较高，氧化速度较慢，一片石墨完全烧尽的时间较长。所以石墨在高温区有较强的控制熔速的作用。因而碳质材料中同时配入碳黑和石墨控制保护渣的熔化速度效果更好。通常保护渣中加入碳质材料量为 3～7%。

助熔材料的加入量，取决于浇注的钢种和熔融保护渣需要的粘度。

(2)性能。

1)熔化温度 为了保证保护渣熔融层达到合适的厚度，并在出结晶器后仍能以熔融状的渣皮粘贴在铸坯表面，保护渣应有较低的熔化温度。由于保护渣是多种材料的机械混合物，会在一定温度范围内熔化，为了统一其熔化温度的标准，人们将保护渣熔化达到一定流动性的温度定义为熔化温度。实际应用中是将渣料制成 $\phi 3\times 3mm$ 的标准试件，在半球点测定仪上测定的。即将试样加热到由圆柱形变为半球形的温度，称为熔化温

度。连铸生产中通常将保护渣的熔化温度控制在 1200℃以下。

2)熔化速度 通常用一定质量的试样在测定温度下完全熔化所需的时间来表示熔化速度,也可用测定试样达到半球点所需要的时间来确定。

保护渣在结晶器中的熔化速度与渣料的组成及熔化温度有关。组成中熔点低的组分先熔化,熔点高的组分后熔化,这种熔化顺序不同的现象称为“分熔倾向”。“分熔倾向”影响了熔渣层的均匀性,从而影响到保护渣的粘度及减弱其吸收夹杂物的能力。为改善保护渣的熔化均匀性,应当通过调整渣料组成及改进加工粉料工艺(磨得更细、混料更匀)以及研制“预熔性”(即将定量渣料入炉熔化、使之均匀后加工成粉渣)熔渣等途径加以解决。

3)粘度 粘度直接影响到熔渣吸收氧化物夹杂的速度和润滑铸坯的效果。粘度合适的熔渣,在浇注过程中能均匀地充填于结晶器壁与坯壳之间的气隙之中,包围整个铸坯,起到传热、加速铸坯凝固和润滑器壁防止粘结的作用。粘度过低会使渣膜增厚且不均匀,从而导热不均,在相应凝固壳较薄处应力集中,产生表面裂纹。同时粘度过低还会使液渣流失加快,这不仅增加了保护渣的消耗,还会因液渣流下粘附在格栅上乃至堵塞格栅,使铸坯局部得不到冷却,甚至漏钢。粘度过高则使液渣难于流入缝隙,使结晶器润滑不良,致使坯壳与器壁粘连,促使铸坯表面振痕的发展,进而产生横裂和穿钢。过高的粘度还会影响钢水表面液渣的形成,使熔融层内出现烧结颗粒,如被卷入钢中,则成为铸坯表面或皮下夹杂,从而恶化铸坯表面质量。可见保护渣的粘度对铸坯表面质量、操作工艺及吸收夹杂物能力均有明显影响。因此必须根据钢种、铸坯断面、拉坯速度、钢水过热度等多种因素确定保护渣的合适粘度。

保护渣的粘度取决于渣中组分的类别及含量。在以 SiO_2、CaO 为基料的渣中配入 CaF_2、Na_2O 等助熔剂,并限制 Al_2O_3 的含量,能降低熔渣的粘度,各组分的影响如下:

A. CaF_2 能向渣中提供 F^- 离子,F^- 离子的静电势$\left(\frac{Z}{r}=0.74\right)$比 O^{2-} 离子的静电势$\left(\frac{r}{Z}=1.52\right)$小,能促进 $Si_xO_y^{2-}$ 离子团解体。而且 CaF_2 比 Na_2O 及 CaO 能引入更多的阴离子,因此 CaF_2 对调整酸性渣粘度的作用比碱性渣大。但是,过高的 CaF_2 会发生如下反应:

$$4F^- + SiO_2 \longrightarrow SiF_4 + 2O^{2-}$$

SiF_4 是易挥发物,能促使熔融石英水口熔损并危害操作人员健康。此外当渣中 Al_2O_3 含量较高,特别是浇注含 Al 高的钢种时,易在渣中析出高熔点的枪晶石($3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot CaF_2$),从而提高液渣的粘度,并严重恶化液渣的玻璃性能(玻璃体率 = (Na_2O +

Li_2O)/(Al_2O_3 + SiO_2),玻璃体率增加液渣粘度下降),使之由'长渣'变成'短渣'。因此浇注含 Al 高的钢种时,保护渣中 CaF_2 的含量以 15～20%为宜。

B. Na_2O 具有较低的熔点(920℃),在保护渣中能使熔点明显降低,它又是碱土金属氧化物,可降低酸性保护渣的粘度。据研究,当渣中 Na_2O 小于 9%时,提高 Na_2O 的含量,有较强的降低熔渣粘度的作用。但当浇注含 Al 高的钢种时,过高的 Na_2O 含量、易与 Al_2O_3 结合,使渣中析出高熔点的霞石($Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$),从而降低液渣粘度。因此浇注含 Al 高的钢种应限制渣中 Na_2O 不超过 12%。

C. TiO_2 是高熔点(1920℃)的氧化物,在浇注含 Ti 高的钢种(如 1Cr18Ni9Ti)时,由于钢中 Ti 还原渣中 SiO_2 使渣中 TiO_2 增加,随着浇注的进行渣中(TiO_2)会愈来愈高,当液渣中富集氧化钛时,会出现熔点为 1980℃稳定的钛钙尖晶石,使液渣的粘度增加。

综上所述,浇注一般碳素钢及低合金钢时,增加渣中的 CaF_2 和 Na_2O 的含量、降低 Al_2O_3 的含量,能够得到合适的粘度。但是浇注含 Ti、Al 等元素含量较高的钢种时,由于渣中 Al_2O_3 及 TiO_2 的增加,使保护渣的碱度、熔化温度、粘度等都有较大的变化,从而会恶化熔渣性能和铸坯质量。因此,对这些钢种应研制特殊的保护渣。

4)表面张力:保护渣的表面张力是影响钢渣分离、液渣吸收夹杂物并使之从钢中排除的一个重要参数。钢渣间的界面张力,可由下式计算:

$$\sigma_{钢-渣} = \sigma_{钢} - \sigma_{渣}\cos\theta \qquad (9-6-12)$$

式中　$\sigma_{钢}$——钢液的表面张力,N/m;

$\sigma_{渣}$——熔渣的表面张力,N/m;

θ——润湿角。

式(9-6-12)说明,钢-渣间界面张力愈大,则 $\cos\theta$ 愈小,即 θ 愈大,两相间润湿程度愈小,表明钢渣愈易分离。反之,钢渣愈难分离。

结晶器中的钢水,由于表面张力的作用,在与器壁接触处形成如图 9-6-25 示出的弯月面。弯月面的半径 r 可用流体静力学公式表示,即:

$$r = 5.43 \times 10^{-2}[\sigma_{钢-渣}/(\rho_{钢} - \rho_{渣})]^{1/2} \qquad (9-6-13)$$

式中　$\rho_{钢}$——钢水的密度,kg/m^3;

$\rho_{渣}$——熔渣的密度,kg/m^3;

$\sigma_{钢-渣}$——钢渣间界面张力,N/m。

式(9-6-13)表明,$\sigma_{钢-渣}$愈大,$\rho_{渣}$ 愈小,弯月面的半径 r 愈大,则弯月面在钢水静压力作用下越易变平,即钢渣越易分离。降低保护渣的表面张力可增加钢渣间的界面张

力(见 9－6－12)。能降低保护渣表面张力的氧化物有 CaF_2、SiO_2、Na_2O、K_2O、Fe_2O_3 等，称之为表面活性物质。通常用于连铸的保护渣的表面张力小于 0.3N/m。降低 $\sigma_{渣}$ 的方法主要是向保护渣中加入表面活性物质。

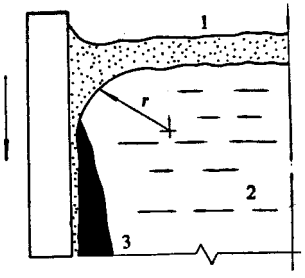


图 9－6－25　液渣下的弯月面

1—熔渣；2—钢水；3—凝固壳

三、保护渣应用实例

随着连铸技术的发展、浇注的钢种日益扩大，产品质量逐步提高，对连铸用保护渣也提出了更高的要求。目前国内外对保护渣的研究工作从渣的组成、性能、润滑机理、渣模厚度及加工方法等不断有新的进展。生产实践中主要是根据浇注的钢种、铸坯断面及操作条件的不同，选择与之相适应的保护渣。选择保护渣，既要满足铸坯质量的要求，做到组成合理、成分稳定；又要经济节约、尽可能就地取材，充分利用当地的废弃资源。例如国内工厂常用的保护渣原料有玻璃粉($SiO_2 > 70\%$、$Na_2O > 13\%$)、水泥、高炉渣、烟道灰、固态水玻璃、苏打、萤石等。这些原料按照不同比例配制成需要的渣料。表 9－6－9、表 9－6－10 分别示出保护渣常用基料及常用助熔剂的化学成分。表 9－6－11、表 9－6－12 为有关单位推荐并在厂家应用的保护渣主要成分范围。

表 9－6－9　保护渣常用基料的化学成分

名　称	化学成分，%						
	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	MnO	Na_2O	Fe_2O_3
高炉渣	25～39	33～45	8～15	2～8	0.1～1.0		<1
电厂灰	45～60	2～5	10～20	1～4		2～6	TFe 3～8
钾　土	60～65	1～2	13～15	5～7		$K_2O + Na_2O$ <13	1～2

名　称	化学成分,%						
	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	MnO	Na_2O	Fe_2O_3
水泥熟料	19 ~ 22	60 ~ 65	5 ~ 7	1 ~ 4			< 6
白渣	< 18	45 ~ 55	18 ~ 22	< 9			< 2
硅灰石	约 42	约 46	约 0.35	约 0.70			
蛭　石	约 40	约 7	约 12	约 14		约 1.50	
石英砂	约 94	约 1	约 2.5	约 0.12			约 1.6

表 9 – 6 – 10　保护渣常用助熔剂的化学成分

名　　称	化　学　成　分,%					
	SiO_2	Al	F	CaF_2	Na_2O	Ba_2O_3
固体水玻璃	60.76				26.71	
冰晶石 Na_3AlF_6	< 0.45	13.00	53.0		31.0	
硼　　砂					34	66
苏　　打					约 58	
萤石	14.5			约 75		

表 9-6-11 保护渣应用实例（I）

序号	渣名	使用情况			化学成分，%									主要物理性物质			
		适应钢种	铸坯尺寸 mm	启用时间	CaO	SiO_2	Al_2O_3	ΣFeO	MnO	MgO	NaO + K_2O	CaF_2	B_2O_3	$\frac{CaO}{SiO_2}$	熔点 ℃	粘度 1300℃ Pa·s	表面张力 1300℃，N/m	堆积密度 g/cm³
1	TL—88	29# 电机硅钢	179×259	1989.9	21.44	33.56	5.17		6.24	3.89	4.88	11.28	—	0.64	1068	1.5	—	1.05
2	TL—82	普碳钢 3C 船用钢	150×988 ～1158	1979	33.76	36.38	3.66	0.64	0.038	0.48	12.42	7.59	—	0.93	1094	2.5	0.267	1.01
3	TL—91	20# 10# D40 45#	160×160	1979.12	32.30	33.46	3.87	0.98	0.06	1.85	8.26	6.73	—	0.97	1114	2.4	—	—
4	TL—92	BY3 3C 16Mn	610×110	1984.10	30.51	33.90	3.95	2.23	—	1.63	7.40	7.94	—	0.90	1110	2.0	—	—
5	HL—04	1Cr18Ni9，1Cr18Ni9Ti	200×200	1988，12 试用	13.30	19.18	5.51	—	—	3.61	15.75	22.38	6.60	0.69	935	1.0	<0.32	0.61
6	2—05	40Cr45# 60Si2Mn 1Cr18Ni9Ti	170×250	—	23.42	30.16	10.74	—	—	1.73	1.26	7.46	—	0.78	1146	10.3		
7	2—07		170×250	—	33.80	37.10	3.30	—	—	—	5.30	9.80	—	0.91	1140	7.2		

注：重庆大学推荐。

表 9-6-12 保护渣应用实例（II）

牌号	化学成分，%								熔化温度范围，℃	熔化速度	粘度	铸坯断面	适用条件	鉴定日期
	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	Na_2O	MgO	F	C						
B2W—2	34.0	34.0	≤5	<3.0	6.0	<3.0	5.0	5.1	1030～1250	1400℃，20s	1400℃，3.0Pa·s	170～250×1000～1600 150×750～1050	铝镇静钢、硅钢、船板钢 低合金钢、普碳钢	1979 年
B2W—3	32.0	29.0	7.0	<3.0	5.0	<3.0	4.0	6.0	1080～1200	1400℃，30s	1400℃，4.0Pa·s	170～250×1000～1600 150×750～1050	普碳钢，低合金钢	1979 年
GL—3	32.0	34.0	≤3.0	<2.0	4.0	<3.0	3.0	6.0	1070～1280	1350℃，34s	1350℃，3.0Pa·s	180×700 150×750～1050	普碳钢，低合金钢	1985 年
GL—5	31.0	28.0	<5.0	<5.0	8.0	<3.0	5.0	5.0	960～1160	1350℃，27s	1350℃，2.0Pa·s	150～180× 650～1200	普碳钢，低合金钢	1988 年
YCT—2	34.0	34.0	5.0	<3.0	8.0	<1.0	5.0	4.0	1020～1150	1300℃，22s	1400℃，1.5Pa·s	140×1030 ～1280	不锈钢	1988 年
W—4	31.5	31.8	6.0	<3.0	8.5	<3.0	4.5	5.0	1100～1150	1250℃，45s	1300℃，3.5Pa·s	210×1050	高低牌号，无取向硅钢	1986 年
W—5	30.0	30.0	7.0	<3.0	9.0	<3.0	6.0	4.5	1100～1130	1250℃，40s	1300℃，2.0Pa·s	210×1050	高低牌号，无取向硅钢	1986 年

注：冶金部钢铁研究总院推荐。

第七章　连铸坯质量

第一节　概　　述

最终产品质量决定于所提供的铸坯质量。根据产品用途的不同，提供合格质量的铸坯，这是生产中所考虑的主要目标之一。从广义来说，所谓铸坯质量是得到合格产品所允许的铸坯缺陷的严重程度。所谓铸坯质量的含义是指：

铸坯的纯净度（夹杂物含量、形态、分布）；

铸坯表面缺陷（裂纹、夹渣、皮下气泡等）；

铸坯内部缺陷（裂纹、偏析等）。

对上述三方面质量的要求与连铸过程的关系如图 9－7－1 所示。

铸坯的纯净度主要决定于钢水进入结晶器之前的处理过程，也就是说要把钢水搞“干净”些，必须在钢水进入结晶器之前各工序下功夫，如选择合适的炉外精炼，钢包→中间包→结晶器的保护浇注等。

铸坯的表面缺陷主要决定于钢水在结晶器的凝固过程。它是与结晶器内坯壳的形成、结晶器振动、保护渣性能、浸入式水口设计及钢液面稳定性等因素有关的，必须严格控制影响表面质量的各参数在合理的目标值以内，以生产无缺陷的铸坯，这是热送和直接轧制的前提。

铸坯内部质量主要决定于铸坯在二冷区的凝固冷却过程和铸坯的支撑系统的精度。合理的二冷水量分布、支承辊的严格对中、防止铸坯鼓肚变形等，是提高内部质量的关键。

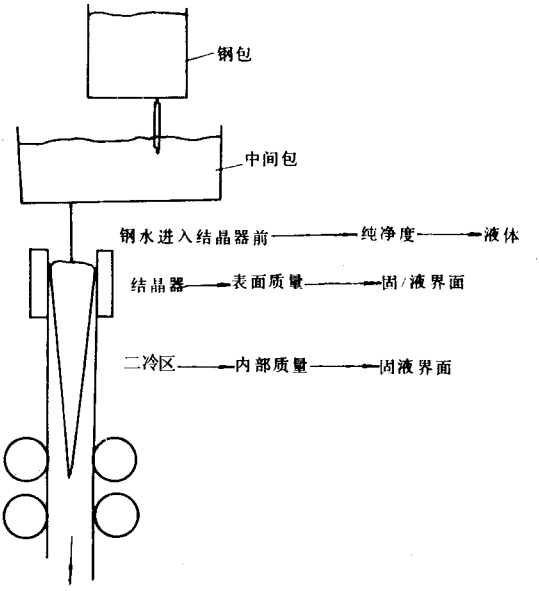


图 9－7－1　铸坯质量控制示意图

因此为了获得良好的铸坯质量，我们可以根据钢种和产品不同要求，在连铸的不同阶段如钢包、中间包、结晶器、二冷区采用不同的工艺技术，对铸坯质量进行有效的控制，以消除铸坯缺陷或把缺陷降低到不影响产品质量所允许的范围内。

第二节　铸坯纯净度

一、铸坯纯净度与产品质量

所谓钢的纯净度是指钢中夹杂物含量的水平，通常可用钢的总氧量表示。

与钢锭相比，连铸坯中夹杂物特点是：1）来源广泛，组成复杂；2）结晶器液相穴内夹杂物上浮困难。

钢中夹杂物可分为：1）超显微夹杂，均匀分布在钢中；2）显微夹杂，其尺寸小于 50μm，它与钢中溶解[O]含量有关；3）宏观夹杂（大型夹杂），尺寸大于 50μm。这种夹杂颗粒大、数量少、在钢中呈偶然性分布，对产品质量危害最大。

夹杂物是深冲薄板钢冲裂废品的主要原因。对裂纹部位检验指出：主要是不规则的

$CaO-Al_2O_3$ 和 Al_2O_3 夹杂物，尺寸在 100～300μm。

应用于汽车的薄板，如薄板表面有黑线、结疤等缺陷会导致表面涂层不良。因此不允许板卷表面有长条状的黑线存在，而黑线主要来自于铸坯表皮下的 Al_2O_3。

应用于包装的镀锡板，除要求高的冷成型外，必须要求夹杂物数量少尺寸小，否则在深冲过程中容易造成飞翅裂纹(flange crack)。国外厂家生产经验指出，钢中大颗粒夹杂物(>50μm)应控制在 10 公斤钢几毫克的水平，或者是 $1m^2$、0.3mm 厚的薄板小于 50μm 夹杂物少于 5 个，才能达到深冲 2000 个 DI 罐裂纹废品少于 1 个的目标。可见减少连铸坯中夹杂物数量对提高深冲薄板质量是非常重要的。

对于极细(如 0.10～0.25mm 轮胎钢丝)和极薄(如 0.25mm 镀锡板)的产品，铸坯中所允许最大夹杂物尺寸必须小于最终产品尺寸。而铸坯中夹杂物数量和尺寸对产品质量影响也与铸坯的比表面积有关。传统的板坯和方坯，单位长度的表面积(S)与体积(V)之比为 0.2～0.8，随着薄板坯和薄带连铸的发展，S/V 值达到 10～50，这就意味着钢中相同夹杂物含量的水平，铸坯中夹杂物更接近于表面，这对生产薄板危害更大，因此降低钢中夹杂物含量更为重要。

连铸坯轧制长条和中厚板产品，夹杂物是产生内部缺陷(如裂纹)的潜在危险，也是超声波探伤报警不合格的原因。

夹杂物的组成和尺寸对最终产品缺陷的影响如表 9－7－1 所示。

表 9－7－1　夹杂物组成和尺寸对最终产品缺陷影响

产　品	缺陷类型	夹杂物尺寸	组　成
深冲镀锡板	凸缘裂纹	50μm	$CaO\cdot Al_2O_3$
电阻焊管	超声波探伤缺陷	150μm	$CaO\cdot Al_2O_3$，Al_2O_3 群 $MnO-SiO_2-Al_2O_3$，
UOE 管	超声波探伤缺陷	200μm	Al_2O_3 群，$CaO-Al_2O_3Al_2O_3$ 群，$CaO\cdot Al_2O_3$，
冷轧薄板	冲压缺陷	250μm	$CaO-SiO_2-Al_2O_3$
轮胎钢丝	冷拔断裂	30μm	Al_2O_3，$Al_2O_3\cdot SiO_2$
弹簧钢丝	冷拔断裂	30μm	$Al_2O_3-MnO-CaO$，Al_2O_3

二、连铸坯夹杂物

在工艺条件一定的情况下，夹杂物在铸坯内的数量和分布主要决定于铸机类型。就铸坯夹杂物分布而言，结晶器注流冲击影响到弧形连铸机铸坯内弧侧的弯曲区，固液界面容易捕捉上浮的夹杂物(图 9－7－2)，在内弧表面 10mm 左右形成 Al_2O_3 的聚集，大颗粒夹杂在内弧侧 1/4～1/5 厚度形成集聚(图 9－7－3)，这是弧形连铸机的弱点。

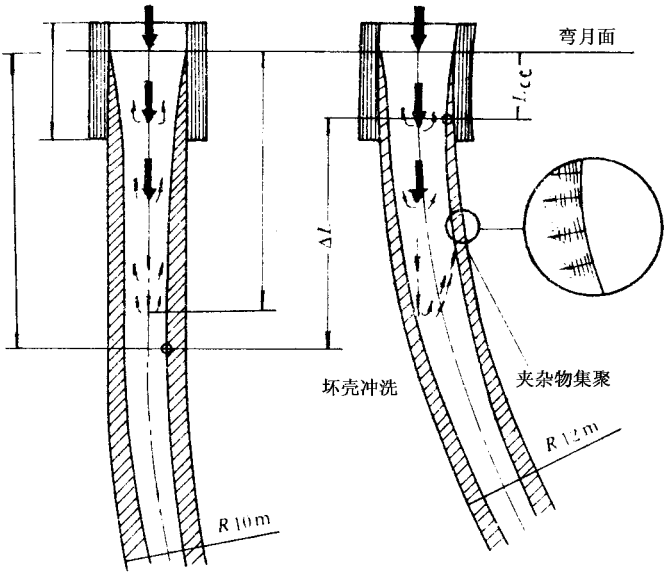


图 9－7－2　液相穴内夹杂物上浮示意图

a—带垂直段立弯式铸机 L_{CS}—垂直段临界高度；

b—弧形连铸机 L_{CC}—弧形结晶器直线临界高度；

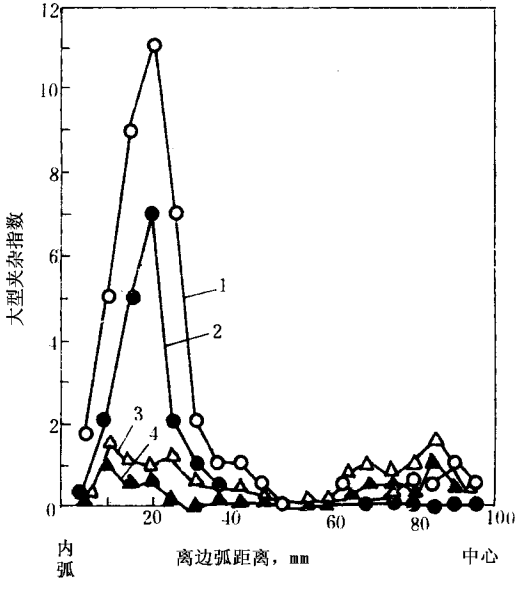


图 9－7－3　铸坯内夹杂物分布

弧形铸机　1—低温浇注；2—高温浇注；

立弯形铸机　3—低温浇注；4—高温浇注；

对于带垂直段的立弯式铸机，结晶器注流冲击深度的影响区在直线部分（图 9－7－2），夹杂物在液相穴内容易上浮，铸坯中夹杂物分布均匀（图 9－7－3）。对铸坯内夹杂物聚集机理指出，有利于液相穴内夹杂物上浮的有效垂直氏度不小于 2m。为消除铸坯内夹杂物集聚，建没带垂直段（2～3m）立弯式连铸机又有新的发展趋势。

就铸坯夹杂物数量而言，立式为 0.43mg/10kg 钢，立弯式为 4.6mg/10kg 钢，弧形为 17.5mg/10kg 钢，水平为 13.5mg/10kg 钢。

对弧形连铸机（$R=10.5$m，250×2100mm）浇注 Al－Si 镇静钢铸坯大型夹杂物数量和尺寸研究指出（mg/10kg 钢，平均值），钢包 12.2，149～210μm；中间包 30.3，149～210μm；铸坯 4.7，297～710μm。夹杂物组成，钢包 50%以上有 SiO_2 析出的硅锰酸盐；铸坯中 60%以上为 Al_2O_3 析出的铝酸盐（如 $CaO\cdot Al_2O_3$，$CaO-SiO_2-Al_2O_3$），夹杂物中 Al_2O_3 含量达 50～80%。这类夹杂物坚硬，轧制过程中不易变形而形成裂纹。

对带垂直段 2.55m 立弯式铸机（$R=9.55$m，250×1300mm）浇注 Al 镇静钢铸坯大型夹杂物数量演变研究指出（mg/10kg 钢，平均值），CAS 处理后钢包 178，140～300μm；中间包 262.5，80～300μm，铸坯 7.5，80～100μm。夹杂物组成，钢包和中间包主要为钙铝酸夹杂，组成相当于 $CaO\cdot2Al_2O_3$，还有铁铝氧化物和串状 Al_2O_3，结晶器和铸坯 98%为群状和块状 Al_2O_3。

三、提高铸坯纯净度措施

要提高钢水纯净度，就必须在钢水进入结晶器之前各工序上下功夫，为此在工艺上采取以下措施：

（1）无渣出钢

转炉采用挡渣球、电炉采用偏心炉底出钢，可阻止炼钢炉内渣子进入钢包，防止了悬浮渣滴与钢水中元素的相互作用。

（2）钢包精炼

扩大连铸品种和提高铸坯质量，只有与炉外精炼相配合才能达到。要根据连铸钢种和产品用途，选择合适的炉外精炼方法。

（3）无氧化浇注

钢包处理后，钢水中总[O]可达 20ppm 以下。从钢包→中间包用长水口，中间包→结晶器用浸入式水口（板坯、大方坯）或气体保护（小方坯），中间包采用覆盖剂，结晶器用保护渣。上述保护措施是必须的也是有效的（图 9－7－4）。否则钢包处理效果前功尽弃。

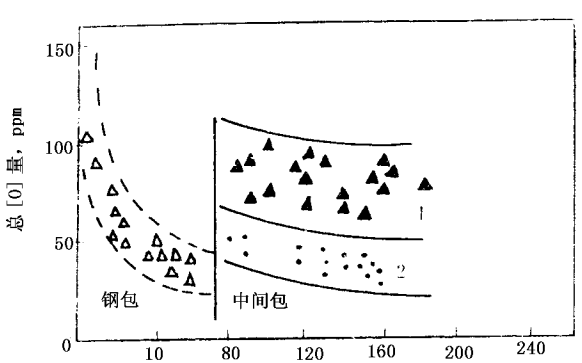


图 9－7－4　保护对钢总氧量影响

1—钢包→中间包保护不好；2—钢包→中间包保护好

(4)中间包冶金

随着对铸坯纯净度要求的提高，人们把中间包作为一个净化钢水的冶金反应器，充分发挥中间包去除夹杂物的能力。中间包钢水夹杂物上浮表现为钢中氧含量的降低。钢中氧含量$[O]_t$可表示为：

$$[O]_t = ([O]_0 - [O]_f)\exp\left(-AK_{eff}\frac{t}{V}\right) + [O]_f \qquad (9-7-1)$$

式中　$[O]_0$——钢水中原始含氧量，ppm；

$[O]_f$——钢水最终氧含量，ppm；

K_{eff}——有效传质系数，cm/s；

A——熔池表面积，m^2；

V——熔池体积，m^3。

由式 9－7－1 可知，统治中间包钢水夹杂物上浮的因素是：钢水搅拌强度（K_{eff}值大小）、中间包表面积与体积之比（A/V）和夹杂物上浮时间。

对于大容量的钢包钢水中[O]由 60ppm 降到 25ppm，采用弱的吹 Ar 搅拌则需 30min，采用强搅拌则需 10min。但搅拌太强会引起卷渣。

中间包是一个良好的去除夹杂物的冶金容器。K_{eff}一般为 0.25cm/s，如把钢水中[O]由 30ppm 降到 15ppm，则夹杂物上浮到钢渣界面至少要 10min。因此中间包容积应保证钢水有足够的停留时间使夹杂物充分上浮，以达到所要求的清洁度水平。为此中间包向大容量深熔池方向发展。如北美各钢厂中间包平均容量 1966 年为 6～10t，熔池深度为 500～700mm，1986 年平均容量为 45t，熔池深度为 1m 左右。最大容量为 70t。中间

包熔池深度增加，由夹杂物引起产品废品率减少（表 9－7－2）。

表 9－7－2　中间包熔池深度对铸坯废品的影响

熔池深度 mm	平均停留时间 min	废品率 %
350	4	8
500	6.5	4
650	9.0	1

改善中间包钢液流动状况，消除中间包死区，促进夹杂物上浮。主要办法是在中间包加挡墙和坝，使流动沿钢渣界面运动，而又不扰动界面，使夹杂物易于被中间包渣子吸收。中间包容量加挡墙对纯净度的影响如表 9－7－3。

表 9－7－3　中间包容量对纯净度影响

中间包容量 t	板坯废品率 %	夹杂物缺陷 个/cm^2
6	1.2	0.82
12	0.7	0.51
12 加挡墙	0	0.04

还有中间包吹 Ar、使用过滤器、复合渣，以及使用碱性包衬等，都有利于中间包进一步净化钢液。

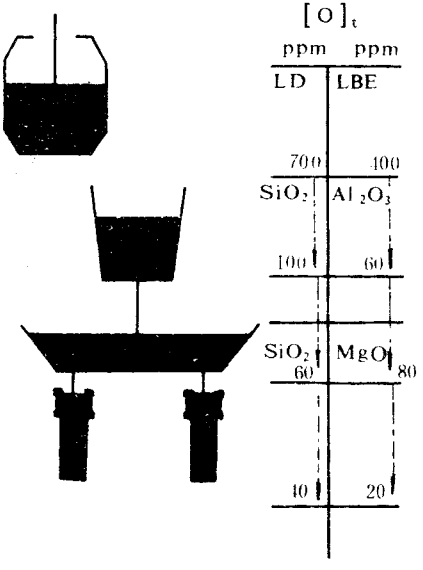


图 9－7－5　浇注过程钢中总[O]演变

如图 9－7－5 所示，钢包注流使用长水口、中间包碱性包衬、并使用挡墙加坝，可使铸坯中总[O]达到 20ppm，消除了大于 50μm 大颗粒夹杂，使深冲 DI 罐（Draw and lroned Can）废品率减少到万分之五。

第三节　铸坯表面质量

铸坯表面质量的好坏决定了在热加工之前是否需要精整。它是影响金属收得率和成本的重要因素，也是铸坯热送和直接轧制的前提条件。

铸坯表面缺陷产生的原因是极其复杂的，要针对缺陷的类型具体分析。不过从总体上可以说，表面缺陷主要是受钢水在结晶器凝固过程控制的。铸坯常见的表面缺陷如图 9－7－6 所示。

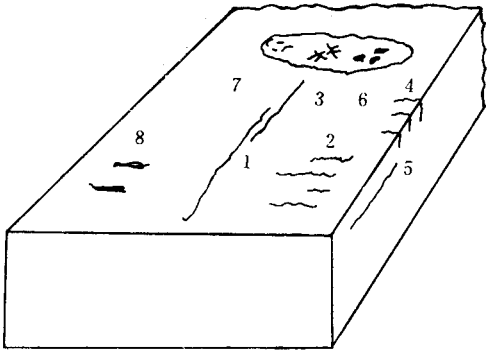


图 9－7－6　板坯表面缺陷示意图

1—表面纵裂纹；2—表面横裂纹；3—网状裂纹；4—角部横裂纹；
5—边部纵裂纹；6—表面夹渣；7—皮下针孔；8—深振痕

一、表面纵裂纹

铸坯表面的裂纹，会影响轧制产品的质量。如长 300mm 深 2.5mm 的纵裂在轧制板上留下 1125mm 的分层缺陷。纵裂严重时会造成废品或拉漏事故。

为研究铸坯表面纵裂形成机理，曾进行了结晶器模拟试验。在结晶器钢水弯月面区和下部区的铜板内表面打了 1～3mm 宽 0.1～0.3mm 深 150mm 长的槽沟，在有沟与无沟的铜板厚度方向用热电偶测定浇注过程中温度变化，并加入 S 以测定凝固壳厚度，共

浇注了 60m。得出以下结果：1）有槽沟处铜板温度差大，纵裂严重；2）有纵裂处坯壳厚度减少 10%；3）相对应的槽沟处铸坯表面有凹陷并有纵裂；4）位于结晶器弯月面区的槽沟产生纵裂，而结晶器下部的槽沟无纵裂。金相检验指出，裂纹处局部有 MnS 析出，表层处裂纹沿初生枝晶延伸，深处沿奥氏体晶界延伸。

从板坯横断面低倍检验指出，C = 0.10% ~ 1.6% 钢，纵裂纹起源于凝固壳激冷层厚度的不均匀性，在激冷层的薄弱点，裂纹深度为 0.5 ~ 2.5mm。

这一试验说明，表面纵裂是在结晶器弯月面区初生坯壳厚度不均匀，作用于坯壳上的拉应力超过钢的高温允许强度和应变，在坯壳的薄弱处产生应力集中导致产生纵裂，出结晶器后在二冷区继续扩展。

从理论上分析，作用于坯壳上的应力有：

1）由凝固壳温度不均匀而形成的热应力 σ_t；

2）板坯宽度方向凝固壳收缩在钢水静压力作用下产生的鼓胀力 σ_P；

3）坯壳与铜板不均匀接触而产生的摩擦力 σ_f；

4）由于产生气隙，宽面凝固收缩受窄面的约束而使坯壳承受的弯曲应力 σ_b。

一般来说，在板坯宽面中心区域 σ_t，σ_b 最大。试验指出，宽厚比为 7 的 1890mm 宽的板坯纵裂发生率是宽度为 1520mm 的 2 倍。

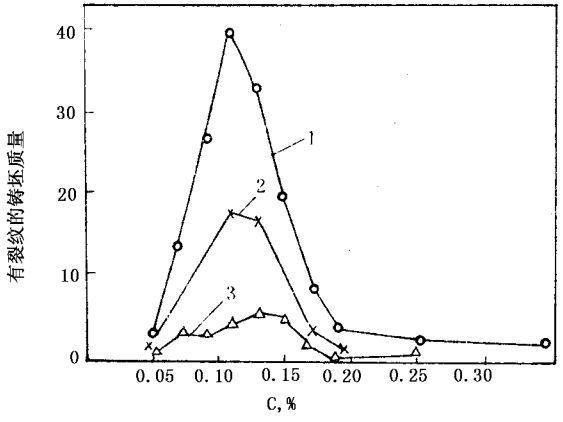


图 9－7－7　C 含量与纵裂关系

1　180 × 1830mm v = 1.05m/min

2　230 × 1830mm v = 0.85m/min

3　305 × 1525mm v = 0.65m/min

钢中 C 对板坯纵裂的影响如图 9－7－7 所示。图中数据是由 60 万 t 板坯统计得到

的。由图可知：大约在 C = 0.10% 左右时纵裂最严重，每种断面纵裂都有一个峰值，且铸坯厚度减小拉速提高纵裂趋向加重。

为什么 C = 0.10% 左右时纵裂最严重呢？这是因为钢凝固处于包晶区（$L + \delta \rightarrow \gamma$），在固相线温度以下 20 ~ 50℃ 钢的线收缩最大（图 9 - 7 - 8），此时结晶器弯月面刚凝固的坯壳随温度下降发生 $\delta_{Fe} \rightarrow \gamma_{Fe}$ 转变，伴随着较大的收缩，坯壳与铜板脱离形成气隙，导出热流最小坯壳最薄，在表面会形成凹陷。凹陷部位冷却和凝固速度比其他部位慢，组织粗化，对裂纹敏感性强，在热应力和钢水静压力作用下，在凹陷薄弱处造成应力集中而产生裂纹。

坯壳表面凹陷越深，坯壳厚度不均匀性就越严重，纵裂出现的几率越大（图 9 - 7 - 9）。

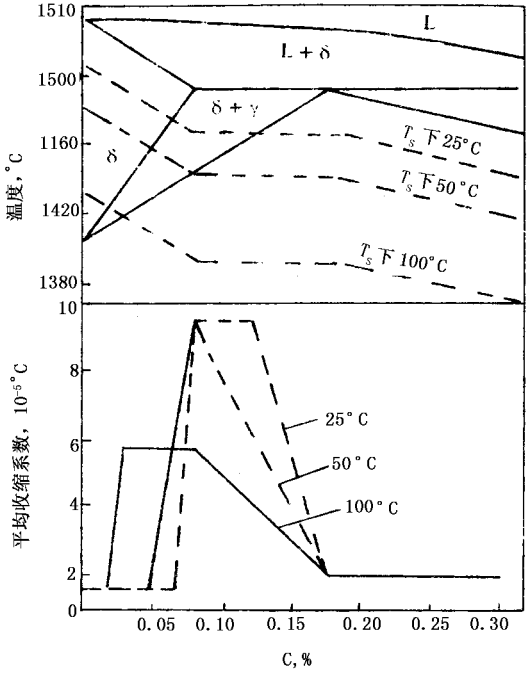


图 9 - 7 - 8　碳对坯壳线收缩的影响

而当 C > 0.2% 时，包晶凝固生成的 δ_{Fe} 比例减小，固相线温度下发生 $\delta \rightarrow \gamma$ 转变的线收缩较小（2×10^{-5}/℃），弯月面区域坯壳厚度生长均匀，产生纵裂的几率较小。

钢中 S + P + As 含量高，板坯纵裂纹发生几率增大。P > 0.017%，S > 0.015%（图 9 - 7 - 10），钢的高温强度和塑性降低较多，容易产生纵裂。保持 S < 0.025%，Mn/S = 24 ~ 26，MnS 单独存在于基体，可减少纵裂。

保护渣对纵裂的影响是：渣子熔化速度过快或过慢，使液渣层过厚或过薄；或者渣子

粘度不合适，流入坯壳与铜板之间渣膜厚薄不均匀，致使结晶器导热不均而导致局部区域坯壳厚度不均，使 δ_t 和 δ_b 局部增大而促使纵裂纹发生。试验指出，液渣层厚度小于10mm，铸坯表面纵裂纹增加（图 9－7－11）。

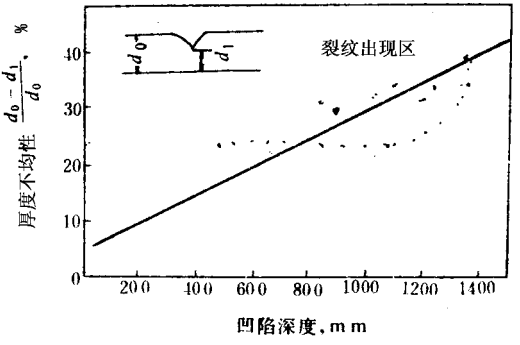


图 9－7－9　壳厚不均匀性与凹陷深度关系

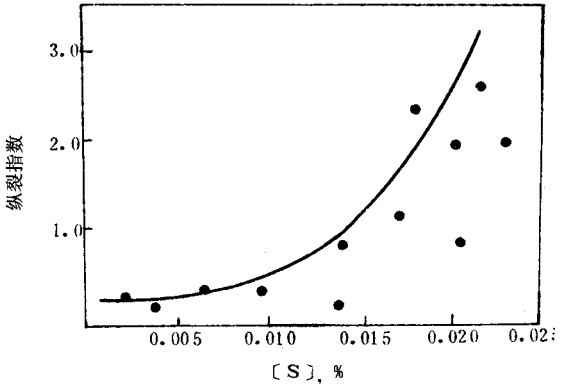


图 9－7－10　钢中[S]对纵裂影响

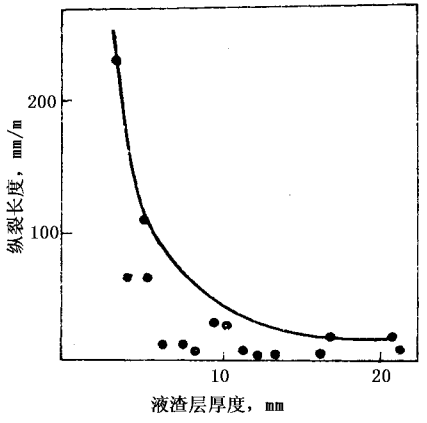


图 9－7－11　液渣层厚度对纵裂影响

结晶器液面波动对纵裂的影响如图 9－7－12。浇注板坯越宽，液面波动增大，发生裂纹趋势越严重。而结晶器液面的稳定性是受钢水流量、水口堵塞、水口结构、插入深度以及由钢水再循环引起的弯月面产生的波浪有关的，这是一个复杂的体系。法国 Solmer 工厂试验指出，结晶器液面波动大于 10mm，发生纵裂的几率占 30%；浸入式水口插入深度的变化大于 40mm，发生纵裂的几率占 20%。

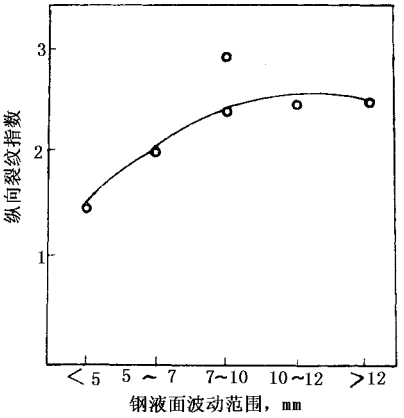


图 9－7－12　液面波动对纵裂影响

(0.09% < C < 0.12%，250 × 1890mm)

总之，纵裂纹的形成是多种因素综合作用的结果。然而纵裂纹形成的基本条件是：1)初生坯壳厚度不均匀，在坯壳薄弱处产生局部应力集中；2)沿树枝晶元素(C、Mn、S、P)的局部偏析，裂纹的开口和扩展总是在偏析严重之处，河野拓夫提出了纵裂纹形成的机理如图 9－7－13 所示。

为防止纵裂纹的产生，关键是使弯月面区初生坯壳生长均匀。因此在操作上防止纵裂产生的措施是：

1)稳定的结晶器液面。液面波动由 ± 5mm 增加到 ± 20mm，纵裂指数由 0 增加到 2.0。

2)合适的浸入式水口插入深度和出口倾角。出口倾角太小，流股碰点在窄面上端，引起液面紊流，液渣不能均匀流入坯壳，会导致宽面纵裂。出口倾角太大，流股靠近窄面下端，角部冲刷严重，容易引起角部纵裂。浸入式水口插入深度和倾角应由模型试验决定，一般是倾角向下 15°～35°。

3)合适的结晶器锥度。试验指出：220 × (700～1600) mm 的板坯，当窄面锥度不够大时，会产生离角部 2～5cm 角部纵裂纹。当结晶器锥度为 1.3%/m 时消除了角部纵裂。

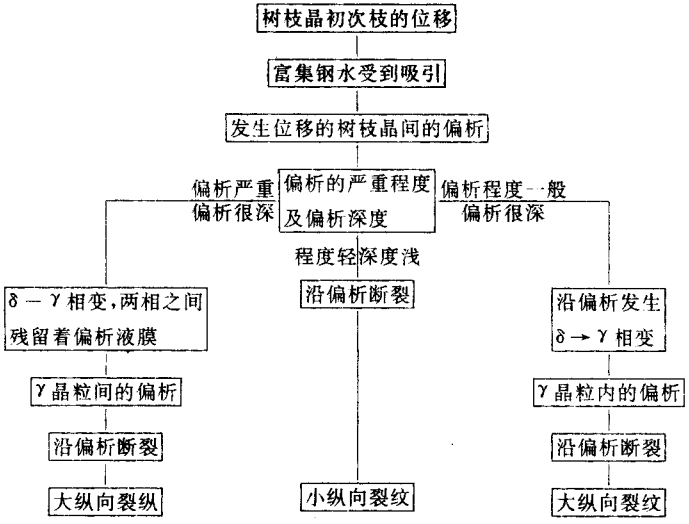


图 9－7－13　纵裂形成机理示意图

4)浸入式水口与结晶器对中,以防止钢流热中心位移而冲刷坯壳。

5)合适的保护渣性能。在保护渣各项特性中,粘度对产生表面纵裂影响最大。渣高粘度使纵裂增加,渣低粘度产生纵裂少,因此要控制渣子的粘度(η)与渣子熔融时间(t_f)合适的比值。如浇含 Al 钢(Al > 0.02%),渣液层的 $\eta/t_f < 2$ 可明显减轻纵裂和夹渣。

6)合适的钢水过热度。钢水过热度提高 10℃,在结晶器内高温钢水流动会吃掉凝固壳约 2mm。

7)采用波浪结晶器。在宽面铜板上加工 0.2～1mm 深间距 2～5mm 的沟,使坯壳与铜板间气隙均匀生成,弯月面区热流降低 10%初生坯壳厚度均匀,减少了纵裂纹发生几率。如 C = 0.10%～0.16%钢,240×2000mm 板坯,采用波浪结晶器后板坯纵裂减少了 58%。

8)采用热顶结晶器。即在弯月面区 75mm 的铜板内镶入不锈钢、镀 Cr、Ni 或碳铬化合物的隔热材料,使结晶器的热流密度可以减少 50～70%,延缓了坯壳的收缩,减轻了凹陷深度从而减少了裂纹的发生率。

角部纵裂常常位于铸坯角部 10～15mm 处。板坯角部是宽面和窄面的二维传热,结晶器角部钢水凝固比其他地方要快,初生坯壳收缩最早,在角部形成不均匀气隙(图 9－7－14a),热阻增加,凝固减慢,当坯壳薄弱处不能抵抗张应力时形成角部纵裂纹。

防止角部纵裂纹的关键就是要改变结晶器窄面形状,保持凝固壳与铜板紧密接触,防止角部区域坯壳的过早收缩。其中重要的是保持窄面合适的锥度。

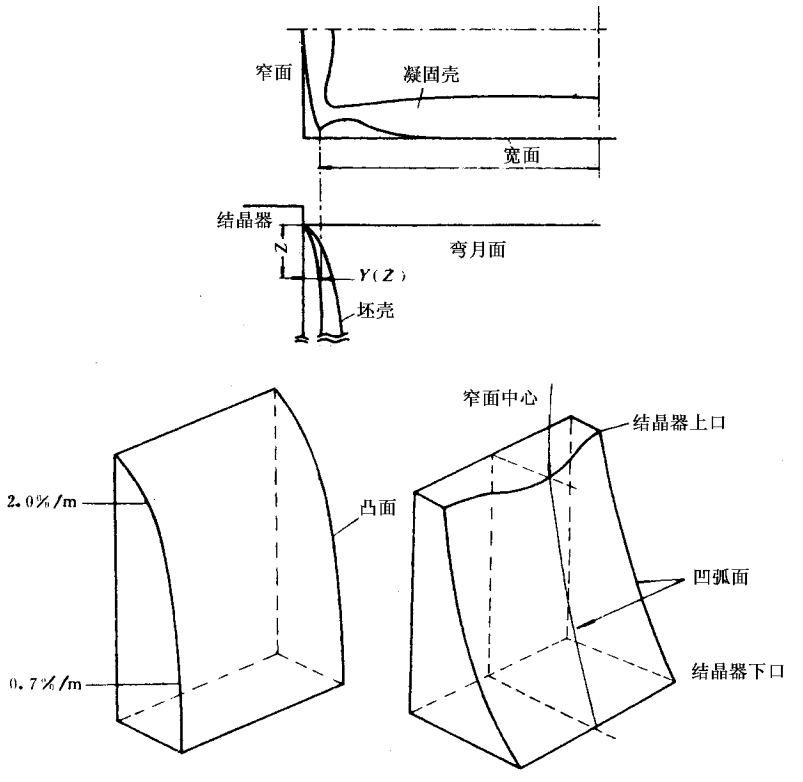


图 9－7－14　结晶器坯壳收缩和锥度示意图

a—坯壳收缩；b—凸面状结晶器；c—凹面状结晶器

由弹塑性应力模型，导出沿结晶器宽面方向坯壳收缩方程：

$$Y = KZ^{\frac{1}{2}} \tag{9－7－2}$$

式中　Y——**坯壳收缩量**，m；

K——**系数**，$m^{\frac{1}{2}}$；

Z——**结晶器弯月面以下距离**，m。

K **值与浇注参数、板坯宽度、拉速、保护渣性能有关。以下式表示：**

$$K = 0.017B(4 - v)W_B \tag{9－7－3}$$

式中　B——**决定于保护渣性能的系数**；

v——**拉速**，m/min；

W_B——**板坯宽度**，m。

将式 9－7－3 **代入式** 9－7－2 **得**

$$Y = 0.017B(4 - v)W_B Z^{\frac{1}{2}} \tag{9－7－4}$$

根据结晶器窄面锥度的定义，导出锥度随结晶器弯月面以下高度的变化 $\mathrm{d}C/\mathrm{d}Z$：

$$\frac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}Z}=1.7B\times 4\times\frac{v}{Z^{\frac{1}{2}}} \tag{9-7-5}$$

式中　C 代表锥度。此式说明：当拉速一定时，结晶器锥度是与 $1/\sqrt{Z}$ 成反比，也就是说从结晶器弯月面开始锥度应逐渐减小。设定锥度的方法：

1）窄面为线性锥度，一般设定为 1.1%/m；

2）窄面呈凸面状，窄面纵向断面近似为抛物线（图 9-7-14b）；

3）窄面为凹面状，窄面纵向断面呈弧线（图 9-7-14c）。

与线性锥度的结晶器比较，对于凸面状结晶器，沿窄面中心部位热流减少了 40%，而角部热流变化不大，角部气隙仍然较大；对于凹面状结晶器，窄面中心部位热流相差不大，在结晶器 1/2 高度上，角部坯壳强制与铜板接触，热流增加了 70%，坯壳生长均匀，防止了凹陷和角部纵裂。试验指出：当拉速为 1.2～1.4m/min（板坯 240×2020mm），线性锥度结晶器与凹面状结晶器角部纵裂指数分别为 1 和 0.2；当拉速为 1.4～1.6m/min 时分别为 2 和 0.5。

板坯角部纵裂还与出结晶器时宽面鼓肚而窄面不能随之凹入有关。窄面微凸时产生角部裂纹，窄面微凹时则无角部裂纹。这可能与窄面能凹入缓解了宽面鼓肚时产生的角部拉应力有关。

为防止板坯角部裂纹，除调整合适的锥度外，还可在宽面和窄面交界面镶入呈 45°的插板，以减缓角部坯壳的收缩。

小方坯角部裂纹是与铸坯菱变有关的。结晶器角部冷却不良，水缝中水流分布不均匀，铜管变形或圆角半径不合适都会导致角部纵裂。结晶器圆角半径过大则裂纹发生在铸坯顶角附近；圆角半径过小则裂纹发生离开铸坯顶角。结晶器圆角半径：<130×130mm，4～6mm；>130×130mm，6～8mm。

二、表面横裂纹

铸坯横裂纹通常是隐藏看不见的。它是位于铸坯内弧表面振痕的波谷处。金相检查指出，深度可达 7mm、宽度 0.2mm。裂纹位于铁素体网状区，而网状正好是初生奥氏体晶界。电子显微镜研究指出：在奥氏体晶界有 AlN 或 Nb(CN) 质点沉淀。其质点间距是：

板坯	质点间距	质点平均尺寸
	μm	μm
良好板坯	140	40

不良板坯　　60　　14

当奥氏体晶界质点粗大，呈稀疏分布，板坯横裂纹产生的废品减少；当奥氏体晶界质点细小，呈密实分布，板坯横裂纹产生的废品增加。因此控制沉淀在奥氏体晶界质点的粗大或控制质点（如 AlN、TiN、MnS）不在晶界析出，可以降低对裂纹的敏感性。

一般的 C－Mn 钢（Mn＞1%）、C－Mn－Nb（V）钢连铸坯容易产生横裂纹。因为在较高温度下（1050～1100℃），Nb（CN）已开始在晶界沉淀，降低了晶界的结合力，导致沿沉淀物周围的空洞生长，促使晶界裂纹的扩展，同时使钢的脆化温度区间加宽（图 9－7－37），对裂纹敏感性增加。

钢中含 Al 量增加，板坯横向裂纹废品增加。因为 Al 促使晶界质点呈细密分布，另外 AlN 在奥氏体晶界析出，降低了晶界内聚力，增加了 $\gamma\rightarrow\alpha$ 转变的脆性，使 900～700℃钢延性大大降低（图 9－7－37），对裂纹敏感性增加。

因此随钢中 Al、Nb、N 增加，在 A_3 转变温度以上就有氮化物和 C－N 化物沉淀，扩大了降低钢延性温度的范围。

连铸二冷强度对质点的析出有重要影响。表 9－7－4 表示了二冷对 AlN 析出的影响。由表可知，二冷采用弱冷却（0.6L/kg 钢），沿奥氏体晶界 AlN 析出减少了，铸坯保持较高温度（950℃）矫直，可避免横裂的产生。

表 9－7－4　二冷时 AlN 析出的影响

冷却方式	横裂纹数 mm/m	板坯角部		板坯中间		矫直温度	
		$[N]_{AlN}$ ppm	$\frac{[N]_{AlN}}{[N]_{总}}$ %	$[N]_{AlN}$ ppm	$\frac{[N]_{AlN}}{[N]_{总}}$ %	角部 ℃	中间 ℃
强冷	38	45	73	36	62	700	870
上下强冷中间回升	50	43	73	32	58	700	870
弱冷	0	29	54	5	9.6	740	950

铸坯在矫直时内弧受到张力外弧受到压力，在矫直过程中，由于振痕的缺口效应而产生应力集中，再加上矫直温度在脆化温度 700～900℃之间，加速了振痕波谷处横裂纹的产生（图 9－7－15）并沿奥氏体晶界扩散。横裂纹深度决定于板坯厚度方向温度梯度，即裂纹扩展到具有良好延性的温度为止。因此二冷区采用弱冷却，使铸坯进拉矫机温度大于 950℃（含 Nb 钢），且应使板坯中心温度与角部温度差别尽可能减小，可以有效地减少横裂纹。

从 C－Mn 钢拉漏坯壳检查指出：结晶器初生坯壳振痕波谷处就有很细的裂纹，而在

矫直操作区裂纹进一步扩展。裂纹扩展程度决定于钢中 Al 含量、晶界沉淀质点尺寸及铸坯矫直温度等。

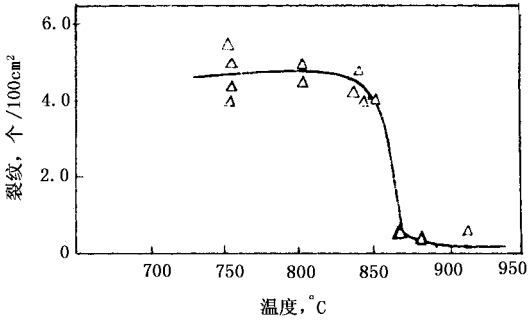


图 9－7－15　矫直温度与横裂纹关系

振痕是与横裂纹共生的，要减少横裂纹就是要减少振痕深度。振痕的形成是由于结晶器振动，引起弯月面钢水周期性流动使坯壳发生折叠所致。振辐越大，振痕越深；负滑脱时间越长，振痕越深；振动频率越低，振痕越深（图 9－7－16）。振痕深处树枝晶粗大，溶质元素富集，当铸坯受到应力作用就成为裂纹的发源地。为此减少横裂纹的措施是：

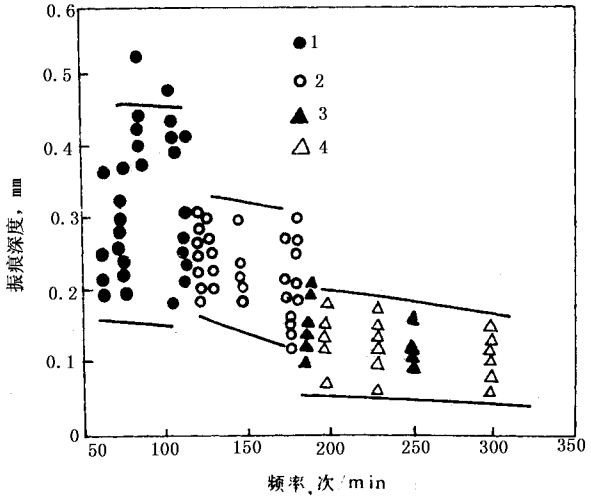


图 9－7－16　振动频率与振痕深度关系

（v 为 0.9～1.2m/min，C 为 0.09～0.17%）

振幅 1—7.8mm；2—4.2mm；3—3.5mm；4—2.8mm

1）结晶器采用高频率（200～400 次/min）小振辐（2～4mm）是减少振痕深度的有效办法（图 9－7－16）。

2)二冷区采用平稳性冷却,矫直时铸坯表面温度高于质点沉淀温度或高于 $\gamma\rightarrow\alpha$ 转变温度,以避开低延性区。

3)降低钢中 S、O、N 含量,或加入 Ti、Zr、Ca 以抑制 C－N 化物和硫化物在晶界析出,或使 C－N 化物质点变粗,以改善奥氏体晶粒热延性。

4)减少结晶器液面波动,采用低表面张力、润滑性能良好的保护渣。

5)细化奥氏体晶粒。横裂纹常沿着铸坯表皮层下的粗大奥氏体晶界分布,可以通过二次冷却使奥氏体晶粒细化,以减少对裂纹的敏感性。

如图 9－7－17 所示,二冷区铸坯表面温度变化有四种方式。A 冷却方式的铸坯表层 5mm 显微组织为细的铁素体＋珠光体。因为二冷初期,表面温度 T_s 降到低于 A_{r3},小然后温度回升到 A_{r3} 以上,发生 $\gamma\rightarrow\alpha\rightarrow\gamma$ 的转变,粗大奥氏体变细,晶界无 AlN 的析出,故没有裂纹发生。而 B、C、D 冷却方式没有 $\gamma\rightarrow\alpha\rightarrow\gamma$ 的转变或转变不完全,奥氏体晶粒粗大,沿晶界有 AlN 等质点的沉淀,促使裂纹的形成(表 9－7－5)。

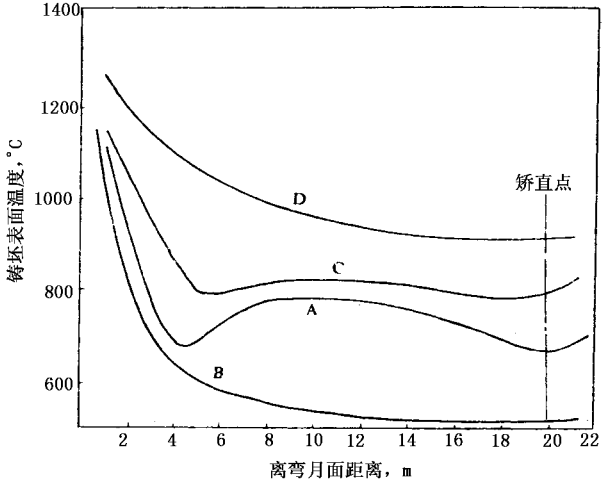


图 9－7－17　不同冷却方式的表面温度

表 9－7－5　不同冷却方式的结果

冷却方式	裂纹	显微组织	B	Al	Nb
A	无	细铁素体＋珠光体	1	1	—
B	很多	粗大马氏体	2	1	3
C	很多	铁素体带	2	2	3
D	少	粗大铁素体＋珠光体	1	1	—

注:1—无析出;2—奥氏体晶界析出;3—沿树枝干析出。

三、铸坯表面网状(星形或晶界)裂纹

这种裂纹在铸坯表面酸洗之后才能发现,深度可达 5mm,沿奥氏体晶界分布。产生的原因可能是:

1)高温铸坯表面吸收了结晶器的铜,而 Cu 熔化为液体沿奥氏体晶界渗透所致。但即使采用镀 Cr、Ni 结晶器后这种裂纹还是存在。

2)铸坯表面 Fe 的选择性氧化,而使残余元素(如 Cu,Sn 等)残留在表面沿晶界渗透形成热脆裂纹。

研究表明,这种裂纹的特点是:

1)表面裂纹区有 Cu、Ni、Sn、Sb 的富集。富集相成分(%):Cu85,Sn5,Ni4,Fe5,Sb1。这种富集相大约在 1050℃熔化沿晶界渗透。

2)Cu 含量增加裂纹加重(图 9-7-18)。因为 Cu 在铸坯表面的氧化铁皮下形成液相,沿晶界穿行而失去塑性。Cu = 0.10% ~ 0.20%时在高温下就有 Cu 的富集,对裂纹敏感性增加。

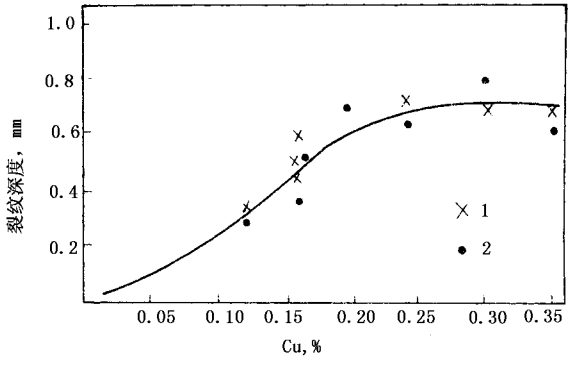


图 9-7-18　Cu 对裂纹深度影响(1200℃)

1—大水量;2—小水量

3)Al 的作用。钢中 Al 含量增加,铸坯表面网状裂纹加重(图 9-7-19)。钢中低 Al 含量时(Al < 0.01%),在较高温度下喷水,裂纹的产生是由于 Fe 的选择性氧化,Cu 液相渗入晶界引起的;钢中高 Al 含量时,二冷喷水产生严重裂纹是由于热循环作用 AlN 在晶界沉淀引起的。

试验指出:Al 含量较高时,在 1000℃喷水,铸坯表面有网状裂纹。裂纹区 AlN 含量高达 80ppm,在裂纹深 4mm 处,AlN 为 20ppm。当 AlN > 25ppm 时使 800 ~ 1100℃钢的

延性大大降低，增加了裂纹敏感性。

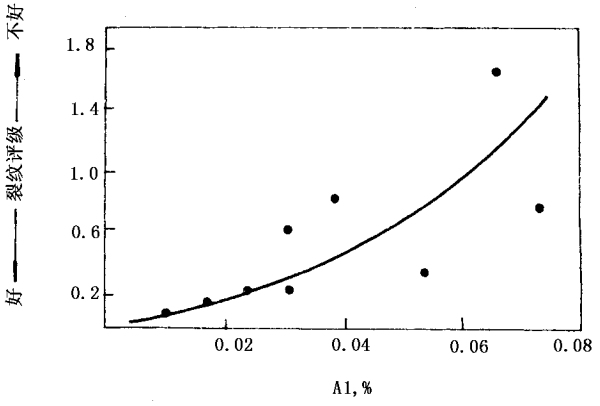


图 9－7－19　Al 对裂纹评级影响(二冷水量 0.4～0.6L/kg)

4)二冷水量。二冷水量对表面裂纹影响如图 9－7－20。铸坯表面氧化铁皮形成速度是与喷水强度有关的。大多数情况下铸坯表面形成氧化铁皮量为 1.0～2.0kg/m^2。弱冷会导致铸坯表面温度高，氧化铁皮生成加速，促使残余元素(Cu，Sn)沿晶界富集形成裂纹。强冷会导致铸坯表面温度大大降低，加大了坯壳的温度梯度，促使微量元素(Al、Nb、B…)在晶界沉淀而增加了裂纹的敏感性。

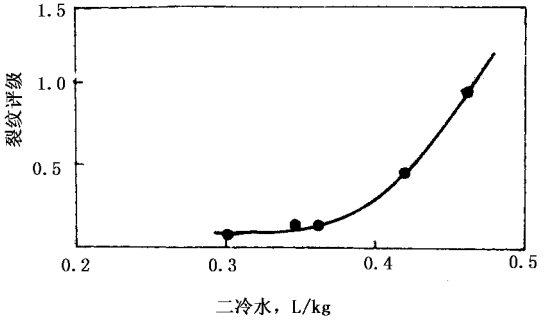


图 9－7－20　冷却水量对表面裂纹影响

因此，减少铸坯表面网状裂纹的措施有：

1)结晶器镀 Cr 和 Ni；

2)合适的二冷水量；

3)精选原料，控制钢中残余元素(Cu、Sn 等)；

4)控制钢中 Cu＜0.2%；

5)控制钢中 Mn/S＞40。

四、铸坯表面夹渣

夹杂或夹渣是铸坯表面的一个重要缺陷。夹渣嵌入表面深度达 2～10mm。从外观看，硅酸盐夹杂颗粒大而浅，而 Al_2O_3 夹杂颗粒小而深，如不清除，则就会在成品表面留下许多弊病。如冷轧薄板呈条状分布的黑线，认为是铝酸钙（70% CaO、30% Al_2O_3）和 Al_2O_3 所致。镀锡板上的 Ca－Al－Na 氧化物夹杂，是冲压裂纹的根源。另外结晶器初生坯壳卷入了夹渣，在坯壳上形成一个“热点”，此处渣子导热性不好，凝固壳薄，出结晶器后容易造成漏钢事故。

（一）对于敞开浇注

由于浇注时二次氧化，在结晶器钢水面上生成浮渣。结晶器液面的波动，浮渣可能卷入到初生坯壳表面而残留下来形成夹渣。对于硅镇静钢，铸坯表面夹渣是与钢中 Mn/Si 有关的（图 9－7－21）。根据钢中 Si、Mn 含量，可能形成的夹杂物：

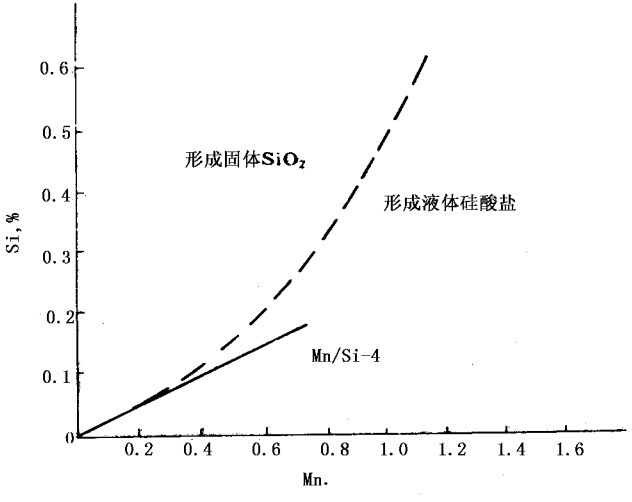


图 9－7－21　钢中 Si，Mn 含量对形成浮渣影响

Mn/Si＜4，形成 SiO_2 浮渣容易在结晶器弯月面处冷凝结壳；

Mn/Si＞4，形成液态 $MnO \cdot SiO_2$ 流动性好，浮渣也呈液态。

因此，随钢中 Mn/Si 比减小，生成浮渣 $MnO \cdot SiO_2$ 熔点升高，流动性不好，容易卷入坯壳。为保持流动性良好的浮渣，应保持钢中 Mn/Si≥2.5 为宜（图 9－7－22）。对于用 Al 脱氧钢，应限制加 Al 量（200g/t）使钢中酸溶铝 [Al] = 0.005%～0.007%，既可防止定径水口堵塞，也可防止因 Al_2O_3 析出使浮渣变粘，增加表面夹渣。

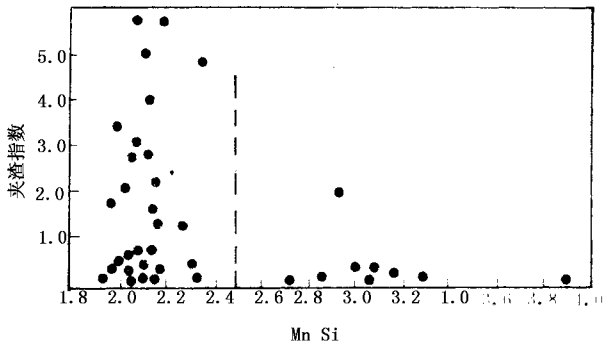


图 9－7－22　Mn/Si 比与夹渣关系

(二)对于保护浇注

结晶器采用浸入式水口和保护渣浇注。结晶器液面波动是弯月面卷渣的根源(图 9－7－23)。造成液面波动的原因：1)外部干扰,如水口扩大、堵塞或塞棒失灵；2)结晶器液体流动的搅动,如水口形状、插入深度,吹 Ar 量等引起液面不稳定；3)拉速突然变化。

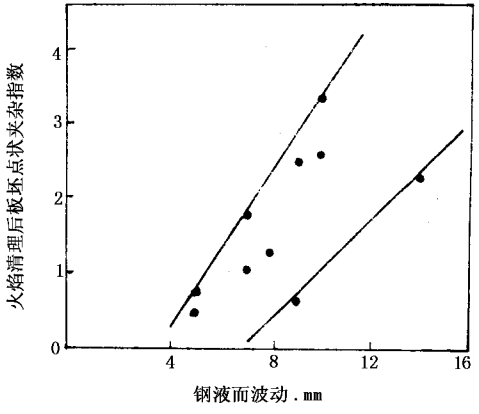


图 9－7－23　液面波动与夹渣关系

(断面　190×1300mm 拉速,1.3m/min)

铸坯表面夹杂的来源主要是：1)保护渣中未溶解的组分；2)上浮到钢液面未被液渣吸收的 Al_2O_3 夹杂；3)富集 Al_2O_3($Al_2O_3>20\%$)的高粘度的渣子。

结晶器液面波动对卷渣的影响是：

液面波动 ±20mm，　　皮下夹渣深度 <2mm

液面波动 ±40mm，　　皮下夹渣深度 <4mm

液面波动 >40mm，　　皮下夹渣深度 <7mm

皮下夹渣深度小于 2mm，铸坯在加热炉加热时就可消除。夹渣深度在 2～5mm，就必须进行表面清理。保持液面波动小于 10mm，就可消除皮下夹渣。因此选择灵敏可靠的液面控制系统，控制液面波动在允许范围内（如 ±3～±5mm），这对防止表面卷渣是非常重要的。

浸入式水口插入深度对铸坯表面夹渣影响甚大（表 9－7－6）。水口插入深度太浅（<100mm）铸坯卷渣严重；太深保护渣熔化不均匀。选择插入深度 150mm 左右。可消除表面卷渣，但纵裂指数有所增加。

表 9－7－6　浸入式水口插入深度对夹渣影响

插入深度，mm	渣斑指数	针孔指数	纵裂指数
≤80	2.85	1.2	0
85～100	1.65	0.7	2
105～120	1.15	1.6	2.1
125～140	0.95	2.3	4.3
>145	0.85	1.2	6.3

如图 9－7－24 所示，结晶器保护渣卷入凝固壳可能有以下机构：

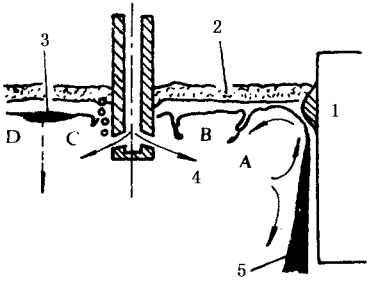


图 9－7－24　结晶器卷渣机构示意图

1—结晶器；2—保护渣；3—结壳；4—注流；5—凝固壳

1）浸入式水口流出的注流向上回流过强，穿透渣层而把渣子卷入液体中；

2）靠近水口周围的涡流把渣子卷入；

3）沿水口周围上浮的气泡过强，搅动钢渣界面把渣子卷入；

4）钢水温度低，保护渣结壳或未熔融渣卷入。

为防止结晶器卷渣，必须控制好以下几点：

1）液面的稳定性，液面波动尽可能小（<5mm）；

2)浸入式水口合适的插入深度,插入深度 125 ± 25mm 为宜;

3)浸入式水口出口倾角应使出口流股不搅动弯月面渣层为原则;

4)中间包塞棒合适的 Ar 气流量,防止气泡上浮增强钢渣界面的搅动;

5)合适的保护渣粘度、渣中 Al_2O_3 含量(渣中 $Al_2O_3 > 20\%$,液渣就不能吸收上浮的 Al_2O_3 使粘度增加)和液渣层厚度。结晶器 1/4 宽度处液渣层 8 ~ 12mm,可避免未熔化渣卷入坯壳,这样必须保持渣粉消耗为 0.35kg/t 钢。

五、铸坯皮下气孔

钢液凝固时 C - O 反应生成的 CO 或 H_2 的逸出,在柱状晶生长方向接近于铸坯表面形成的孔洞叫气孔,直径一般为 1mm,深度为 10mm 左右。气孔裸露在表面的叫表面气孔,没有裸露的叫皮下气孔,气孔小而密集的叫皮下针孔。

在加热炉内铸坯皮下气孔外露被氧化而形成脱碳层,在轧材上会形成表面缺陷,深藏的气孔会在轧制产品上形成微细裂纹。

脱氧不良是造成皮下气孔的重要原因之一,钢中溶解 $Al > 0.008\%$ 就可防止 CO 的生成。

用油做润滑剂或保护渣、钢包、中间包覆盖剂,绝热板干燥不良会导致 H_2 逸出生成皮下气孔。不锈钢中 H_2 大于 6ppm 时,铸坯皮下气孔骤然增加。

对于含 Ti 不锈钢,钢中的 TiN 与保护渣中的 Fe_2O_3 会发生以下反应:

$$6TiN + 4Fe_2O_3 = 6TiO_2 + 8Fe + 3N_2 \uparrow$$

$$TiN + CaO + 2FeO + 2MnO = CaO \cdot TiO_2 + 2Fe + 2Mn + \frac{1}{2}N_2 \uparrow$$

上述反应释放出来的 N_2 可能在凝固坯壳处形成皮下气孔。

另外生成的 TiO_2 和 $CaO \cdot TiO_2$ 大大增加了渣子粘度,可能会在结晶器钢水面上形成渣、钢和气体组成的硬壳,对不锈钢铸坯表面质量带来极大的危害。因此对含 Ti 不锈钢,应尽量降低钢中的[N]和[O]含量,降低保护渣的碱度以及采用最佳几何形状的浸入式水口(如出口倾角向上 15°)是有益的。

中间包塞棒吹 Ar 流量太大或拉速过快,会引起结晶器液面"钢水沸腾",增加了弯月面的搅动,导致卷渣或弯月面的钩形凝固壳会捕捉小于 2mm 的 Ar 气泡(图 9 - 7 - 25),造成冷轧板的分层缺陷。

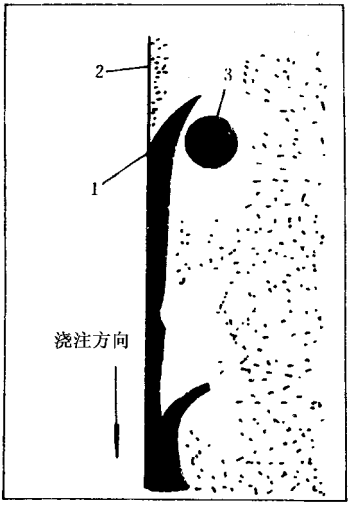


图 9－7－25　陷入凝固钩内的 Ar 气泡

1—弯月面钩形凝固壳；2—结晶器宽面；3—Ar 气泡

第四节　铸坯内部质量

铸坯内部质量主要是指低倍结构(柱状晶与等轴晶比例)，中心偏析、内部裂纹和夹杂物水平。总的来看，铸坯内部质量是与二冷区的冷却和支承辊系统密切相关的。

一、铸坯凝固结构

与钢锭相比，连铸坯低倍结构与钢锭无本质上差别，也是由激冷层、柱状晶和中心等轴晶区组成，但连铸坯低倍结构特点是：

1)连铸坯相当于高宽比相当大的钢锭凝固，边运行边凝固，液相穴很长，钢水补缩不好，易产生中心疏松和缩孔。

2)钢水分阶段凝固。结晶器形成初生坯壳，二冷区喷水冷却完全凝固。二冷区坯壳温度梯度大，柱状晶发达，但凝固速度快，晶粒较细。

连铸坯低倍结构控制的主要任务是：控制柱状晶与等轴晶的比例，获得没有内部缺陷和致密的凝固组织。

二、铸坯中心偏析

偏析是凝固过程中溶质元素在固相和液相中再分配的结果，表现为铸坯中元素分布的不均匀性，恶化机械性能，降低韧性，也是石油管线用钢产生氢脆和耐腐蚀性下降的原因。

偏析可分为显微偏析和宏观偏析两种。显微偏析局限于树枝干和枝晶之间成分的差异，一般在 1 ~ 3μm 范围内。而宏观偏析是长距离范围（以 cm 计）成分差异，在同一产品上会产生机械性能各向异性。

连铸坯中的宏观偏析主要表现为中心偏析（图 9 – 7 – 26），如铸坯中心 C 为原始含量的 2.2 倍，S、P 大约是 5 倍。而 C、S、P 的中心偏析严重，铸坯轧后冷却时在产品中产生马氏体和贝氏体的转变产物，对氢脆裂纹非常敏感，同时中心偏析区粗大的沉淀物（如 MnS、$Nb(CN)_3$），加速了中心裂纹的扩展。

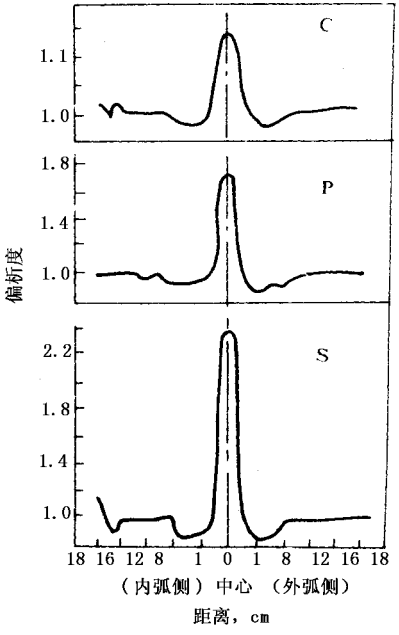


图 9 – 7 – 26　连铸坯中心偏析

铸坯中心偏析形成有两种机构：

1）“凝固桥”理论。铸坯凝固过程中凝固桥的形成阻止了液体的补缩，形成中心缩孔和疏松，导致中心偏析。

2)鼓肚理论。铸坯凝固过程中坯壳的鼓胀(图 9－7－27),造成树枝晶间富集溶质液体的流动,或者凝固末期由于铸坯收缩使凝固末端富集溶质液体流动导致中心偏析(或叫半宏观偏析)。

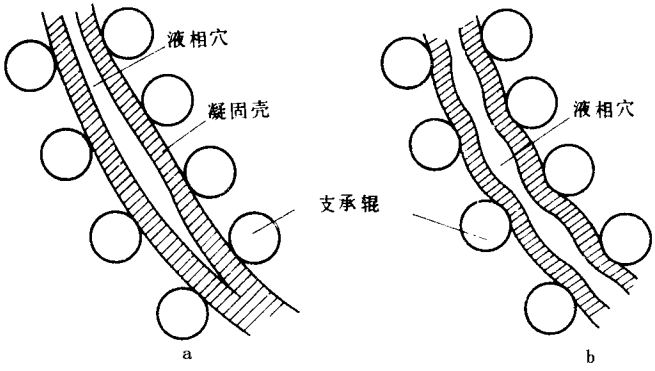


图 9－7－27　板坯凝固壳变形示意图

a—辊子对中不良的鼓肚;b—支承辊间反复鼓肚

两种偏析机构形成的中心偏析如表 9－7－7。可见凝固时树枝晶间富集溶质残余母液的流动是造成中心偏析的主要原因。

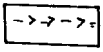
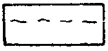
表 9－7－7　铸坯中心与边缘偏析

取样位置	鼓肚偏析		凝固桥偏析	
	无鼓肚	有鼓肚	无凝固桥	有凝固桥
板坯边缘 C%	0.203	0.203	0.138	0.002
板坯中心 C%	0.194	0.269	0.138	0.013

钢水过热度和支承辊的对中对中心偏析有很大影响,增加钢水过热度,促使柱状晶生长,加重中心偏析(表 9－7－8)。

表 9－7－8　铸坯中心偏析形貌

偏析形貌	偏析特点	浇注条件
	中心结构均匀,无明显中心偏析	过热度低,对中好
	不连续的中心偏析线	过热度高,对中好

偏析形貌	偏析特点	浇注条件
	不连续偏析线，有 V 形偏析区	过热度低，对中不好，有鼓肚
	中心裂纹 + 中心偏析	过热度高，液芯矫直或鼓肚

降低碳当量(CEV 值)，中心偏析减轻，从而减轻或消除中心区马氏体的形成。

对 C - Mn - Nb 钢(C0.08% ~ 0.11%，Mn1.4% ~ 1.5%，Nb0.026% ~ 0.037%，S0.003% ~ 0.005%，P0.012% ~ 0.022%) 229 × 1550mm 板坯，测定中心偏析区 5 ~ 30mm 内产生的马氏体的面积，以评价中心偏析严重程度。中心区马氏体(M)与碳当量(CEV)和钢水过热度(ΔT)有关：

$$M = 81(CEV) + 0.177(\Delta T) - 296.7 \tag{9-7-6}$$

式中
$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni + Cu}{15} - \frac{Cr + Mo + V}{5}$$

此式说明了钢成分和过热度(ΔT)对中心偏析的作用。

板坯中心偏析程度也可用偏析长度率 SLR 表示(图 9-7-28)：

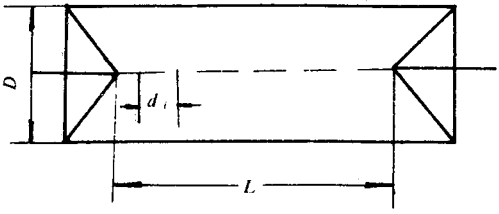


图 9-7-28　中心偏析表示法

$$SLR = \frac{\sum l_i}{L} \times 100\% \tag{9-7-7}$$

或用偏析面积 SA 来表示：

$$SA = \frac{\sum d_i d_i}{DL} \times 100\% \tag{9-7-8}$$

式中　L_i——板坯纵向硫印断面上观察到的中心偏析线长度；

L——测量区的总长度；

D——板坯厚度；

d_i——偏析线的直径。

SLR 值是与中心区的 S、P、Mn 偏析值有关。此值是判断氢呢裂纹敏感性(HIC)的指标。为防止板材的 HIC 的敏感性,应使 *SLR* 值小于 25%,或者板坯中心偏析指数小于 0.5。

还应指出,对高碳钢铸坯,中心偏析区还有 V 形偏析形成。在疑固末期,由于中心区液体凝固潜热的突然释放,使中心区液体温降速率(图 9－7－29O 线)大于周围液体(图 9－7－29O′线、O″线),从 A→B 温差约 120℃,从 B 点开始三者趋于一致。这样导致中心糊状区枝晶之间形成拉应力引起裂纹,而周围的偏析液体渗入其中形成了 V 形偏析。

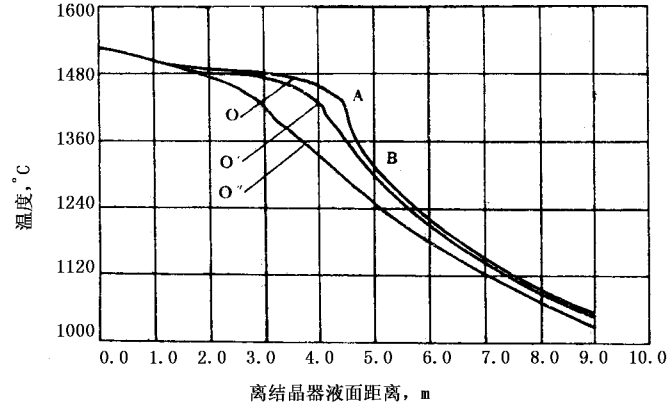


图 9－7－29　铸坯中心区液体温度变化

如图 9－7－30 所示,为防止铸坯中心偏析,采取以下措施:

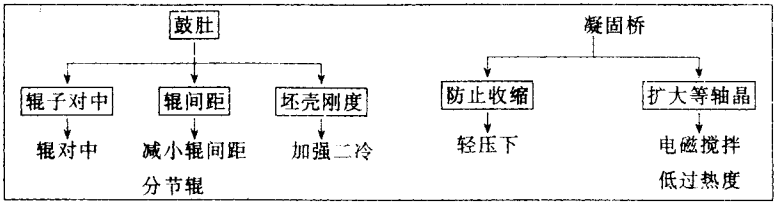


图 9－7－30　防止中心偏析措施

1)减少易偏析元素含量。如采用铁水预处理或钢包脱硫把钢中 S 降到小于 0.01% 以下。

2)为阻止富集溶质残余钢水的流动,就必须防止在凝固过程中坯壳的鼓肚。如二冷区夹辊严格对弧,减少凝固终点区域的辊距,采用多节辊防止夹辊变形,加强二冷以增强坯壳刚度等。

3)控制浇注掘度,对于浇注 C－Mn 钢,最好把过热度控制在 5～15℃。

4)采用电磁搅拌,消除搭桥增加中心等轴晶区,中心偏析明显改善甚至消失。

5)采用强冷技术。铸坯中心偏析是与凝固末期液相穴末端糊状区的体积有关的。如图 9－7－31 所示,在凝固末端设置强冷区,强冷区长度和冷却水量是可调的,强冷能压实铸坯芯部,防止坯壳鼓胀,增加等轴晶区,中心偏析大为改善,消除了 V 形偏析和疏松,其效果不亚于轻压下技术。

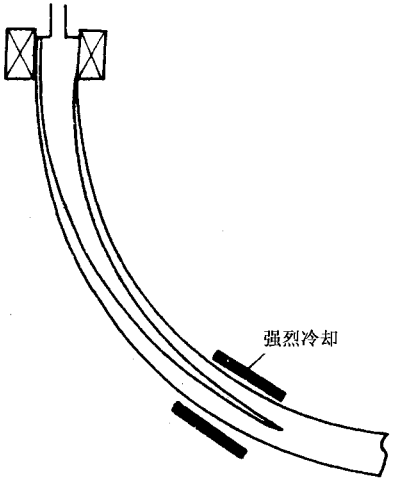


图 9－7－31　采用强冷连铸机示意图

用凝固末端的强冷可取代凝固末端的电磁搅拌器。凝固末端电磁搅拌器的位置是固定的,且搅拌器长度较短(一般 600～700mm),因此不能适应拉速的变化而引起液相穴末端延长。

此技术在小方坯和大方坯试验均取得良好效果,不仅适用于普通钢也适用于特殊钢。

6)采用轻压下技术。中心偏析的产生是由于铸坯在运行过程中,凝固壳鼓肚或凝固收缩引起富集溶质残余液体流动而使局部溶质聚集的结果。为此在凝固末期采用轻压缩技术来补偿最后凝固阶段的收缩,以消除铸坯中心偏析(图 9－7－32)。

大方坯连铸机生产断面 300×400mm,拉速 0.7～0.9m/min,R = 10.5m,铸机长度 30.3m,生产高 C 钢(C = 0.77%～0.81%,Mn = 0.8%～0.9%)。水平段辊子用压缩辊,臣缩区长度 2～4m,试验结果表明,适度轻压缩对减少中心偏析极为有效,V 形偏析几乎消失(图 9－7－33)。

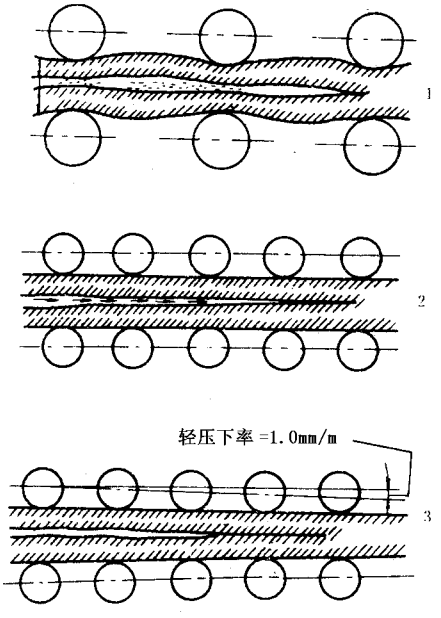


图 9－7－32　铸坯轻压下示意图

1—大辊间距，坯壳鼓胀严重，中心偏析严重；2—小辊间距，坯壳鼓胀轻微，中心偏析中等；3—小辊间距加轻压下中心偏析消失

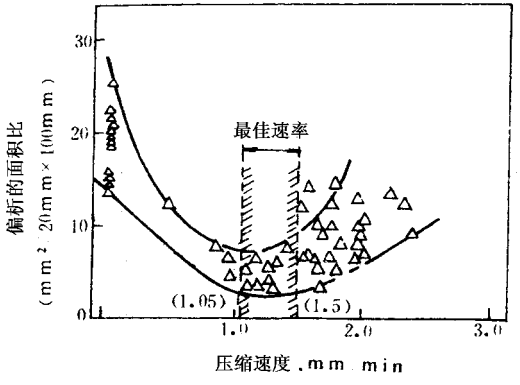


图 9－7－33　压缩率对偏析影响

板坯连铸机在接近凝固终点装有 ϕ350mm 辊子，辊间距为 420mm 共组成 11 对辊子其长度为 4.2m，每对辊用液压控制均匀压下，当压缩速率为 0.9mm/m 时，中心偏析减到最小(图 9－7－34)。

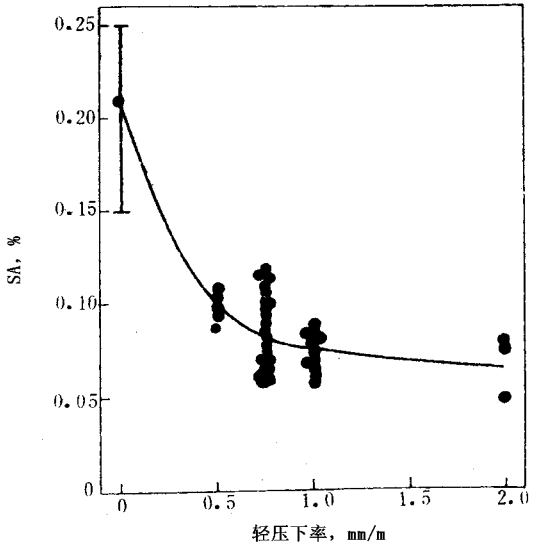


图 9－7－34　轻压下对中心偏析影响($\Delta T \geqslant 30℃$)

研究指出，采用轻压下板坯角部区域中心偏析有所增大。这是因为：1)板坯宽度方向压缩不均匀；2)液相穴末端形状不规则(图 9－7－35a)。为了改进板坯宽度方向压缩的均匀性，采用故意鼓肚和轻压下相结合的技术(叫 IBSR 法)。如图 9－7－35b 所示，在连铸机上部区域(A 区)的辊缝沿出坯方向逐渐加大，使铸坯微有鼓肚，然后进入轻压下区(B 区约 4m)时板坯宽度中心厚度大于边缘厚度，在轻压下区(B 区)压缩辊未接触板坯宽度边缘就能实现压缩，使宽度方向获得均匀压缩。试验表明，故意鼓肚量 6mm，轻压下速率 0.75～0.9mm/m，中心偏析的改善优于普通的轻压下法。

轻压下也可在结晶器出口以下 4～6m 之间，支承辊开口度排成轻度的锥形，铸坯导向系统在拉坯方向逐渐变窄，使铸坯内部凝固时互相压缩焊合不致引起内裂纹。

三、铸坯中心致密度

铸坯中心致密度决定了中心疏松和偏析程度，而致密度主要决定于柱状晶与等轴晶比例。它与以下因素有关：

1)钢种。低碳钢(0.1%～0.2%)和高碳钢(0.5%～0.7%)的柱状晶发达，中碳钢(0.2%～0.5%)柱状晶较短。奥氏体不锈钢柱状晶发达，铁素体不锈钢有柱状晶和中心等轴晶。

2)冷却制度。二冷区强冷，促进柱状晶的生长，以致形成搭桥造成严重的中心疏松和偏析。

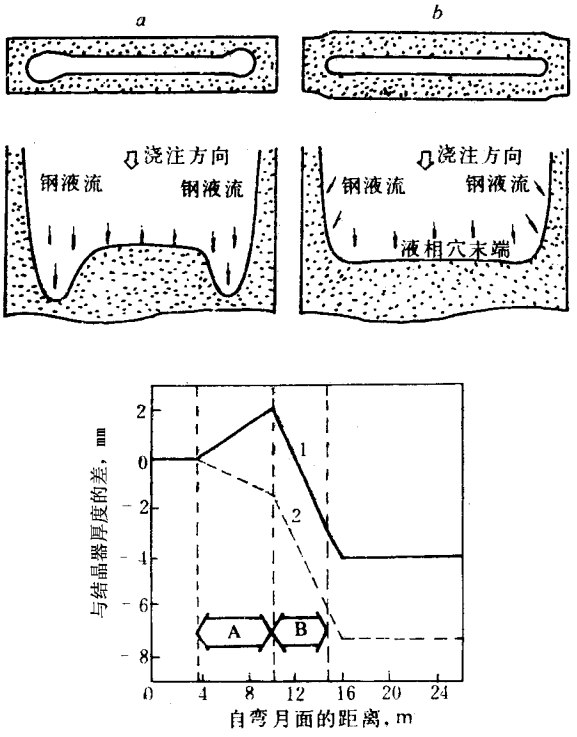


图 9－7－35　不同轻压下法对中心偏析影响

a—普通轻压下液相穴形状；b—IBSR 法液相穴形状；

1—普通法；2—IBSR 法；

A—鼓肚区；B—轻压缩区

3)浇注温度。高温浇注促进柱状晶生长。

加速柱状晶向等轴晶的转化是改善中心致密度的有力措施。为此：

1)尽可能在低的过热度下浇注；

2)加速液相穴过热度的消除；

3)采用电磁搅拌技术。

四、铸坯内部裂纹

如图 9－7－36 所示，铸坯内部裂纹有中间裂纹、矫直裂纹、皮下裂纹、角部裂纹和中心线裂纹等。铸坯内裂纹起源于固液界面并伴随有偏析线，即使轧制时能焊合，还会影响钢的机械性能和使用性能。

铸坯内裂纹特征如下：

1)角部裂纹。角部裂纹是在结晶器弯月面以下 250mm 以内产生的，裂纹首先在固

液交界面形成然后扩展。铸坯角部为二维传热，凝固最快收缩最早，产生气隙，传热减慢坯壳较薄，在鼓肚或菱变造成的拉应力作用于坯壳薄弱处而产生裂纹，严重的角部裂纹还会产生漏钢。

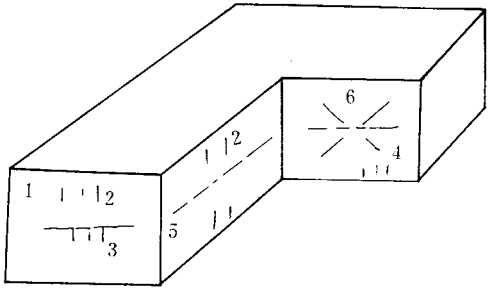


图 9－7－36　铸坯内裂纹示意图

1—角裂；2—中间裂纹；3—矫直裂纹；4—皮下裂纹；

5—中心线裂纹；6—星状裂纹

2)中间裂纹。中间裂纹位于铸坯表面和中心之间的某一位置上。它主要是由于二冷区冷却不均匀，坯壳反复回温(温度回升超过 100℃/m) 或者由于支承辊对中不良(如开口度偏大，辊子变形)使坯壳鼓肚，在凝固前沿受到张应力作用，在固液交界面出现裂纹，并沿柱状晶薄弱处继续扩展直到坯壳高温强度能抵抗应力为止。在裂纹里吸入富集溶质 S、P 的液体，在硫印图上表现为裂纹黑线，裂纹里有链状硫化物夹杂。

根据硫印图所显示的裂纹位置，可量出裂纹尖端至铸坯表面的距离 e，即是产生裂纹那一时刻坯壳凝固厚度：

$$e = K\sqrt{t} = K\sqrt{\frac{H}{v}}$$

$$H = \left(\frac{e}{K}\right)^2 v$$

式中　K 为凝固系数，板坯可取 $24 \sim 28\text{mm}/\sqrt{\text{min}}$，$v$ 为拉速，H 为结晶器液面到铸坯产生裂纹所在连铸机的距离。

把已知 e、K、v 值代入上式，就可求出 H。这样就可知道铸坯在二冷区产生裂纹的位置，以进行检查维修。某厂 250mm 铸坯硫印结果指出：内裂纹常发生在离内弧或外弧表面 60～90mm 处，计算得出距弯月面 6～14m 范围内，相当于扇形段 $2^{\#} \sim 5^{\#}$。

3)压缩(矫直)裂纹。带液芯的铸坯矫直时，拉矫辊压力过大，铸坯受压面的垂直方向变形超过允许变形而产生裂纹，裂纹集中在内弧侧柱状晶区，裂纹内充满残余母液。

4)皮下裂纹。离铸坯表面不等(3～10mm)的细小裂纹，主要是由于铸坯表层温度反

复回升所发生的多次相变，裂纹沿两种组织交界面扩展而形成的。

5）中心线裂纹。铸坯横断面中心区域可见的缝隙叫中心线裂纹，并伴随有 S、P、C 的正偏析。它是由柱状晶搭桥或凝固末期铸坯鼓肚而产生的。

6）对角线裂纹。它常发生在两个不同冷却面凝固组织交界面，小方坯的菱变、结晶器冷却不均匀及二冷不对称冷却都会导致此种裂纹的产生。

7）星状裂纹。方坯横断面中心裂纹呈放射状。凝固末期接近液相穴端部中心残余液体凝固要收缩，而周围的固体阻碍中心液体收缩产生拉应力，另外中心液体凝固放出潜热又使周围固体加热而膨胀，在两者的综合作用下使中心区受到破坏而导致放射性裂纹。

铸坯在连铸机内凝固冷却过程中能否产生裂纹决定于三个条件：

1）固液交界面所能承受的外力（如热应力、鼓肚力、矫直力、弯曲力等）和由此产生的塑性变形超过了所允许的高温强度和极限应变值，则形成树枝晶间裂纹。

2）铸坯凝固结构，即柱状晶和等轴晶比例。柱状晶发达促使裂纹的扩展。

3）残余杂质元素的含量。如 S、P < 0.02% 产生裂纹的几率减少。

为减少铸坯内裂纹发生的几率，在铸机设计上和工艺上必须考虑以下几点：

1）采用多点矫直；

2）辊间距合适，对弧准确，如支承辊间隙误差小于 1mm，外弧对弧误差小于 0.5mm；

3）尽可能不带液芯矫直或采用压缩铸造技术；

4）二冷区水量分配适当，铸坯表面温度分布均匀。

总之，铸坯表面裂纹和内部裂纹可以在连铸机不同区域产生，裂纹形状各异，产生原因也极其复杂，受设备状况、凝固条件和工艺操作等因素的影响。铸坯凝固过程坯壳所受各种外力作用是产生裂纹的外部条件，而影响坯壳产生裂纹的本质因素是钢在 1400 ~ 600℃的力学行为。因此只有充分认识铸坯凝固冷却过程中坯壳力学行为，在设备和工艺上采取正确决策，才是防止坯壳产生裂纹的有效方法。

人们发现，钢的高温力学性能与铸坯裂纹有直接关系。由热模拟试验机（Gleeble - 1500）测定低碳钢高温延性曲线如图 9 - 7 - 37b 所示。由图可知，钢高温延性可分为三个区：

1）熔点脆化区（Ⅰ区）。当温度下降到液相线温度 T_L 时，钢液开始结晶。温度下降到固相线温度 T_S 以上 20 ~ 30℃时（相当于疑固分率 90%），树枝晶彼此连接开始能传递微小的拉伸力的作用，表现有微弱强度（σ 约 1 ~ 3N/mm^2）。把晶体强度等于零的温度叫零强度温度，$T_{F0} = T_S + (20 \sim 30℃)$。

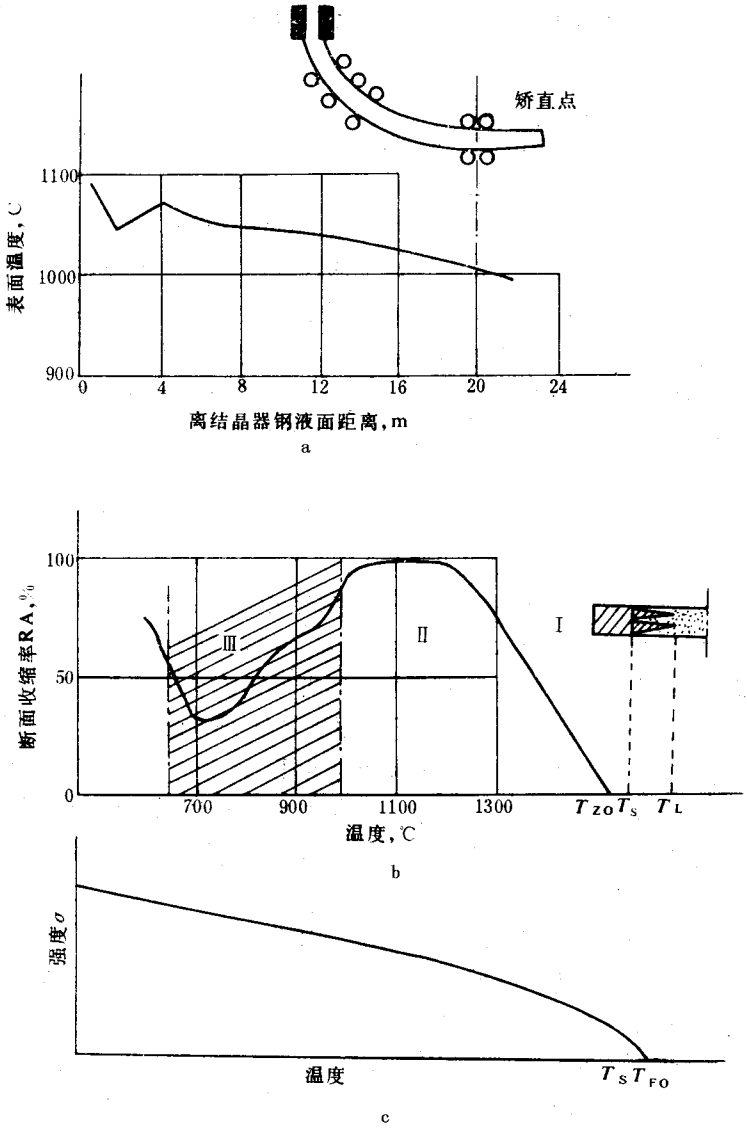


图 9－7－37　钢延性与矫直点铸坯温度关系

a—铸坯表面温度变化；b—钢的脆性曲线；c—强度曲线

当温度继续降低，固体强度缓慢增加，但表征钢的塑性的断面收缩率（以 RA% 表示）仍为零，凝固前沿处于极易脆断区。只有当低于 T_S 以下 30～50℃时，固体延性开始上升。把延性等于零的温度叫零塑性（韧性）温度，$T_{ZO} = T_S - (30 \sim 50℃)$。

因此，钢固相线温度 T_S 上下的零强度温度和零塑性温度是表征凝固界面抵抗裂纹的能力，T_{FO} 和 T_{ZO} 之间温度区间的大小是衡量凝固前沿内裂纹倾向的尺度。

钢中 C 含量增加，T_{FO}和 T_{ZO}降低；钢中 S、P、O 易偏析元素增加，降低 T_{FO}和 T_{ZO}，增加了固液界面裂纹敏感性。

固液界面产生裂纹的临界值：对于低碳钢 $\sigma = 1 \sim 3 N/mm^2$，$\varepsilon = 0.15\% \sim 0.2\%$

2)最大塑性区(Ⅱ区)。温度在 1300～1000℃，钢的高温强度和塑性增加达到最大值，这相当于常用的热加工区。视钢种不同，此温度范围略有变化，如 C－Mn 钢为 1300～900℃。

1300～900℃脆裂机理是沿奥氏体晶界有过饱和的 S、O 化物沉淀如(Fe，Mn)S，(Fe、Mn)O，增加了晶界断裂的敏感性。研究指出，Mn/S＜30 为贫延性($RA < 40\%$)，Mn/S＞40 为良好延性($RA > 60\%$)。因此保持合适的 Mn/S 比对防止裂纹产生是非常重要的。

3)二次脆化区(Ⅲ区)。此区相当于 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变区。当温度小于 1000～900℃塑性下降，到 700℃左右塑性最低($RA < 20\%$)。变形速率 $\dot{\varepsilon}$ 越小，脆性就越严重。此区脆性是铸坯表面横裂纹的产生的根源。

脆裂机理　沉淀在奥氏体晶界的 Nb(CN)和 AlN 质点，是应力集中源，在外力作用下引起晶界滑移，形成孔洞(图 9－7－38)增加了晶界脆性，或者在 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变时，在 γ 晶界产生的薄膜状的初生铁素体，由于 αFe 的强度比 γ－Fe 的强度小几倍，使晶界集中不均匀变形而产生晶界脆裂。

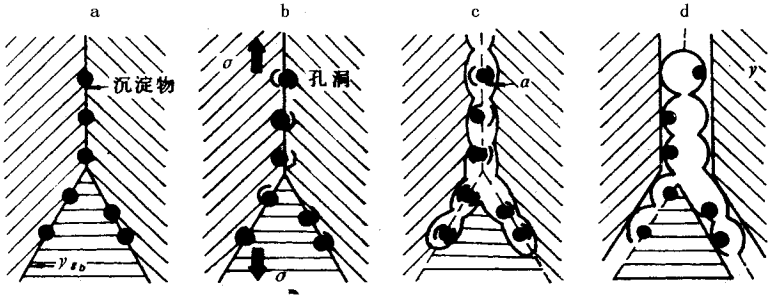


图 9－7－38　晶界脆裂示意图

a—晶界沉淀物 AlN，BN，Nb(CN)，(Fe，Mn)S，O；b—晶界滑移形成孔洞；

c—晶界铁素体形成；d—晶界孔洞聚合

一般来说，铸坯凝固过程中受外力作用，在固液交界面产生内部裂纹，而已凝固坯壳产生表面裂纹。铸坯在连铸机内运行过程中，沿液相穴固液交界面产生裂纹相当于Ⅰ区(熔点脆化区)，在二冷区铸坯产生裂纹相当于Ⅱ区，而铸坯矫直相当于Ⅲ区(脆性口袋区)。因此应根据钢的高温延性曲线，制定适合于钢的强度和延性变化的二冷制度，使铸坯表面温度始终处于良好塑性区，也就是在铸坯矫直时避开低延性区，以防止裂纹形成。

如图 9－7－37 所示，在 1000℃左右钢塑性下降，在矫直点铸坯表面温度大于 1000℃，为此二冷配水应保证铸坯在矫直点达到此温度。应当指出，钢塑性降低起始温度值是与钢种有关的，应用热模拟试验机进行测定。

总之要控制内部裂纹，就必须采取措施使作用于铸坯上应力的总和达到最小程度，因此必须保证有良好的设备设计、设备维修和操作工艺条件。

过去人们称钢锭裂纹为鬼线。所谓鬼线是形容裂纹时隐时现，有点捉摸不定。在实际生产中也碰到这样的情况，有时铸坯出现了裂纹，但过几天工艺条件也无多大的变化，铸坯裂纹又消失了。这说明裂纹产生的原因是极其复杂的，是多种力和物理现象综合作用的结果。

不少研究者从钢的高温变形理论出发，提出了弹性、蠕变和塑性理论，分析坯壳应力场结合钢的高温力学性能来预见铸坯中裂纹的形成，为铸机工作状态的诊断和冷却制度的改进提供依据。

从力学观点，对铸坯裂纹的形成提出了以下观点：

1）临界应力。以凝固过程中坯壳所承受的应力来判断裂纹的形成。如应力超过了固相线温度附近固体的临界强度则就产生裂纹。对于碳钢临界强度一般认为 $1 \sim 3 N/mm^2$。

2）临界应变。当固液界面固相的变形量超过了临界应变值时就产生断裂。从变形到断裂主要受变形速率的影响，变形速率 $\dot{\varepsilon}$ 增加，允许的应变量（ε）减少，容易产生裂纹。不同研究者测定的 ε 值差别较大。对碳钢测定当 $\dot{\varepsilon} = 10^{-3}/S$ 时 $\varepsilon = 0.2\% \sim 4\%$。连铸机上试验测定的 $\varepsilon = 0.2\% \sim 1\%$。一般认为，1340℃时，$\varepsilon = 0.2\%$ 作为判断凝固前沿产生裂纹的临界值是合适的。

临界应力 σ 和应变 ε 值决定于铸坯的凝固结构，也就是 δ 相与 γ 相的比例。全 δ 相凝固（$C < 0.10\%$）时强度和韧性都较高，抗裂纹能力较强；$\delta + \gamma$ 相凝固（$C = 0.10\% \sim 0.50\%$）和 γ 相凝固（$C > 0.5\%$）韧性和强度较低，对裂纹敏感性增加。

从冶金学观点，对铸坯形成裂纹提出了以下观点：

1）晶界脆化理论。在凝固前沿大约液相分率为 10% 时，富集溶质的液体薄膜（如硫化物）包围树枝晶，降低了固相线温度附近钢的延展性和强度，当受到外力作用时裂纹就沿晶界发生，致使凝固前沿产生裂纹。

2）柱状晶区“切口效应”。凝固前沿的柱状晶生长的根部，相当于一个“切口”产生应力集中而导致裂纹。

3）硫化物脆性。硫化物沿晶界分布形成所谓Ⅱ类硫化物，引起晶间脆性，成为裂纹

优先扩展的地方。这就是已凝固坯壳产生裂纹的原因。

4)质点沉淀理论。铸坯在冷却过程中,AlN,Nb(CN)等质点在奥氏体晶界沉淀,增加了晶界脆性,加强了裂纹的敏感性。这是铸坯矫直产生裂纹的重要原因。

第五节　铸坯形状缺陷

一、铸坯菱形变形(脱方)

在小方坯横断面上两个对角线的长度不相等,即称为菱变。菱变大小用 R 表示:

$$R = \frac{a_1 - a_2}{0.5(a_1 + a_2)} \times 100\% \qquad (9-7-9)$$

式中　a_1 和 a_2 分别为两个对角线长度。$R > 3\%$,方坯钝角处导出热量少角部温度高坯壳较薄,在拉力作用下会产生角部裂纹。如果 $R > 6\%$,在加热炉内推钢时会发生堆钢或轧制时咬入孔型困难,并发生折叠缺陷。因此应控制菱变在 3% 以下。

从结晶器到二冷区铸坯菱变还定期转换方向,即按一定周期由原来钝角转换为锐角,而锐角转换为钝角。

引起方坯菱变的根本原因在于结晶器弯月面区域的初生坯壳厚度的不均匀性,进入二冷区进一步发展。对于菱变的产生有两种看法:

第一,菱变是结晶器 4 个面不均匀冷却所致。由于受结晶器壁的约束,铸坯坯壳呈方形,但坯壳厚度不均匀,冷却强的角部形成锐角,冷却弱的角部形成钝角。锐角附近坯壳较厚,钝角附近坯壳较薄。在二冷区喷水冷却时,即使 4 个面冷却均匀,但坯壳厚度不均造成温度不一致,导致坯壳不均匀收缩而促使菱变进一步发展。

第二,结晶器 4 个面不同步的间歇沸腾造成坯壳 4 个面不均匀冷却而导致坯壳厚度不均匀,而菱变的方向性决定于角部坯壳薄弱的程度。如某一时刻在结晶器弯月面区域,相邻两个面冷却水处于沸腾状态,冷却强度较大,坯壳较厚;而另外两个相邻面冷却水处于不沸腾状态,冷却强度较低,坯壳较薄。由于相邻面坯壳收缩不一致,结果前两个面形成锐角,而后两个相邻面形成钝角。而在另一个时刻,结晶器相邻两个面发生沸腾的转换,导致菱变也相应的变换方向。

结晶器相邻两面冷却水的沸腾和不沸腾状况,使结晶器铜壁温度不一致而导致铜管也发生周期性的变形。如果结晶器 4 个面的冷却水都处于沸腾或不沸腾状态,则铸坯都

不会形成菱变。

影响菱变因素如下：

1)钢化学成分。试验指出，C = 0.08% ~ 0.12%，R = 2% ~ 4%，钢中含 C 量的增加菱变趋向缓和。Mn/S 大于 30 有利于减少菱变。

2)结晶器几何形状。结晶器内腔要保持正方形，使其凝固坯壳为规正的形状。结晶器要有合适的锥度，可减少弯月面和角部气隙而使坯壳厚度均匀，坯壳强度较高，增加了抗变形能力，出结晶器后铸坯变形不大又加上足辊的支承，有利于减少菱变。

对于小方坯，锥度一般为 0.4% ~ 0.6%较为台适。

3)结晶器冷却。结晶器冷却水质差，杂质在铜壁冷面上沉淀，会导致局部导热不良而引起菱变。

结晶器水缝水流速为 5 ~ 8m/s(水缝尺寸为 5mm)，将出现间歇沸腾；水速大于 10m/s 可抑制间歇沸腾。对低碳钢水速小于 6m/s、中高碳钢水速小于 9m/s，会在结晶器冷面引起间歇沸腾。总的说，水速增加，可抑制间歇沸腾，但导出热流的增加被坯壳与铜壁之间气隙热阻所抵销。

水质好，水速在 5 ~ 6m/s 也可抑制间隙沸腾。水质好冷却水出水温度可高一些，但一般不大于 40℃，进出水温度差不大于 12℃为宜。

4)二冷的均匀性。在结晶器坯壳的变形受到结晶器内腔的限制，但出结晶器后，铸坯的支承和喷水冷却对抑制菱变的发展有重要作用。目前小方坯连铸机广泛使用足辊和冷却板(多级结晶器)两种支承方式，其效果比较如下：

	足　辊	多级结晶器
安装位置	结晶器出口安多对辊子，与结晶器一起振动	出结晶器后安 300mm 长的冷却板
拉速	3 ~ 2.5m/min	4 ~ 4.5m/min
对中	困难	容易调整
喷水	冷却不均匀，温度波动大	坯面间接冷却，角部喷水冷却
坯壳生长	角部较薄	角部较均匀
漏钢率	100mm 方坯， v = 3.5 ~ 4m/min 1% ~ 2.5%	< 200mm^2， < 1%
菱变	较严重	较轻
维修	较困难	容易维护
寿命	较长	500 ~ 1000 炉维修一次

5)结晶器热变形。铜壁受热不均匀而产生不同程度的膨胀，而结晶器几何形状又限

制了铜管的膨胀。在弯月面区域(钢液面以下 150mm 以内),铜壁热面温度最高(约 250～300℃),向外膨胀(约 0.168mm),形成了 1.27%/m 的负锥度。结晶器壁纵向温度逐渐降低,膨胀减小,形成了 0.38%/m 的正锥度。这样使坯壳角部比中部产生的气隙更大,再加上结晶器液面的波动和弯月面区域结晶器冷面间隙沸腾的不协调,导致结晶器不对称变形,加重菱变的发展。

由以上讨论可知,防止铸坯菱变措施:

1)采用合适的单锥度、双锥度或抛物线型的结晶器。

2)增加出结晶器后铸坯 4 个角部的喷淋水量。

3)二冷区喷淋水覆盖铸坯面部,而角部不喷水。

4)结晶器以下 600mm 距离准确对弧。

5)强化冷却,消除结晶器间歇性沸腾。

二、鼓肚

带液芯的铸坯在连铸机运行过程中,由于钢水静压力作用,铸坯宽面中心高温坯壳鼓胀成为凸面,这称为鼓肚。

板坯鼓肚会引起液相穴内富集溶质钢水产生流动,引起严重的中心偏析和内部裂纹,对铸坯质量带来严重的危害。

作用于坯壳上钢水静压力 P 可表示为:

$$P = \rho h$$

式中　P——静压力;

ρ——钢水密度;

h——液相穴长度。

未凝固液相穴高度 h 越高,则钢水静压力越大,知 200mm 板坯,拉速为 1.2m/min,最终凝固点钢水静压力立式铸机是弧形铸机的 1.5 倍。

如图 9－7－39 所示,在两支承辊之间在钢水静压力作用下高温坯壳产生的鼓胀,可以用弹性或弹塑性理论来描述坯壳的变形。根据平板弹性变形理论,导出坯壳的变形量(鼓肚量)δ:

$$\delta = \frac{12\beta(1-\gamma^2)Pl^4 a_0 t^n}{e^3} \qquad (9-7-10)$$

式中　δ——坯壳鼓肚量,mm;

β——决定于铸坯断面形状系数;

γ——泊桑比;

P——钢水静压力，kg/mm^2；

l——两辊之间的间距，mm；

a_0——蠕变常数，$mm^2/(min \cdot kg)$；

t——蠕变时间(相当于铸坯经历两辊间距)，s；

n——指数(0.25～0.32)；

e——凝固壳厚度，mm。

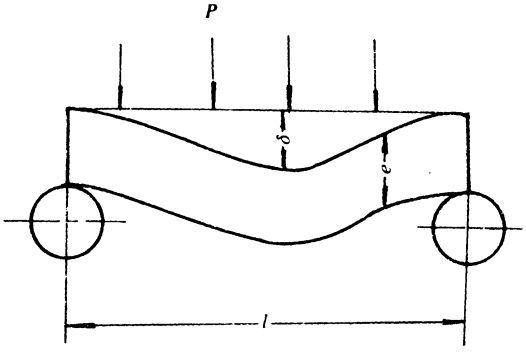


图 9－7－39　两辊间距内坯壳鼓肚示意图

由式 9－7－10 可知，鼓肚量随辊间距的 4 次方而增加，随凝固壳厚度的 3 次方而减小。从设计和工艺上减少鼓肚的措施有：

1)降低液相穴高度，也就是降低连铸机高度；

2)缩小辊间距。铸机从上到下辊子由密向疏布置；

3)加大二冷强度，增加凝固壳厚度和高温强度；

4)支承辊严格对中；

5)防止支承辊变形，如采用多节辊；

6)加强辊子支承系统的维修。

第八章　水平连铸技术

第一节　概　　述

一、水平连铸的工艺流程

水平连铸技术是在20世纪70年代末发展起来的。水平连铸机的全部设备安装在地平面以上，呈直线水平方向布置，如图9－8－1所示。其流程为钢液从盛钢桶注入中间罐，中间罐通过底部侧面连接管和分离环与结晶器入口的端部相连接，钢液从分离环进入水冷结晶器，在结晶器内壁和分离环四周冷凝成型，带液心的铸坯拉出结晶器后，经二次冷却完全凝固，切割成定尺，做为轧材的坯料。

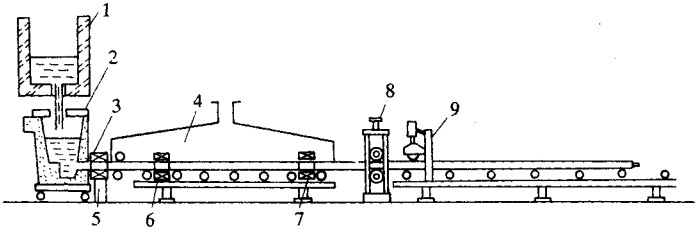


图9－8－1　水平连铸机示意图

1—盛钢桶；2—中间罐；3—结晶器；4—二冷区；5—M－电磁搅拌器；6—S－电磁搅拌器；7—F－电磁搅拌器；8—拉矫机；9—测量辊

二、水平连铸机的特点

与传统弧形连铸机相比，水平连铸机有以下优点：

(1)由于设备是水平布置，机身低，在原有旧厂房内可以安装，所以基建投资费用低，约为弧形连铸机的 1/3。

(2)钢质比较纯净，钢中含氧量较低。根据统计数据列表 9－8－1。

表 9－8－1　钢中夹杂物含量对比

	弧形连铸坯	水平连铸坯
夹杂物/mg·kg^{-1}	190	20
含氧量	80×10^{-6}	31×10^{-6}

此外，水平连铸坯无需弯曲矫直，产生内裂的可能性很小；铸坯无鼓肚、疏松等缺陷的发生。水平连铸机结晶器导热集中于前端，铸坯出结晶器后不用喷水冷却，铸坯冷却均匀，表面质量好，适于合金钢浇铸。

(3)能够浇注小断面铸坯。如 ϕ8～20mm 的圆坯，因而能取得近终形产品的效果，从而可大大地缩短生产周期。

(4)安全可靠性好，便于设备的安装维修。

目前水平连铸机多浇铸圆坯。最大断面 ϕ200mm，最小断面为 ϕ8mm；最高拉速为 6m/min。水平连铸机有单流、双流和多流等。由于受分离环制造技术的制约，水平连铸机不能浇铸板坯和大方坯，只能浇铸小断面铸坯，因而发展受到一定的限制。

第二节　水平连铸机设备的特点

一、中间罐

水平连铸机用中间罐容量最小有 0.5t，最大的为 15t。国际上有加大容量的趋势。容量增大会减小温降速度，有利于夹杂物上浮；在盛钢桶浇毕，中间罐能够贮存足够量的钢水，以实现多炉连浇。

中间罐构造如图 9－8－2 中 2 所示。其特点为：

(1)中间罐与结晶器直接密封连接；

(2)中间罐水口是水平方向安装,钢液沿水平方向流入结晶器。当中间罐内液面较低时,水口处不会产生凹涡,钢水也不会裸露。覆盖剂和保护渣更不会卷入而造成铸坯夹渣;

(3)中间罐熔池较深,一般在 500 ~ 850mm,有利于夹杂物上浮;

(4)在中间罐外壁水口处同时垂直安装两块滑板,分别封住中间罐和结晶器,然后中间罐与结晶器可以脱开。这种滑动水口又称双滑板滑动水口,如图 9 - 8 - 2 所示。中间罐滑板与中间罐水口之间是依靠滑槽压板蝶形弹簧压紧密封。双滑板就是闸板,用液压驱动。滑动水口用氧化锆耐火材料制做。由于水平连铸机浇铸断面小,浇注时间长,因而浇注后期钢水温降较多,水口易冻结。为了降低钢水的过热度,稳定中间罐钢水温度,实现"低温快注"也可采用等离子枪或感应加热等热补偿装置。

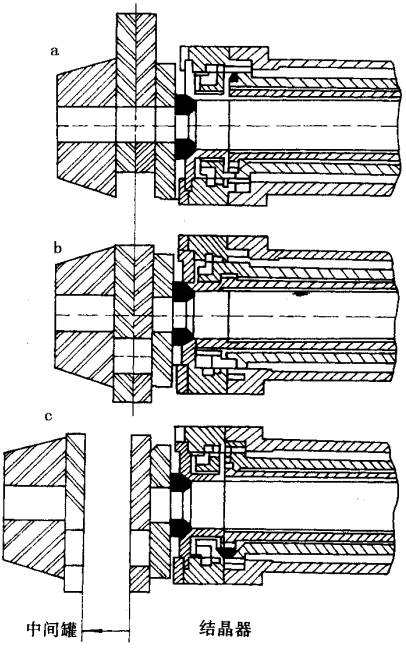


图 9 - 8 - 2　双滑板滑动水口工作方式

a—浇注时滑动水口打开;b—浇注完毕滑动水口关闭;

c—由于采用双滑板结构,结晶器与中间罐分离时仍然封闭

二、结晶器

水平连铸机的结晶器是不能振动的固定式结晶器,中间罐与结晶器密封连接。结晶

器内钢水静压力比弧形连铸机高 5～6 倍，因此成型的凝固坯壳紧贴结晶器内壁，传热效果好；但铸坯与结晶器壁间的摩擦阻力较大。结晶器传热集中于前端，在距分离环 200mm 长度内，热传导量占结晶器总传热量的 70%～80%，因而沿结晶器长度方向的传热是不均匀的，致使凝固速度有差异；为此水平连铸机采用多级结晶器，其结构如图 9－8－3 所示。结晶器长度为铍铜套长 150mm，石墨套长 900mm，总长 1050mm。

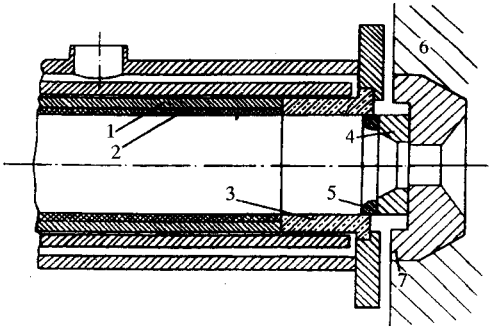


图 9－8－3　水平连铸机多级结晶器结构示意图

1—铬铜套；2—石墨套；3—铍铜套；4—结晶器水口；

5—分离环；6—中间罐；7—中间罐水口

三、分离环

分离环是水平连铸机的技术关键部件，处于中间罐与结晶器的连接部位，如图 9－8－3 中 5 所示。它既是实现“密封浇注”，又是钢液凝固的起点。因比分离环要能经受高温冲击，便于加工，才能保证它与结晶器铜套紧密配合。分离环可用氧化锆耐材制做；也可用以氮化硼（BN）为基料加入氮化硅（Si_3N_4）热压成型，曾在马钢水平连铸机上试用，一次使用寿命长达 8h37min，满足了当时多炉连浇的需要。

四、拉坯方式

水平连铸机与其他连铸机机型不同，结晶器不能振动，并且与中间罐密封连为一体；钢液的供应与铸坯的运行方向相垂直。钢液进入结晶器首先与分离环接触，形成凝固壳。从分离环开始沿铸坯运行方向凝固壳逐渐减弱。若按传统方式连续拉坯，有可能将铸坯拉断；如果实现连续拉坯时，必须具有足够的坯壳厚度，那么拉速就要限制在 20～30mm/min 以内，这样的拉速在工业生产上是没有意义的。为此水平连铸机采用了拉—停—推—拉组合的周期间歇式拉坯方式。有拉—停—推—停，或拉—推—拉—推，或拉

—推—停—推等组合形式。停的目的是使铸坯的坯壳继续增厚，具有足够的强度，以便将整个新形成的凝固壳从分离环处拉走；推的目的是使凝固壳受到机械压缩，以补偿钢液凝固的收缩量。如果拉速为 6m/min 时，拉坯位移量在 25mm，时间为 25s；反推 2mm，时间 0.02s，停顿 0.23s。倘若铸坯表面的冷隔（类似振痕）太深时，可通过调节连铸坯的行程和停顿时间加以改善。

拉坯速度主要取决于钢种、铸坯断面，钢液过热度和拉坯周期。

第三节　连铸坯的凝固特点

水平连铸机的结晶器与中间罐密封连接，由于有水冷却，分离环和水口温度较低。因此钢液的热量除了通过径向结晶器冷却水带走之外，还沿分离环轴向散热。钢液首先在分离环处形成三角形的凝固壳。已凝固的铸坯与结晶器铜套间也有少部分坯壳形成，这样每拉一个步距就形成一个双三角坯壳。图 9－8－4 所示的图形是在一个完整周期内，即一个步距，铸坯的行程及其相应凝固壳的形成过程。其中 a 表示一个拉坯行程后，形成铸坯坯壳。b 表示拉坯开始后，坯壳刚从分离环处拉出，新钢液流入凝固坯壳与分离环之间；由于凝固壳与分离环的传热条件不同，因而钢液从两边的凝固速度也不一样，故两个结晶面汇集于 A 点，又构成一个双三角形。c 和 d 表示，再继续拉坯时，两个结晶面都在长大，A 点也随之移动。e 表示，当拉坯周期结束时，新形成的坯壳与先形成的坯壳仍存在着 A 点。如果继续拉坯，在 A 点铸坯有可能被拉断；为此在铸坯凝固过程中，对其实行停或反推，使 A 点坯壳增厚，以便新老坯壳连接牢固，具有足够的强度。再继续拉坯时，就可以将新形成的坯壳整个从分离环处拉出。又开始下一个拉坯周期。

由于水平连铸机是这样反复拉—推—停来实现连续拉坯，所以在分离环处结晶的坯壳表面就会形成类似弧形铸坯表面振痕一样的明显标记，水平铸坯叫冷隔。冷隔过深也影响铸坯质量。如果拉坯的频率大于 100 次/min，冷隔深度小于 1mm。提高频率则会消除冷隔裂纹。

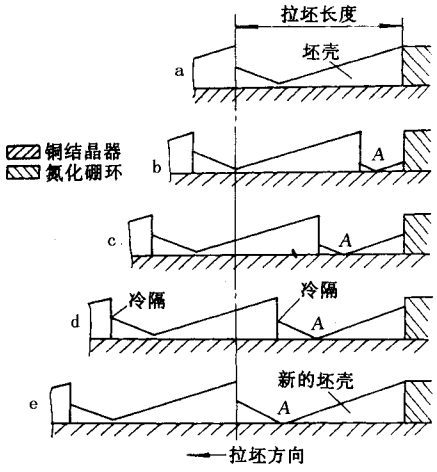


图 9－8－4　水平连铸机铸坯坯壳形成过程示意图

第四节　水平连铸的工艺特点与铸坯质量

一、水平连铸的工艺特点

水平连铸的工艺特点为：

(1)供应的钢液需经精炼处理，并注意不要二次污染；

(2)选择最佳的钢液过热度。最好能实现低温快注，保证铸坯质量；

(3)盛钢桶到中间罐注流应采用长水口保护浇注；

(4)可采用中间罐加热技术和底部吹 Ar 气技术；

(5)可安装电磁搅拌装置，以改善铸坯质量；

(6)设置整体快速更换装置，便于维修和快速改变铸坯规格。

二、铸坯质量

铸坯质量主要由以下几方面决定：

(1)表面裂纹。主要是由于结晶器内铸坯坯壳生长不均匀所致。安装电磁搅拌器以后，铸坯的纵裂纹有明显改善。

(2)表面冷隔。这是水平连铸坯特有的标记。采用合理的拉坯制度可以减轻冷隔，

安装电磁搅拌器也能明显改善铸坯表面质量。

(3)热裂纹。是与冷隔相平行的一种横裂纹。主要是由于凝固收缩应力集中,使坯壳薄弱处开裂形成的。为此应适当增加反推,以补偿收缩,可以避免横裂纹的发生。

(4)重皮。钢液流入结晶器与铸坯之间的间隙造成的。有可能是由于分离环损耗严重,或者拉一停时间过长,坯壳收缩过大所致。

(5)铸坯中心有明显的疏松、缩孔和中心偏析,采用电磁搅拌技术可得到改善。

第九章　薄板坯连铸连轧技术

第一节　薄板坯连铸连轧技术的特点

一、薄板坯连铸连轧的工艺实质

薄板坯连铸连轧的工艺实质为：

(1)通过一系列有别于传统板坯连铸机的工艺装备，将铸出的板坯厚度减薄到某一合理的临界区间，以至可以省去传统热轧板生产机组中的粗轧机架，而只用 4 架以上精轧机架轧成热轧薄带卷。图 9－9－1 给出了最终成品带卷厚度与入口板坯厚度及精轧机架数目间的对应关系。

(2)通过一系列精确的工艺控制，使生产过程中各工序点的温度控制在某一合理范围内，且只允许连铸机和热轧机之间予以较小的热量补充，从而在充分节能的条件下实现长时间的连铸连轧工艺运作，达到能量充分利用的目的。

(3)通过一系列调控措施，使生产过程中的物流维持在一个合理范围内(例如连铸机的拉速为 3～6m/min)，使之在保持一定流量的前提下(例如产量为 60～180t/h)，工艺流程控制为一个合理的时间节奏：既不因铸速过快而出现故障，又不因拉速过慢而出现物流传送的过多停顿。

(4)通过一系列的技术措施，使从钢水进入结晶器至热卷取完毕的时间节奏缩短到 30～15min 左右。

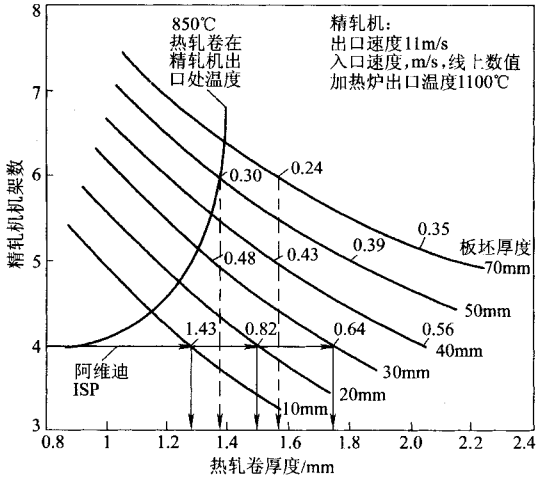


图 9－9－1　最终板卷厚度与入口铸坯厚度及精轧机机架的对应关系

二、薄板坯连铸连轧的工艺特点

薄板坯连铸连轧工艺的特点为：

(1)整个工艺流程是由炼钢(电炉或转炉)—炉外精炼—薄板坯连铸—物流的时间节奏与温度衔接—热连轧等 5 个单元工序组成，将原来的炼钢厂和热轧厂紧凑地压缩、有机地组合在一起。

(2)整个工艺流程中炼钢炉、薄板坯连铸机和热连轧机是刚性较强的工艺装置，特别是薄板坯连铸机目前只能在 3～6m/min 的拉速范围内浇铸，因此它在温度、时间节奏以及物流流量等参数上的刚性较强。而炉外精炼装置和物流、温度衔接装置的工序功能则是为了在温度、时间、流量等参数上的衔接、匹配和缓冲、协调，本质上是为了增加前后工序间的弹性和系统的柔性。因此，在薄板坯连铸连轧工艺中充分注意并且不断完善这些柔性工序的功能也是十分必要的。如这些柔性活套设计不合理，整个工程的效率和效益均会降低。

(3)在薄板坯连铸连轧工艺中，热连轧是决定规模和投资的主要因素。就薄板坯连铸机与热连轧机组而言，两者所占投资比例约为 1/3∶2/3 或 30%∶70%。所以充分发挥热连轧机组的能力应是整个工程建设中考虑的要点之一。也可以说，炼钢炉、炉外精炼装置、薄板坯连铸机及铸机与轧机间的缓冲、衔接装置的设计、选择应以充分发挥热连轧机组的效率为主要前提。

(4)基于薄板坯连铸机装置的刚性较强,平均拉速一般在 4.5 ~ 6m/min 间,最低拉速不能小于 2.5m/min,相当于过程工艺物流 2.5 ~ 3.0t/min。为了稳定地连续浇铸,对宽度为 1350 ~ 1600mm 的薄板坯连铸机而言,每小时钢水流量应不少于 150t。据此计算,采用电炉应为 150t 超高功率电炉,转炉容量则应不小于 80t,以 100t 以上为宜。

三、薄板坯连铸的特点

1. 板坯厚度薄

薄板坯连铸一般要求厚度范围在 40 ~ 70mm 之间,由此带来如下问题:

(1)在设备方面,要求对传统的结晶器、浸入式水口进行改造,便之能对钢水注入较窄的结晶器进行可靠控制;另外拉坯速度快,出结晶器时的坯壳厚度小,在二冷区的导向辊之间容易产生鼓肚(甚至拉漏),影响铸坯质量。故二冷区只能采用小辊径、小辊距的密辊布置方案。

(2)在工艺方面,薄板坯不适合在加热炉中进行加热,因为若用加热炉,其长度必将远大于常规加热炉,这是不经济的;同时由于比表面积大大增加,加热过程的表面烧损也会增加。因此薄板坯连铸只适合采用连铸连轧工艺,还要求铸坯无缺陷。

(3)在操作方面:

1)薄板坯的表面积数倍于普通板坯,加上铸坯温度高、表面氧化严重,要求进行保护浇铸;

2)结晶器内的温度分布规律易受操作因素干扰,难于稳定,对操作要求更高;

3)为使薄板坯连铸与普通连铸具有相同的生产率,拉坯速度要与板坯厚度的减少成比例提高,要求能对高拉速、可变拉速及多炉连浇进行可靠控制。

2. 生产过程连续

薄板坯连铸只能采用连铸连轧工艺,使得整个生产过程连续进行,它所带来的特点有:

(1)在操作方面,要求出坯温度高,能满足直接轧制的要求,并使薄板坯在整个断面上温度分布均匀。

(2)在铸坯质量方面,考虑到直接装炉,要求铸坯无缺陷。

(3)在机组衔接方面,注意机组的衔接匹配,能对联合机组进行可靠的控制,使整个生产系统获得尽可能高的利用率。

3. 薄板坯连铸的金属学特点

浇铸薄板坯时必然出现下列两种情况:一是从钢水到凝固的冷却速度快,可使凝固

组织细化、合金元素固溶量增大、细小析出物增多；二是铸坯薄，不能在后续轧制工序施加大压下率，这使浇铸组织的残存组织粗大化，造成轧制退火后的力学性能和表面质量恶化。

薄板坯连铸连轧工艺使对晶粒尺寸有明显影响的相变不再在热轧前发生，致使直轧坯初始晶粒比传统工艺的约粗大 10 倍；同时，连轧工艺中热轧压缩也会产生晶粒粗化和 MnS、Nb、V 等的析出。有文献认为，对于未变形的铸坯如 CSP 铸坯，因其原始组织粗大，均温时晶粒粗化不严重；而经过铸轧或大压下量轧制变形的铸坯如 ISP 铸坯，均温时的晶粒粗化就不容忽视。均温时的晶粒租化可通过对均温温度的控制来实现。

这一特点要求确立工序之间互为补充和制约且能生产最佳产品的综合技术，要使金属学的要求积极反映在浇铸和轧制上。

4. 薄板坯凝固速度快

薄板坯连铸在冶金上的突出优点就是铸坯很薄，凝固速度快，导致内部组织晶粒细化，球状晶区扩大，中心偏析减少，提高了板坯的致密度，对下一步轧制加工很有利，可以减少压缩比。

按照凝固过程的经典方程，凝固壳厚度 S 的增长和凝固时间 t 的平方根成正比，即 $S = Kt^{1/2}$，将该式微分后可得到铸坯的凝固速度：

$$\mathrm{d}S/\mathrm{d}t = (1/2)\,Kt^{-(1/2)}$$

由上式可知，板坯凝固速度亦随时间的延长而减慢。50mm 厚的薄板坯其全凝固时间约为 0.9min，而 250mm 厚的厚板坯全凝固时间约为 23.1min。这样，薄板坯的凝固过程是处在快速凝固区，而厚板坯的凝固过程大部分是处在慢速凝固区，只是表层金属有细晶粒层。这就是薄板坯连铸凝固速度快、致密度好的理论依据。而且工业实践已证实了这一点。曼内斯曼西马克公司作过如表 9－9－1 所示的轧件试验。

表 9－9－1　曼内斯曼西马克公司所作轧件试验

试验项目	厚板坯	薄板坯
铸坯厚度/mm	250	50
钢种	X70	X70
轧成板材厚度/mm	15.9	15.9
压缩比	15.7	4.4
屈服强度 σ_s/MPa	482	510
抗拉强度 σ_b/MPa	565	590

5. 薄板坯的比表面积大

所谓比表面积就是单位重量钢坯的表面积。薄板坯的比表面积增大后，在工艺上带来如下影响：

(1)由于生产同样吨位的铸坯与结晶器的接触面积增大了若干倍，因此为保证其经济的寿命周期，薄板坯结晶器铜壁的抗磨性能要求大大提高。

(2)在结晶器内，凝固初期任何可能引起铸坯表面质量问题的病灶都必须严格杜绝，不然将导致更为严重的后果。为此，保护渣的供给、结晶器内流股的行为、液面的控制、振动模型的选择(减轻振痕和消除粘结)等将成为薄板坯连铸工艺的基本技术而要求加以完善。

(3)由于比表面积大，热量容易散失，所以生产高温铸坯的保温技术就变得更为重要和困难。

6. 薄板坯连铸冶金长度短

薄板坯因为薄且凝固时间短，所以其连铸机的冶金长度也很短。薄板坯连铸机的冶金长度大约在 5～6m 左右，而厚板坯连铸机的冶金长度大约为 40m 左右。冶金长度缩短会带来如下优点 连铸机的机长大大缩短，设备少、重量轻、投资省。

总之，薄板坯连铸工艺的基本特点是铸坯薄，由此引发出一系列专门技术问题和独具特色的技术优越性。

第二节　薄板坯连铸连轧的关键技术

自从薄板坯连铸连轧这项新技术问世以来，时间不过 10 来年，但已有多种不同的方法。众多的生产线显示出各自具有不同特点的关键技术。纵观当今世界各国对该项技术的开发和研究，主要集中在以下几个方面：

(1)探寻合理且合适的铸坯厚度，使整个生产线发挥出最大的生产率，获取最佳经济效益。

(2)不断改进与完善结晶器形状、液芯压下、固相轧制、二次冷却制度等相关技术，确保该项工艺的先进性与可靠性。

(3)除主体技术外，研究开发其他相关技术，如结晶器材质、浸入式水口、结晶器振动装置、连铸保护渣、高压水除鳞、轧辊在线磨削技术等。这些技术的成功应用，有力地支

持了薄板坯连铸连轧工艺的发展。

(4)成功实现了薄板坯连铸机与热连轧机组的有效连接和协调匹配技术,为该工艺的贯通奠定了基础。

下面简要介绍一些薄板坯连铸连轧的关键技术。

一、薄板坯的厚度选择

薄、中、厚板坯的厚度分别界定为 40 ~ 70mm、90 ~ 150mm、200 ~ 300mm。铸坯厚度是一个区别各类连铸工艺的特征参数,也是影响铸坯质量的重要参数。薄、中、厚板坯三种连铸工艺的主要特征如表 9 - 9 - 2 所示。

表 9 - 9 - 2　薄、中、厚板坯三种连铸工艺的主要特点

连铸工艺	薄板坯连铸	中板坯连铸	厚板坯连铸
铸坯厚度/mm	40 ~ 70	90 ~ 150	200 ~ 300
结晶器形状	漏斗形	平行板形	平行板形
拉速/$m \cdot min^{-1}$	高,最大 6.0	中,最大 5.0	低,最大 2.5
轧制线主要设备	精轧机(4 ~ 6 机架)	粗轧机(1 ~ 2 机架) + 卷取箱 + 精轧机(4 ~ 6 机架)	粗轧机(1 ~ 3 机架) + 精轧机(7 机架)
品种	以低碳钢为主	与传统工艺相当	多
质量	较低(特别是表面)	与传统工艺相当	高
投资	小	中	大

分析 CSP、ISP、FTSRQ、CONROLL 等多种工艺在铸坯厚度上的区别,就可以对厚度选择的原则有深入的了解。西马克公司开发的 CSP 工艺采用的是漏斗形结晶器,上口可插入常规浸入式水口,使用保护渣。经过渡段出口的铸坯已变薄到 70mm 以下,从而保证了薄板坯能够直接进入精轧机架轧制,最终可以轧成 2.0mm 厚的热轧带卷。该工艺选择厚度的原则是能满足省略粗轧机架而直接进行精轧要求的必须厚度。而德马克公司开发的 ISP 工艺起初使用平行板结晶器,结晶器出口厚度 60mm。近年来有所改进,变成小漏斗形。上口宽边最大厚度几经改进加大至 60mm + (2 × 25) mm,且一直将此鼓肚延伸至出口处保持为 60mm + (2 × 25) mm。为了与精轧机组配合,开发了液芯铸轧和固相轧制技术,使出结晶器后的铸坯在二冷一段经软压下变为 40mm 厚,再经过 2 ~ 3 架粗轧机进行全凝固状态下的固相轧制减薄至 15 ~ 25mm,直接可入精轧机,同样可以轧制 2.0mm 厚的热轧带卷。ISP 工艺在阿维迪的生产线上是 4 架精轧机,比 CSP 少 1 ~ 2 架。

意大利达涅利公司开发出一种不同于漏斗形的全鼓肚形结晶器，也称凸透镜形。结晶器下方带有一组轧辊，可将出结晶器后的铸坯辗平，保持厚度为 50～90mm。扁形段的软压下装置，可将铸坯减薄至 20mm。而奥钢联却始终认为铸坯厚度保持在 70～120mm 并采用平行板形结晶器有利于液面平稳，防止卷渣，减少铸坯缺陷。此外 70～90mm 厚的铸坯能耗也最小，能使生产成本降低。另外在选择铸坯厚度时还要考虑市场需求。

应当指出，厚度选择除了要考虑上述因素外，还必须结合结晶器内钢水流量来确定，因为薄板坯连铸机拉速甚高，为此需要有一定的钢水流量作保证。如 CSP 工艺的漏斗形结晶器中需要 3～4t/min 钢水，而一般铸坯宽度的确定又受到产品尺寸的限制不会太宽，为使结晶器的容积足够大，以保证钢水的容量，厚度也就不可能过薄。每一种断面的铸坯，其厚度总有一个合理的临界值。

可见，厚度的选择必须综合分析，充分考虑到社会分工原则和本地的实际情况，没有必要条条生产线均具备生产全部品种和规格的能力。如果想投资省、效率高、成本低，并不想生产特殊的高、精产品，可首选 CSP、ISP 或 FTSRQ 工艺。美国纽柯公司的多条生产线近年来的生产实践充分证明了这一点。虽然它们在生产初期仅能生产全部带钢品种的 42%，但由于市场销路好，同样取得了明显的经济效益。通过对生产过程的逐步优化，产品品种扩大到 60%以上，显示出了极强的竞争力。

二、结晶器

薄板坯连铸对结晶器有特殊要求。在薄板坯浇铸过程中，结晶器内的温度分布规律易受操作因素的干扰。这是因为一方面浸入式水口的外壁与结晶器内壁的距离小，要求浸入式水口准确对中；另一方面在液面以下维持熔池稳定的钢水量不多，液面波动较大。

薄板坯连铸机结晶器的设计必须注意以下条件：

(1)在结晶器形状方面，要使结晶器不对凝固壳产生过大的应力，以减少坯壳表面缺陷和裂纹缺陷；要易于设计、加工和容纳浸入式水口，并使浸入式水口具有较长的使用寿命；要有足够的化渣面积。

(2)在结晶流场方面，要能容纳较大量的钢水，减少钢水湍流，使结晶器短边侧附近的涡旋不太强烈，减少卷渣；要有一定的上回流，防止搭桥并均匀化渣，迅速形成熔融渣层并均匀地覆盖钢液，使渣液均匀地润滑坯壳；要能减少对凝固坯壳的冲刷，以形成均匀坯壳厚度，减少出现裂纹甚至发生拉漏的危险。

纵观当今各种薄板坯连铸连轧工艺，尽管结晶器早期在形状方面差别颇大，但发展至今，却出现了逐渐接近的趋向，表现在上口面积的加大，目的均是有利于浸入式水口的

插入及保护渣的熔化，以改善铸坯表面质量。

图 9－9－2 给出了 4 种类型结晶器的形状。图 9－9－2a 是德马克公司 ISP 工艺的第一代立弯式结晶器。其上部是垂直段，下部是弧形段，侧板可调，上口断面是矩形，尺寸为(60～80)mm×(650～1330)mm。在意大利阿维迪生产线上采用后，发现这种形状的结晶器只能使用薄板形浸入式水口。但即使这种特殊的长水口很薄，插入结晶器内也只能保持 10～15mm 的间隙，造成水口插入处宽面侧保护渣熔化不好，很难获得恒定的、能控制的保护渣层，影响了薄板坯的表面质量。为此，阿维迪厂 1993 年以后开始改造结晶器，主要是重新设计了上口断面形状，由原平行板形改为小漏斗形(又称小橄榄球形)，即结晶器上口宽边最大厚度为 60mm＋(2×10)mm，这种形状一直保持到结晶器下口仍有(2×1.5)mm 的小鼓肚。近年来，其结晶器的小鼓肚越改越大，现使用的上口宽边最大厚度已达 60mm＋(2×25)mm，下口为 60mm＋(2×5.0)mm。浸入式水口仍是薄片形，尽管壁厚有所增加，但其距结晶器壁两侧的间隙还是大大增加，改善了保护渣层的状况，薄板坯的表面质量也有了很大改进。

图 9－9－2b 是西马克公司 CSP 工艺所用的漏斗形结晶器。上口宽边两侧均有一段平行段，然后和一圆弧相连接。上口断面较大。这个漏斗形状在结晶器内保持到 700mm，结晶器出口处铸坯厚度为 50～70mm。结晶器总长为 1120mm。上口的漏斗形状有利于浸入式水口的伸入，并在结晶器的两宽面板间形成了一个垂直方向带锥度的空间。漏斗区以外的两侧壁仍是平行的，两侧壁的距离相当于板坯厚度。这种结晶器在形状上满足了长水口插入、保护渣熔化和薄板铸坯的厚度要求，经在多条生产线上使用，均收到较好的效果。但这种结晶器内钢液注入后凝固时要产生变形，而理想的结晶器形状应尽可能减少坯壳内两相区的弯曲变形率。于是设计这种漏斗形状以及从漏斗向平行段过渡区的形状、选择最佳弯曲半径是很关键的技术。CSP 工艺多年来的生产实践证实此类结晶器已是很成熟的技术。

图 9－9－2c 是达涅利公司 FTSRQ 工艺开发出的全鼓肚形(又称凸透镜形)结晶器。该公司认为平行板形和漏斗形结晶器有浸入式水口插入不便和铸坯易出现表面裂纹、疤痕等缺陷的不足，而这种全鼓肚形结晶器的主要特点是其鼓肚形状贯穿整个铜板自上而下，并一直延续到扇形一段中部。结晶器出口处为将铸坯鼓肚形状辗平而特别设计了一组带孔型的辊子。对铸坯鼓肚进行矫平的设备长度比仅用结晶器时长了两倍。也就是说这与仅用结晶器来矫平坯壳的鼓肚相比，坯壳上所受的应力大大降低了。这种形状结晶器的另一个好处是内部容积更大，可以通入更大的钢水流量，具有更好的钢水自然减速效应。此外，结晶器上部尺寸加大可使水口有更好的设计尺寸，保证结晶器内液面稳

定。该公司认为，他们这种结晶器能良好地控制初期坯壳的形成过程，能生产高质量的铸坯。该结晶器长度为 1200mm，宽度为 1220～1620mm，厚度为 55、60、65、70mm。下口处配有两对足辊，与扇形一段的带孔型的辊子段相接。

图 9－9－2d 是奥钢联 CONROLL 工艺中的平行板形直结晶器。浸入式水口也是扁平状，钢水从两侧壁孔流出。结晶器断面尺寸是 1500mm×（70～125）mm。实际上这类板坯应划在中板坯之列。奥钢联从节能降耗的角度出发，分析得出生产 70～90mm 厚的铸坯能耗最小、加工成本也较低的结论，所以认为不必追求太薄的铸坯厚度，而趋向于生产中等厚度的板坯。从结晶器的形状来看，奥钢联强调只有钢水在其内凝固时不变形，且保持液面稳定，才有利于消除铸坯表面裂纹，促使结晶器内钢水中的夹杂物上浮和防止卷渣，所以主张使用平行板状结晶器。

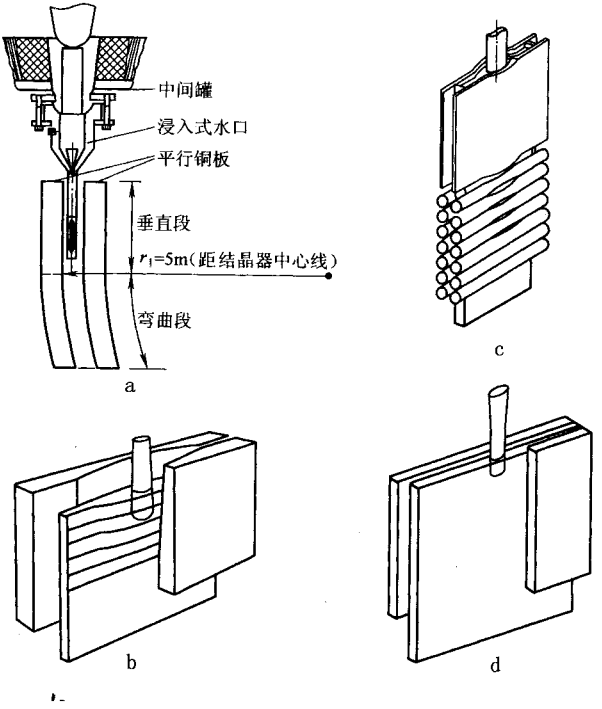


图 9－9－2　4 种类型的薄板坯连铸结晶器

a—立弯式结晶器（第一代），德马克公司 ISP 工艺；

b—漏斗形结晶器，西马克公司 CSP 工艺；c—凸透镜形结晶器，达涅利公司 FTSRQ 工艺；

d—平行板形结晶器，奥钢联 CONROLL 工艺

上述 4 种类型的结晶器实际可归类为平行板形、漏斗形和全鼓形 3 种。从当今世界上已投产的薄板坯连铸连轧生产线来看，经生产实践证明，后两种更有利于提高产品质

量、扩大品种和提高薄板坯连铸机的单流产量。原先采用大开口度(170mm)的 CSP 漏斗形结晶器现在开口度有所变小(140mm),原先没有开口度的结晶器,如 ISP 平行板形结晶器现在也采用了一定的开口度而开发了 ISP 小漏斗形结晶器。

三、浸入式水口

由于结晶器的形状不同,各种类型工艺所采用的浸入式水口也不同。

图 9－9－3 给出了 CSP 工艺漏斗形结晶器使用的浸入式水口)状及其在结晶器内的位置。浸入式水口和结晶器是一整体。漏斗形结晶器的上口开口度保证了长水口有足够的伸入空间,为使用厚壁长水口提供了有利条件。长水口外部形状决定了钢水在结晶器内上部的流动通道,而内部形状特别是出口形状则决定了钢水流态和注入时的动能分布。CSP 工艺所用的长水口历经改进已由传统板坯连铸机使用的第一代演变到现在使用的大十字出口第四代。这种大十字状出口可增加钢水流量、稳定拉速,对拉速高的情况更能显示优越性,其寿命可达 11～12 炉。

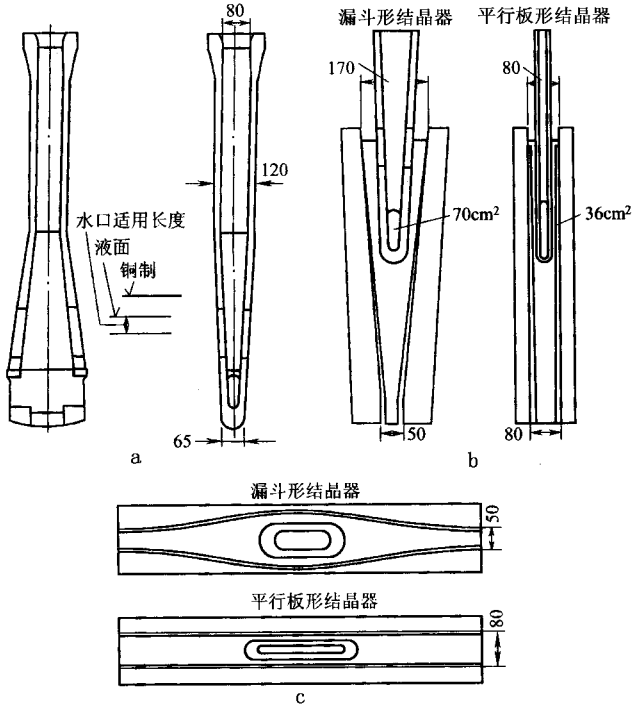


图 9－9－3　CPS 工艺的浸入式水口形状及长水口在结晶器内的位置

a—浸入式水口示意图;b—长水口在漏斗形和平行板形结晶器内位置的纵剖图;

c—长水口在漏斗形和平行板形结晶器内位置的俯视图

采用平行板形结晶器的薄板坯连铸机只能使用薄片形的浸入式水口。CONROLL和ISP两工艺所用水口即属此类。CONROLL工艺所用的浸入式水口从薄片的两侧壁开孔出钢。ISP工艺的薄片形水口则从下口出钢，下口厚度仅30～35mm。ISP工艺的薄片形水口和结晶器如图9－9－4所示。

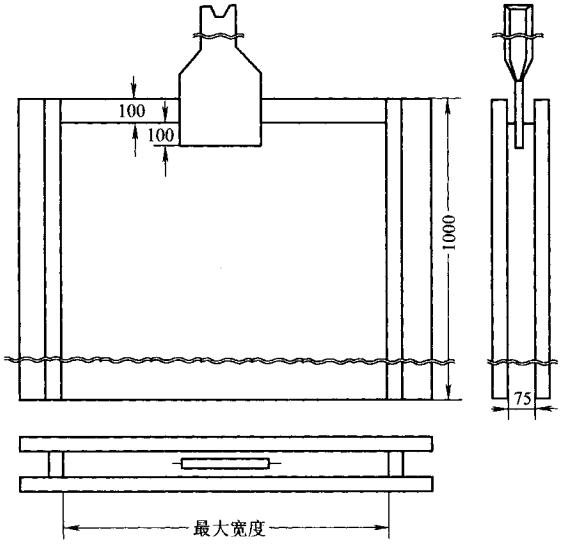


图9－9－4　ISP工艺的结晶器及浸入式水口模型示意图

薄片形水口的缺点是寿命较低，这也就迫使ISP工艺将其平行板形结晶器的上口宽边加大了厚度，且逐渐变大为现在使用的60mm＋(2×25)mm，成为橄榄状。虽然仍使用薄片形水口，但壁厚已增至20mm，且将侧壁出钢改为底部出钢，寿命明显提高。

各类型长水口材质均趋于使用Al_2O_3－C或Al_2O_3－ZrO_2－C质的耐火材料经等静压成形。随着材质的改进，长水口已向薄壁化发展，这样在寿命提高的同时，还扩大了长水口与结晶器侧壁的间隙，有利于保护渣熔化，相应耐火材料的消耗也有所降低。

四、保护渣

保护渣的性能对薄板坯连铸的成败关系重大。它除具有防止钢水二次氧化、保温、吸收非金属夹杂物、润滑、控制钢水在结晶器内的散热速度的功能外，还要满足薄板坯连铸拉速高、凝固速度快、润滑的表面积大、铸坯表面热辐射的相对面积增大等要求。所有这些均要求薄板坯连铸用保护渣具有熔点低、粘度小、熔速快、绝热性能和润滑性能好的特点。西马克公司已开发了多种薄板坯连铸用保护渣，并成功应用于各采用CSP工艺的

钢厂中。德马克等公司研究的结果倾向于使用不同于粉状保护渣的粒状保护渣。

目前，在传统的高速板坯连铸机的现有保护渣技术的基础上，已研制成功可满足浇铸速度达 6.0m/min 的薄板坯连铸机特殊需要的圆柱状保护渣。这些保护渣具有极佳的化学稳定性、良好的流动性和环境清洁度。

墨西哥希尔萨公司的 CSP 薄板坯连铸机于 1995 年投产以来，主要浇铸低碳钢和硅钢。该公司使用的两种圆柱状保护渣（A 和 B）的化学成分和物理性能见表 9－9－3。

表 9－9－3　两种圆柱状连铸保护渣的化学成分和物理性能

保护渣	A	B
$m(CaO)/m(SiO_2)$	0.89	0.86
Al_2O_3 的质量分数/%	3.6	8.0
AEO① 的质量分数/%	15.0	12.0
F 的质量分数/%	6.5	6.5
1300℃以下的粘度/Pa·s	0.12	0.18
熔点/℃	1060	1030
结晶器/℃	1096	1077
DTA 结晶点②/℃	1070	1060

①AEO = 碱土金属氧化物 $Na_2O + K_2O + Li_2O$；

②DTA 结晶点 = 差热分析法测定的结晶点。

我国钢铁研究总院也已开发出一种供薄板坯连铸用的保护渣，专利号是 CN1060050A。大连重型机械（集团）公司在研制弧形板坯连铸技术的过程中，对保护渣进行了试验研究，研制出的 4 号粉渣铺展性好，在 2.0～3.5m/min 拉速下，熔化速度和粘度适中，熔渣层厚度为 10～16mm，烧结层厚度为 2～4mm，铸坯表面光滑，没有发现表面夹渣等缺陷。

五、铸轧技术

铸轧技术的内涵包括液芯软（轻）压下和液—固相轧制两个方面。所谓带液芯压下是在铸坯出结晶器下口后，对其坯壳施加挤压，而液芯仍保留其中。经二冷扇形段，液芯不断收缩，直至铸坯全部凝固。其原理如图 9－9－5 所示。

德马克公司在 ISP 工艺中首先采用了带液芯和不带液芯的液—固两相铸轧技术，在意大利阿维迪生产线上使用得很成功。铸坯出结晶器下口时的厚度为 60mm，经逐步减轻的轧制变为 22mm。液芯压下段的变形量不超过 20%，固相铸轧段可把坯厚减薄

60%。经几年的生产验证,液芯铸轧对细化晶粒效果明显,可获得具有良好韧性的铸坯;而固相轧制技术也为薄板坯连铸机直接生产一般中板提供了条件。此外,用铸轧方法减薄铸坯厚度也可减少精轧机架数,缩短连铸机和精轧机之间的距离以及加热装置的长度。

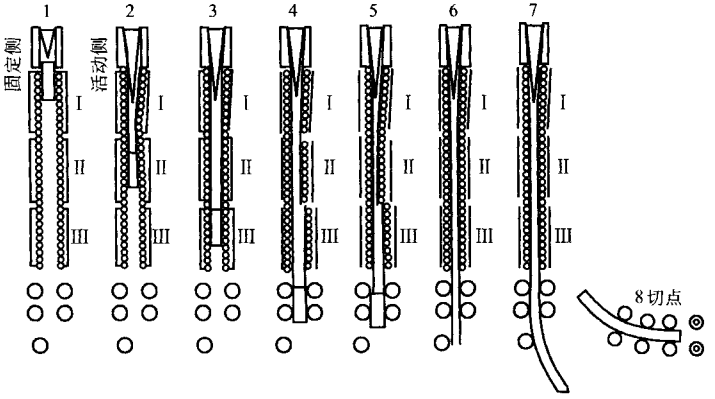


图 9-9-5　液芯压下原理

达涅利公司的 FTSRQ 工艺也在连铸机扇形段设置了软压下装置,即带液芯铸轧,最大压下减薄厚度为 20mm。它与动态液芯长度控制系统配合操作,使铸轧效果更好。所生产的钢种在中心偏析与疏松方面的质量均符合一级标准。

原 CSP 工艺没有液芯铸轧技术,经改进后的美国希克曼(Hickman)厂的 1 号连铸机在轧制较薄的产品时也采用了该技术。其结晶器下口厚度由 50mm 增至 70mm,上口也相应增大,整体容积变大,可容纳更多钢水。在通过量不变的情况下,钢水流速减慢、变稳,有利于夹杂物的上浮和提高拉速。采用该技术后,铸坯由出口处的 70mm 经扇形段连续压缩至 65、60、55、50mm,压下 20mm 不会产生漏钢。

西马克公司还与蒂森(Thyssen)公司合作开发了带'铸、压、轧'的三位一体的 CPR 技术。它是在结晶器下口坯壳厚度约为 15mm、温度为 1300℃左右时立即给铸坯较强的压辊压缩力,使之芯部焊合,再用一架两辊或四辊轧机将铸坯轧成厚度为 15~24mm 厚的热轧板卷。该技术已在意大利的依尔瓦厂(Ilva)应用。

由此可见,带液芯或不带液芯的铸轧技术的应用,为提高铸坯质量、进一步降低能耗作出了贡献。该项技术已相当成熟,也是薄板坯连铸今后生产板带产品必用的工艺。采用带液芯的铸轧技术必须根据浇铸时的拉坯速度、钢种、结晶器冷却条件、二冷区冷却强度、钢水过热度、浇铸时间等一系列工艺参数来计算凝固断面的形状、坯壳厚度、液芯率等,从而决定变形率并随之自动调整扇形辊间距来实施轻压下。

六、动态软压下技术

1. 动态软压下工艺

软压下是指在结晶器出口处板坯尚未完全凝固的条件下将其厚度压缩到所要求的尺寸的工艺。

目前，达涅利公司的薄板坯连铸机可通过所有扇形段在很宽的变形范围内进行软压下作业。在调节范围内，可进行各种软压下组合，但惟一的限制是相邻两个扇形段间板坯厚度的压缩必须呈现平滑的斜度变化。

每一个软压下扇形段由 4 个液压缸各自进行位置控制。通过调节使软压下处于最佳状态。选择进行软压下的最佳液压位置时，应考虑热量散发、拉坯速度、产品质量和拉坯力（拉坯力最小化能使凝固壳上的应力较小，产生表面缺陷的可能性更低）等因素。

2. 动态软压下的效果

软压下产生对流运动，使正在凝固的钢水混合并产生下列效果：

(1)对流运动使钢水的成分趋向均匀。

(2)存在部分偏析的高温薄板坯的液芯部分由于软压下产生对流运动，使液芯部分的钢水与枝状晶端部接触后将其重熔，并与偏析较小的钢水混合而被稀释。

(3)对流运动将脱离内表面的正在重熔的固态结晶送到板坯中心位置，由于它起到了晶核作用而有利于薄板坯中心钢水的凝固。

(4)枝状晶重熔的热损失降低了过冷度，有助于通过晶核作用进行凝固。

(5)在软压下终点，通过机械作用使枝状晶的端部断裂，加快晶核化。

软压下的理想时间应是铸坯受挤压而不破裂之时。倘若不在理想时间进行软压下或过了理想时间继续进行软压下，铸坯由于柱状晶过分生长不能再破碎就会产生内裂纹。所以，在不合适的时刻进行软压下，不但不能改善铸坯的金相组织，反而会产生裂纹损害板坯的内部质量。这就是静态软压下和液芯轧制的负面效应。

变形曲线的最佳形状由非固态数量决定，因此限定相应凝固段的软压下变形量是十分必要的。研究表明，在非固态比率相同的情况下，铸坯枝状晶内裂纹随着扇形段压下比率的增加而增多。深层次的试验研究能够预先确定变形曲线、非固态数量和产生枝状晶裂纹之间的关系。了解这些关系有助于确定每个扇形段的最佳变形方案，有助于最大限度地发挥软压下改善铸坯质量的作用。

七、拉坯速度

薄板坯连铸的特点之一就是拉坯速度高。但即使拉速达到 5m/min，60mm 厚的薄板

坯连铸机产量也只有 300mm 厚的传统板坯连铸机以 1～2m/min 的拉速生产时产量的 1/2。因此，薄板坯连铸连轧生产线有两个发展倾向：一是增加板坯厚度，如达涅利公司以 60～70mm 为主，而奥钢联的 CONROLL 工艺更主张生产中板坯；二是继续提高拉坯速度。从已投产的多条生产线来看，阿维迪厂的拉速为 4.5～5.5m/min，美国纽柯一厂（克拉福兹维莱厂）的拉速为 4～5m/min，美国纽柯二厂（希克曼厂）的拉速为 5～5.5m/min，墨西哥希尔萨厂的拉速为 5.5m/min，美国戈拉庭厂的拉速为 5.5m/min，达涅利公司提供的连铸机的拉速也是 5m/min，而奥钢联的连铸机拉速则是 3～5m/min。可见拉速均未有达到 6m/min 的实绩。

一台 200mm 厚的传统板坯连铸机拉速在 4m/min 时年产量即可达到 280 万 t，而 100mm 厚的板坯连铸机则需保持 6.5m/min 的拉速才能完成相同的产量。至于 50mm 厚的薄板坯连铸机，只有拉速达到 8～9m/min 产量才可与前两种情况相比。为使薄板坯连铸连轧生产线的连铸机与轧机之间能力更加匹配，提高连铸机的拉速势在必行，而其前提则是改进结晶器的传热。因为薄板坯（50mm）的凝固时间大大短于传统板坯，单位时间产生的凝固表面积（传热面积）又低于传统板坯，热流密度则是传统板坯的 4 倍，所以必须加大冷却强度，减小结晶器铜板厚度，控制保护渣使之呈薄膜状。此外就是改进二冷段支撑辊为密排小辊径，这样在高拉速下可防止铸坯产生鼓肚。据报道，西马克公司为泰国设计的 CSP 生产线连铸机拉速就是 7～8m/min。希克曼厂也拟把扇形段加长 8m，再附加其他相应技术，可望将拉速提高至 7～8m/min。

八、冷却制度

薄板坯连铸的各种二次冷却工艺采用的方式不同，但最终目标都是要获得良好的铸坯质量。

冷却方式有喷水冷却、气—水冷却和干式冷却（空冷）三种。传统的喷水冷却用在高速薄板坯连铸二冷段时，必须根据铸速高这一特点来选择冷却水量和水速以及喷嘴的布置方式，再根据钢种来确定合适的冷却曲线。现 CSP 工艺仍沿用这种方法。气—水混合冷却有很好的冷却效果和均匀程度，ISP、FTSRQ 和 CONROLL 工艺均采用这种方式来冷却铸坯。采用这种工艺时，要根据薄板坯的宽度、厚度、拉速等因素来控制水流速度、改变压缩空气和水的压力以及气水比，以达到有效调节水流量的目的。操作时需沿拉坯方向和铸坯宽度方向按不同冷却强度要求进行自动控制，以达到二冷制度的合理化和最佳化。ISP 工艺也有采用干式冷却的。在二冷区内不喷水，铸坯的冷却是借助导辊来间接冷却。导辊一般是螺旋焊管，中心通水。冷却水从辊身与辊套之间流过，铸坯依靠它

来冷却只能是弱冷。这种冷却方式冷却速率低但能使铸坯表面得到均匀冷却，对薄板坯表面质量的改善极有好处，特别适于浇铸裂纹敏感性强的钢种，也适于薄板坯连铸连轧这种铸坯直轧工艺。但应指出，干式冷却后的铸坯温度高，很容易形成氧化铁皮，必须及时清除，因此需配合使用如高压水除鳞这样的技术。

气—水冷却有一个问题就是空气带来的二次氧化问题很严重，氧化铁皮也很厚。因此有人认为，喷水冷却这种传统冷却方式即可冷却板坯，又可冷却导辊，冷却水还能将导辊和铸坯上的残留保护渣冲掉，仍不失为一种好的冷却方式。近年来薄板坯连铸工艺中普遍采用了软压下技术，这就对薄板坯在二冷段的温度要求更加严格。铸坯一旦经喷水冷却后，表面温度过低，软压下技术就难以应用。由此看来薄板坯连铸的二冷方式趋于缓冷是合理的，同时也为节约能源创造了条件。当然这一切的前提是确保铸坯的质量。

九、加热方式

薄板坯连铸连轧工艺中除 ISP 工艺外均沿袭均热炉的加热方式。均热炉一般长 160～200m，炉内布置的辊子系耐热材质，内芯冷却。均热炉由天然气加热，保温效果好。如薄板坯入炉前温度达 1100℃就不需加热，仅在拉速较慢时才通过设置在均热炉上部的烧嘴加热。均热炉内各段温差很小，计算机通过多个测温点来控制炉内温度的均衡。无论是辊底式还是其他类型的均热炉都需尽量减少自身的热量损失和尽量提高使用寿命。对两条生产线共用一组精轧机的流程，均热炉做成平移式和摆动式，将大大方便铸坯的加热和运输。ISP 工艺采用的是感应加热和克日莫那炉，感应区仅 18m，后接克日莫那炉，既可加热（有天然气烧嘴）、保温，又可卷取，大大缩短了生产线长度，而且操作灵活、污染很小。但此种方式设备较复杂，易出现故障，维修困难，在使用中有能量的二次消耗问题。尽管如此，感应加热仍不失为一种新颖的设计思想。

十、精轧机组

薄板坯连铸连轧生产线由连铸机和连轧机两部分组成。薄板坯连铸机给连轧提供的坯料温度高且分布均匀，一般厚度为 15～25mm，这就为精轧机轧制较薄的热轧带卷创造了条件。根据产品规格的不同和铸坯生产过程中有无铸轧（软压下）可以配置数目不等的精轧机架。如达涅利公司的 FTSRQ 工艺和德马克公司的 ISP 工艺，由于采用液芯压下技术可将铸坯减薄 20mm，又有固相铸轧机组对铸坯再行轧薄，所以精轧机架就相应减少。阿维迪生产线仅 4 架精轧机就能生产 1.5～2.0mm 的热轧带卷。CSP 工艺及 CONROLL 工艺一般不带液芯铸轧，为提高单流产量都拟设置粗轧机。精轧机的数目可

由 6～7 架减为 5～6 架。现已投产的各条薄板坯连铸连轧生产线上的精轧机组均在板形控制方面开发了一系列技术，如板形和平直度控制系统——CVC 技术、轧辊磨损和热凸度控制系统——PFC/CFC 技术等。这些技术可保证带钢产品的板形横向公差很小，纵向无变化且平直度极佳。特别值得一提的是在固定轧制一种宽度或用两流连铸机生产铸坯交错轧制不同宽度的带钢时，也不会出现因轧辊磨损或热凸度变化造成不正常的板形。

为适应不锈钢薄板的生产，热连轧机可用炉卷轧机代替。它在将薄板坯卷起保温的同时进行轧制，大大减少了薄板的温降，可用灵活的工艺和低于热连轧机的设备投资生产出多种加工温度范围较窄的特殊带钢。实际上倾翻带钢工艺（Tippins Samsung Process，简称为 TSP）中使用的斯特克尔（Steckel）轧机也属于这种类型。

薄板坯连铸连轧生产线生产厚度为 1.0mm 的热轧带卷已成为现实。未来的方向是如何生产出 0.8mm 的热轧带卷以部分取代同等厚度的冷轧板。由于追求高产量和更薄的产品不能仅靠增加轧机架数，提高轧制速度更显得必要。现在末架轧机的速度已由 6～8m/s 增加至 10.8～12m/s，由恒速轧制改为小升速轧制，主电机功率明显增大。

第三节　典型的薄板坯连铸连轧工艺

一、CSP 工艺

西马克公司开发出的 CSP 工艺（Compact Strip Production），也可称为紧凑式热带生产工艺。西马克公司先在德国布什（Buschüetten）钢厂的立弯式连铸机上做了一些改进，成功地在传统连铸机上浇出 50mm 厚的薄板坯来，其连铸机见图 9－9－6。随后在美国纽柯公司的克拉福兹维莱厂、黑克曼厂、戈拉廷厂、韩国的韩宝厂、墨西哥的希尔沙厂、西班牙的比斯卡亚厂，先后建成工业化的生产线，取得了很大成功。合同订单还包括了印度、马来西亚、中国、德国、荷兰、埃及等的多条生产线。CSP 技术的主要发展阶段见图 9－9－7。CSP 铸机的主要参数见表 9－9－4。

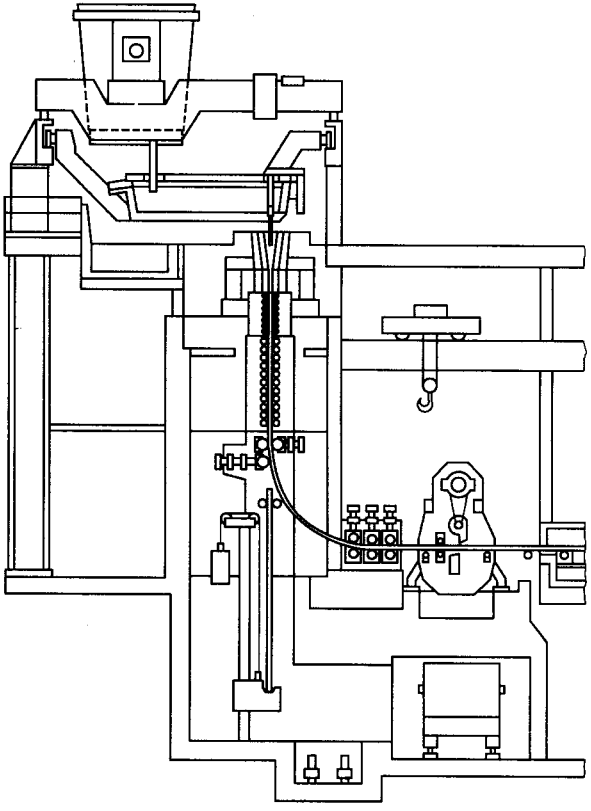
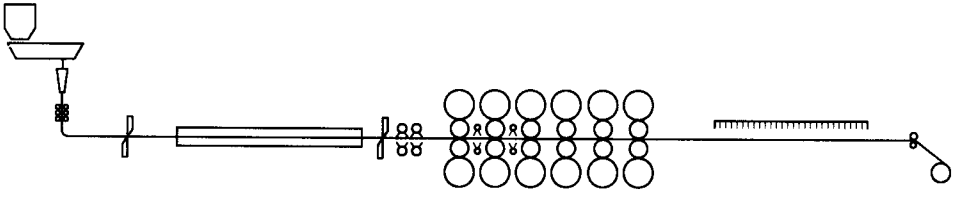


图 9－9－6　CSP 连铸机示意图



质量保证	最终产品厚度	钢种	生产能力
漏斗型结晶器	≥1.8 mm 碳钢	高质量低碳钢	增加第 2 流
浸入式水口设计	↓	↓	提高拉速
连铸用保护渣	≥1.2 mm 碳钢	高碳钢、高强度钢	液芯压下
电磁制动闸	↓	↓	适当增加板坯厚度
软压下技术	1.0 mm 或更薄的碳钢、超低碳钢	高合金钢、超低碳钢	
除鳞系统	以及 1.5 mm 高强度材料		
	↓		
板形、平直度、断面	为进一步减薄厚度、增大物流流量、		
控制系统	提高强度而增加的新的控制系统		

图 9－9－7　CSP 技术的主要发展阶段

表 9－9－4　CSP 连铸机的主要参数

设　备		技 术 参 数
机型		2 流 CSP 连铸机
流间距		7000mm
钢水接收		回转台
钢水量		385t
中间罐容量		70t
板坯宽度		900～1600mm
结晶器类型		CSP 结晶器(带电磁制动)
结晶器宽度	类型 2	1130～1600mm
	类型 1	900～1350mm
结晶器长度		1100mm
出口坯厚		60mm
厚度		60/45mm 带液芯铸轧
振动类型		低振幅
振动		液压
拉速(机器)		8.0m/min
拉速		最大 6.0m/min(60mm 厚)
冶金长度		9150mm
二冷段		1～4 段,垂直
弯曲		完全凝固
弯曲半径		3250mm
引锭杆		刚性
矫直		4 辊连续矫直
剪切		机械摆动剪
剪切温度		760℃,60mm×1600mm 600℃,60 mm×1600mm
地面高度		±0mm
浇铸平台高度		+14450mm
辊道高度		+915mm

1. 工艺特点

CSP 工艺具有流程短、生产简便且稳定，产品质量好、成本低，有很强的市场竞争力等一系列突出特点。

CSP 工艺生产流程一般均为电炉(AC 或 DC)→钢包精炼炉→薄板坯连铸机→均热(保温)→热连轧机→层流冷却→地下卷取。CSP 技术的基本原理见图 9－9－8。薄板坯从连铸机拉出，厚 50mm，经剪切长度为 160m，使用用天然气的均热炉加热保温，薄板坯经由高压水除鳞后，通过 4～6 架精轧机轧成 1～2.5mm 热轧带卷，冷却后成卷，卷重约 20t。从钢水的冶炼到成品离线，仅需 1.5h。热轧带卷的质量不断提高，已从 1990 年次品率的 8%降至 4%，1996 年后继续降为≤2%。热轧带卷的成本为 50～60 美元/t，大大低于传统生产线的成本，向生产板材的大厂显示了强大竞争力。

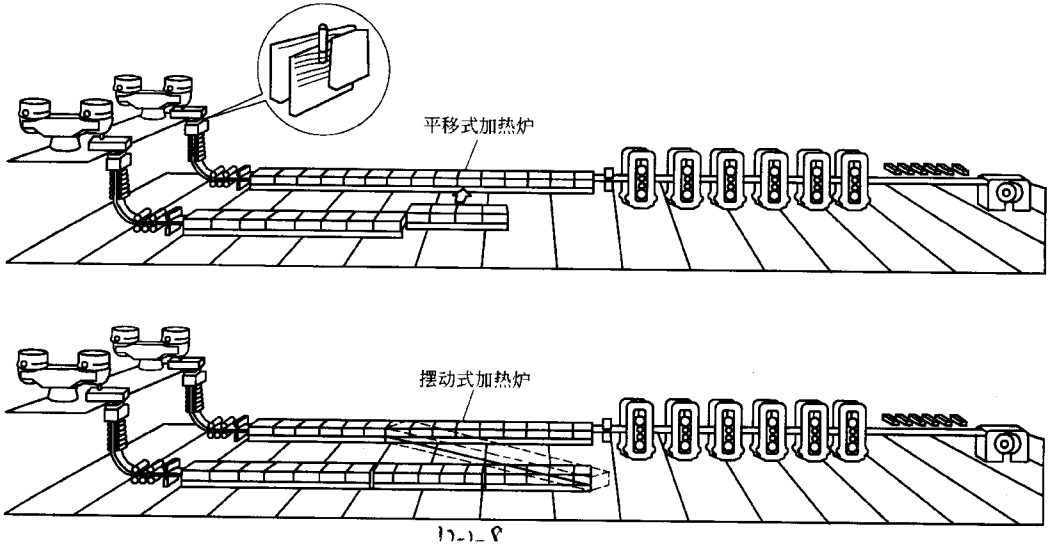


图 9－9－8　CSP 技术的基本原理

CSP 工艺采用了许多关键技术，从而保证了自身特点的实现，具体为：

(1)使用漏斗型结晶器，它有较厚的上口尺寸(70～130mm)，便于浸入式长水口的插入，长水口和器壁间的间距不少于 25mm，有利于保护渣的熔化。布什钢厂的试验机上首次使用后，只能做到 10～15min 的间断浇铸，现在黑克曼厂的结晶器寿命已达 150 炉、希尔沙厂则为 800 炉，漏斗型结晶器经几年来改进，收到了很好的使用效果。

(2)严格控制钢水质量，提高纯净度。对 CSP 工艺而言，为保证产品质量，要从精料做起，采用优质原材料、控制废钢杂质、配加直接还原铁(DRI)等都是必要的。钢水 100%经钙处理，加铝仅为脱氧，一般钢水中 Cu＋Ni＋Mo＋Sn 总量小于 0.25%。这些措

施保证了钢板的高质量和生产线的顺行。

(3)针对热连轧机组在板形控制方面开发应用了一系列新技术,使薄板坯连铸连轧生产线更优于传统工艺来轧制薄规格的产品。如轧辊可轴向移动、轧辊热凸度控制、板厚及平整度的在线控制等措施,保证了生产 1.0mm 厚度的热轧带卷已不是难事。

2. 工艺演进

自 1989 年在纽柯公司建成第一条 CSP 生产线以来,随着多条生产线的投产,在实践中摸索出许多经验,既有成功又有不足,近年来在工艺技术、装备及其控制系统等方面均做了不少改进,使其不断完善发展,现已进入成熟阶段。新建的生产线中普遍采用了高压水除鳞、电磁闸、液芯压下、结晶器液压振动、第一架精轧机架前加立辊轧机、板形和平整度控制、平移式二辊轧机等多项新技术。如果说布什钢厂的试验机是 CSP 工艺的第一代技术,纽柯Ⅰ厂就是第二代,戈拉廷厂、韩宝厂、希尔沙厂以及中国多条的 CSP 生产线应是第三代了。

(1)漏斗型结晶器的不断完善

纽柯Ⅰ厂使用的漏斗型结晶器在使用中存在寿命短、结晶器的形状不能保证铸坯有最好的表面质量两大缺点。西马克公司经较长时间的研究和传热计算,对其上部形状进行了优化,保证钢水进入后不致产生旋涡,大大减少了铸坯表面缺陷。自动控制的水冷系统使铜板上部传热合理,冷却效果变好,铜板外冷却水槽水流速控制在 10m/s 以上,水压 $p > 0.6$MPa,水的蒸发量减小。结晶器寿命大大提高,一般在 200 ~ 500 炉,修磨后仍可使用。

浸入式长水口和结晶器是一整体,与平行扳型结晶器相比,漏斗型结晶器的上口开口度保证了长水口有足够的插入空间。这为使用较厚壁的长水口提供了有利条件。长水口外部形状决定了钢水在结晶器内上部的流动通道;而内部形状,特别是出口形状,则决定了钢水流态和注入时的动能的分布。图 9 - 9 - 9 示出了 CSP 工艺四代长水口的形状,从中可知其变化是日趋合理。第一代是由传统板坯连铸使用的长水口形状演变来的,曾在试验机上采用;第二代是工业生产以来多条生产线一直采用的长水口;第三代和第四代是为提高拉速新设计出的大十字出口的长水口,有增加流量、稳定拉速的作用。目前长水口的寿命纽柯公司各厂为 11 ~ 12 炉,希尔沙厂为 7 ~ 8 炉。

对漏斗型结晶器而言,实践证明,鼓肚处每增加 5mm,表面质量可成倍地改善,显然这和上口面积增大有利于保护渣的加入、熔化和吸附夹杂是密切相关的。现使用的结晶器长度已加长至 1100mm,且均可在线调宽。

应指出,漏斗型结晶器的缺点是坯壳在结晶器内要变形,为保证器壁压住坯壳又要

做到器壁与坯壳间有合适距离，以求获得良好的表面质量，必须结合钢水本身收缩的计算来设计结晶器的过渡段。尽管该类型结晶器由斜变直的过渡段仅 100mm，在 5m/min 的拉速下铸坯通过此段只需几毫秒，但仍需给予高度重视，要想确保弧度连续变化，一般采用有限元法来优化变形段的设计。

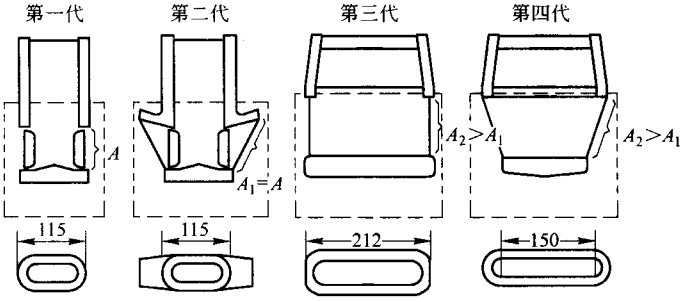


图 9－9－9　CSP 工艺长水口的演进

(2)液芯压下技术在黑克曼厂采用

液芯压下(Liquid core reduction)技术是在铸坯出结晶器下口后，对其坯壳施加挤压，液芯仍保留在其中，经二冷段，液芯不断收缩直至薄板坯全部凝固。

1995 年黑克曼厂的 1 号连铸机在轧制较薄的产品时采用了该技术，这样结晶器下口的厚度就可由 50mm 增至 70mm，上口随之也可相应增大，更有利于长水口的插入。结晶器变大后可容纳更多钢水，在通过量不变的情况下，钢水流速减慢、变稳，有利于夹杂物上浮和提高拉速。液芯压下技术实际上是在黏稠带内加工，它将导致铸坯内部晶粒破碎和滑移，可得到较细的晶粒，使得铸坯在相同的轧制温度下获得更好的韧性。试验证实，采用液芯压下比相应的减薄结晶器厚度带来的效果更佳，现黑克曼厂生产的所有钢种的中心偏析和疏松方面的质量均可达到一级标准。为使铸坯不致漏钢，一般液芯压下量不超过 20mm，自结晶器出口处的 70min 厚铸坯，经二冷段连续压至 65－60－55mm，效果很好。

(3)液压振动装置在意大利 AST 公司试验机上的应用

AST 试验机是一台拟生产奥氏体不锈钢的生产设备，结晶器采用液压振动(Hydranlic Oscillator)，旨在改善铸坯与器壁的接触，通过自由选择的非正弦波振动曲线，按选定的运动方程振动，可使负滑脱时间 T_N 缩短，即减少熔融保护渣进入铸坯和器壁间接触区域的机会，有利于表面质量的提高。带液压振动装置的振动曲线见图 9－9－10。西马克公司提出 $T_N = 0.1s$ 是取得良好铸坯表面质量的保证值，该技术的研究正在进行中。

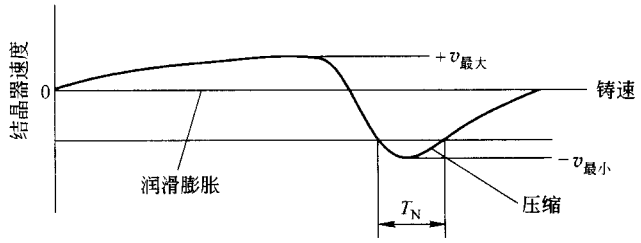


图 9－9－10　液压振动装置的振动曲线

(4)电磁闸在纽柯Ⅰ厂安装使用

电磁闸(Electromagnetic Brake)于 1994 年 10 月安装在克拉福兹维莱厂的结晶器上部漏斗状的两侧,其宽度同于结晶器,功率 200kV·A,电压 4.16kV,电流 125A,频率 60Hz,具有控制液面平稳度和提高铸坯表面质量的作用,使用效果较好。

在无电磁闸的结晶器内,长水口流出的钢液冲击器壁窄边后,约 80%向下流动,20%向上流动,见图 9－9－11a。两流股均在来自器壁的回流冲击下分散,靠近下部窄边区域钢水由于静压力作用难以向上运动,夹杂物无法上浮。应用电磁闸后,结晶器上部产生一磁场,其强度可调节,钢水注入后经磁场作用产生感应电压,并在其内诱发短路电流,形成电磁力,扼制钢流,可使流速降低约 1/4,理想状态是产生均匀分布的向下流动,见图 9－9－11b。

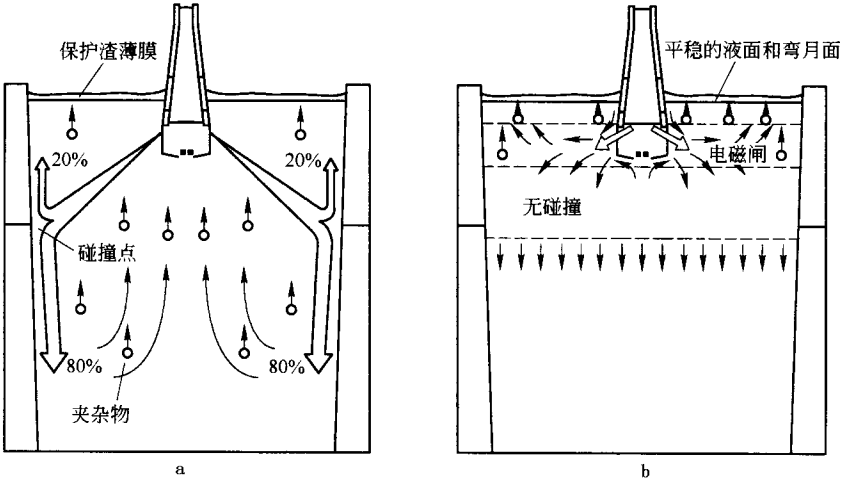


图 9－9－11　钢液在结晶器内的流动

a—无电磁闸;b—带电磁闸

电磁闸对液面平稳度的控制也有显著影响,见图 9－9－12。电磁闸关闭,向上流动

的钢水容易在窄边处形成液面凸起，即鼓肚 打开电磁闸，该鼓肚明显收缩。现场操作中结晶器内液面平稳，保护渣分布更加均匀。结晶器内液面平稳带来的效果不仅是能减少夹杂物，而且是进一步提高拉速的潜在条件。

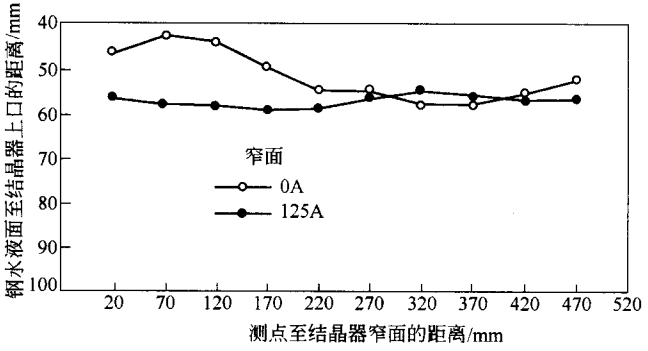


图 9－9－12　电磁闸的测定效果(拉速 4.57m/min)

西马克公司认为，凡浇铸优质薄板坯的 CSP 铸机均应留有装置电磁闸的位置。

(5)二冷段的改进

新建的 CSP 铸机变二冷段喷嘴平均布置为按坯宽来放置，解决了因坯宽不同造成的较窄断面铸坯边部冷却强度过大的问题，保证了铸坯冷却均匀，改善了铸坯质量。

扇形段加长，有利于拉速的进一步提高。纽柯Ⅰ厂支撑段为 5.7m，黑克曼厂和韩宝厂为 6.02m，而为印度、马来西亚、西班牙的设计值为 6.97m，我国包头采用 7.1m。戈拉廷厂 CSP 铸机扇形段是 7.815m，其中预留出 2m，为提高拉速创造了条件。纽柯Ⅲ厂(伯克利，南卡罗莱纳州)力求拉速达到 8m/min，在扇形段设计上也做了预留。基于厂房高度取决于炼钢设备的高度，一般加长扇形段 2m 左右不需增高厂房。

(6)新的高压水除鳞装置

实践表明，纽柯Ⅰ厂的除鳞机(High presure water descaler)已不适用，新一代的高压水除鳞机已在戈拉廷厂、韩宝厂、希尔沙厂等生产线采用，设在精轧机架前，能及时将出加热炉后 950～1050℃的铸坯表面不同成分的、厚约 1～2mm 的氧化铁皮迅速除掉。新除鳞机的特点是：

1)喷嘴与坯表面距离、喷嘴间距离均减小，见图 9－9－13。

2)全新式的变压水泵可使水压由原 20MPa 提至 40MPa，实际操作中水压为 32～35MPa 即可达到良好的除鳞效果。

3)装有防止污水流入薄板坯表面的设备。

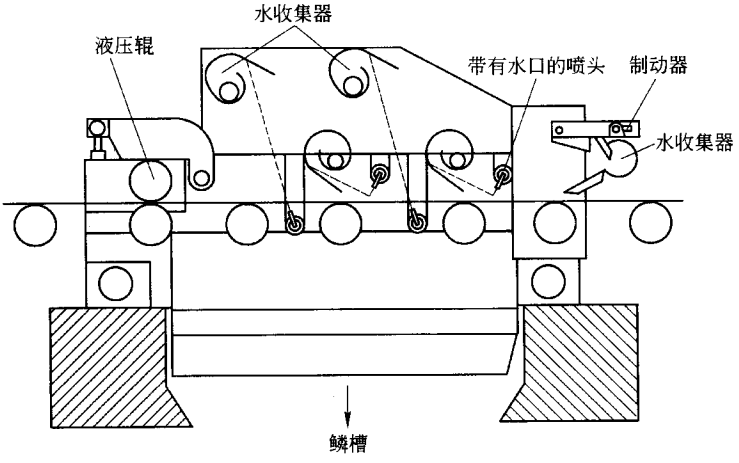


图 9－9－13　改进后的高压水除鳞装置的喷头

(7)精轧机 F_1 机架前加立辊轧机

戈拉廷厂 CSP 轧机前增设了立辊轧机，可对薄板坯边缘 10mm 进行轧制，立辊的大压下操作改变了铸坯边部结晶组织，解决了铸坯边部因冷却快易出现边角裂纹的问题。立辊轧边的压下量由钢种而定，合理的操作能大大减少进入精轧机后薄板坯边部的开裂缺陷，改善带钢边缘质量。立辊轧机的工艺参数现仍待进一步优化。

(8)板形和平整度控制技术定为 CSP 精轧机的标准配置

精轧机机架上带有优化的 AGC、WRB 和 CVC/PFC 系统，可使工作辊调节范围更加灵活，轧制产品保证达到预期的板形和极佳的带钢公差及平整度。

纽柯Ⅰ厂和芬兰的罗塔鲁基(Routaruukki)厂实践表明，带钢产品板形能保持在很小的公差范围内，整个纵向范围无板形变化。更值得注意的是，在固定轧制一种宽度带钢或用 2 流铸机生产铸坯交错轧制不同宽度带钢时，也不致出现因轧辊磨损而发生的热凸度造成的不正常板形。通过板形和平整度的控制技术还消除了因长时间轧一种固定尺寸带钢常常出现的带钢边缘皱纹缺陷。

3. 主要 CSP 生产线

自 1986 年西马克公司与美国纽柯钢铁公司签订 CSP 薄板坯连铸技术的工业化合同，1989 年 6 月世界上第一条生产热轧板卷的 CSP 生产线诞生以来，现有 CSP 生产线的情况见相关表。

已建成和正在建设的 CSP 生产线，尽管均采用相同技术，但在某些技术环节上仍略有差异，可归纳成七种类型：

(1)美国纽柯Ⅰ厂克拉福兹维莱的第 1、第 2 流连铸机，见图 9－9－14；

(2)美国纽柯Ⅱ厂黑克曼钢厂的第1、第2流CSP铸机,韩国的韩宝第1、第2流CSP铸机,墨西哥的希尔沙钢厂第1、第2流CSP铸机,美国戈拉廷钢厂的CSP铸机,意大利依尔瓦钢厂的CSP试验机,美国阿克梅钢厂的CSP铸机,见图9-9-15;

(3)美国第纳米克斯钢厂第1、第2流CSP铸机,中国珠江钢厂CSP铸机,见图9-9-16;

(4)美国纽柯伯克利钢厂、泰国的乔恩布日钢厂的CSP铸机,见图9-9-17;

(5)马来西亚的梅加钢厂的CSP铸机,见图9-9-18;

(6)印度的德罗伊斯帕特公司和西班牙的比斯卡亚钢厂的CSP铸机,见图9-9-19;

(7)中国邯郸钢铁公司和包头钢铁公司的2流CSP铸机,见图9-9-20;

各机组的主要区别在于结晶器断面宽度、弧形半径、冶金长度、是否带液芯压下、剪切点距铸机中心线距离等。

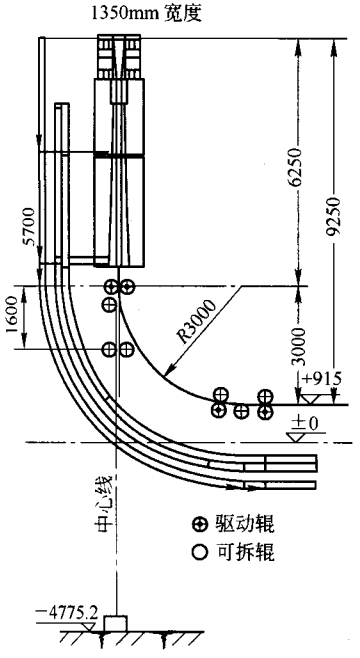


图9-9-14　第一种类型CSP生产线
(美国纽柯Ⅰ厂克拉福兹
维莱第1流、第2流连铸机)

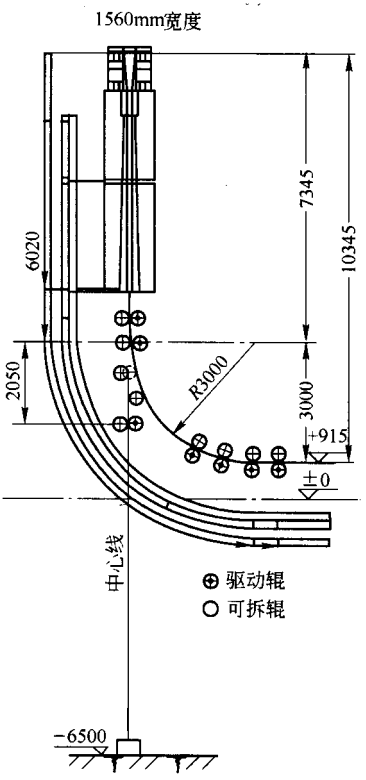


图 9－9－15　第二种类型 CSP 生产线
（美国纽柯Ⅱ厂黑克曼钢厂第 1、第 2 流连铸机，
韩国韩宝钢厂第 1、第 2 流连铸机，墨西哥希尔
沙钢厂第 1 流（宽度 1350mm）、第 2 流（宽度 1372mm）
连铸机，美国戈拉廷钢厂连铸机
（未来冶金长度 7815mm），意大利依尔
瓦钢厂试验机，美国阿克梅钢厂连铸机）

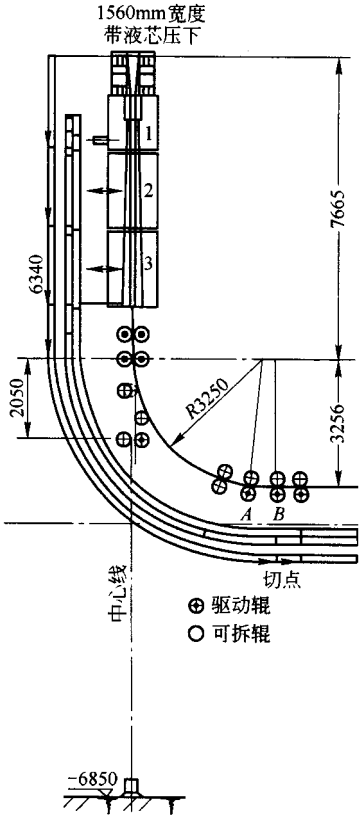


图 9－9－16　第三种类型 CSP 生产线
（美国第纳米克斯钢厂第 1、
第 2 流连铸机，中国珠江
钢厂连铸机（宽度 1350mm））

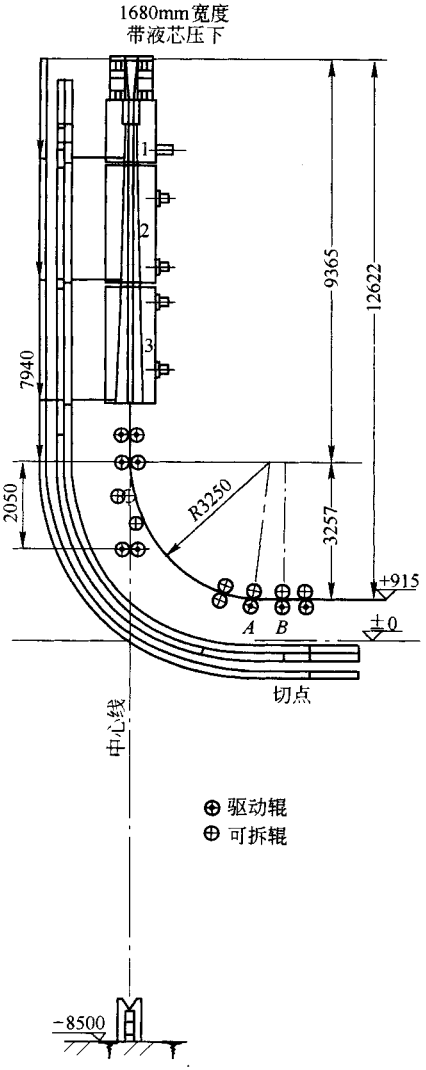


图 9－9－17　第四种类型 CSP 生产线
（美国纽柯伯克利钢厂连铸机
（预留液芯压下），
泰国乔恩布日钢厂连铸机
（宽度 1600mm））

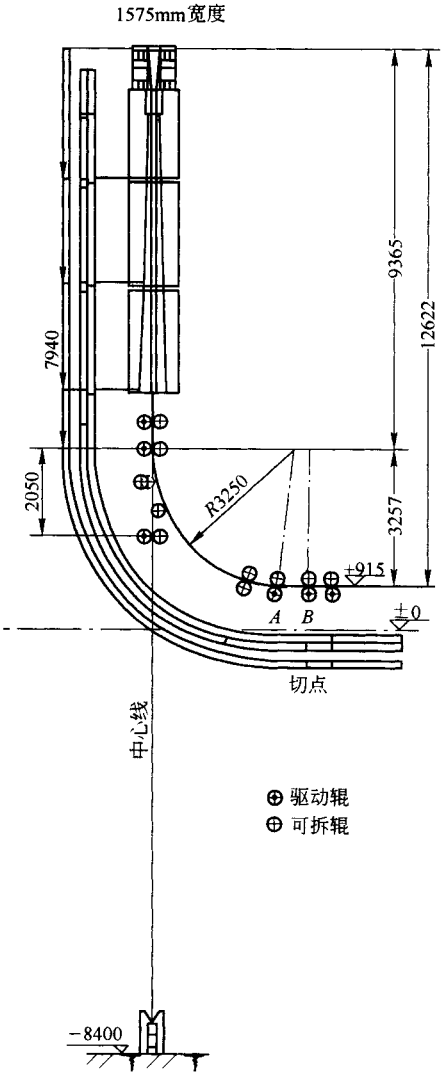


图 9－9－18　第五种类型 CSP 生产线
（马来西亚梅加钢厂连铸机）

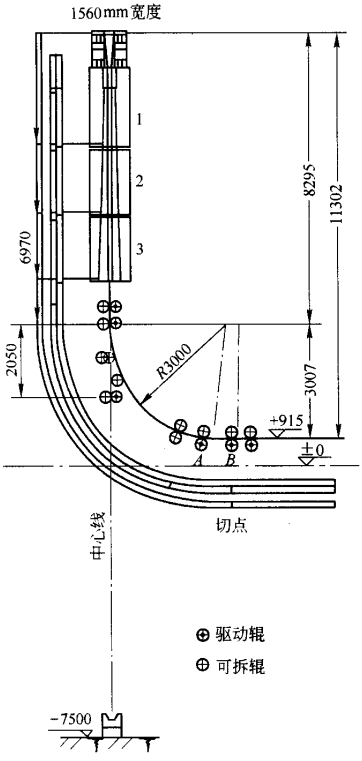


图 9－9－19　第六种类型 CSP 生产线
（印度德罗伊斯帕特公司连铸机，
西班牙比斯卡亚钢厂连铸机）

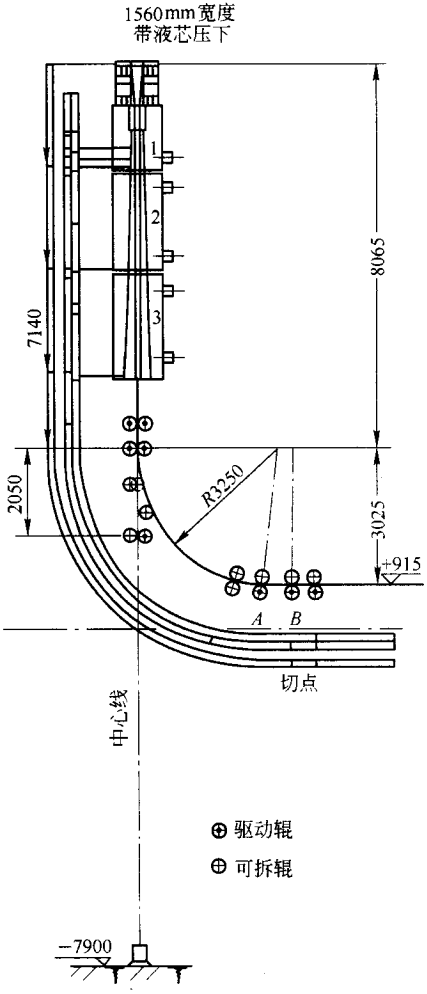


图 9－9－20　第七种类型 CSP 生产线
（中国邯郸钢铁公司和
包头钢铁公司 2 流连铸机）

以下将分别介绍国外各条 CSP 生产线状况。

1）美国纽柯公司克拉福兹维莱厂 CSP 生产线

1989 年 7 月，美国纽柯钢铁公司克拉福兹维莱（Crawfordswill）钢厂（简称纽柯Ⅰ厂）首次采用 CSP 技术生产出热轧卷。该厂位于印第安纳州的印第安纳波利斯（Indianapolis）市西北约 56 公里处，是一个紧凑式钢厂（mini－mill）。纽柯Ⅰ厂平面布置见图 9－9－21，其 CSP 生产线布置及有关参数见图 9－9－22。主要产品是长条和板带。

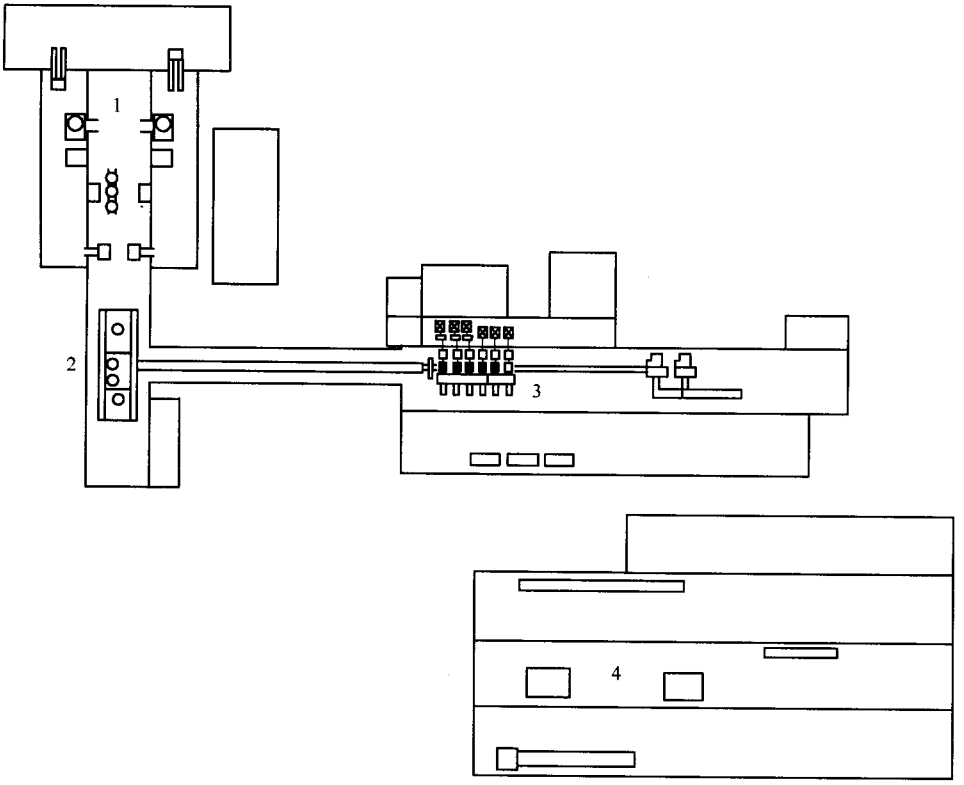


图 9－9－21　纽柯Ⅰ厂的平面布置

1—电炉车间；2—CSP 铸机；3—CSP 精轧机；4—CSP 冷轧机

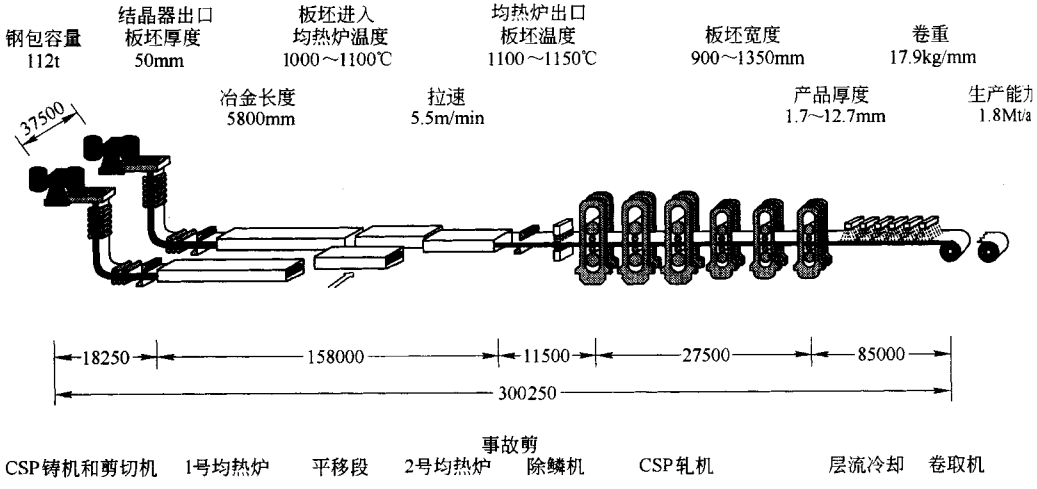


图 9－9－22　纽柯Ⅰ厂 CSP 生产线布置及有关参数

纽柯Ⅰ厂第一个使用了漏斗型结晶器，以电炉钢水浇出(40～50)mm×(900～1350)mm的薄板坯。电炉为ABB公司的交流电炉(2座)，容量112t，原料为10%～15%直接还原铁(DRI)、85%～90%的废钢。电炉钢水经由真空脱气装置进入CSP铸机，初建时是1机1流，1994年4月扩建了第2流，产量已达170万～180万t/a，拉坯速度为6m/min。铸坯经加热炉进入精轧机，起初为4机架，后改成5机架，1996年已增至6机架，可生产厚度为1.8～12.7mm的热轧带卷。机架的增加是为冷轧做准备，以节省道次，1996年冷轧板已达80万t/a，其中每个月可轧铁素体不锈钢1万t，用于汽车工业过滤器上。

纽柯Ⅰ厂以其产品价格便宜、质量满足市场的需要，产品销路颇好，产量节节上升，取得了良好的经济效益。该厂为扩大生产规模，增设了第3台电炉，使其产量达到200万t/a，产品50%热轧卷出售，50%冷轧用。纽柯Ⅰ厂的目标是用热轧板在现有的轧机上优化工艺参数，轧出1.0～1.2mm的薄板，尽量扩大热轧产品，其中仍以低碳钢为主(70%)。

纽柯Ⅰ厂的技术参数见表9－9－5。

表9－9－5　纽柯Ⅰ厂的主要技术参数

CSP铸机	刚性引锭杆，从下部插入	
	生产能力	82万t/a
	薄板坯厚度	50mm
	薄板坯宽度	900～1350mm
	薄板坯长度	47m
	钢包容量	112t
	中间罐容量	17t
	液面高度	800mm
	拉坯速度	2.5～5.5m/min
	结晶器长度	1100mm
	冶金长度	5800mm
	弯曲半径	3000mm
	摆动剪切力	4.3MN
CSP加热炉	以天然气为燃料的辊底式加热炉，是加热、均热和缓冲区	
	总长度	162m
	入口温度	平均950～1050℃
	出口温度	1100℃

CSP 轧机	5 机架，带有液压压下、CVC 技术、精整时控制工作辊弯曲度系统	
	终轧厚度	2.0 ~ 12.7m
	终轧宽度	900 ~ 1350mm
	轧制力	30MN
	工作辊直径	780mm
	工作辊身长度	1700mm
	支撑辊直径	1350mm
	支撑辊身长度	1500mm
	轧制速度	最大 11.0m/s
地下卷取	二级三辊万能卷取，带有液压驱动助卷机辊（分级控制）	
	带卷半径	最大 1950mm
	带卷重量	最大 24t
	卷单位长度重量	18kg/mm

2）美国纽柯公司黑克曼钢厂 CSP 生产线

1992 年 8 月，纽柯公司的第二条 CSP 生产线在黑克曼（Hickman）钢厂（简称纽柯 Ⅱ 厂）投产，它的建设周期仅 15 个月，设计生产能力 100 万 t/a，至 1993 年 11 月 2 日就已完成了百万吨的产量。该厂位于阿肯色州密西西比河（Mississippi）流域，拥有自己的码头，废钢和成品运输极为方便。

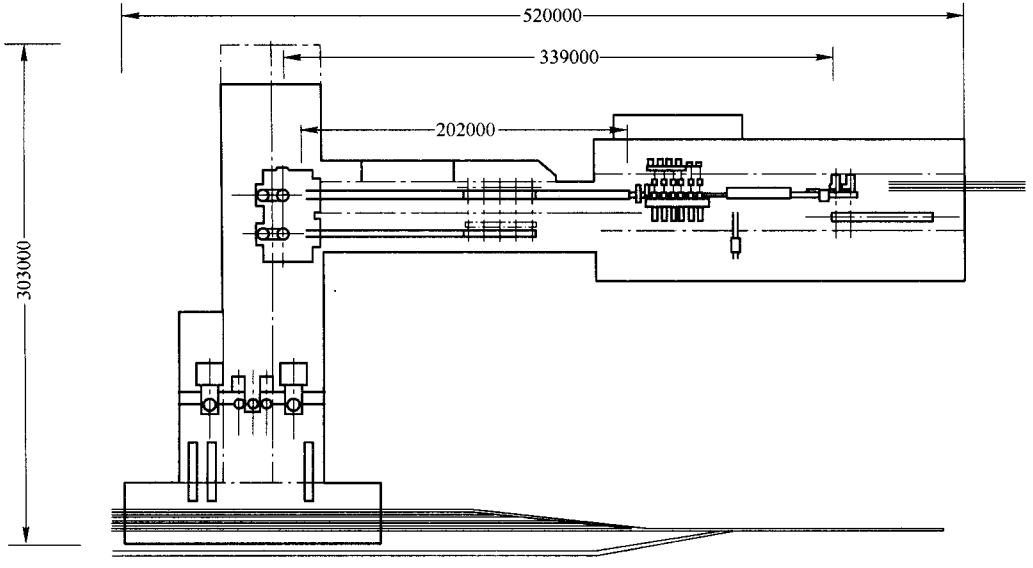


图 9 - 9 - 23　纽柯 Ⅱ 厂的平面布置

纽柯Ⅱ厂平面布置见图 9－9－23，其 CSP 生产线布置及有关参数见图 9－9－24。在最初设计时黑克曼钢厂就预留了铸机位置，于 1994 年 5 月建成第 2 流，使生产能力扩大为 220 万 t/a。该生产线主要技术参数见表 9－9－6。它的主要特点是第 2 流装上了液芯压下装置，铸坯可从 60mm 变薄为 45mm。

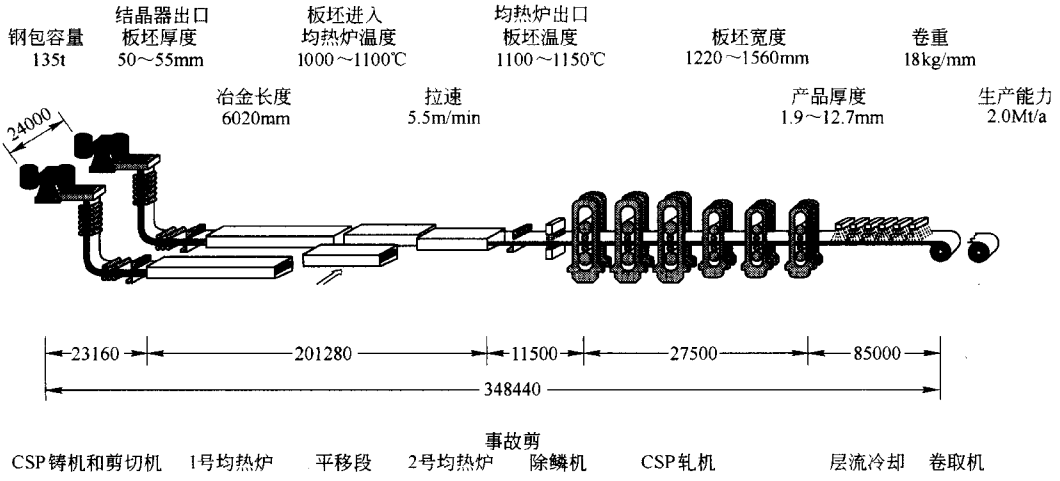


图 9－9－24　纽柯Ⅱ厂 CSP 生产线布置及有关参数

表 9－9－6　纽柯Ⅱ厂熔炼车间和 CSP 生产线的主要技术参数

熔炼车间	电弧炉	2(DC)
	钢包炉	2
	真空脱气装置	
	容　量	135t
	冶炼周期	最小 60min
	钢　种	碳钢为主，普通结构钢和深冲钢，高强度低合金钢
CSP 铸机	机　型	立弯式
	流　数	2
	薄板坯厚度	50～55mm
	薄板坯宽度	1220～1560mm
	钢包支撑方式	钢包回转台
	中间罐容量	28t
	结晶器长度	1100mm
	拉坯速度	2.8～5.5mm/min
	冶金长度	6020mm
	引锭杆	刚性引锭杆，从地下立式插入和拉出
	引锭杆系统弧形半径	四点牵引辊装置，3000mm
	拉坯矫直机	四点拉矫装置
	薄板坯剪切机	摆动式机械剪
	薄板坯长度	47m

CSP 加热炉	供　货	布瑞克蒙特厂
	长　度	202m
	燃　料	天然气
CSP 精轧机	事故剪	液压杠杆式水平飞剪
	除鳞装置	高压水除鳞
	轧　机	6 机架
	带卷厚度	1.90 ~ 12.7mm
	带卷宽度	1220 ~ 1560mm
	带卷外径	1000 ~ 1900mm
	带卷内径	760mm
	带卷重量	18kg/mm
	工作辊直径	800mm(F_1 ~ F_3) 735mm(F_4 ~ F_6)
	工作辊身长度	1900mm(CVC 技术)
	支撑辊直径	1350mm
	支撑辊长度	1700mm
	轧制力	35MN(最大)
	带卷冷却方式	层流冷却
	卷取机	1
	卷取机类型	地下分级控制

纽柯公司耗资 1.2 亿美元,在黑克曼 200 万 t/a 的热轧板厂增添冷轧、镀锌、酸洗、涂油和退火设备,于 1997 年第四季度开工,1999 年第 1 季度投产,冷轧材生产能力增加 80 万 t/a,镀锌材增加 50 万 t/a,能生产镀锌铝薄板。

黑克曼厂再建第 3 台电炉(135t),将生产能力提高到 250 万 t/a,产品方向是 1mm 厚的薄尺寸,并对精轧机进行改造。扩建后纽柯 Ⅰ 厂、纽柯 Ⅱ 厂的平面布置见图 9 – 9 – 25。

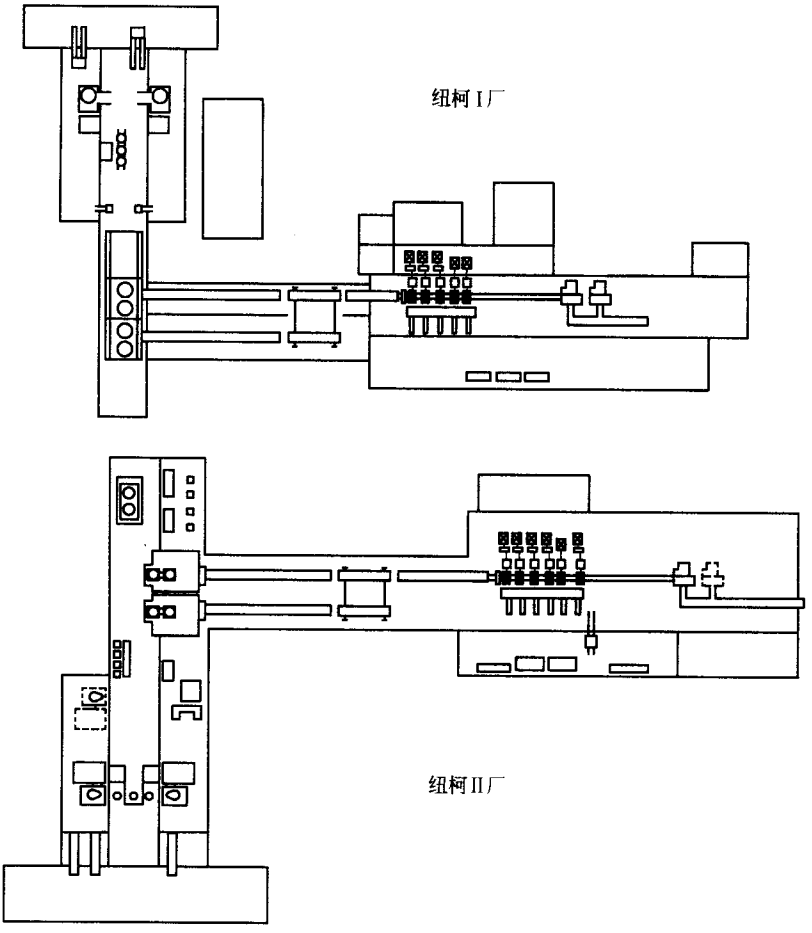


图 9－9－25　扩建第二流后纽柯Ⅰ厂和纽柯Ⅱ厂的平面布置

3)意大利依尔瓦钢厂的试验机

依尔瓦钢厂隶属 AST 公司(Acciai Speciali Terni),该公司是克虏伯(Krupp)的子公司。其中有一台专供试验的机组,由 AST 公司的研究人员和西马克公司的部分工程师共同在这台连铸机上完成了大量的 CSP 技术的开发研究工作,试验费用由双方共同承担,完成了从碳素钢→硅钢→铁素体不锈钢→奥氏体不锈钢的试生产工作。

该机组原由西马克公司提供主要设备,连铸机是由普通传统铸机改造而成,没有钢包回转台,也不用中间罐运输车,一个月只生产 2～3 次,截止 1997 年已浇铸了 150 次薄板坯,虽然钢包容量为 140t,但每次试验只装 40t 钢水。其余设备和工艺参数是在不断试验的条件下,不断地改进。之所以选择 AST 公司来进行此项试验,而没在布什钢厂继续完成 CSP 的技术完善工作,原因很简单,即在德国找不到像 AST 公司这样对薄板坯连铸

感兴趣的厂。该机组结晶器断面厚度 60mm，冶金长度 6m，有两个扇形段，铸坯经辊道运送，可进行火焰切割。由于试验工作已基本结束，该厂即把连铸机和轧机连接起来使用，它成为世界上第一套浇铸优质合金钢和不锈钢的薄板坯铸机，最终产品尺寸为 1.5mm × 1600mm。

AST 公司不锈钢 CSP 生产线布置及有关参数见图 9－9－26。

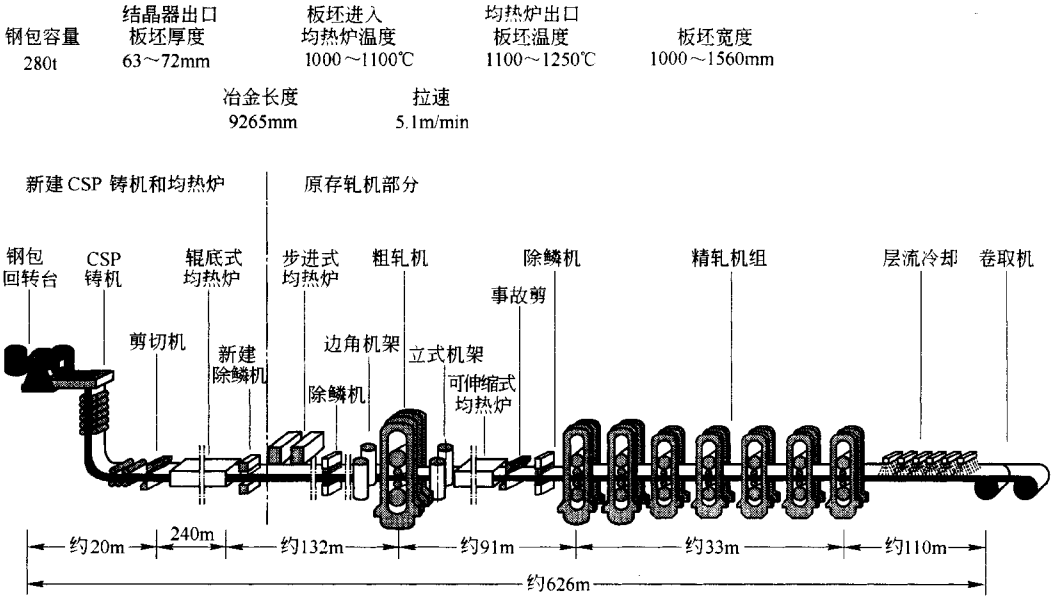


图 9－9－26　AST 公司不锈钢 CSP 生产线布置及有关参数

4）墨西哥的希尔沙钢厂 CSP 生产线

希尔沙（Hylsa）钢铁厂坐落于墨西哥东北部的重要工业基地蒙得勒（Monterrey）市工业区，系希尔沙公司下设的石油化工、合成纤维、食品加工、汽车铝材、电话通讯、钢铁冶金等子公司之一，隶属阿尔法集团（Alfa Group）。该厂始建于 1942 年，现年产 150 万 t 线、棒、管、板材等冷、热轧材，并具有矿石和直接还原铁（DRI）生产厂。直至 1994 年底，板带材全是采用 5t 钢锭经常规轧制工艺流程轧成最大尺寸 1090mm 宽的热轧板，经酸洗、清洗、精整再冷轧。墨西哥全国钢产量为 1200 万 t/a，希尔沙是其第二大钢铁厂，具有举足轻重的地位。

1991 年，该厂设想扩建，当时曾将传统板坯连铸机与薄板坯连铸机加以比较，计算投资回收率的同时，又对美国纽柯钢厂的薄板坯带卷进行测试、检验、评估。1992 年 12 月果断决策，选用西马克公司的 CSP 生产线来实现他们发展连铸工程的计划。仅经过 19

个月的施工期，投资 3.35 亿美元，在 1996 年 2 月，这条包括熔炼、浇铸和轧制的新车间便正式投产，热试几天后，生产出高质量的热轧带卷。

希尔沙钢厂的生产能力为 75 万 t/a，职工 240 人。其主要装备及工艺参数详见表 9－9－7，车间平面布置见图 9－9－27。希尔沙钢厂 CSP 生产线布置及有关参数见图 9－9－28。

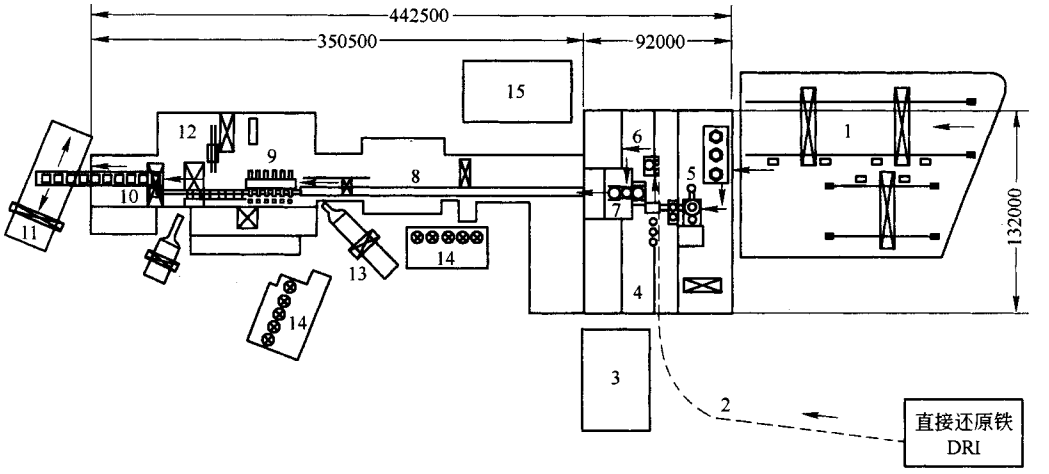


图 9－9－27　希尔沙钢厂 CSP 生产线平面布置

1—废钢料厂；2—直接还原铁输送管道；3—烟尘收集；4—渣场；5—电弧炉；6—钢包炉；7—CSP 连铸机；8—CSP 辊底式加热炉；9—CSP 轧机；10—卷取；11—热轧卷库存区；12—轧辊修磨车间；13—氧化铁皮坑；14—水处理车间；15—主要产品存放区

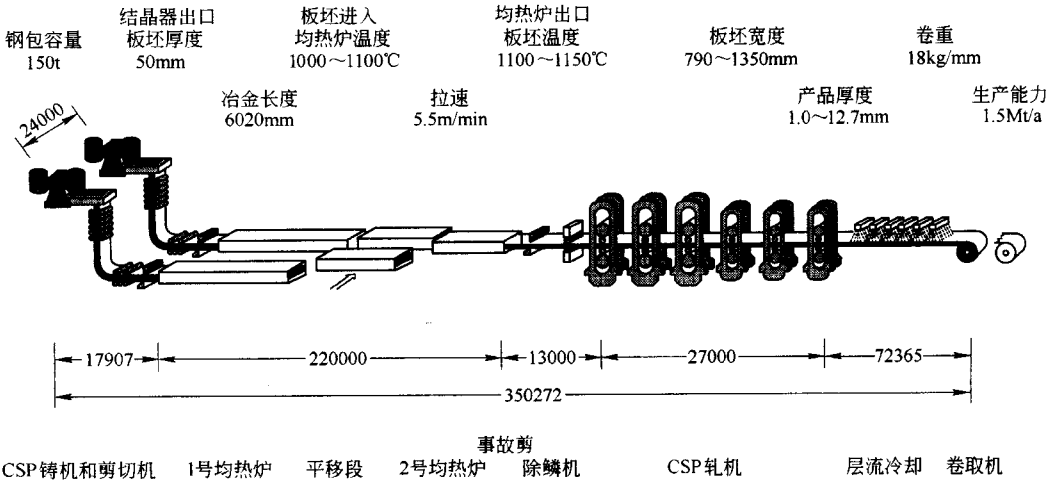


图 9－9－28　希尔沙钢厂 CSP 生产线布置及有关参数

表 9－9－7　希尔沙钢厂主要工艺技术参数

熔炼车间	电弧炉	1(直流)
	钢包炉	1
	真空脱气装置	1
	容　量	150t
CSP 铸机	冶炼周期	65min
	钢　种	碳钢,普通结构钢和深冲钢,HSLA 钢,硅钢
	流　数	1
	薄板坯厚度	50mm
	薄板坯宽度	790～1350mm
	钢包支撑方式	钢包回转台
	中间罐容量	28t
	结晶器长度	1100mm
	拉坯速度	2.8～5.5m/min
	冶金长度	6020mm
	引锭杆	刚性引锭杆从地下立式插入和拉出
	引锭系统	三点牵引辊装置
	弧形半径	6020mm
	拉坯矫直机	三辊拉矫装置
	剪切方式	摆动型机械剪
	薄板坯长度	47m
CSP 加热炉	供货商	布瑞克蒙特厂
	长　度	220m
	燃　料	天然气
CSP 精轧机	事故剪	液压杠杆式水平飞剪
	除　鳞	高压水除鳞
	轧　机	6 机架
	带卷厚度	1.0～12.7mm AISI 1004,最大宽度 1200mm
	带卷宽度	790～1350mm
	卷外径	1000～1950mm
	卷内径	760mm
	卷　重	20t,18kg/mm
	工作辊直径	790mm(F_1～F_3) 500mm(F_4～F_6)
	工作辊辊身长度	1700mm(CVC 技术)
	支撑辊直径	1350mm(F_1～F_3),1250mm(F_4～F_6)
	支撑辊辊身长度	1500mm
	轧制力	30MN(F_1～F_3),25MN(F_4～F_6)
	带卷冷却方式	层流冷却
	卷取机	1
	卷取类型	地下,分级控制

该 CSP 生产线自投产以来，热轧带卷产量逐月上升，截至 1995 年 10 月 31 日已达 164.502 万 t，其中有的月份中有半个月的维修时间。与纽柯公司克拉福兹维莱厂相比，希尔沙钢厂 CSP 生产线投产后产量上升速度高于纽柯厂，达产期较短。

1995 年 12 月 9 日，该生产线已轧出 1mm 厚的热轧卷，表面质量良好。投产以来还先后轧成花纹表面的板材。

希尔沙钢厂的 CSP 生产线工艺路线的主要特点表现在：

①DC 炉的原料 55% 是预热废钢，废钢管理有专门机构负责，预热装置是福施（Fuchs）公司提供，其余 45% 为直接还原铁，通过传输系统直接入炉，并可在线调节加入量，可确保 55 ~ 65min 内顺利完成熔化目标，出钢温度为 1610 ~ 1615℃，钢水温度较理想且成分准确，能耗低，钢水纯净。

②LF 炉在线处理钢水约 30min，经加合金微调成分、吹氩、调温，将符合温度（约 1585 ~ 1590℃）和成分要求的钢水，按节奏送至连铸机。为进一步提高钢水纯净度，现所有的钢种均予以钙处理，并在出钢过程中通过喂丝添加铝钙基的低熔点块状脱氧剂。

③炉前设置自动化学分析系统和自动跟踪白云石等耐材及炉子热状态等系统，随时按目标调整工艺路线。

④连铸机采用漏斗型结晶器，可在线调宽，使用长水口保护渣浇铸，液位控制仍为^{60}Co，最大拉速 5.5m/min。二冷水冷却，喷嘴个数也可在线调节，结晶器和二冷扇形段均可快速更换，便于事故处理。浇铸周期为 60 ~ 70min。开浇以来，前 770 炉中仅漏钢 16 次，1995 年 8 月漏钢率为 0.3%。最高连浇 16 炉，平均 8 炉，保证了较高的作业率。

⑤加热系统是燃烧天然气的 220m 辊底式加热炉，入炉坯温 950 ~ 1050℃，经 203 个内水冷却辊、7 个加热区，出口坯温升至 1100℃。该炉具有同步燃烧控制和热模拟跟踪控制装置。

⑥出炉后的薄板坯经液压事故飞剪和随后的高压水（48MPa）除鳞装置，进入 6 机架精轧机，$F_1 \sim F_3$ 工作辊直径 $\phi = 790$mm，$F_4 \sim F_6$ 工作辊直径 $\phi = 500$mm，均装有 CVC 装置，可灵活调节工作辊，实现板形、平整度、防折叠等调控，确保产品几何尺寸和公差符合要求。轧机驱动系统由西门子公司提供。

⑦旋转台和层流冷却系统将带钢与传送辊紧密接触，以保证冷却效果，经由地下卷取完成热带卷取。

在产品库中堆放的热轧带卷表面质量优良，有碳钢、低合金钢、硅钢等不同品种，其中 44% 以热轧带卷出售，26% 以酸浸热轧卷、10% 以冷轧卷、20% 以退火冷轧卷出售。

希尔沙钢厂 CSP 生产线的成功是发展中国家引进先进技术武装自己的范例，墨西哥

的冶金工作者提出了不同于纽柯钢厂的‘既要利润，又要技术’的明确口号，投产短短九个月来取得显著的经济效益和宝贵的技术经验。并已向日本住友、法国尤西诺尔·沙西洛尔公司（Usinor SacilorS.A.）和德国蒂森公司出口热轧带卷。虽已能轧出 1mm 的热轧卷，仍以 1.2mm 厚度为主，现正在完善较薄尺寸带卷的工艺。希尔沙钢厂在预留位置扩建了第二流 CSP 生产线，从而组成的热连轧厂的生产能力达到 150 万 t/a。再增设真空处理装置，生产超低碳钢卷，其中 20% 是 0.9～1.01mm 的产品，最终分享传统的冷轧带卷市场。

5）美国戈拉廷厂 CSP 生产线

戈拉廷钢厂（Gallatin Steel）坐落在美国肯塔基州与俄亥俄州、印第安纳州的交界处，距辛辛那提市 100 公里左右。该厂注意到纽柯公司引进 CSP 生产线后热轧带卷产品销售良好后，迅速做出决定，于 1995 年投产一条新的 CSP 生产线，从设计到建成仅用了 20 个月。此地建厂原因在于交通运输方便，靠近最终用户，且肯州废钢充足、电力充足，并给予建厂优惠。

戈拉廷厂主生产线的平面布置见图 9－9－29，其 CSP 生产线布置及有关参数见图 9－9－30。主要装备有一台双壳直流电炉，两炉壳共用一个电源，炉容量 230t（GHH 公司设计，NKK 公司提供设备），冶炼周期为 70min。采用 LF 钢包炉精炼钢水，钢包容量 175t，可进行温度、成分控制、充当缓冲器。现仅建有 1 机 1 流 CSP 铸机，预留了第二套冶炼—精炼—铸机的位置。年生产能力为 100 万 t，铸坯断面为 50mm×（1260～1590）mm，拉速达 5.5m/min，一般连浇 5～6 炉，每炉浇铸时间约 65～70min。该铸机与黑克曼厂铸机区别有两点：①扇形段由 6m 加长至 8m，为提高拉速做了准备；②铸机采用液芯压下和电磁闸装置，对改善铸坯质量、减薄产品厚度均有好处。均热炉预留了摇摆装置（见图 9－9－31），待第二流建成后即可使用。炉子后面备有事故剪，静态下可剪切。剪后为新一代的高压水除鳞机。现精轧机为 5 机架，预留了第 6 架，并在第一机架前增设了立辊轧机，可轧边 10mm，立辊能消除边部因快速冷却出现的边部裂纹缺陷，使用后效果较好。5 机架生产的热轧带卷为 2.1mm，6 机架投入生产后可轧 1.5mm 的产品或更薄的产品，目前热轧带卷为普通低碳钢（C0.06%）、含锰、铌等建筑用扁平材。

戈拉廷钢厂的连铸机和精轧机均是黑克曼厂的翻版，但由于炼钢区布置不好，所以在上第二流时要进行相应改造。

6）韩宝钢厂 CSP 生产线

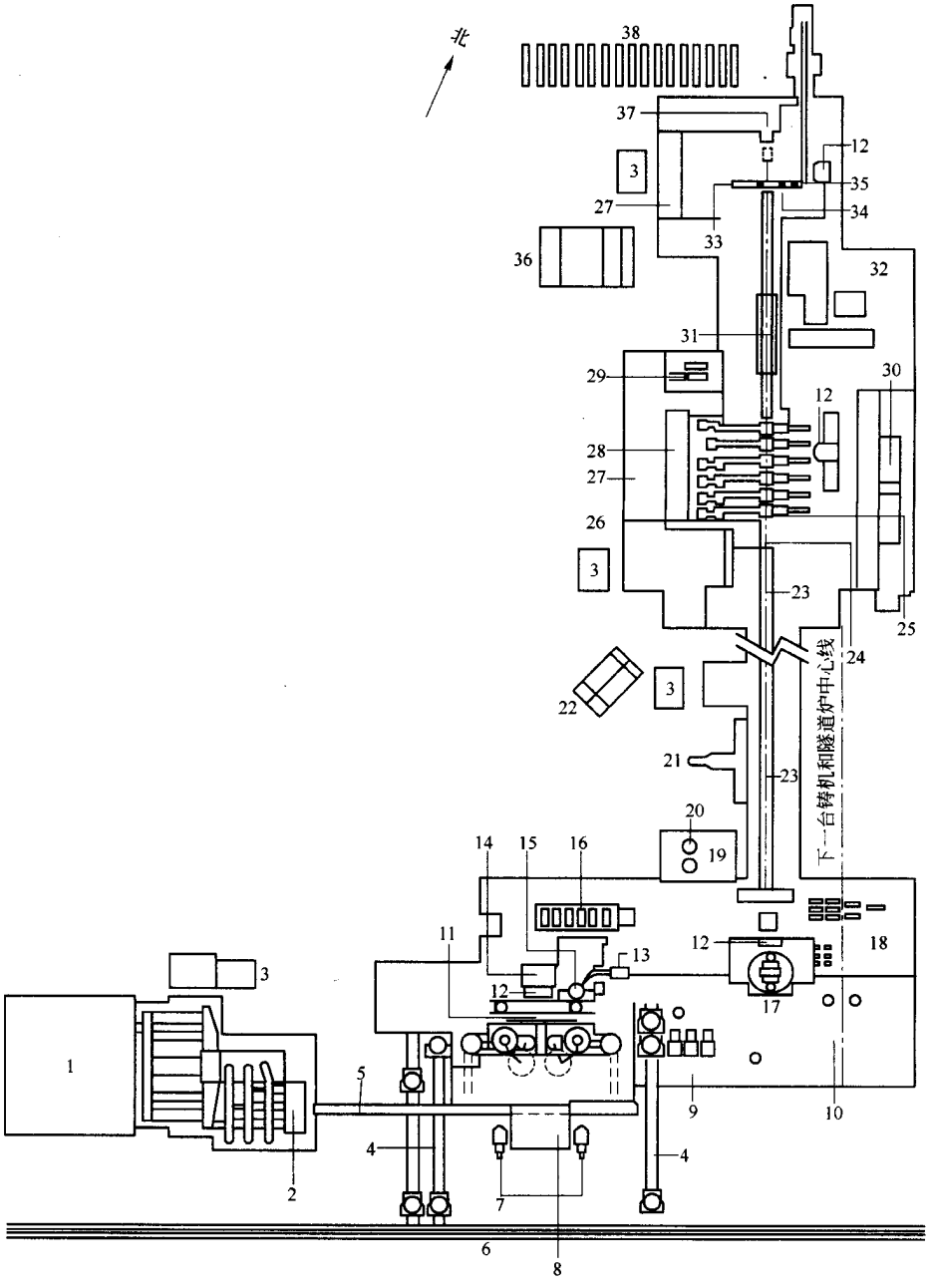


图 9－9－29　戈拉廷钢厂主生产线的平面布置

1—集尘室；2—电集尘器；3—变电站；4—料篮车；5—废气炉尘；6—废钢场；7—运渣机；8—变压器房；9—钢包预热站；10—钢包准备区；11—炉壳；12—控制台；13—补加合金系统；14—化学分析室；15—钢包冶金装置；16—中间罐区；17—连铸机；18—结晶器车间；19—泵房；20—结晶器水箱；21—换热器烟道；22—热轧机组氧化铁皮坑；23—隧道炉；24—事故剪；25—剪边机；26—除鳞箱；27—电气室；28—热轧机组；29—液压和润滑系统；30—轧钢车间；31—层流冷却；32—轧钢库；33—No.1 卷取机；34—打捆机；35—打号机；36—层流冷却氧化铁皮坑；37—No.2 卷取机(待上)；38—钢卷库

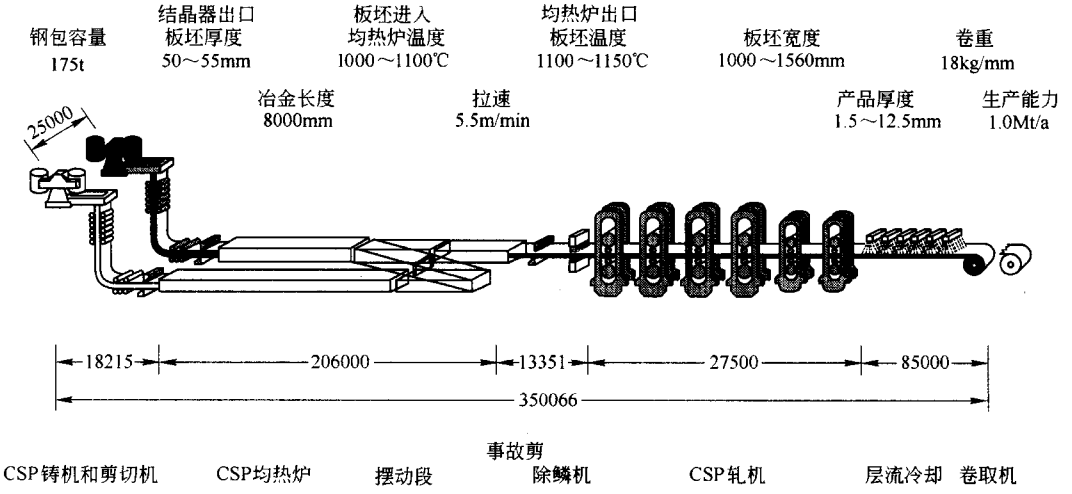


图 9－9－30　戈拉廷钢厂 CSP 生产线布置及有关参数

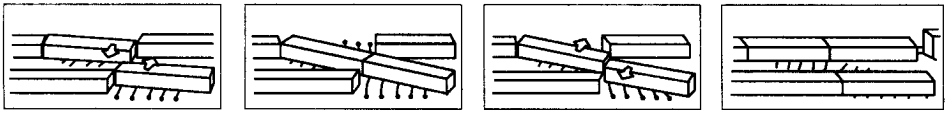


图 9－9－31　戈拉廷钢厂均热炉摇摆装置

韩国的韩宝(Hanbo)钢厂于 1995 年投产的 CSP 生产线,先是单流,后又上了双流。韩宝钢厂共投资 300 亿美元建成的包括 NKK 电炉(DC)直至连铸连轧、冷轧等全套生产设备,规模庞大,因钢水质量不好,产量一直上不去。1996 年该公司由于涉嫌经济问题,已宣告破产,暂由浦项(Posco)钢铁公司接管,银行担保,暂时停产。

韩宝钢厂基本技术参数见表 9－9－8,CSP 生产线布置及有关参数见图 9－9－32。

表 9－9－8　韩宝钢厂炼钢车间和 CSP 生产线基本技术参数

炼钢车间	电弧炉	2(DC)
	钢包炉	2
	真空脱气站	(1)
	料　重	150t
	冶炼周期	60min
	钢　种	主要是碳钢和结构钢

CSP 铸机	铸机类型	立弯式铸机
	流　数	2
	薄板坯厚度	50mm
	薄板坯宽度	900～1560mm
	钢包转换	钢包回转台
	中间包容量	28t
	结晶器长度	1100mm
	拉坯速度	最大 5.5m/min
	冶金长度	6020mm
	引锭杆	刚性引锭杆，上装式，从底部拉出
	引锭杆系统	3 辊牵引
	弯曲半径	3000mm
	拉矫机	4 点矫直
	薄板剪切	摆动式剪切机
	薄板长度	47.8m
CSP 加热炉	供应商	布里克蒙德(Bricmont)
	长　度	170m
	燃　料	天然气
CSP 轧机	事故剪切	肘节杆剪切，液压传动
	除鳞机	高压水除鳞(20～40MPa)
	轧机组	6 机架轧机
	带厚度	1.6～25mm
	带宽度	900～1560mm
	带卷外径	1000～1950mm
	带卷内径	760mm
	带卷重	最大 28t，18kg/mm
	工作辊直径	800/730mm(F_1～F_3)，600/546mm(F_4～F_6)
	工作辊身长度	1950mm(CVC 技术)
	支撑辊直径	1450/1350mm(F_1～F_6)
	支撑辊身长度	1750mm
	轧制分离力	40MN(F_1～F_3)，32MN(F_4～F_6)
	带卷冷却方式	层流冷却
	卷取机	2
	卷取机类型	分步控制式地下卷取机

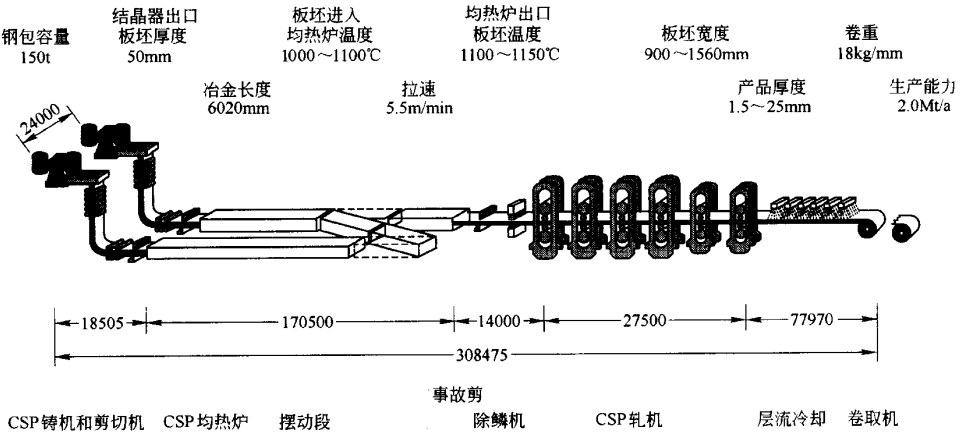


图 9－9－32　韩宝钢厂 CSP 生产线布置及有关参数

7)美国第纳米克斯钢厂 CSP 生产线

美国第纳米克斯钢厂(Stol Dynamics Inc.),简称 SDI 厂,又称美国动力钢厂,位于印第安纳州,是美国最年轻的钢铁厂,1994 年 10 月建厂,1996 年 1 月 2 日投产,当时生产能力为 125 万 t/a。设有 1 台单供电系统、容量为 150t 的双壳电炉,设计年产钢水 150 万 t,两台带电磁搅拌和除硫功能的钢包炉、1 台 CSP 铸机、隧道式加热炉、6 机架的热精轧机。投产后产品销售很好,后再建电炉一座、CSF 铸机一套、第 7 机架,第二流生产线于 1998 年 5 月投产,使生产能力达到 220 万 t/a。为给电炉提供高质量的原料,1997 年 6 月已动工兴建以煤炭为基础的直接还原铁生产车间,产量约 50 万～70 万 t/a 球、块状直接还原铁(DRI);同时还要建一座 100 万 t/a 的冷轧厂、140 万 t/a 的酸洗线、两条热镀锌线、退火线及平整线等,届时该厂可直接向汽车制造商提供钢板,其中 25%～30%将用在严格的产品中。

第纳米克斯钢厂的平面布置见图 9－9－33,其 CSP 生产线布置及有关参数见图 9－9－34。铸坯尺寸为 50mm×(1000～1560)mm,最大拉速为 7.5m/min,热轧带卷规格为 1.2mm×1240mm。使用的浸入式长水口为加拿大一公司的专利产品,能保证钢水液面平稳,对改善铸坯质量有利。液芯压下技术和电磁闸均在第二流铸机上后采用。

该厂最大特点是投资少(2.75 亿美元)、见效快(14 个月建成,投产 6 个月盈利),产品销路好、成本低(240～250 美元/t)、人员少(270 人)。

8)美国阿克梅金属里弗代尔厂 CSP 生产线

阿克梅(ACM)厂是美国最小的钢铁联合企业,年产生铁 120 万 t、钢 90 万 t。高炉、焦化、烧结在芝加哥厂区,炼钢、轧钢在里弗代尔厂区。里弗代尔厂有 2 座 75t 氧气转炉,

另设有初轧机、方坯轧机、窄带钢热轧机和冷轧机等设备。该厂是第一家以转炉配薄板坯连铸连轧的工厂，投资 3.64 亿美元，27 个月建成了 CSP 生产线，取代了原有模铸、初轧、钢坯轧机、热轧机等，于 1996 年第三季度投产，1997 年达产。

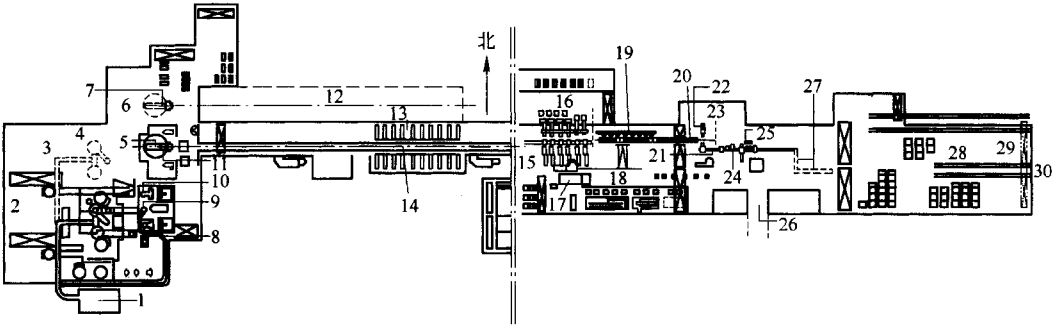


图 9－9－33　第纳米克斯钢厂 CSP 生产线平面布置

1—布袋收尘室；2—铸钢跨；3—双壳电炉；4—电炉跨；5—回转台；6—铁水跨；7—预留 2 号连铸机；8—1 号钢包精炼炉；9—钢包吹氩搅拌；10—2 号钢包精炼炉；11—1 号连铸机；12—2 号隧道式加热炉；13—待建竖炉；14—1 号隧道式加热炉；15—剪切机；16—预留轧机机架；17—精轧机；18—轧制车间；19—层流喷水冷却；20—输出辊道；21—传送机；22—1 号卷取机；23—2 号卷取机；24—升降台；25—轧卷捆扎；26—酸洗线进口；27—步进梁式轧卷运输机(预留)；28—轧卷堆存区；29—装货区；30—卡车停放区

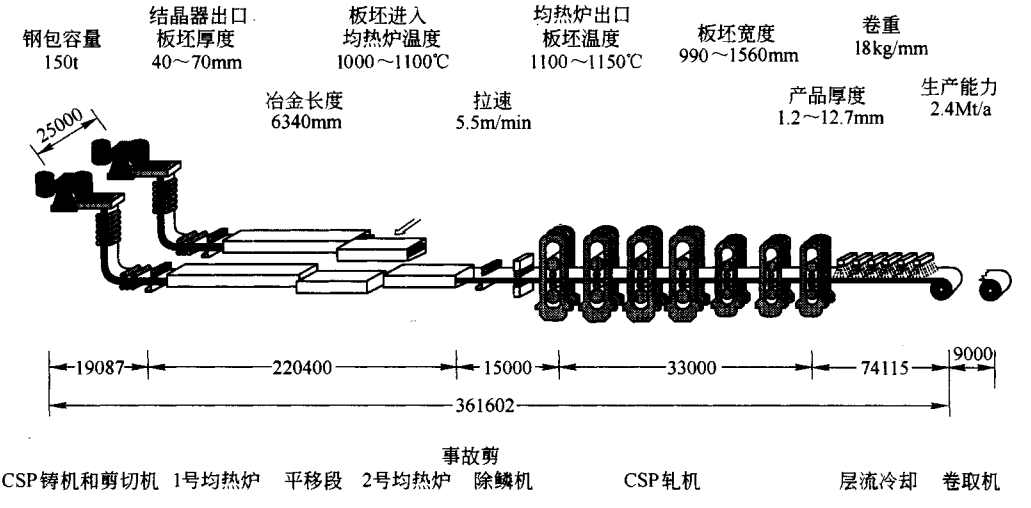


图 9－9－34　第纳米克斯钢厂 CSP 生产线布置及有关参数

阿克梅厂 CSP 生产线布置及有关参数见图 9－9－35，因钢水需近 1 公里长的运输，增设了一座带电加热的 91t 钢包炉，以保证钢水成分和温度满足薄板坯连铸连轧的要求。CSP 铸机结晶器断面尺寸为 50mm×1524mm，带有电磁闸，铸坯出结晶器下口经液芯压下、气雾冷却、均热后进入 7 架精轧机，精轧机全部采用液压压下、液压弯辊和 CVC 板形控制，最终轧成(1.25～12.7)mm×(900～1560)mm、卷重 25～30t 的带卷。该厂可生产碳素钢及低合金钢、高碳钢(C0.9%)、高强度钢、工具钢等钢种，产品涉及面广，甚至包括卷尺用热处理钢、刀具用钢和农业用钢等，其中高碳钢种占 50%(C0.50%～1.0%)。阿克梅厂的实践证明，转炉钢水比 100%用废钢的电炉钢水质量好，同于用 50%DRI 的电炉钢水，钢水质量好保证了产品质量，7 个机架的使用可生产出极薄的高强度纯净薄板。以往的 CSP 生产线均是生产含碳量 0.5%以下的低碳钢，阿克梅的成功无疑是对薄板坯连铸连轧工艺的新突破，极有力地证明氧气转炉完全适应薄板坯连铸连轧工艺的要求，它将对该技术的发展起到推进的作用。

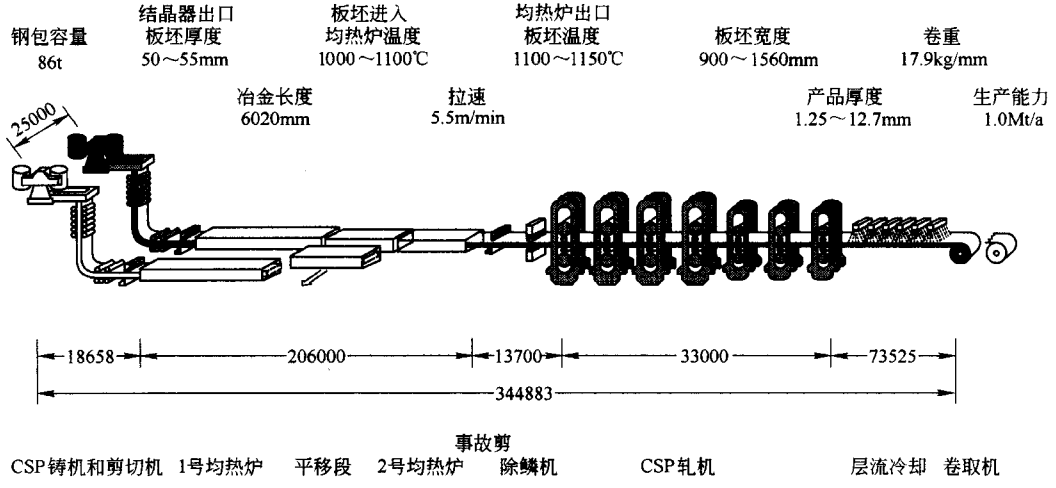


图 9－9－35　阿克梅厂 CSP 生产线布置及有关参数

该厂决定再建一座电炉，增加第二流 CSP 铸机和均热炉，扩大生产能力到 200 万 t/a。工艺流程为：

高炉(铁水 150 万 t/a)→转炉(LD，86t×2)→钢包精炼炉(LF，86t×2)→CSP 铸机→7 机架精轧机。

9)西班牙比斯卡亚钢铁联合公司 CSP 生产线

比斯卡亚是西班牙北部一个著名的海湾，ACB 厂(Aceria Compacta de Bizkaia)是坐落该地的紧凑式联合小型钢厂。该厂建成了欧洲第一套短流程的 CSP 生产线。原有的高

炉、转炉、厚板连铸和热轧设备全部停产，生产线于 1996 年 10 月投产，技术参数见表 9－9－9。由于欧共体内部限产，1998 年前只能生产 90 万～93 万 t/a。生产的低碳钢热轧带卷经镀锌后出售，也开始轧 1.15mm 的产品，第二流于 2003 年 2 月建成。其产品种类见表 9－9－10。

表 9－9－9　西班牙 ACB 厂 CSP 生产线技术参数

炼钢车间	电弧炉	2
	钢包炉	2
	真空脱气站	(1)
	料　重	132t
	冶炼周期	90min
	钢　种	碳钢和结构钢
CSP 铸机	类　型	立弯式铸机
	流　数	2
	薄板坯厚度	50～60mm
	薄板坯宽度	790～1560mm
	钢包转换	钢包回转台
	中间罐容量	28t
	结晶器长度	1100mm
	拉坯速度	2.8～5.5m/min(53mm 板厚)，将来 6m/min
		6.5m/min(50mm 板厚)，将来 6.9m/min
	冶金长度	6970mm
	引锭杆	刚性引锭杆，上装式，从底部拉出
	弯曲半径	3000mm
	拉矫机	4 点矫直
	薄板剪切	摆动式剪切机
	薄板坯长度	最大 50m
CSP 加热炉	供应商	LOI 公司
	长　度	185m
	燃　料	天然气

CSP 轧机	事故剪切	肘节杆剪切,液压传动
	除鳞机	高压水除鳞(20～40MPa)
	轧机组	6 机架轧机
	带厚度	1.5～12.7mm
	带宽度	790～1560mm
	带卷外径	1000～2000mm
	带卷内径	760mm
	带卷重	最大 28t,20kg/mm
	工作辊直径	800/730mm(F_1～F_4),600/545mm(F_5～F_6)
	工作辊身长度	1950mm(CVC 技术)
	支撑辊直径	1500/1350mm(F_1～F_4),1450/1350mm(F_5～F_6)
	支撑辊身长度	1750mm
	轧制分离力	40MN(F_1～F_4),32MN(F_5～F_6)
	带卷冷却方式	层流冷却
	冷却组数	8
	卷取机	1
	卷取机类型	分步控制式地下卷取机

表 9－9－10　西班牙比斯卡亚钢铁厂生产的钢种(1994 年 8 月)

规格	德国钢种	碳含量/%	应用	铸速/m·min^{-1}	备注
DIN17162,UNE36130,JIS3302		≤0.05	镀锌钢	5.5	
EN 10163,DIN 1623,JIS3141(SPCC)	FePO1,St12,St13	≤0.05	结构钢	5.5	冷轧、拉拔
EN 10163,DIN 1623,JIS3141(SPCEN)	FePO4,St14	≤0.04	结构钢	5.5	冷轧、深冲
EN 10111,DIN 1614,JIS 3131(SPHD)	DD11,StW22	≤0.05	结构钢、管	5.5	冷轧、深冲
EN 10111,DIN 1614,JIS 3131(SPHE)	DD12,DD13,StW23,StW24	≤0.05	结构钢	5.5	冷轧、深冲
EN 10025,DIN 17100,JIS3106	Fe360 St37.3	0.06～0.08	结构钢	5.5	热轧
EN 10025,DIN 17100,JIS 3106	Fe430 St44.3	0.15～0.17	结构钢	4.5	热轧

规格	德国钢种	碳含量/%	应用	铸速/m·min^{-1}	备注
EN 10025，DIN 17100，JIS3106(BSM53B)	Fe510St52.3	0.15～0.17	结构钢	4.5	热轧
DIN 17119，SEW087	Corten A，Corten B	0.06～0.08	结构钢	5.5	抗大气腐蚀钢
UNE 36122/36123(Spain)，AFNOR36203，ASTM 607		0.05～0.08	结构钢	4.5	微合金钢
高碳钢		0.43～0.48	结构钢	4.5	耐磨钢

ACB厂 CSP 生产线布置及有关参数见图 9－9－36。

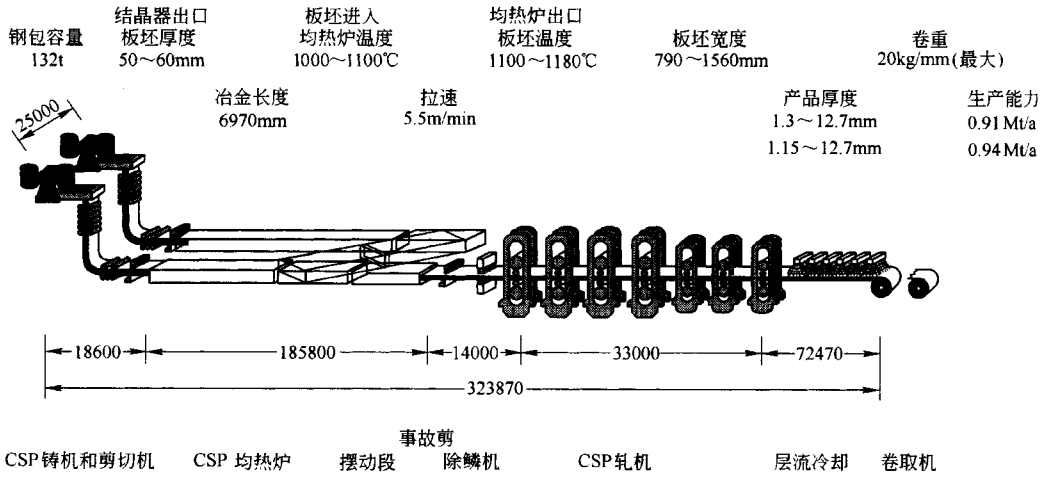


图 9－9－36　ACB厂 CSP 生产线布置及有关参数

10)美国的伯克利钢厂 CSP 生产线

伯克利钢厂位于美国南卡罗莱纳州，为纽柯公司于 1996 年 10 月投产的一条 CSP 生产线，又称纽柯Ⅲ厂。当时该生产线为单流，预留了第 2 流，第 2 流于 2000 年 7 月投产。该机组冶金长度为 8m，这为提高拉速做了准备，浇铸厚度为 50～60mm 的薄板坯最大拉速可达 6.5m/min。精轧机为 6 机架，可生产轧 1.37mm 的热轧带卷，供汽车用板，年生产能力达 240 万 t。该厂产量很高，生产经验丰富。

伯克利钢厂 CSP 生产线布置及有关参数见图 9－9－37。

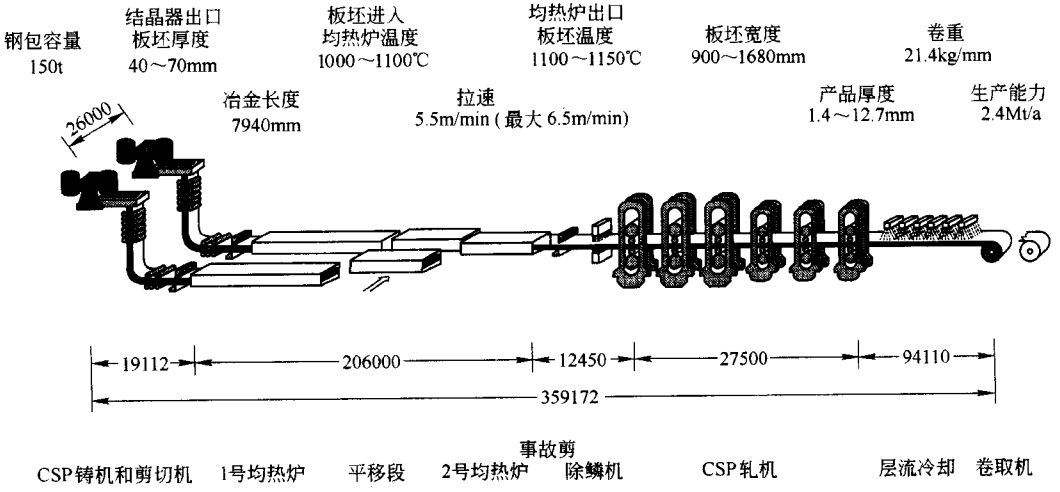


图 9－9－37　伯克利钢厂 CSP 生产线布置及有关参数

11）**泰国的乔恩布日 NSM 钢厂 CSP 生产线**

泰国 NSM 钢厂 CSP 生产线布置及有关参数见图 9－9－38。该厂设有一台 180t 电炉、两座钢包炉，第一期只有一台 CSP 薄板坯连铸机，第二期再增加一台。出结晶器时铸坯厚度为 60mm，采用带液芯铸轧技术后可获得厚度为 50mm、宽为 1220～1680mm 的薄板坯。铸机冶金长度为 7.94m、拉速为 2.8～5.5m/min，当采用液芯铸轧技术时最大拉速可达 6.5m/min。CSP 精轧机组设有 6 机架，年生产 100 万～114 万 t 热轧带卷，其最小厚度为 1.2mm。

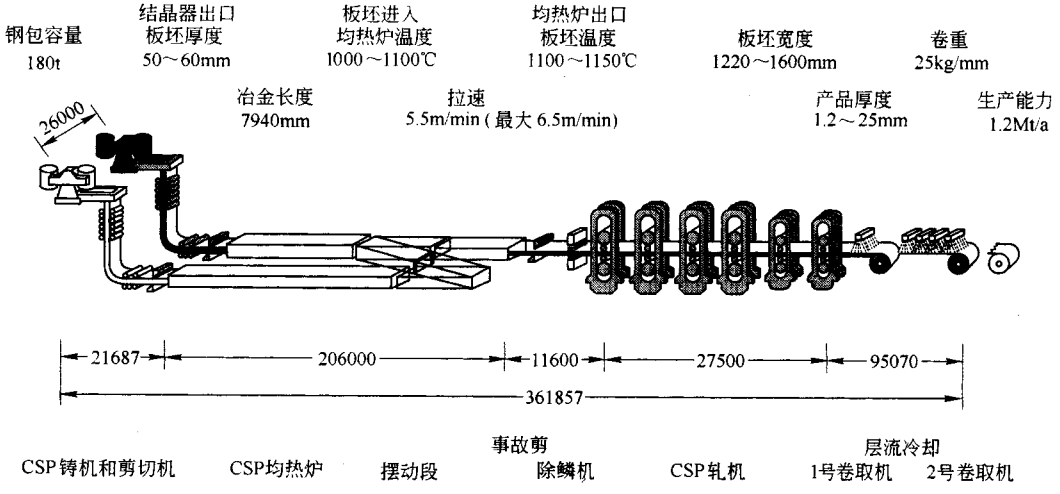


图 9－9－38　泰国 NSM 钢厂 CSP 生产线布置及有关参数

12)德国蒂森钢铁厂 CSP 生产线

德国蒂森(Thyssen)钢铁厂经多年讨论了各种生产薄板坯的方案后,决定上一套 CSP 生产线来生产非常薄的热轧带卷,该生产线见图 9－9－39。合同于 1997 年 3 月生效,1999 年 4 月 2 日上午 10 点 15 分轧出第一卷热轧带卷。蒂森钢铁厂炼钢厂有氧气转炉两座,容量 365t,配有 LF 钢包炉一台,容量 380t。新建两流的薄板坯连铸机,其冶金长度为 9m(和我国邯郸的 CSP 铸机相同),结晶器上口断面为 63mm×(900～1600)mm,出结晶器下口铸坯厚度为 48～63mm。浇铸周期约 2h。铸坯经长达 240m 的辊底式加热炉(采用摆动式)进入 7 机架的精轧机,低碳钢可由 63mm 轧成 1mm 的薄产品,高碳钢可由 48mm 轧成小于 1mm 的更薄带卷。该生产线基本上只轧 1.0～3.0mm 的薄规格热轧产品,年产量达 240 万 t。

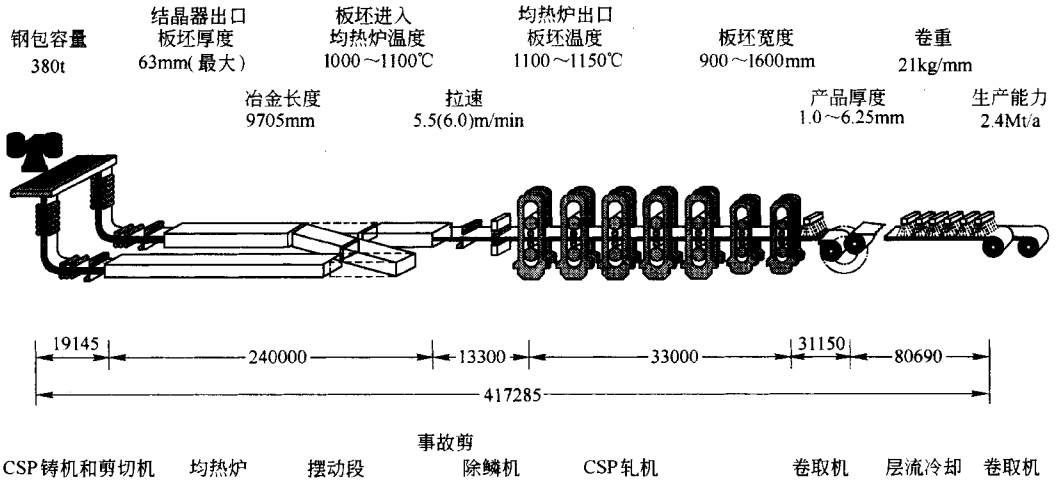


图 9－9－39　德国蒂森钢厂 CSP 生产线布置及有关参数

这套机组特点是:CSP 生产线和长流程相接,年产量高,可充分发挥轧机的生产能力。7 机架的精轧机布置满足了轧制较薄产品的需要。另一最大特点是加热炉长达 240m,原因是该条生产线采用了半无头轧制,铸坯入炉前不需要剪切,铸坯很长,出炉后直接入轧机,精轧后再切成定尺,既减少了切头切尾,又为今后生产更薄(0.7mm)的产品创造条件。由于板坯过长,轧后又很薄,精轧机后设有一台配置两个卷筒的卷取机,这是一种专门设计的特殊卷取机,两个卷筒交替作业,当一个卷筒抓紧板坯时,另一卷筒可将板坯卷上平稳通过,且给板卷一个张力作用,使其变得更薄。

7 个精轧机架如何布置才能适应蒂森钢厂的产品要求一直是方案讨论的核心,墨西哥的希尔沙厂是前两架后五架的布置,两组轧机可用不同轧制速度操作,也可以采用前

一架后六架的方式，最后蒂森钢厂决定将 7 个机架连在一起，为串列方案。F_7 机架出口速度达 15～18m/s，薄板坯一次通过精轧，出精轧后进入新设计的卷取机，经层流冷却后，剪切，再由两机架的卷取机卷成成品卷。240m 长的铸坯出炉后进入精轧机的最大问题是不能跑偏，该设计中已充分考虑了这点。

蒂森钢厂选取此方案有两大原因：

①满足产品最高质量水平的要求，既要有良好的表面，又要有致密均匀的内部组织，还要保证高的屈服强度和抗拉强度。

②轧制更薄的产品需要半无头轧制技术，240m 长的薄板坯最后才切断，轧机的布置只能是串列式。

13）荷兰康力斯薄板坯连铸连轧生产线

康力斯（Corus）带钢厂原为霍戈文（Hoogovens）厂，1997 年 10 月在伊莫伊登建立直轧热带厂，利用原有转炉炼钢厂富裕的钢水，通过双模式工艺轧制热带。薄板坯连铸机由原德国曼内斯曼—德马克公司（现并入 SMS－Demag）提供，连轧机由日本三菱公司（现三菱—日立金属机械公司）提供。

新建热带厂技术参数见表 9－9－11。

表 9－9－11　康力斯热带厂技术参数

钢　种	低碳结构钢及微合金化钢
年产量	130 万 t 热轧带卷
热带厚度	0.7～3.0mm
热带宽度	1000～1560mm
卷　重	最大 33t

康力斯热带厂的工艺流程见图 9－9－40。连铸机结晶器出口坯厚为 70mm，拉速达 6m/min，由 7 机架连轧机实现最终带钢厚度的要求。该生产线的浇铸时间约为 40min，轧制时间约为 20min。

该生产线采用双模式（Dual Mode）轧制，也称（半）无头轧制。在隧道炉中只有一块长坯，其重量是带卷重量的数倍，加热后的板坯以轧制速度喂入粗轧机。热带经由紧凑式出带冷床被卷曲机咬入成卷，在卷曲区热带被飞剪剪成合适卷重的长度。隧道炉长度是 310m，最多可放相当于 7 块最大卷重量的薄板坯，因此无头轧制时穿坯次数可减为传统轧制的 1/7 或更少（对小卷重来说）。双模式轧制的特点是提高了宽/厚比。在传统热轧带钢生产的最小带钢厚度为 1.5～2.0mm，如轧更薄规格就要牺牲产量，因为无法靠进一步增加轧制速度来保证更高的小时产量，此外过高的轧制速度会带来带钢的扭曲及带

卷头部飞出、跑偏、甩尾等事故。厚度在 1mm 以下的带钢宽度可达 1250 ~ 1300mm，则其宽厚比可达 1250，通常需要对卷取前出带辊道进行精心设计。

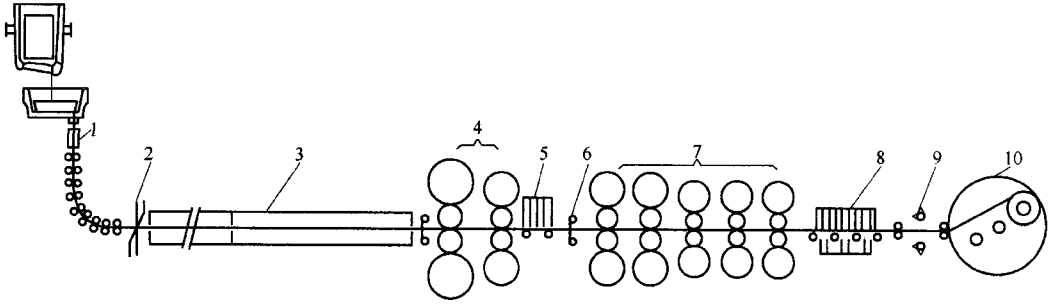


图 9 - 9 - 40　康力斯(霍戈文)热带厂工艺流程图

1—薄板坯连铸机；2—摆剪；3—隧道式加热炉；4—粗轧机组；5—中间冷却；6—二次除鳞机；7—精轧机组；8—超快速冷却；9—飞剪；10—卡诺塞尔卷取机

该生产线可按奥氏体和铁素体轧制分别操作。奥氏体轧制使用 6 ~ 7 机架和 100m 长的层流冷却区和下卷取机；铁素体轧制操作模式中，最后一道精轧必须在 750 ~ 800℃ 之间进行，因此在带钢进入最后一道精轧之前需要调整温度，通常是在第 2 和第 3 机架之间加冷却区，亦即形成 $R_1 \sim R_2 + F_3 \sim F_7$ 的粗轧加精轧格局。卷取温度尽可能高，使带钢进行再结晶，为此要求卷取机尽量靠近最后一道精轧机，减少卷取前的温度损失。两种轧制模式均需要两个卷取站，一个在层流冷却区出口，一个放在轧制线出口附近。两个卷取站都分别安装有飞剪和卡诺塞尔(Carrousel)卷取机(或两个下卷取机)，这样可达到奥氏体轧制操作时，薄带可在仅 8m 的冷床上强化冷却，而当铁素体轧制时则可关闭不用，保证了在有限的长度内尽量减少温度损失而保持带卷的卷取温度。

康力斯热轧带钢生产线自 2000 年春季投产以来，产量不断提高，现每季平均产量为 20 万 t，万吨钢水漏钢率已降至 0.5 次。目前该厂力求生产薄规格产品，截至 2002 年 8 月，37% 的产品规格在 1.8mm 以下，其中 18% 在 1.5mm 以下。1.5mm 以上热带用常规方法一卷一卷地生产，1.5mm 以下的薄规格则用无头轧制操作来生产，通常第一卷控制在 1.5mm 厚，随后的热带卷采用快速变更板厚法轧成更薄规格。目前该厂(半)无头轧制时一块铸坯最多可轧 4 卷。该流程在带钢厚度控制和凸度控制上均有优势。

为生产优质产品，康力斯热带生产线从冶炼洁净钢开始，做了大量技术开发工作：

①改用 H 型中间包，防止钢包渣卷入，有利于夹杂物上浮；

②采用漏斗型结晶器，减少铸坯表面应力及随之产生的裂纹；

③通过电磁闸来控制结晶器内钢水流动；

④应用二次除鳞技术，改善了热带表面质量；

⑤轧机出口处安装一台带钢表面质量控制自动摄像监测系统，保证及时“挑选表面”。

现生产线主要生产的钢种是标准的低碳深冲钢（DD11）和结构板 S235，计划生产更多的钢种，如微合金钢、低合金高强度钢以及镀锌用钢带 DX51D + Z 和 S250GD + Z。康力斯厂拟向生产专门用途带钢产品方向转型，未来面向的市场将是薄规格的热轧带卷直接使用（酸洗后的热轧带卷可以在很多场合毫不逊色于冷轧带钢）或用于热镀锌母板。

14）印度薄板坯连铸连轧生产实践

印度在发展中国家范围内也是产钢大国，粗钢产量 2003 年为 30Mt/a，而国内钢材消费量略高于产量。其中热轧卷/板总产量是 8.34Mt/a。印度于 1998 年引进德国 SMS 公司的薄板坯连铸连轧设备建成了该国第一条近终形连铸连轧生产线——伊斯帕特（Ispat）厂。采用此技术的原因是节约燃料、提高产量、降低成本，能使炼钢厂与轧钢厂直接衔接。

伊斯帕特厂的工艺流程见图 9－9－41，其 CSP 生产线布置及有关参数见图 9－9－42。电炉—薄板坯连铸连轧生产线由高炉/直接还原提供热铁水和 DRI。电炉系双炉壳电炉，钢水经二次精炼浇入薄板坯连铸机，铸坯自隧道式加热炉进热连轧机组，轧后带卷通过层流冷却后由地下卷取机成卷。热轧带卷可送人冷轧和涂层厂进行深加工。

该厂建设分两期，全部完工后年产 300 万 t。

伊斯帕特厂薄板坯连铸连轧生产线的技术特点为：

①采用全套德国 SMS 公司提供的薄板坯连铸连轧装备（CSP）。

②钢水由双炉壳电炉提供，允许铁水、海绵铁和废钢按不同比例混加冶炼，钢水质量有保证，因配加定量热铁水使炼钢吨钢能耗低至 300kW·h，远远小于传统电炉炼钢的 600kW·h。

③最终成品厚度为 1.2mm 的热轧卷，质量良好且规格较薄，为其在一定范围内替代冷轧产品创造了条件。

④突出优势为产量大，为占领市场、增加利润提供了保证。

⑤整条生产线采用二级机、三级机以及 SAP－R/3 自动化系统对全流程进行控制，有效地保持正常运行和质量调控。

经过几年生产实践，伊斯帕特厂的 CSP 生产线取得了显著成果，生产十分稳定，产量也在不断增长，月产量最高曾达 12.1 万 t，这也是目前 CSP 生产线一流所取得的最高月产量。钢的成材率提高了 3%（94%→97%），能耗由 1463MJ/t（350000 kcal/t）下降至 376.2MJ/t（90000kcal/t），热轧卷的生产周期由传统的 8h 减至 30min（从液态钢水到轧出热轧带卷），资金成本指数及轧机磨辊指数均大幅下降（分别为 130→100、150→100）。

该条生产线的第二流现已安装完毕，于 2003 年投产成功。

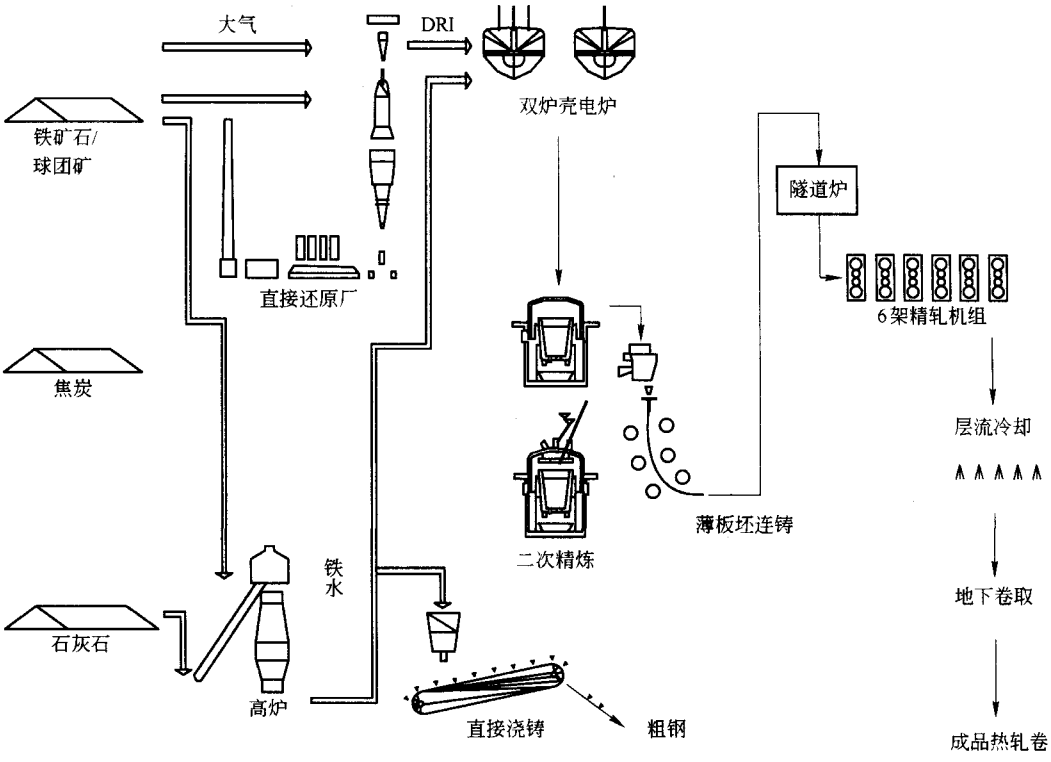


图 9－9－41　伊斯帕特(Ispat)钢铁联合企业生产流程

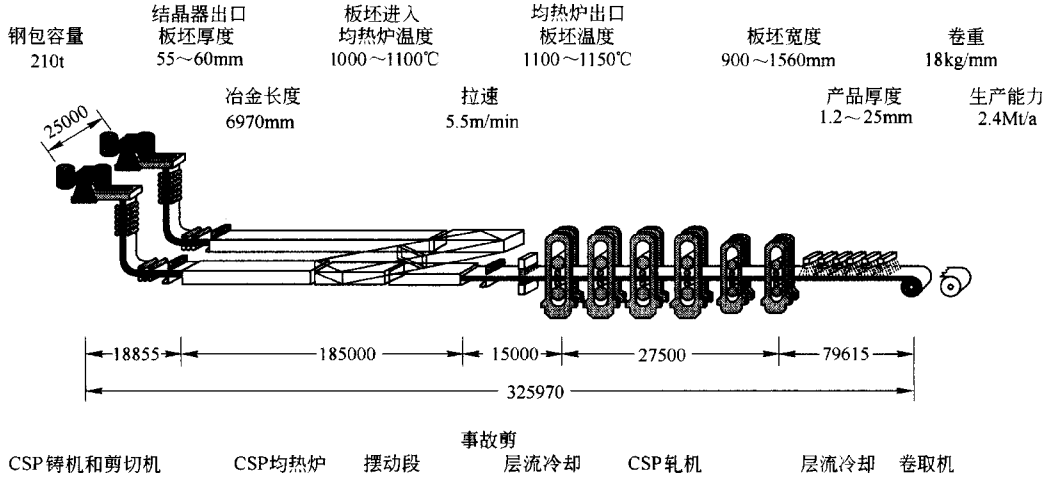


图 9－9－42　印度德罗伊斯帕特厂 CSP 生产线布置及有关参数

15)埃及的亚历山大国立(ANSDK)钢厂 CSP 生产线

埃及的 ANSDK 厂 CSP 生产线布置及有关参数见图 9－9－43。尽管炼钢工序上存在设计上的问题,但现在年产量也达 90 万 t。2003 年 1 月份产钢 77000t。主要产品为 2mm 以下的薄规格钢,其中低于 1.8mm 的产品占整个产量的 75%。大部分产品出口欧洲和美国。

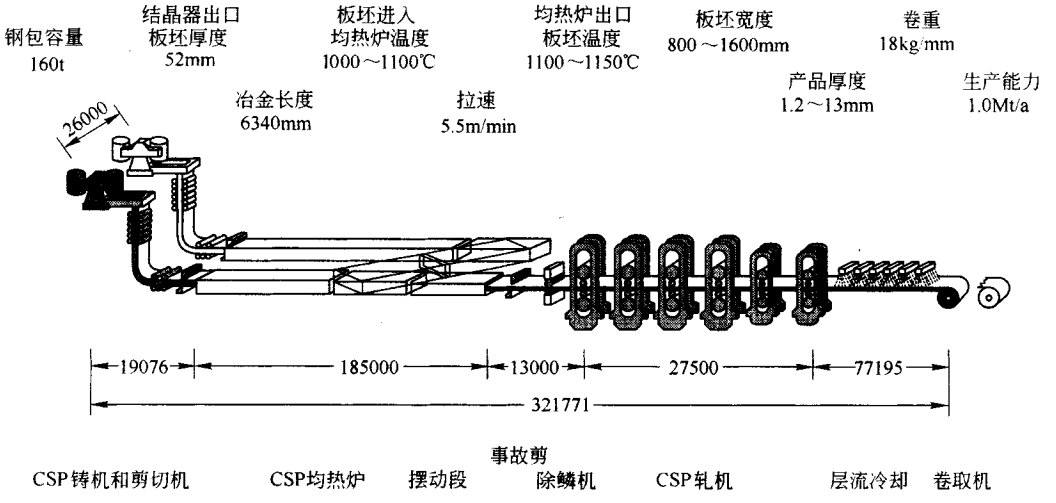


图 9－9－43　埃及 ANSDK 厂 CSP 生产线布置及有关参数

16)第一家生产不锈钢的 CSP 工厂

在纽柯工厂成功地生产出铁素体不锈钢热轧卷后,SMS 公司又向更高的工艺技术迈进,开发新的漏斗型结晶器、浸入式水口、保护渣、电磁闸、短杆式液压振动装置、液位控制装置等一系列新技术,在意大利的 Terni－AST 工厂利用薄板坯和厚板坯的混合轧制新工艺方案,即通过在一架炉卷轧机或一组紧凑式轧机前面的一台 CSP 连铸机以及联合一台厚板坯连铸机和一组常规的热带钢轧机来实现薄板坯和厚板坯的混合轧制。新的 CSP 连铸机安装在现有的热带钢轧机前并通过一座加热炉相连接,形成了一个完整的 CSP 生产线。

第一次浇铸时间是 2001 年 8 月 1 日,生产能力约为 100 万 t/a 奥氏体和铁素体不锈钢以及硅钢(取向和非取向)。2001 年 10 月正式投产,目前月产 60～70mm 连铸坯 3 万 t 左右。最大拉速达 4.5m/min,连浇炉数达 6 炉。厚板坯和薄板坯分别通过步进梁式加热炉和辊底式炉进入热连轧机,混合轧制厚度为 1.5～2mm 的不锈钢卷和高硅钢卷。薄板坯厚度为 63mm,厚板坯厚度 215mm。产品中有需要进行板坯修磨的含钛奥氏体不锈钢 AISI300Ti 系列和部分由常规工艺生产的奥氏体不锈钢 AISI300。而铁素体不锈钢

AISI400 系列全部由薄板坯铸机生产。

17)其他 CSP 生产线

伊朗沙法轧钢和钢管厂 CSP 生产线、马来西亚梅加钢厂 CSP 生产线、印度尼西亚 KS－浦项钢铁公司 CSP 生产线布置及有关参数见图 9－9－44～图 9－9－46。

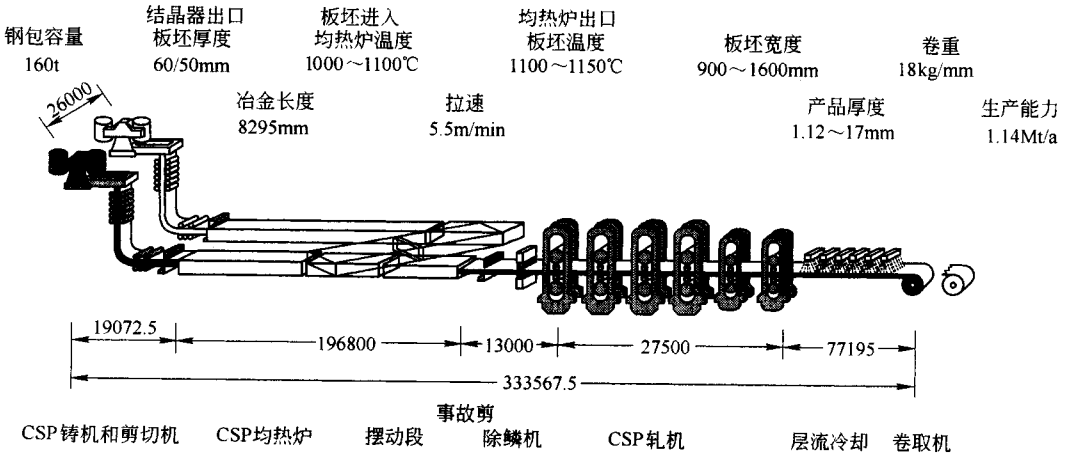


图 9－9－44　伊朗沙法轧钢和钢管厂 CSP 生产线布置及有关参数

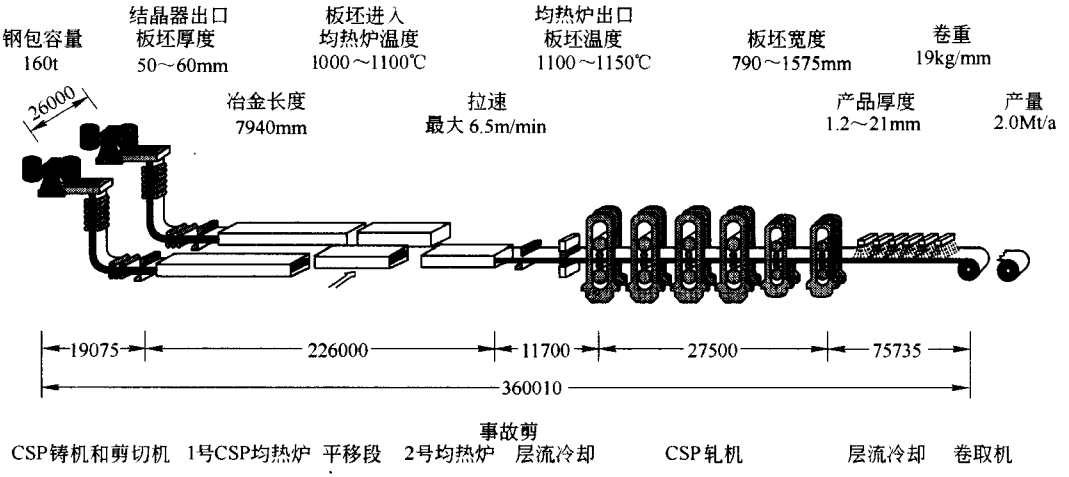


图 9－9－45　马来西亚梅加钢厂 CSP 生产线布置及有关参数

4. 存在问题

CSP 技术自 1989 年在美国纽柯公司实现工业化生产以来，仅仅经历了不到十年的时间，就在美国投产 7 个工厂 9 台铸机，年生产能力达 900 万 t，有些厂均已增设第二台 CSP 铸机，年生产能力将达 1300 万 t。CSP 产品已迅速占领了热轧卷的市场，CSP 技术显

示出极好的前景。

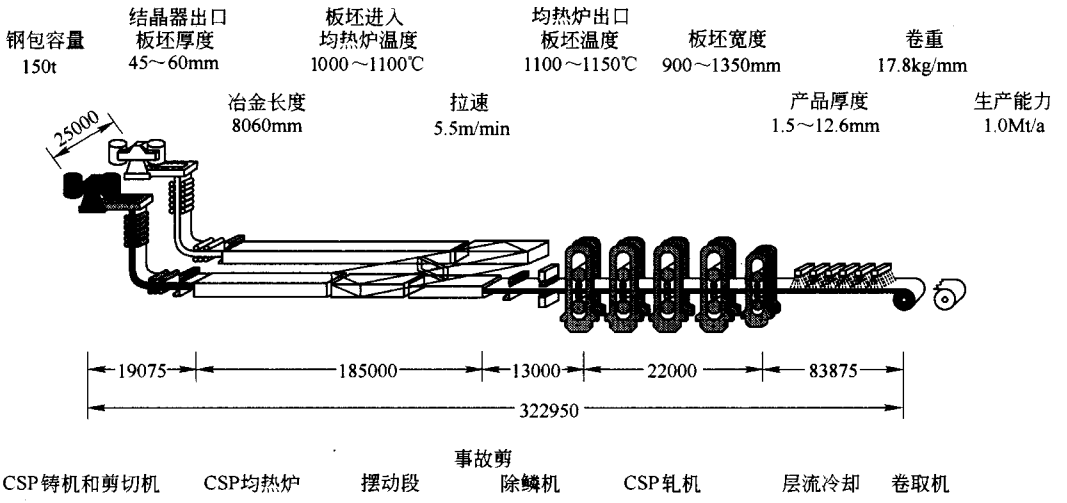


图 9－9－46　印度尼西亚 KS－浦项钢铁公司 CSP 生产线布置及有关参数

在 CSP 生产线投产初期，热轧卷表面质量不尽如人意，CSP 工厂生产的产品只能替代 40% 的热轧卷，产品厚度也只能做到不小于 2.5mm。薄板坯轧出的卷表面常有点状缺陷、钢板表面氧化铁皮较厚，个别还有小裂纹和折皱缺陷。造成上述质量问题的原因一般是因保护渣卷入铸坯表面、氧化铁皮消除不净所致。近年来通过控制结晶器液面和改进结晶器保护渣，有效地防止了保护渣的卷入，从而得以改善。新一代高压水除鳞机的应用、增加精轧机架，减少每道次压下量、提高轧速、降低坯温等，改善了氧化铁皮厚的缺陷。钢板质量不断提高，热轧卷次品率已下降到 2%。

从多条生产线的实践来看，CSP 工艺还存在以下问题有待解决：

(1)原 CSP 铸机均和电炉相连接，截至目前为止，薄板坯连铸每台生产能力仅有 80 万 t/a 左右，浇铸的薄板坯越薄，每流的生产能力就越低。如想提高生产能力可进一步提高拉速，但拉速受多方面限制，拉速达到 8m/min 是目标，为此 CSP 机组仍需改进。

(2) CSP 生产线电炉为冶炼设备时，受废钢质量限制，当含高残余元素时，生产高质量的钢板尚有困难。至于生产不锈钢产品目前也仅限于试浇铁素体不锈钢，其他产品有待开发。

(3)受宽厚比和最小轧制压缩比的冶金学方面的限制，CSP 工艺很难生产出很宽的或较厚的钢板。在此问题上，奥钢联建议结晶器出口薄板坯厚度为 90～100mm 是有一定道理的，各公司也都纷纷加厚了结晶器出口坯厚。

(4) CSP 精轧机类型的选择是其工艺的先决条件，目前 CSP 薄板坯连铸机产品只能

在线热送直接轧制。工业化大批量生产要求热轧机轧出带卷有一定单重，因此薄板坯的规格尺寸必须满足精轧机的要求，一般几十米长，而且薄板坯越薄、越长，也就越易变形。由于 CSP 铸机和精轧机的不可分，铸坯只能热送、在线轧制，铸坯应是无缺陷，且二者生产能力一定要匹配，究竟采用 5 机架还是 6 机架，则不能单纯从投资成本考虑，而更重要的是产品厚度。而且带钢轧机除了热连轧机外，还有炉卷轧机（单架、双架）、行星轧机，轧机类型的选择必须符合产品需求，满足一定的范围和一定的条件。

(5) CSP 生产线均热炉设备仍未定型化，究竟是辊底式还是步进梁式，采用平移式还是摆动装置均需生产实践进一步验证。

(6) CSP 生产线中，铸机和转炉连接的工艺正在探索中，多台连铸机和转炉组合，加上连轧机架合理匹配，是可以达到 240 万 ~ 400 万 t/a 规模的。

二、ISP 工艺

1. ISP 生产工艺的特点

ISP 工艺（Inline Strip Production），即在线热带钢生产工艺，其典型工艺布置见图 9 - 9 - 47。德马克公司早期开发的薄板坯连铸机使用传统的平行板形结晶器，浇出 60mm 左右的铸坯，为此需将浸入式水口做成薄板状，壁厚仅有 10mm。为了与精轧机配合，还开发了液芯铸轧技术。铸坯在二冷段经液芯压下由 60mm 减至 40mm，在全凝固状态下经 3 机架粗轧机轧成 15 ~ 25mm，然后经克日莫那炉（Cremona）卷取、开卷，送至 4 机架精轧机轧为 3mm 或更薄的热带，经层流冷却后卷取。近年来由于薄片形水口寿命低、铸坯表面质量不好等问题，已将结晶器改进为橄榄球形。其上口宽边最大厚度为 60mm + (25 × 2) mm，此形状至出口处仍保留 1.5mm × 2mm 的小鼓肚。薄片形水口壁厚增至 20mm，寿命得到提高。结晶器内保护渣使用状况也得以改善，铸坯质量逐步好转。

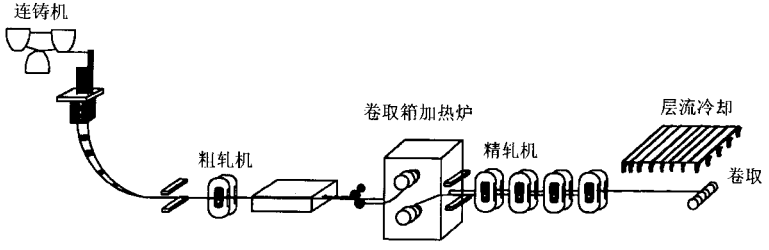


图 9 - 9 - 47　ISP 典型工艺布置图

ISP 生产线的工艺流程可简述为：钢包车→中间罐→薄片状浸入式水口→结晶器→铸轧段→大压下量粗轧机→剪切机→感应加热炉→克日莫那炉→精轧机→层流冷却→

地下卷取。该生产线的特点为：

(1)生产线布置紧凑，不使用长的均热炉。感应加热炉总长度仅 18m。从钢水变成热轧带卷仅需要 20～30min。

(2)采用了液芯压下和固相铸轧技术，可生产厚度为 15～25mm、宽度为 650～1330mm 的薄板坯，如不进精轧机，可作为中板直接出售。

(3)二次冷却采用气雾冷却或干冷(空冷)，有助于生产较薄断面且表面质量要求高的产品。

(4)感应加热炉炉长 18m，铸坯在此区段加热和均热，操作灵活且升温有效。克日莫那炉实际是一双卷取机，通过气体来加热铸坯，同时将长铸坯卷取送至精轧机。该炉可提供 9min 的缓冲时间，但其设备较复杂，维修困难。

(5)早期采用平行板形结晶器限制了浸入式水口的形状，水口通钢量难以加大且寿命低。近年来已将结晶器改为小鼓肚的橄榄球状，薄片形浸入式水口壁厚随之加大，出钢孔也改为底部出钢，寿命显著提高。

(6)流程热量损失小以及采用了铸轧技术和二冷气雾冷却方式等综合因素，决定了 ISP 生产线能耗少。

(7)为配合不锈钢生产，该生产线需配置 MRP 精炼炉。这是一种类似于 AOD 炉的新型转炉，它可有效地完成脱碳保铬、净化钢水等任务。

液芯铸轧是提高薄板坯质量和设备机动性的重要手段，其原理见图 9－9－48。在此工艺中，铸坯的厚度在结晶器以下的扇形段被施以软压下使之逐渐变小。

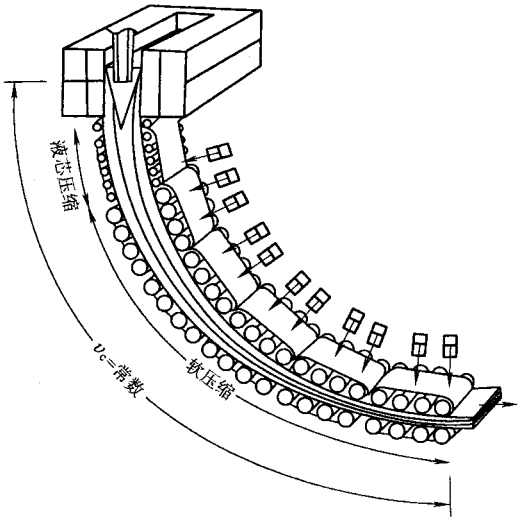


图 9－9－48　ISP 液芯铸轧原理

ISP 工艺是当今世界上多种薄板坯连铸连轧工艺中第一个在工业条件下使用固液铸轧技术的生产工艺,它也被确认为无头轧制工艺。薄板坯离开连铸机和除鳞之后,以浇铸速度进入粗轧机组的第一个机架,轧制速度按 5 步压缩量来决定。液芯和固芯铸轧连续进行,通常结晶器出口处 50mm 厚的铸坯在二冷段经液芯压下完成 20% 左右的变形量,减薄至 40mm 铸坯完全凝固后经 3 机架(或 2 机架)粗轧机再轧制减薄 60%,铸坯最小厚度可达 15mm。

由于采用较小的压下率和小直径的工作辊,轧制力和所需的驱动功率也相应变小,使投资和操作费用大大减少。与精轧机组相比,轧制力减半,马达功率减小 90%。经固芯铸轧后的板坯具有较高的冷却速率,可获得与电磁搅拌效果相类似的均匀的温度及成分分布。其中低碳钢有相对细小的晶粒和较高的强度;奥氏体钢经过液芯铸轧后薄板坯内部会出现特殊的奥氏体组织,降低了 δ 铁素体的含量比,使 δ 铁素体均匀化,并减少了二次枝晶间距细化晶粒。这些特性一直保持到随后的热处理中。

固芯铸轧技术具有连续操作的优点,轧制条件恒定,可保证中间坯形状恒定。

ISP 技术第一个实现了在线厚度压缩,并有一整套设备能保证铸坯温度均匀及铸坯终轧前的在线加热。带液芯的铸轧技术是通过由窄边向外部突出的轧制过程来减薄铸坯,真正的轧制作用是很小的。在宽边上造成的纵向变形也很小,对多数钢种来说一般是无害的。

2. 典型的 ISP 生产线

(1)阿维迪厂 ISP 生产线

阿维迪(Arvedi)厂位于意大利北部米兰市东南 100km 的克日莫那镇。该厂占地约 202343m^2,其中 ISP 生产作业区为 40000m^2。1992 年建成投产,1996 年产量已达到 51 万 t,可生产各种规格的热轧带钢,并试轧了不锈钢。该厂的 ISP 生产线见图 9 - 9 - 49,相关技术参数见表 9 - 9 - 12。该厂自 1995 年以来一直以超设计能力 50% 运行,目前月产达 6 万 t,产品大部分是厚度小于 2mm 的热轧薄带钢。为提高产品质量、扩大产品范围,对系统技术和工艺设计仍在进一步开发。连铸机已改为立弯式,铸流导向系统采用成熟的扇形设计,在 0 扇形段进行铸轧,传统的软压缩在随后的扇形段进行。浸入式水口的形状开发使薄板坯连铸机能够采用平行板形结晶器。现使用的浸入式水口可以使水口和结晶器之间保持 20mm 的间距,能防止搭桥并保证保护渣在结晶器内钢液上部熔化。由于拉速高,阿维迪的结晶器振动机构设计成高频率短行程,结晶器能实现从正弦波到锯齿形波任何所需的运动形式。

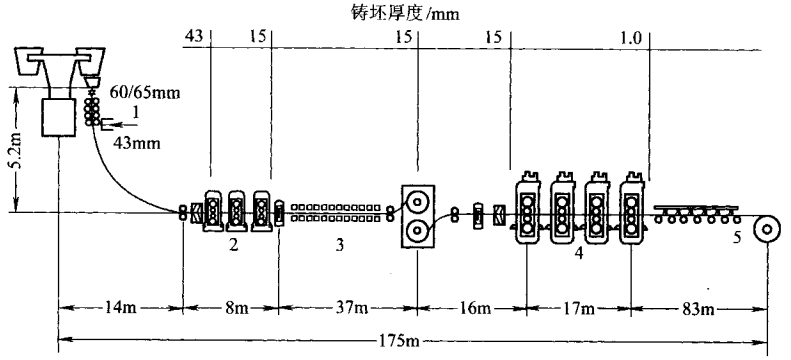


图 9－9－49　阿维迪厂一台一流 ISP 生产线

1—ISP 铸机；2—压下装置；3—克日莫那炉；4—精轧机；5—地下卷取机

表 9－9－12　意大利阿维迪钢厂 ISP 生产线技术参数

项　目				参　数
炼钢厂				1×100t 电炉＋钢包精炼炉
ISP 连铸机		生产能力		70 万 t/a 热轧带卷
		宽度		650～1330mm
		厚　度	薄板坯	43mm
			条钢	15～25mm
			热轧带钢	1.2～12.0mm
		钢种		低碳钢、高碳钢、不锈钢
		ISP 连铸机		单流立弯式，多辊矫直，冶金长度 6.5m
		结晶器类型		弧形结晶器，变弧度
ISP 轧机	粗轧机	形式		3 机架 4 辊式
		工作辊/支撑辊直径		φ410/800mm
		主驱动装置 R1～R3		500kW
		铸坯加热		感应加热炉，20MW
		卷取/开卷		克日莫那炉，燃气，涨缩式卷取机
	精轧机	形式		4 机架
		工作辊/支撑辊直径	F1、F2	φ700/1450mm
			F3、F4	φ600/1450mm
		主驱动装置	F1、F2	6000kW
			F3、F4	4000kW
卷取机		形式		一台地下式卷取机
		带卷单重		20kg/mm

阿维迪的生产数据表明 ISP 工艺适宜轧制薄热带材。实践证明，对奥氏体钢薄带材，要求大约 880℃的终轧温度，输出辊道的出口速度必须达到 10m/s。阿维迪成功地将减小中间坯厚与减少机架数结合起来，用最短的精轧机组（4 机架）将 15mm 的中间坯轧成 1mm 的超薄带材。

（2）韩国浦项钢铁公司的 ISP 生产线

1994 年德马克公司接受了韩国最大的钢铁公司浦项（Posco）钢铁公司的两套薄板坯连铸连轧生产线订货。这是一条二流一机的 ISP 生产线，年产 180 万 t 热轧带卷（厚度 1.2～12.7mm，宽度 900～1300mm）。浦项一号短流程生产线见图 9－9－50，其主要技术参数见表 9－9－13。与阿维迪的第一套 ISP 生产线相比，新的生产线有了较大的改变，主要表现在：

表 9－9－13　韩国浦项一号 ISP 短流程生产线技术参数

项　目				参　数
炼钢厂				2×130t 电炉（DC）+2×LHF 钢包精炼炉/2×双壳 VTD－OB
ISP 连铸机		生产能力		180 万 t/a 热轧带卷
		宽度		900～1350mm
		厚　度	薄板坯	60mm
			条钢	20～30mm
			热轧带钢	1.2～12.7mm
		钢种		深冲钢、低碳钢、普通结构钢、钢管钢
		ISP 连铸机		二机二流立弯式，冶金长度 11m
		结晶器类型		直结晶器，平行板形
ISP 轧机	粗轧机	形式		2 机架 4 辊式
		工作辊/支撑辊直径		φ600/1150mm
		主驱动装置 R1/R2		500/900kW
		铸坯加热		感应加热炉，14MW
		卷取/开卷		自由卷取，5 段式气体加热
	精轧机	形式		5 机架 4 辊式
		工作辊/支撑辊直径		φ700/1450mm
		主驱动装置	F1	5000kW
			F2～F4	6000kW
			F5	4000kW

项　　目		参　　数
卷取机	形式	两台地下式卷取机
	带卷单重	18kg/mm

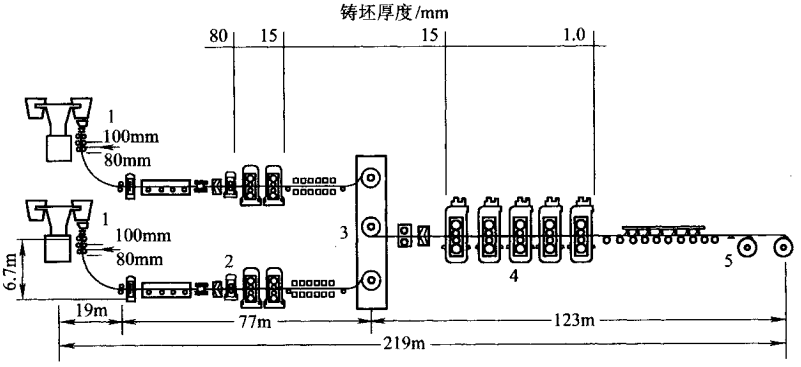


图 9－9－50　韩国浦项一号 ISP 短流程生产线

1—ISP 连铸机；2—粗轧机；3—带卷处理系统；4—精轧机组；5—地下卷取机

1)首次使用共振结晶器，并将其改为插入式。虽然仍为平行板状直立形结晶器，但入口和出口厚度增至 75mm。结晶器上装有电磁闸。

2)改进了薄片形浸入式水口的材质和加工方法，提高了浸入式水口的寿命。

3)开发了浇铸速度下的慢轧技术，使粗轧机架数量由阿维迪的三架减为两架，不但保持了机组同样的总压缩比，而且不超越压下过程的技术极限。经压下后出口厚度为 20～25mm，实现了减少温降的预成形。

4)安装了燃气加速辊道。轧件通过加速辊道送入卷取机，在下一条带钢的头部进到卷取机前，前一条带钢有足够时间完成卷取，经由输送车和提升装置，带钢进入两座燃气保温炉，每座内可装 5 个卷，这样就形成了一个缓冲装置，使卷取机和后面的 5 机架精轧机之间有充足的延时间隔。

5)将克日莫那炉改为无卷筒中间坯卷取系统。该系统将两个卷取站和向精轧机组给料的中心松卷站相连。每个卷取站设在一条浇铸线的末端。包含卷取站和松卷站的整个范围对环境隔热，并通过快速燃烧器保持一定温度，防止中间带卷在卷取和松卷时冷却下来。两个卷取站之间的区域可作为连铸机和轧制线之间的缓冲区。每块铸坯的最大缓冲时间与一个钢包的容量相匹配，即使停机 20min，也无需将钢坯返回炉内。

6)精轧机采用 APEC 的板形控制系统。

该厂于 1997 年 3 月又与德马克签订了建设二号短流程生产线的合同，拟建两条薄

板坯连铸连轧生产线，年产量达到 200 万 t。

(3)南非萨尔达尼亚钢厂的 ISP 生产线

萨尔达尼亚(Saldania)钢厂位于南非，它拥有熔融还原(Corex)厂，并同时采用了双炉壳电炉(Conarc)和 ISP 技术，是一个典型的集中了传统炼钢的产品质量和薄板坯连铸连轧技术经济效益的新型紧凑流程钢厂。该厂工艺流程为：Corex/DRI→电炉炼钢→单流 ISP。一期年产 140 万 t，二期年产将翻番。1996 年，德马克公司获得该厂从炼钢以下全部设备的订单。其中炼钢设备包括双炉壳电炉(170t)、钢包炉、VOD 炉、脱硫设备以及配套的除尘设备、加料系统设备、吊车及台车等。在生产中可一炉吹炼(以 DRI、生铁或废钢作冷却剂)，另一炉熔化海绵铁。出钢时间 40 ~ 50min。二期将新建一流连铸机，并将两个加热炉连接起来。该厂生产流程见图 9 - 9 - 51。

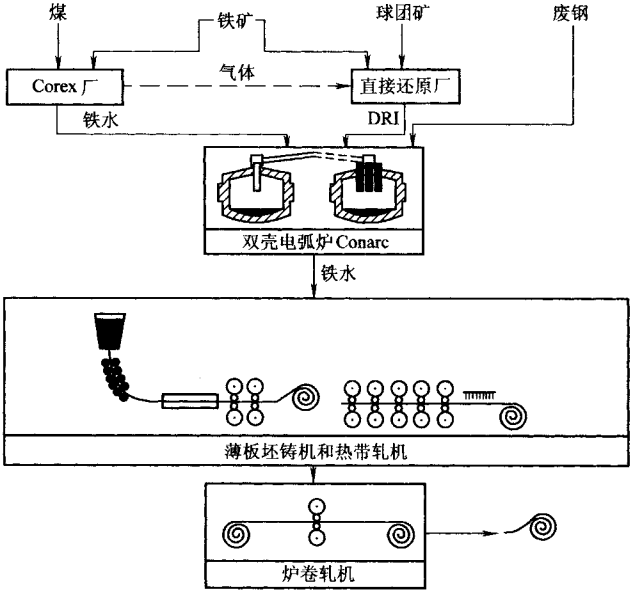


图 9 - 9 - 51　南非萨尔达尼亚钢厂的 ISP 生产线工艺流程

萨尔达尼亚钢厂年产量几乎是阿维迪厂的三倍。它在设计上有很多改进，其中取消了感应加热炉，代之以燃气辊底加热炉。该炉全长 182m，分为加热/均热段、运输段、输出段。铸坯先加热至 1100 ~ 1150℃(最高 1200℃)，然后均热，使表面与中心温度差在 10℃以内。加热炉使用 Corex 煤气，同时使用液化石油气与空气的混合气体，共有 182 个烧嘴。该生产线有关技术参数见表 9 - 9 - 14。

表 9－9－14　南非萨尔达尼亚钢厂的 ISP 生产线技术参数

项　目				参　数
炼钢厂				原料为铁水与海绵铁，1×170t 电炉＋1×加热炉＋1×VOD－OB 炉
ISP 连铸机		产量	一期	140 万 t
			二期	250 万 t
		厚度	结晶器出口	90mm
			铸轧后	75mm
			粗轧后	20～30mm
			热轧带钢	0.8～1.0mm
		钢种		深冲钢、低碳钢、普通结构钢、钢管钢
		连铸机		单流立弯式，冶金长度 15m
		结晶器类型		平行板形直结晶器
		铸坯加热		辊底式加热炉，气体加热，长度 182m，带 4 个存放位
ISP 轧机	粗轧机	形式		2 机架 4 辊式
		工作辊/支撑辊直径		φ900/1450mm
		主马达功率 R1/R2		9000/12000kW
		卷取/开卷		无芯棒式带卷开卷机
	精轧机	形式		5 机架 4 辊式
		工作辊/支撑辊直径	F1～F3	φ840/1450mm
			F4～F5	φ685/1450mm
		主马达功率	F1～F5	7000kW
			F2～F4	9000kW
		轧制力(最大)		40000kN
热带卷取机		形式		一台地下式卷取机
		带卷单重		20kg/mm

三、FTSRQ(FTSC)工艺

FTSRQ 工艺(Flexible Thin Slab Rolling for Quality,后改为 FTSC),称之为生产高质量产品的灵活性薄板坯轧制,是由意大利达涅利公司开发出的又一种薄板坯连铸连轧工艺。初始研究集中在意大利的萨伯拉里厂(Sabolarie)的试验基地,以 1∶1 的机械设备进行了相关工艺操作、设备结构和自动控制功能等方面的开发工作,其典型工艺布置见图 9-9-52。菲律宾的金斯顿钢厂(Jacinto Steel)、伊朗的伊斯发罕厂(Esco-Esfahan)、加拿大的阿尔戈马厂(Algoma)以及美国的北极星厂(North Star BHP)相继购买了此技术,在 1995~1996 年投入生产,生产规模为 70 万~200 万 t/a,既有普通碳钢产品,也有特种不锈钢带卷,厚度可达 2mm 以下。其中,阿尔戈马厂是长流程配薄板坯连铸连轧工艺,转炉容量是 200t,铸坯断面尺寸为 90mm×1750mm,2 流铸机,年产达带卷 200 万 t,于 1997 年试生产。

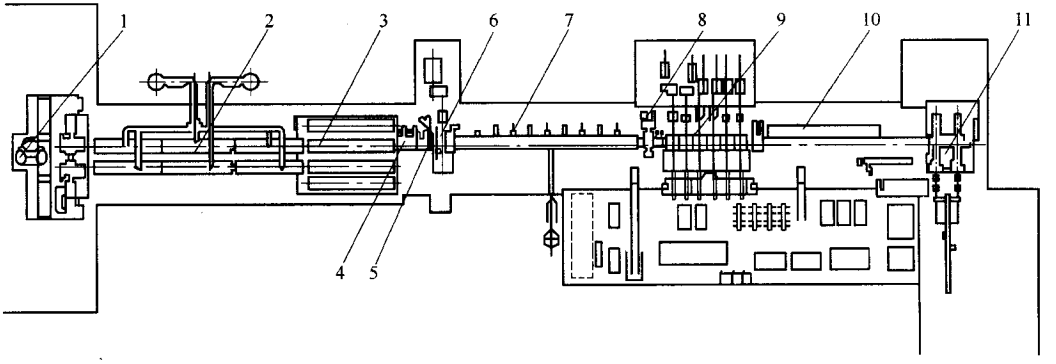


图 9-9-52　典型的 FTSRQ(FTSC)技术的工艺布置

1—连铸机;2—旋转式一次除鳞;3—隧道式加热炉;4—二次除鳞;5—立辊轧机;6—粗轧机;7—保温辊道;8—三次除鳞;9—精轧机;10—输出辊道和冷却段;11—卷取机

达涅利公司认为 FTSRQ(FTSC)技术可提供表面和内部质量、力学性能、化学成分均优的汽车工业用的热轧带卷。该技术具有相当的灵活性,其铸机的主要参数见表 9-9-15。它能浇铸范围较宽的钢种,包括包晶钢;板坯厚度、宽度变化范围也较大;直接轧制过程中操作灵活,出现故障时调整速度容易。

表 9－9－15　FTSRQ(FTSC)铸机的主要参数

结晶器厚度	80～50mm
板坯最终厚度	70～35mm
板坯宽度	800～1200mm,1100～1600mm,1500～2300mm
结晶器液面控制	带液面传感器的液压塞棒(涡流或其他型式)
预防拉漏系统	用热电偶并取得专利权的计算法
振动装置型式	液压式
振动型式	正弦/锯齿/三角形波
连铸机型式	立弯型
结晶器下的封闭区	足　辊
顶　区	辊式,浇铸时可连续调节缝隙和斜度(液压驱动)
扇形段	辊式,铸造时可连续调节缝隙和斜度(液压驱动)
浇铸速度	2.8～6.6m/min(最高设计浇铸速度为 7.5m/min)
引锭杆	可挠曲的钢带
引锭杆的插入	从底部插入
浸入式水口	整根(一个)
二次冷却方式	气雾冷却
辊子冷却	通过轴孔内部冷却,与板坯冷却分开的冷却系统

1. 工艺特点

FTSRQ(FTSC)工艺流程为 炼钢炉→炉外精炼炉→薄板坯连铸机→旋转式除鳞机→隧道式加热炉→二次除鳞机→立辊轧机→粗轧机→保温辊道→三次除鳞装置→精轧机→输出辊道和带钢冷却段→地下卷取机。

近年来,达涅利公司对 FTSRQ(FTSC)工艺做了大量开发和研究工作,可归纳如下:

(1)H^2 结晶器。

达涅利公司于 1990 年设计制造了用于薄板坯连铸工艺的 H^2 高速高质量长漏斗型结晶器(见图 9－9－53),目的在于减小凝固壳的应力。此外,结晶器内较大的容量和轻压下技术的运用增大了结晶器内弯月面的面积,会对钢水流动产生制动作用,从而改善保护渣的工作条件,为提高拉速和铸坯表面质量创造了条件。同时,H^2 结晶器长漏斗型的内部空间较大,可使用厚壁浸入式水口,延长了其使用寿命。

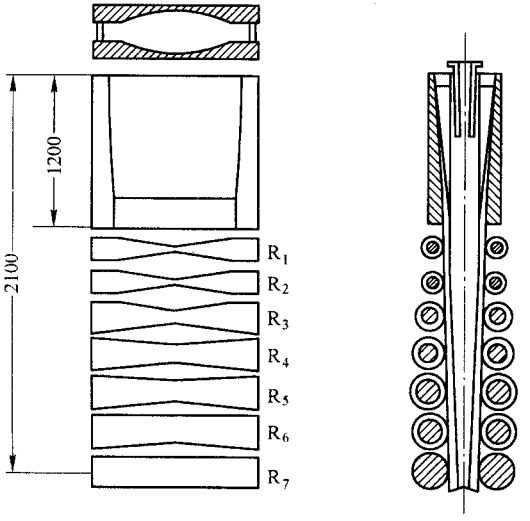


图 9－9－53　H^2 结晶器

H^2 结晶器的设计通过计算机仿真和后续的高温测试，对其形状加以优化，降低了金属凝固壳脱离铜板的速度，从而保证了优良的热交换控制。

H^2 结晶器增强了弯月面的稳定性，减小了钢液面的波动，均匀了热量传递，使凝固壳中的内部应力趋近于零，极有助于提高铸坯内部和表面质量。

基于 H^2 结晶器的特点优化了一系列连铸条件，既可拓宽浇铸铸坯尺寸，又可浇铸所有典型钢种，能与转炉炼钢的生产率和生产周期相匹配。

(2)浸入式水口(SEN)。

达涅利技术采用的厚壁浸入式水口是在比较了各类薄板坯连铸机结晶器内流体动力学结构后，选取最佳参数值设计而成，有较大的钢水通过速度(1.0～5.1t/min)，能防止钢水散流，使其缓慢流入弯月面，从而使结晶器内液面波动最小。浸入式水口的特殊形状可保证在任何拉速条件下都能提供与之相适应的润滑作用，基本消除了坯壳再熔化和搭桥的可能，夹渣现象也可避免。此外，连通管的作用是通过浸入深度的变化使水口保持最为理想的工作状态。该水口可适应各种各样的工作位置，加之最优化的磨损分布，延长了使用寿命。与 H^2 结晶器配合，使得浇铸时间可连续 12h，极大地节省了投资和生产成本。

浸入式水口结构简图见图 9－9－54。达涅利公司的浸入式水口和 H^2 结晶器水模型试验结果见图 9－9－55。由图可以看出该浸入式水口的优点为：

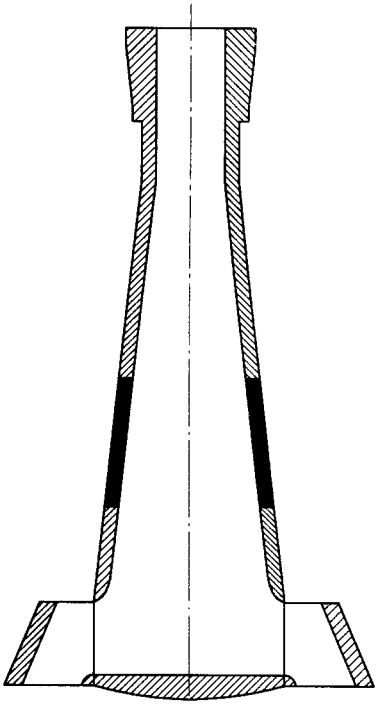


图 9－9－54　浸入式水口结构简图

1)钢液流动环流稳定；

2)弯月面处无漩涡和湍流形成；

3)宽度范围内的使用性能好。

(3)轻压下和液芯控制系统。

铸坯进入二冷扇形段后，通常可根据冶金要求和钢种情况在 0 扇形段内或延伸至铸机整个扇形段进行轻压下。该区间内各段的辊缝由位置变送器控制液压缸来设定。扇形段的设计是使铸机内弧(或活动侧)能对应其外弧(或固定侧)而移动。铸机的拉速是变化的，浇铸的钢种更是多样的，动态轻压下均可适应。采用该技术可细化铸坯晶粒，提高凝固组织特性，减少中心偏析和中心孔隙。通过液芯控制系统的数学模型(LPCS)来控制在线铸坯的压下过程，经萨伯拉里(Sabolarie)厂的试验证明，最佳的变形结构与钢种、浇铸速度、冷却方式及钢水过热度有关，在计算轻压下力时必须考虑过程应力变化及后续矫平过程中已降低的应力值。LPCS 的动态应用很大程度上提高了各类钢种在铸造过程中的内部和表面质量。

(4)漏钢预报系统。

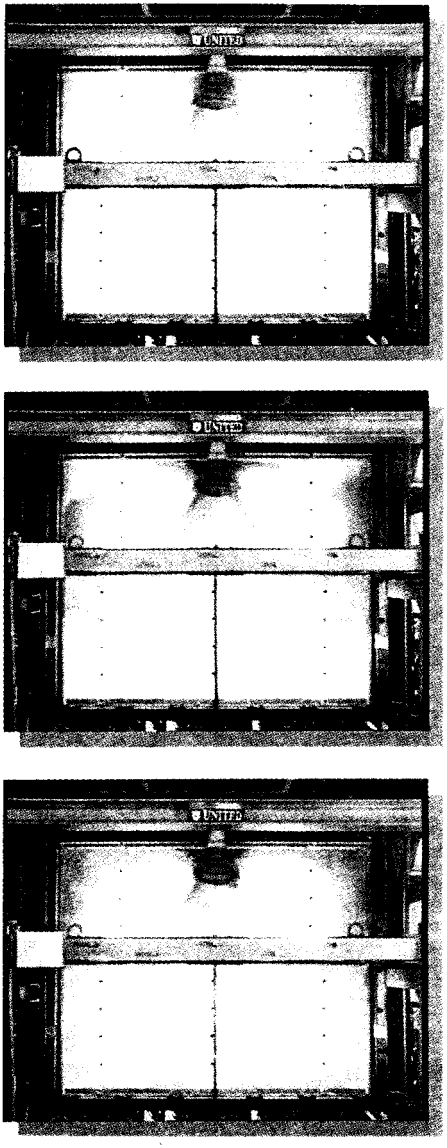


图 9－9－55　达涅利公司的浸入式水口和 H^2 结晶器水模型试验结果
（模型组成 浸入式水口＋结晶器＋0 扇形段 模型比例为 1∶1）

在 H^2 结晶器上安装热电偶，实时监控其温度。它是通过热电偶传来的信号经过二级过程自动化的详细分析，以结晶器温度图的形式显示出来的。一旦系统识别出了漏钢（或黏钢）问题，就启动自动处理程序来预防事故的发生，从而实现了连续浇铸的进行。该系统极大地减小了漏钢事故发生率，具有较高的可靠性和极小的出错率。利用这一完整且连续的温度监控系统还可以获取结晶器内的热交换信息、结晶器内保护渣流动状

况、结晶器窄面锥度对铸坯质量的影响，从而为质量控制系统收集必要的数据。

漏钢事故处理恢复过程中的热电偶温度与连铸速度监控实例见图 9－9－56。

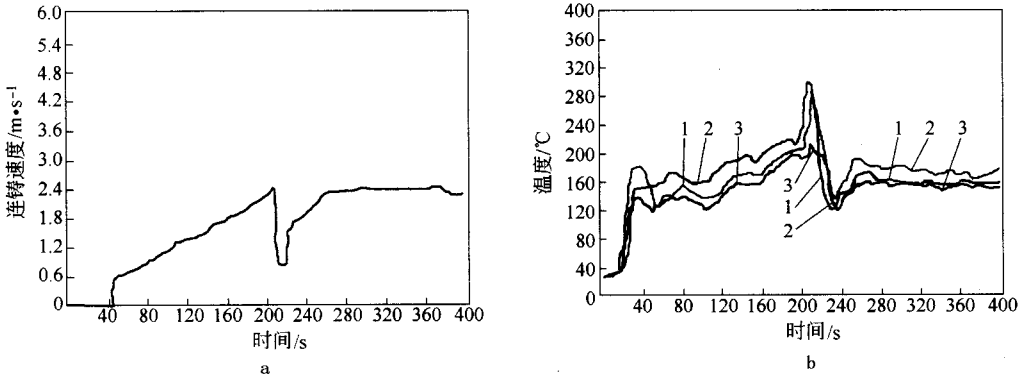


图 9－9－56　漏钢事故处理恢复过程中的热电偶温度与连铸速度监控示例

a—连铸速度；b—热电偶温度

(5)摆式剪切机。

在连铸机的出口处设有一台启停式的摆式剪切机，其功能如下：

1)对铸坯头部进行剪切；

2)根据热轧卷重量进行定尺剪切；

3)对铸坯的过渡段(锥形部分)和尾部进行局部剪切。

摆式剪切机的特点是：

1)上、下两个直刀片可用来避免板坯进行头尾剪切后而发生变形；

2)可通过移动小车实现快速更换刀片；

3)在剪切失败时有安全液压缸保证操作安全。

摆式剪切机安装在连铸机矫直拉拔段的后面，适于薄板坯轧制中的切头尾，与传统的火焰切割机相比，有利于保持板坯的温度。

(6)旋转式除鳞机。

安装在薄板坯连铸机输出辊道出口处的旋转式除鳞机是一高压力、低流量的除鳞装置，它可将薄板坯表面的氧化铁皮有效及时地清除，它适用于低速移动的板坯，使板坯入加热炉前清洁无鳞，防止在再加热过程中硅酸盐的形成。板坯清洁无粗大氧化铁皮，从而延长了加热炉内辊道的寿命。

旋转式除鳞机由带有喷射器的箱体组成，喷射器安装在箱内的旋转臂上，均匀的水喷射可获得良好的除鳞效果，并可保证薄板坯在除鳞机入口与出口处温度差低于 5℃。

(7)高压水除鳞机。

高压水除鳞设备的作用是利用分布在热轧机上不同区段的一系列高压水喷嘴集管来去除板坯表面的氧化皮。一组安装在粗轧机之前,另一组安装在精轧机组之前。水压为 200MPa、水流速为 260 ~ 460m^3/h,有 4 个除鳞集水管。这一装置能够全面保护除鳞机集水管的水泄漏,同时可以形成细密且高压的水幕墙,对改善坯温和有效均匀除鳞都有显著效果。

(8)隧道加热炉。

隧道炉的结构可以保证在一条加热线上存储至少 4 块铸坯,并确保在轧机换辊过程中不间断地浇钢。为此,加热炉炉身的长度通常是根据最长坯料的长度设计的,分为均热段和排料段两个加热段,在整个炉身长度上顶部全设置燃烧器,这些燃烧器交替布置在炉内每一侧。当生产线扩建为 2 流后,隧道炉为扩大容量,保证双线运行,需将排料段变为往复式加热段。这种加热炉同时也是辊底式的,辊子对板坯提供多向支撑并将其运输。在隧道炉进行加热的过程中,可以进行单个的换辊工作。

(9)立辊轧边机。

为使板坯达到规定的宽度且有良好的边部质量,利用立辊轧边机来轧制板坯的边部,立式轧辊可以是平辊也可以是孔形轧辊。

用平辊轧边 在侧压的过程中,金属的流动明显是不均匀的,边部常会形成突起,这种轧件边部过厚通常称之为鼓肚,即‘狗骨状”。

用孔型轧辊轧边 在轧边过程中,可以有效地减少板坯宽度,将‘狗骨状’突起的部分分移到板坯中部,提高轧边时的稳定性。

(10)液压自动宽度控制(HAWC)。

液压自动宽度控制系统是一种辊缝控制系统,它通过对机架的变形补偿和对板宽的反馈修正,确保轧出的带钢在全长上宽度均匀。在立辊轧机前安装宽度测量仪来测定板坯实际宽度,由此来调整辊缝。同时还能获取板坯位置及带钢的宽度图。

(11)保温罩。

为使板坯保持均匀的温度,减少轧件温降,降低氧化铁皮的形成几率,进而节省能源降低成本,采取保温罩来保存热量,在 72m 的加热输送辊道上可有效地减少粗轧和精轧机组之间坯料的热损失。

(12)滚筒式剪切机。

此剪切机带有一个快速更换箱,可迅速便利地进行离线维护和调整。它用来根据定尺剪切坯料头部和尾部。轧件的头部由弧形剪进行剪切,为的是减少轧辊咬钢时轧件施

加在工作辊上的振动载荷。轧件的尾部由直剪进行剪切，使尾部能均匀地缠绕在轧后的钢卷上。剪切厚度可达 60mm。

(13)边部感应加热器。

在进入热连轧精轧机架后轧件的温度会逐步下降，特别是其边部更易快速地冷却下来，往往要比中部低 100℃。对进入精轧机架前的轧件进行边部感应加热可以改善轧件的机械特性和冶金性能，从而减少切边工序。达涅利 Rotelec 边部加热器有单头和双头感应加热两种方式，依现场条件决定悬挂或地面安装。

(14)带卷卷取箱。

热轧带卷箱布置在切头剪之前，具有两套托卷辊。当轧件进入带卷箱时，弯曲辊引导热金属向下弯曲来进行卷绕，在 1 号托卷辊开始卷绕工作。轧件可从任意一套托卷辊上送入精轧机组中。时间允许时，轧卷一般都留在 1 号托卷辊上，但当下一块轧件很快就要在粗轧机中完成轧制时，必将它送到 2 号托卷辊上以便 1 号托卷辊开始下一次卷绕工作。当要将轧卷送入精轧机组进行轧制时，固定芯棒被插入到轧卷的内径中，外圈的带卷被剥离，托卷辊加速转动，开始进行开卷工作。热轧带卷箱可降低能源损失，并大大地节省了占地空间。

(15)精轧机组。

达涅利公司的热连轧机年产能力为 220 万 t，通常为 6 机架，配有提高产品质量的液压自动厚度控制(HAGC)、液压自动宽度控制(HAWC)、辊星、轧辊凸度控制和工作辊轴向抽动系统。

在整卷带钢的轧制过程中，为了在辊缝中获得理想的带钢厚度分布并控制辊缝形状，达涅利公司采用正负大弯辊的控制策略，可达到较好的板型控制效果。正负大弯辊系统是在每个工作辊的轴承座上施加 + 200t 到 - 120t 弯辊力的工作辊弯辊系统，在得到大小不同弯辊力的同时，并不降低轴承的使用寿命，大弯辊系统所获得的弯辊力要比传统的弯辊系统高一倍。

为减少轧辊局部磨损量，采用了工作辊轴向抽动，加上对带钢凸度和平坦度的控制系统，可有效地进行自由规程轧制。所谓轧辊热凸度(RTC)控制系统是通过变化沿辊身方向上的冷却效率来控制工作辊的热凸度变化。

基于市场对超薄带钢的需求越来越大，轧制技术必须加以改进，于是促成了新型带钢轧制工艺的出现，即无头和半无头轧制以及铁素体轧制。达涅利公司开发出了 f^2CR 的灵活自由凸度轧机机架，可以在轧制过程中运用轧辊交叉技术和轴向抽动技术，使带钢凸度在较大范围内连续调整，而且还可对工作辊磨损进行单独控制，从而充分满足带

钢在凸度和板形控制上的严格要求。

(16)薄带卷输送辊道。

为将薄带钢卷安全地送入地下卷取机中,采用小直径输送辊、小辊间距方式,保证带卷平稳运输且头尾不翘曲。

(17)水幕冷却系统。

细密的墙状水流通过带钢上下表面,使整条带钢获得均匀的冷却效果。形成水墙的集水管配有复杂的控制系统,可保证带钢从头到尾都有最佳的冷却温度。

(18)地下卷取机和地上卷取机。

配有液压侧导板和液压夹送辊的全液压地下卷取机和地上卷取机,可保证热轧带卷的及时成卷并运出,提高了工作效率,也创造了更为安全的工作条件。

从地下卷取机出来的带卷直接进入在线带卷处理系统进行翻转、头尾剪切、取样、环向和径向包装、称重打标记。

2. 加拿大阿尔戈马 FTSRQ(FTSC)生产线

位于加拿大安大略省的阿尔戈马(Algoma)钢铁公司直接联合带材生产厂,简称DSPC,主要为汽车工业提供板材。其中,58%是低碳钢,包括深冲钢板,15%为包晶钢、特殊钢。生产能力为带卷 200 万 t/a(最大 250 万 t/a)。该生产线采用的冶炼设备是转炉,所以配置了 2 流立弯式达涅利的薄板坯连铸机,2 流中心距 8m,钢包容量 230t,中间罐容量 50t。铸坯出结晶器下口断面 90mm,出连铸机后变为 70mm,宽度为 1750mm。阿尔戈马厂 FTSRQ(FTSC)生产线的布置及有关参数见图 9-9-57。铸坯经粗轧后减薄为 35~40mm,经 6 机架精轧机后最后轧成 1.0mm 的带卷。

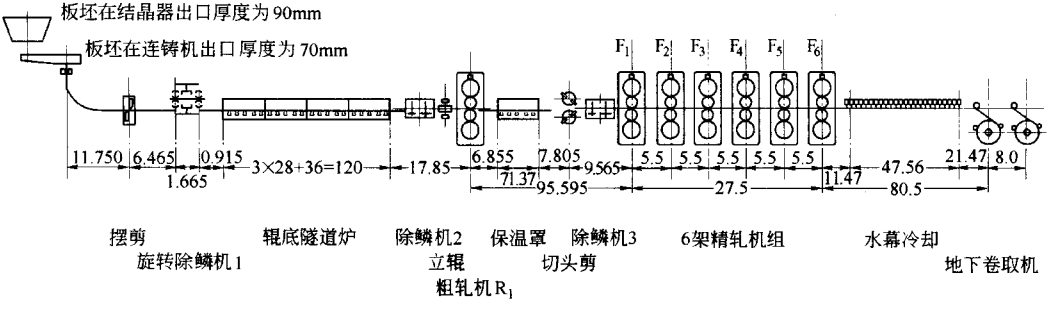


图 9-9-57　阿尔戈马厂 FTSRQ(FTSC)生产线布置及有关参数

阿尔戈马厂 FTSRQ(FTSC)生产线的设备参数见表 9-9-16,其产品规格见表 9-9-17。

表 9－9－16　阿尔戈马厂 FTSRQ(FTSC)生产线的设备参数

机架	工作辊		支撑辊		马　达			齿轮比 τ	最大辊径时的轧制速度		轧制力(最大)/kN
	最大尺寸/mm	辊身长度/mm	最大尺寸/mm	辊身长度/mm	功率/kW	基本速率/r·min^{-1}	最大速率/r·min^{-1}		基本值/m·min^{-1}	最大值/m·min^{-1}	
E_1	1020	466			2×200	65	165	5	41	106	2500
R_1	1220	1756	1450	1750	9200	85	170	3.0	109	217	46000
F_1	810	2050	1450	1750	5600	104	304	4.44	60	174	40000
F_2	810	2050	1450	1750	7000	130	380	3.0	110	322	40000
F_3	810	2050	1450	1750	7000	130	380	2.08	159	465	40000
F_4	810	2050	1450	1750	7000	130	380	1.58	209	612	40000
F_5	700	2050	1450	1750	7000	130	380	1.0	286	836	30000
F_6	700	2050	1450	1750	5000	170	450	1.0	374	989	30000

表 9－9－17　阿尔戈马厂 FTSRQ(FTSC)生产线的产品规格

板坯厚度	70mm
板坯宽度	800～160mm
最大板坯长度	34500mm
板坯最大单重	29.4t
带卷厚度	1.0～16.0mm
带卷宽度	800～16000mm
带卷内外径	762～1900mm
单位长度卷重	18kg/mm
最大卷重	28.8t

阿尔戈马厂薄板坯连铸连轧生产线的产品大纲见表 9－9－18，其产品质量保证值见表～表 9－9－23。

表 9－9－18　阿尔戈马厂薄板坯连铸连轧生产线的产品大纲及参数

钢　种	钢牌号	产品所占比例 /%	板坯厚度 /mm	最大工作拉速 /m·min^{-1}	最大保证拉速 /m·min^{-1}
低碳钢	AISI 1006 AISI 1008	58.15	70	5.50	5.20
包品钢	AISI 1009 AISI 1016	15.65	70	4.20	4.00
中碳钢	AISI 1019 AISI 1030	7.90	70	5.70	5.50
高碳钢	AISI 1035	6.35	70	4.80	4.50
低合金高强度钢	40－60－80 Si 镇静钢	11.95	70	5.50	5.20

表 9－9－19　阿尔戈马厂薄板坯连铸连轧生产线的产品质量保证值——厚度

带卷厚度/mm	保证误差	占总辊身长度百分比/%
1.0～1.2	±40μm	98.0
1.21～4.0	±40μm	99.0
4.01～5.0	±50μm	99.0
5.01～12.0	±1%	99.0
12.01～16.0	±120μm	99.0

表 9－9－20　阿尔戈马厂薄板坯连铸连轧生产线的产品质量保证值——平整度

带卷厚度/mm	I－单位低碳钢、中碳钢	I－单位低合金高强度钢	占总辊身长度百分比/%
1.0～1.2	30	不适用	95.0
1.21～5.0	25	30	95.0
5.01～16.0	16	20	95.0

表 9－9－21　阿尔戈马厂薄板坯连铸连轧生产线的产品质量保证值——凸度

带卷厚度/mm	C40 允许形状误差	占带卷百分比/%
1.0～5.7	±20μm	95.0
5.71～12.0	±0.35%	95.0
12.01～16.0	±42μm	95.0

表 9－9－22　阿尔戈马厂薄板坯连铸连轧生产线的产品质量保证值——宽度

带卷厚度/mm	保证误差	占总辊身长度百分比/%
800～1220	－0＋8mm	95.0
1221～1600	－0＋10mm	95.0

表 9－9－23　阿尔戈马厂薄板坯连铸连轧生产线的产品质量保证值——温度

工　序	保证误差	占总辊身长度百分比/%
终　轧	±15℃	95.0
卷　取	±20℃	95.0

3．意大利萨伯拉里(Sabolarie)试验机组

在意大利萨伯拉里(Sabolarie)的试验厂，达涅利公司于 2000 年就已将薄板坯连铸机的拉速提高至 8m/min。该试验机组结晶器的厚度为 62mm，铸坯经软压下后达 40mm。

为确保在 8m/min 拉速下工艺过程稳定和生产出良好质量的铸坯，加大了结晶器冷却强度，改善了结晶器润滑用的保护渣成分，调整了结晶器窄面铜板锥度，提高了支撑导向段的二冷强度。从试验结果来看，当拉速升至 8m/min 后，结晶器内液面波动并不显著，见图 9－9－58。浇铸过程非常稳定，设备运行可靠，铸坯质量令人满意，甚至不仅不会恶化还会在某种特定条件提高质量。例如，随着拉速的提高，振痕深度会逐渐变浅。软压下和二冷参数经过优化后，可改善铸坯内部质量，而不会降低铸坯横向几何精度。在试验过程中，曾对较高的软压下参数值进行试验，当拉速达到 8m/min 时，中心偏析和中心疏松总是低于或相当于原 0.5 级评级标准。

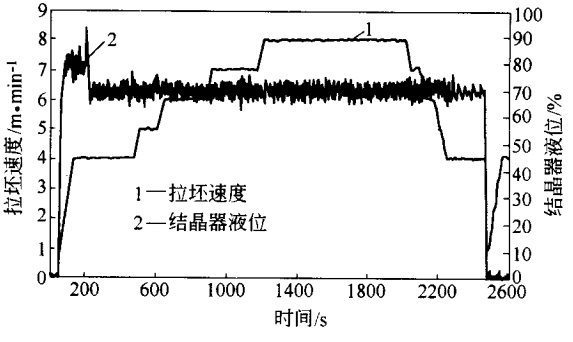


图 9－9－58　在 8m/min 拉速下，拉坯速度变化曲线

拉速提高直接使生产率大幅度增长，对于一台浇铸厚度为 90/70mm（分别对应结晶器出口厚度和经过软压下的铸坯厚度）、宽度为 1200mm 的单流板坯连铸机，平均拉速为 8m/min，则意味着年生产能力可达 200 万 t 左右，投资和设备维修成本均可大为减少。

4. 埃及艾茨重工业公司 EFS 厂的 FTSC（达涅利）生产线

2003 年 2 月 6 日埃及艾茨重工业公司（AlEzz Heavy Industries – Egypt）的 EFS 厂由达涅利公司提供的年产 130 万 t 热轧带卷的生产线，已顺利通过验收。

这条生产线采用废钢/DRI 为原料的电炉和达涅利的 FTSC 灵活制造技术组成薄板坯连铸连轧工艺，在 2002 年 11 月 20 日生产出第一卷热轧带卷。

这条生产线从电弧炉、钢包精炼炉、薄板坯连铸机、隧道式加热炉、热带轧机、精整轧机，直到所有的辅助设备全由达涅利公司供货。工厂的总体设计和全面协调、设备安装、调试和试车也均由达涅利公司承担。

艾茨重工业公司 EFS 厂 FTSC 一期和二期生产线布置及有关参数分别见图 9 – 9 – 59 和图 9 – 9 – 60，其设备参数和产品规格见表 9 – 9 – 24 和表 9 – 9 – 25。

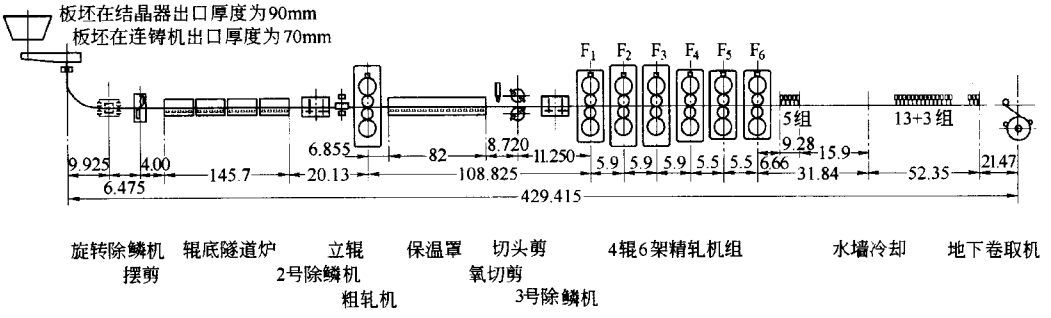


图 9 – 9 – 59　艾茨重工业公司 EFS 厂 FTSC 一期生产线布置及有关参数

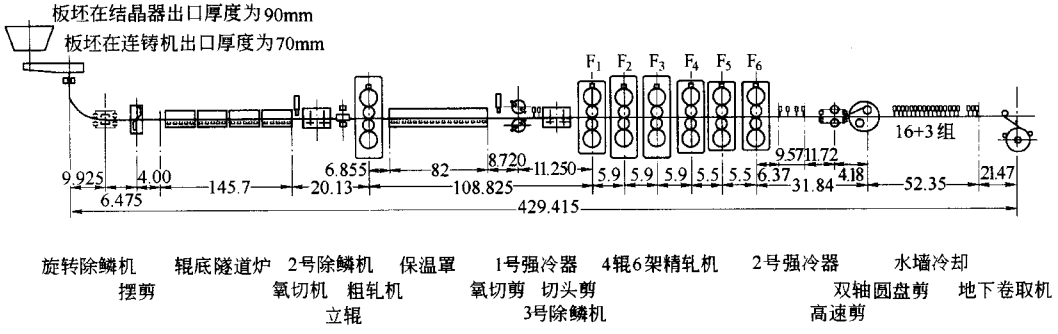


图 9 – 9 – 60　艾茨重工业公司 EFS 厂 FTSC 二期生产线布置及有关参数

表 9－9－24　艾茨重工业公司 EFS 厂 FISC 生产线的设备参数

机架	工作辊		支撑辊		马　达			齿轮比 τ	最大辊径时的轧制速度		轧制力(最大)/kN
	最大尺寸/mm	辊身长度/mm	最大尺寸/mm	辊身长度/mm	功率/kW	基本速率/r·min^{-1}	最大速率/r·min^{-1}		基本值/m·s^{-1}	最大值/m·s^{-1}	
E_1	1020	430			2×200	80	200	5.00	0.85	2.14	2500
R_1	1220	1750	1450	1750	11000	100	190	3.03	2.11	4.01	46000
F_1	810	2000	1470	1750	5600	104	352	4.43	1.00	3.37	40000
F_2	810	2000	1470	1750	7000	130	440	3.22	1.7l	5.80	40000
F_3	810	2000	1470	1750	7000	130	440	2.21	2.49	8.44	40000
F_4	810	2000	1470	1750	7000	130	440	1.37	4.02	13.62	40000
F_5	(1)700 (2)630	2050	1450	1750	7000	180	550	1.00	(2)5.94	(2)18.14	30000
F_6	(1)700 (2)630	2050	1450	1750	7000	180	550	0.77	(2)7.71	(2)23.56	30000

表 9－9－25　艾茨重工业公司 EFS 厂 FTSC 生产线的产品规格

板坯厚度	700mm
板坯宽度	800～1600mm
板坯长度	14～37m
板坯最大单重	25t
带卷厚度	1～20mm
带卷宽度	800～1560mm
带卷内外径	762～1980mm
单位长度卷重	20kg/mm
最大卷重	25t

现生产的热轧带卷厚度为 2.8～5mm，符合尺寸公差的带钢长度中，符合厚度公差的占 99.98%，符合宽度公差的占 100%，均大于标准要求的 95%。目前该生产线正按照达产曲线投入正常运行。

四、CONROLL 工艺

奥钢联工程技术公司(VAI)开发出的 CONROLL 工艺,用以生产不同钢种的高质量热轧带卷。它具有高的生产率,且产品价格便宜。美国的阿姆科·曼斯菲尔德(Armco Mansfield)钢厂于 1995 年 4 月正式建成投产一条 CONROLL 生产线,其流程见图 9－9－61,部分技术参数及生产钢种见表 9－9－26。

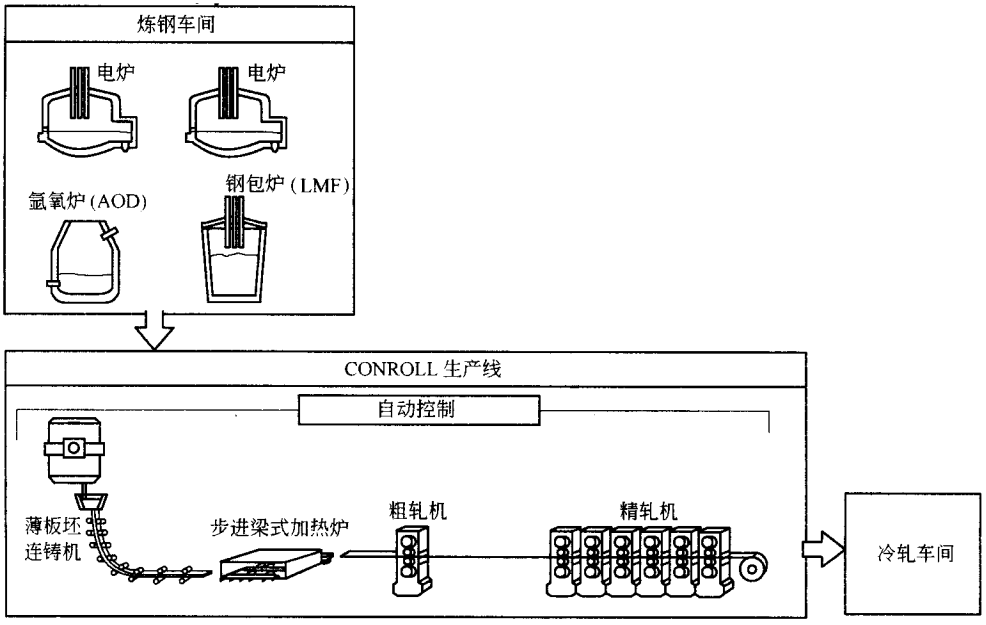


图 9－9－61　奥钢联的 CONROLL 生产流程

表 9－9－26　CONROLL 流程的主要技术参数

铸坯厚度	75～130mm
铸坯宽度	635～1283mm
直接装炉/轧制	100%
钢　种	低、中、高碳钢 高强度钢 铁素体不锈钢(409,430,434,435) 马氏体不锈钢(410,420) 硅钢(无晶粒取向)
生产能力	热轧卷 70 万 t/a

1. 工艺特点

CONROLL 工艺具有以下特点：

(1)采用平行板型结晶器，认为只有这种形状才不会对初生坯壳产生应力，避免了任何变形。结晶器的冷却水槽形状保证了热量在宽度和长度方向上的均匀散失。结晶器宽度可自动调整。使用了新型浸入式水口，经优化设计的水口能做到钢水成分和温度均匀，并可根据铸速和板坯宽度来控制其浸入深度，从而得到一个平静稳定的液面。结晶器采用带无磨损叶簧导向系统的液压驱动装置，以正弦或非正弦方式在线调节行程和频率，进而控制保护渣的耗量。设有摩擦力测定装置。

(2)高压除鳞可清除氧化铁皮，为避免温降损失过大，采用了旋转除鳞机，供水量仅是原有的 1/4。

(3)超低头弧形连铸机，半径为 5m，比立弯式高度小，可降低厂房高度，尤其是提高拉速后(现 $v_{拉}=4\text{m/min}$)和浇铸高强度钢时优势更加明显。

(4)二次冷却系统应用了动态冷却模型，计算铸坯浇铸过程的温度变化，由此来决定冷却方式，可减轻鼓肚、控制坯壳生成厚度和提高表面质量。在不同位置上均布置了比色高温计，用以测量铸坯进入二冷区后各段的表面温度；在二冷横向梁上放置了应用测量仪(6 个)，通过铸坯内部受力情况来反映芯部液态终止的位置，一般导向辊上压力小到一定程度则表示凝固在此终止。

(5)铸机备有液态软压下(LSR)系统。

(6)可以生产包晶钢的热轧带卷。

2. 阿姆科厂的 CONROLL 生产线

阿姆科·曼斯菲尔德钢厂位于美国俄亥俄州，奥钢联为其提供的 CONROLL 生产线见图 9-9-62。其中，包括有 1 台 LMF 钢包炉，1 台新的薄板坯连铸机，1 台步进梁式加热炉(ITAM 制造)，并对原热带轧机进行局部改造，对全厂进行全套自动化系统装备。

该厂原有电炉两座，容量 136t，1 台 AOD 炉。薄板坯连铸机为超低头立弯式，采用平行板型结晶器，铸机主要工艺参数见表 9-9-27。铸坯经带有保温盖的辊道入炉，升温/均热后，以 1230～1260℃直接进入轧机。轧机包括一台可逆式粗轧机和 6 机架精轧机，粗轧可将板坯减薄至 25～28mm，精轧后最终厚度为 1.8～12.7mm。整条生产线年产量为 90 万～180 万 t(1×1 流或 2×1 流)。阿姆科·曼斯菲尔德钢厂原有热轧机由奥钢联改造后获得了新的特性，见图 9-9-63。高压除鳞、液压厚度自动控制系统、工作辊带液压活套装置、热轧机的下游配置了层流冷却系统及 CVC 技术的应用，最终可保证获得 870～890℃的终轧温度且力学性能好的优良带卷，整个轧制系统由不同设定和适应模型的全套一级、二级自动化装置调控。

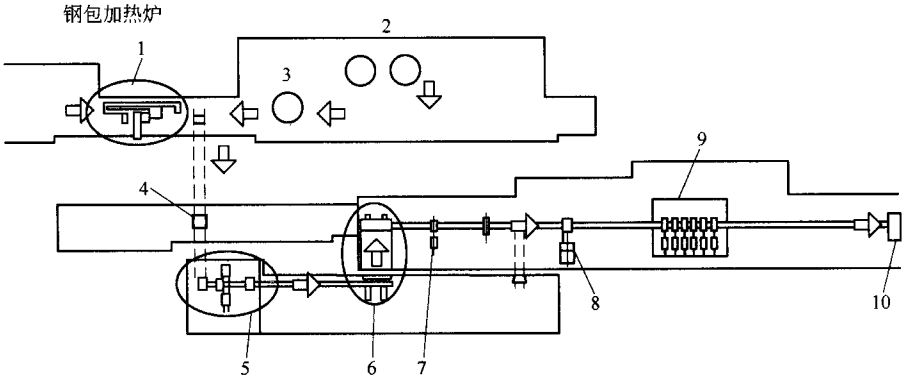


图 9－9－62　阿姆科·曼斯菲尔德的 CONROLL 生产线

1—钢包加热炉；2—电炉；3—AOD；4—传送车；5—薄板坯连铸机；6—中间加热炉；7—初级立辊轧机；8—可逆式粗轧机；9—6 机架精轧机；10—地下卷取机

表 9－9－27　阿姆科·曼斯菲尔德薄板坯连铸机主要参数

钢包容量		136t
结晶器长度		1200mm
弧形半径		5m
冶金长度		14.6m
板坯尺寸	厚　度	75～125mm
	宽　度	635～1283mm
	长　度	18.3m
拉　速		4m/min
铸机生产能力		3.5 t/min
冷却系统		气雾冷却
板坯剪切		火焰切割
出坯温度		870～1065℃

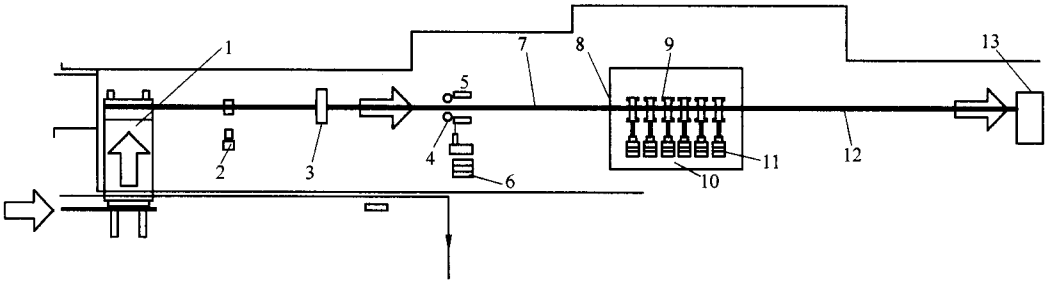


图 9－9－63　阿姆科·曼斯菲尔德 CONROLL 生产线轧机布置

1—步进梁式加热炉；2—立辊粗轧；3—新的初次除鳞机；4—立辊；5—除鳞机；6—粗轧机；7—保温均热板；8—除鳞机；9—带液压装置的活套和 AGC 系统；10—粗轧机组；11—改造过的驱动系统；12—新的冷却线；13—地下卷取机

阿姆科·曼斯菲尔德的 CONROLL 生产线从投产至 1997 年 1 月，已取得了连浇炉数最长 17 炉的记录（浇铸时间为 25.7h）。当经常变换钢种时，平均连浇 5 炉。它的漏钢率为 0.27%，是薄板坯连铸可达到的最低指标。连浇炉数和拉漏炉数情况见图 9－9－64。

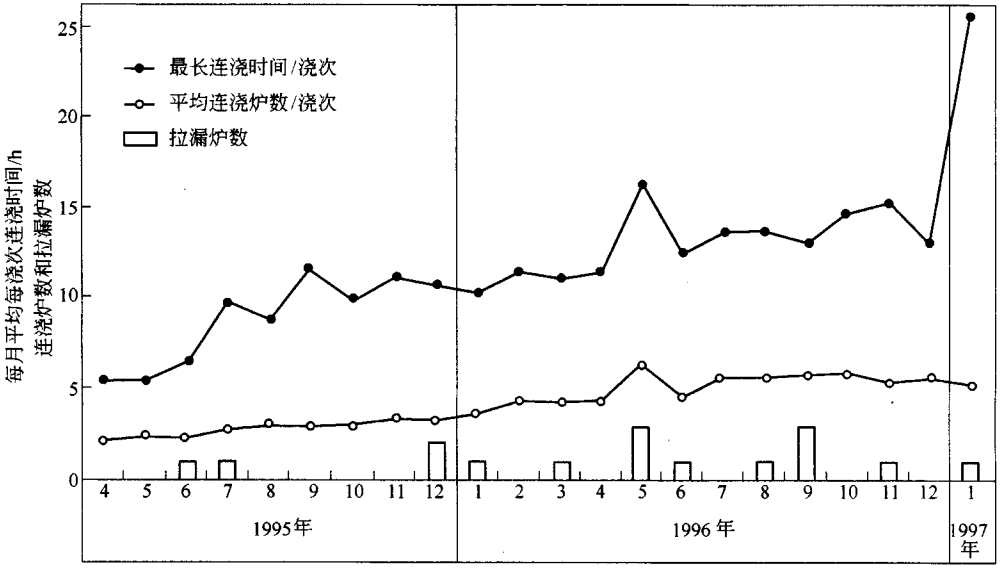


图 9－9－64　阿姆科·曼斯菲尔德 CONROLL 生产线连浇炉数和拉漏炉数

阿姆科·曼斯菲尔德钢厂曾对所生产的热轧带卷检查了 59 卷，其中低碳钢 47 卷中 41 卷无缺陷，其余 6 卷中有 13 个单独轻微缺陷；合金钢 4 卷全部无缺陷；不锈钢 8 卷中 5 卷无缺陷，3 卷中有 11 个单独轻微缺陷。59 卷产品都达到了欧洲‘05’标准，无缺陷率为

99.42%，由于缺陷均是细线结疤和针孔，不影响产品质量，均可供冷轧车间轧制用。此外，力学性能和内部质量也在规定范围内，屈服强度、抗拉强度和延伸性能在纵向、对角线、横向和边缘部位均匀一致。

奥钢联以 CONROLL 技术对阿姻科·曼斯菲尔德老厂进行了改造，使这个企业在质量和产量上都获得了满足，整个工艺的可靠性及不需清理板坯的直接热装工艺给它带来显著的效益。

五、CPR 工艺

CPR 工艺即铸压轧工艺（Casting Pressing Rolling），由西马克公司、蒂森公司和法国尤西诺尔·沙西洛尔（Usinor Sacilor）公司共同开发，用于生产厚度小于 25mm 的合金钢和普碳钢热轧带材，其工艺原理见图 9－9－65。它利用浇铸后的大压下（60%极限压下量），仅使用一组轧机，最终可生产厚度为 6mm 的薄带卷。该工艺采用西马克的漏斗型结晶器，出结晶器下口铸坯厚度为 50mm，直接进行液芯压铸和粗轧，早期的试验装置是一对铸轧辊，初轧制力为 2500kN，后改为两对，第一对挤压、压制力为 500kN，可将铸坯减薄至 25～30mm，再进入第二对辊，通过 2500kN 的轧制，粗轧铸坯为 13～20mm。该生产线包括一台连铸机、一台感应炉、除鳞机、一台四辊轧机。试验线见图 9－9－66。

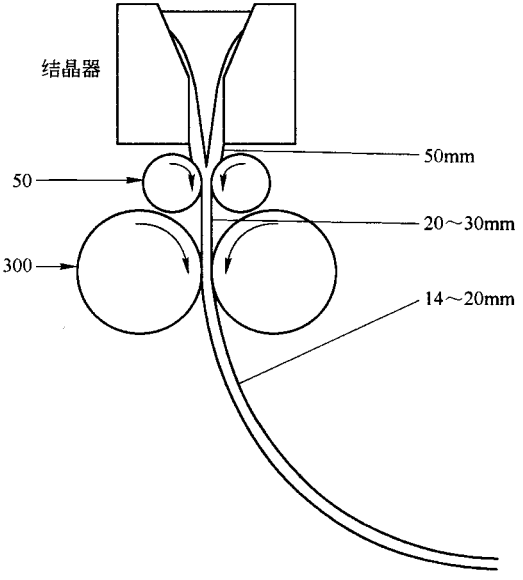


图 9－9－65　CPR 原理示意图

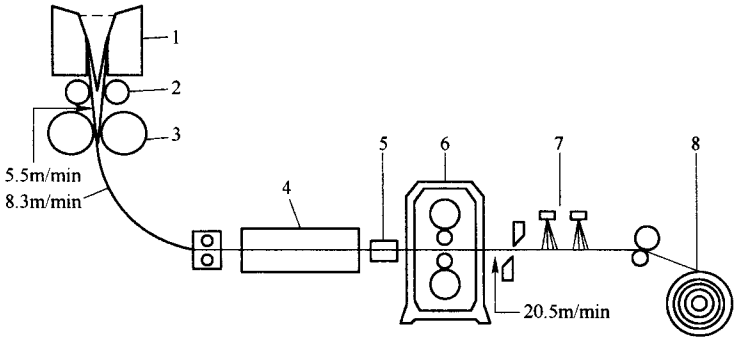


图 9－9－66　森林公司的 CPR 试验线示意图

1—结晶器；2—挤压辊；3—轧制辊；4—感应炉；5—除鳞区；6—轧机；7—冷却区；8—卷取机

在 CPR 技术中，有几个重要环节：

(1)铸机和轧机之间铸坯有较大温降，需设感应加热炉。使铸坯表面升温的同时，还应考虑带钢边缘的加热，保证宽度方向的温度均匀。

(2)不同的浇铸速度和轧制力可获得不同厚度的带钢。如浇铸速度为 5.0m/min，车制力为 2500kN，可得到 15mm 厚度带钢；浇铸速度提高至 6m/min，带钢厚度为 13mm。

(3)由于仅有一组轧机，它所允许的最大压下量限制了带钢的最终厚度。一般来讲，CPR 工艺的生产能力受浇铸速度和液芯压铸厚度影响而有一定局限，这方面是有别于 CSP 工艺的。

(4)相对低的轧制速度引起铸坯温度损失较大，因此生产线上采用高压除鳞机，旋转喷头沿带钢横向移动，尽量减少温降。

(5)为提高铸坯表面质量，在液芯压铸和粗轧位置均设置除渣(或鳞)装置，再配合合适的钢水过热度、保护渣和结晶器冷却速度等一系列优化工艺参数，可使带钢表面无氧化铁皮。

(6)四辊轧机带有 CVC 和 AGC 板形控制设备，能保证带钢最终规格满足扁平材的要求。

(7)CPR 工艺如能满足生产厂所需带钢厚度范围的要求，那么选择它的投资成本是很低的。CPR 生产线具有设备投资少、劳动力成本低(100～150 美元/t)等显著特点，是紧凑型低成本的生产线，适合 40 万 t/a 的小钢厂。

(8)CPR 工艺现已能生产 St14 带钢，最薄厚度为 6.0mm，力学性能符合要求，冷轧后带钢性能均匀。其他如低碳钢、管线钢、铁素体和奥氏体不锈钢及高硅电工钢也已能成功的生产出来。

第四节　薄板坯连铸连轧流程的优化分析

一、薄板坯连铸连轧流程的优化方向和原则

1. 优化方向

薄板坯连铸连轧工艺流程的优化方向包括：

(1)确定合理的薄板坯规格尺寸，建立以降低临界压缩比为主要标志的流程“紧凑化”；

(2)力求产品专业化、系列化，甚至以热轧超薄带卷与同规格的冷轧薄板相竞争；

(3)促成各工序/装备在作业时间上的“在线”/“离线”控制协同化；

(4)实现生产、管理、经营系统的信息集成。

2. 化学冶金过程优化原则

对薄板坯连铸连轧流程进行化学冶金过程优化的基本出发点是：

(1)确保薄板坯连铸机的连浇周期(涉及产量、成本、效率)；

(2)生产高温无缺陷薄板坯(涉及质量、成本)；

(3)薄板坯断面、钢件与轧机需要(市场销售)在时间上协调一致(涉及市场、效益)。

薄板坯连铸连轧流程中各工序协调的原则是：

(1)各工序的工艺过程时间的优化及其时钟推进的优化；

(2)各工序间输送/等待时间的优化、协调和最小化；

(3)连铸中间包内钢水过热度的优化及由此反推二次冶金、炼钢炉离站钢水温度的优化范围；

(4)各工序的合理温度范围及其递次收敛性，见图 9－9－67；

(5)工序间物流量—温度—时间(时钟)协调推进；

(6)约束边界条件下的静态优化(收敛)和实际运作条件下的动态调控(发散—收敛)的结合。

以电炉—钢包精炼炉(LF)—连铸机的生产流程为例，来说明流程中各工序间协调化的表达方式。

在上述三个工序间时间合理调控原则为：

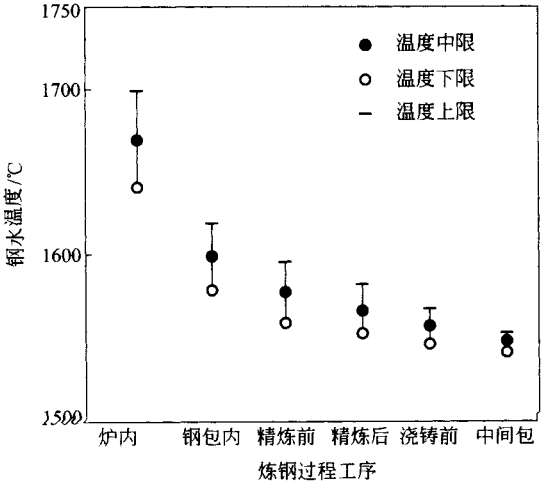


图 9－9－67　炼钢过程温度‘收敛性’分析

$$t_{EF} \leqslant t_{CC}$$

$$t_{LF} \ll t_{EF} \leqslant t_{CC}$$

式中　t_{EF}——电炉的冶炼周期，min/炉；

t_{CC}——连铸机的浇钢周期，min/炉；

t_{LF}——钢包精炼炉的精炼时间，min/炉。

三个工序操作时间允许有一定的波动范围，但应确保每个工序操作时间波动合理，符合下式：

$$\Delta t^{o}_{CC} \leqslant \Delta t^{o}_{EF} < \Delta t^{o}_{LF}$$

式中　Δt^{o}_{CC}——连铸机浇铸时间合理波动范围，min；

Δt^{o}_{EF}——电炉作业时间合理波动范围，min；

Δt^{o}_{LF}——钢包精炼炉处理时间合理波动范围，min。

各工序在作业时均有可能出现等待，但不能超出一定范围，表示为：

$$\Delta t^{w}_{CC} \leqslant \Delta t^{w}_{EF} < \Delta t^{w}_{LF}$$

式中　Δt^{w}_{CC}——铸机允许等待电炉、LF 炉的合理时间范围，min；

Δt^{w}_{EF}——电炉允许等待 LF 炉、铸机的合理时间范围，min；

Δt^{w}_{LF}—钢包精炼炉允许等待电炉、连铸机的合理时间范围，min。

由此还可以推出在流程中各工序的等待时间最小原则：

$$\Delta t^{w}_{CC} + \Delta t^{w}_{EF} + \Delta t^{w}_{LF} \rightarrow \min(\text{最小})$$

流程中温度调控同样重要，首先要保证中间包内钢水过热度在钢液液相线以上 10～20℃，其次是各工序的离站目标温度及其温度波动范围。工序离站目标温度波动范围的约束为：

$$\Delta T_{EF}^{tap} \leqslant \pm 20℃$$

$$\Delta T_{LF}^{off} \leqslant \pm 10℃$$

式中　ΔT_{EF}^{tap}——离开电炉工序时钢液的目标温度范围，℃；

ΔT_{LF}^{off}——离开 LF 炉工序时钢液的目标温度范围，℃。

其中还需要符合工序目标温度波动值的递次收敛原则：

$$\Delta T_{CC} < \Delta T_{LF}^{off} < \Delta T_{EF}^{tap}$$

式中　ΔT_{CC}——连铸机中间罐内钢液的目标温度范围，℃。

工序间的流量协调原则为：

$$Q_{EF} = Q_{LF} = Q_{CC}$$

式中　Q_{EF}，Q_{LF}——分别为电炉和钢包精炼炉每分钟的平均出钢量，t/min；

Q_{CC}——连铸机每分钟的平均出坯量，t/min。

而在全流程中温度因素和时间因素有密切的关系，表示为：

$$\Delta T = f(\Delta t^{w}, Q, R)$$

$$\Delta t = f(\Delta T, R)$$

式中　ΔT——工序间钢水温降，℃；

Δt^{w}——工序间等待/传搁时间，min；

Δt——工序间输送、传搁、等待时间，min；

Q——钢包容量，t；

R——其他相关因素。

3. 物理冶金过程优化原则

物理冶金过程优化原则的基本出发点在于，有利于销售效益的产品大纲优化（涉及市场占有—经济效益—技术优化的结合）。

从物理冶金的角度出发，工序协调原则包括：

(1)合理压缩比的确定以及可能的“最小化”；

(2)一火成材原则；

(3)充分利用铸坯自身热量以及由再加热得到的热量；

(4)形变与相变的结合（涉及轧件的控温轧制与控制冷却）；

(5)轧机系统的“紧凑化”原则以及“临界参数”（如铸坯/轧件尺寸、机架数、产品尺寸

范围等)的选择,见图 9－9－68；

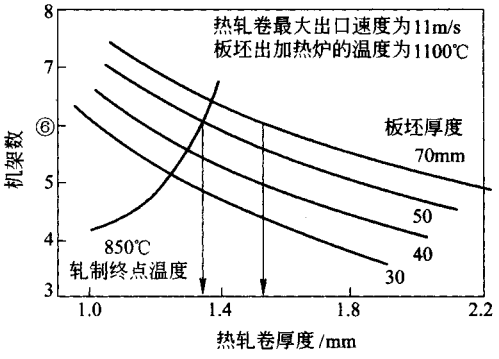


图 9－9－68　热连轧机架数和铸坯进热轧机前厚度对热轧卷可达最小厚度的影响

(6)工序间秒流量—温度—时间的平衡连续/缓冲协调；

(7)形状尺寸控制与表面质量控制；

(8)为后续表面处理的优化创造条件。

物理冶金过程优化原则的表述方式为：

工序间流量协调原则：

$$n_1 Q_{CC} = n_2 Q_{RH} = Q_{RO}$$

式中　Q_{CC}——连铸机每分钟平均出坯量,t/min；

$n_1 = 2$(或 1)；

R_{RH}——加(补)热装置每分钟平均出坯量,t/min；

$n_2 = 2$(或 1)；

Q_{RO}——轧机系统每分钟平均轧制量,t/min。

过程时间最小化原则：

$$t_{CC}^{RH} + t_{RH} + t_{RH}^{RO} + t_{RO} \rightarrow \min(\text{最小})$$

式中　t_{CC}^{RH}——铸坯切割后到进入加(补)热装置的输送时间,min；

t_{RH}——铸坯在加(补)热装置内停留的时间,min；

t_{RH}^{RO}——铸坯出加(补)热装置到进入轧机的输送时间,min；

t_{RO}——铸坯在轧机系统中加工的时间,min。

能源消耗最小原则：

$$\Delta T_{CC}^{RH} + \Delta T_{RH} + \Delta T_{RH}^{RO} \rightarrow \min(\text{最小})$$

式中　ΔT_{CC}^{RH}——铸坯切割后到进入加(补)热装置的温降,℃；

ΔT_{RH}——铸坯在加(补)热装置内的温升,℃;

ΔT_{RH}^{RO}——铸坯出加(补)热装置到进入轧机的温降,℃。

工序间等待时间范围:

$$\Delta t_{RO}^{w} < \Delta t_{RH}^{w}$$

式中　Δt_{RO}^{w}——轧钢机等待加(补)热装置供坯的合理时间范围,min;

Δt_{RH}^{w}——加(补)热装置等待铸机供坯的合理时间范围,min。

4. 化学冶金过程—物理冶金过程的衔接、匹配原则

化学冶金过程—物理冶金过程的衔接、匹配原则为:

(1)温度—时间衔接的"紧凑化"(涉及物流、物态、物性、成本);

(2)流程中生产体物流量衰减的"最小化"或"离线"物流量的"最小化"(涉及效率、成本);

(3)材料物性控制的"遗传/孕育"准备(涉及质量、品种、市场)。

5. 薄板坯连铸连轧流程"在线"/"离线"协调内涵

薄板坯连铸连轧流程"在线"/"离线"协调的内涵为:

(1)流程短——即压缩比的"临界"优化;

(2)工序间传搁、等待时间的最小化;

(3)工序间温降损失的最小化和协调;

(4)工序间时间(时钟推进)—温度协调优化基础上的最佳物流流量;

(5)工序装置"在线"/"离线"的协同化和最佳利用率;

(6)工序间生产体(如钢液、铸坯、轧件等)的收得率最大化。

即:

(1)物流通过时间的"最小化"(min/t);

(2)系统能耗的"最小化"(kJ/t);

(3)最大的工艺装备"在线率"(%);

(4)投资额、投资效率的优化(元/t)。

二、薄板坯连铸连轧流程的时间因素解析

1. 时间因素在流程中的重要性

时间是一个基本的独立参数。时间是连续的而且不可逆转的。时间在钢铁制造过程中是一个基本的且重要的参数,是生产、经营过程中的基本参数。20 世纪 90 年代以来,薄板坯连铸连轧工艺成功地实现工业化生产,"紧凑型"短流程钢厂迅速崛起,钢铁制

造流程的过程时间越来越短，制造过程中的时间因素调控越来越显得重要。

从钢厂的具体生产流程来看，时间因素则表现为从原料、能源的储运开始到生产过程中每一工序间的时钟推进计划以及过程中的时间点等因素的协调和必要变更等。

若扩大至整个钢厂来看，时间因素的重要性则体现为从企业开始接受用户订货起，直至从原、燃料购进将其变为产品发货乃至资金周转过程中的时间周期的合理安排，是一个全方位贯穿在全流程中的参数。

2. 时间在“紧凑型”流程中的表现形式及其内涵

在以薄板坯连铸连轧工艺流程为代表的“紧凑型”钢厂流程中看时间这一参数，其表现形式越来越丰富。它具体表现出的特点已不再是简单地过程时间的长短了，而是以时间点、时间域、时间位、时间序、时间节奏、时间周期等形式表现出来。在建立钢厂的 MIS 和 CIMS 系统之前均需解析这些表现形式。

薄板坯连铸连轧流程是一连续化/准连续化制造过程，时间已不仅是随机自变量，还需将它作为目标函数来研究，分析它在钢铁制造过程中各单元工序间协调（集成）过程中的含义。

举例来看，某钢厂若实现智能化调度，首先必须做到工厂生产系统在满足各方面要求（或边界条件）的情况下，达到生产过程时间最短，确保工序间连续性、协调性或生产率最高。此时，时间因素已作为目标函数出现。但在制造过程中各工序处理时间、传输时间、等待等过程的时间却又呈现自变量的性质。可见，时间在钢厂制造过程中呈两重性。

就某一工序、某一装置而言，其时间消耗值是由化学（物理）冶金时间、辅助作业时间和传输、装卸、等待（缓冲）时间所组成的。其具体表现形式为工序的时间点（开始时间点或离开时间点）、过程时间域（如过程时间的长短和起止时间范围等）和时间节奏（工序作业时间、流程周期时间的节律性等）等的调控。

就前后工序或相邻工序之间的关系而言，则表现为时间序的安排，时间位的调控，时间域的衔接、缓冲、协调范围以及缓冲协调范围的长程性/短程性（相邻两工序之间的时间协调为短程性调控，三个或三个以上工序直到整个流程系统的时间协调属于长程性调控），传输的时间过程，等待时间的长短和时序安排等。对薄板坯连铸连轧流程进行时间解析，可见图 9－9－69。

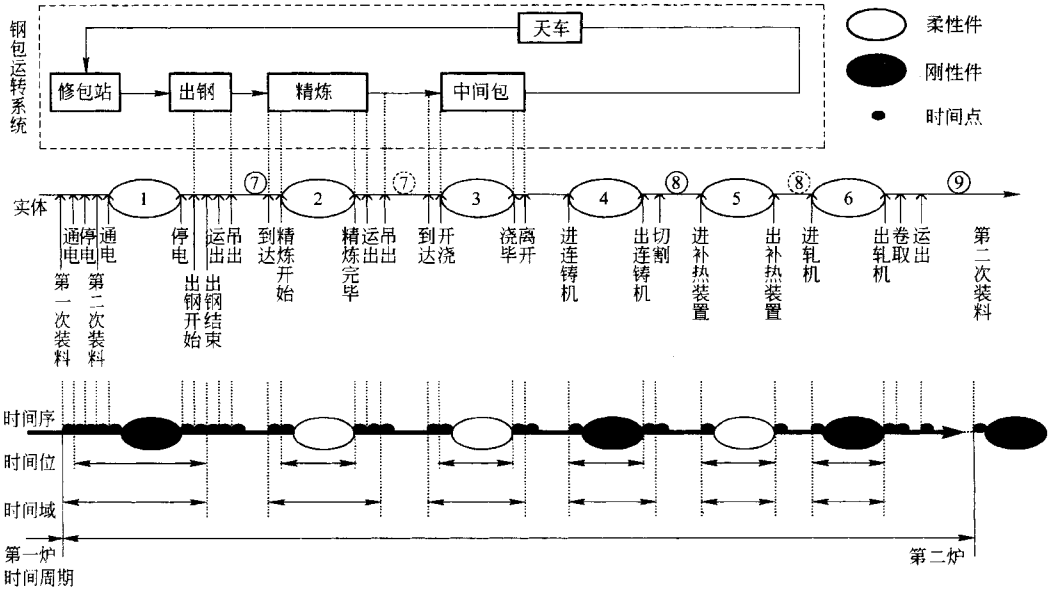


图 9－9－69　薄板坯连铸连轧流程的时间解析

1—电弧炉；2—精炼炉；3—中间包；4—连铸机；5—铸坯补热装置；6—轧机；7—钢水；8—铸坯；9—热轧材

第五节　薄板坯连铸连轧技术的新进展

一、生产超薄规格的半无头轧制技术

由于市场的发展和技术进步，目前采用薄板坯连铸连轧生产的热轧板已可以达到0.8mm，预计今后有可能达到0.6mm。为稳定生产如此薄规格的热轧板，必须在设备上采取措施，半无头轧制就是一种合适的选择。

薄板坯连铸连轧生产线生产薄规格热轧带钢较传统热带轧机有其特殊优势，如经过辊底式炉均热和升温的薄板坯温度可达1100～1150℃，高于传统轧机中间带坯的温度，且薄板坯沿宽度方向和长度方向温度都很均匀，是轧制薄规格钢带的重要的有利条件。墨西哥希尔沙公司生产线投产7个月后即生产出厚0.98mm的带钢，随即成批生产薄规格和超薄规格热轧带钢，最小厚度为0.84mm。我国的珠钢也已生产出1.0mm的热轧带

钢。但是，薄板坯连铸连轧单块轧制由于频繁的咬钢、穿带、甩尾，卡钢和折印事故不可避免。据介绍，生产 0.91mm 的带钢卡钢事故是轧 2.0mm 带钢的 1.8 倍，折印是 2.0mm 的 2 倍。

在总结希尔沙公司和其他一些公司生产线的经验基础上，SMS 公司推出了以生产热轧超薄带为主的薄板坯连铸连轧生产线。该生产线的基本设备配置与传统的 CSP 技术相同，但是技术有很大变化。在工艺上称为半无头轧制技术，连铸的薄板坯出结晶器是 63mm 厚，经过液芯压下后离开连轧机时铸坯厚 48mm。此时，铸坯不剪断进入隧道式加热炉（传统的 CSP 技术铸坯剪断为 40 余 m），加热炉可达 300 余 m（传统 CSP 技术为 200m），铸坯经均热以后进入 7 机架连轧机组轧制成材。输出冷却辊道分为两段，第一段较短，为 30m 左右，其中快速冷却水集管为 10 余 m，冷却段后是超薄带卷取机（旋转卷取机）。第二段为传统的层流冷却和传统的卷取机，主要为生产一般规格的热带。为对生产的成品带钢进行分卷，在卷取机前设有高速飞剪。该生产线生产的产品以超薄规格热带为主，其中 0.8～3mm 的带钢占 60% 以上，高强钢最小厚度为 1.2mm。低碳钢可达 0.8mm。产品宽度为 900～1600mm。由于采用了半无头轧制技术，双流连铸的最大年产量可达到 240 万 t。采用半无头轧制技术利用了连铸坯可以较长的特点，减少了穿带过程产生的带钢温度降低、厚度不易控制和生产不稳定的问题，非常有利于薄规格产品的轧制，CSP 生产线半无头轧制技术的工艺配置见图 9－9－70。我国唐钢的薄板坯连铸连轧生产线则采用三菱重工技术，为二阶段轧制法，其配置形式见图 9－9－71。

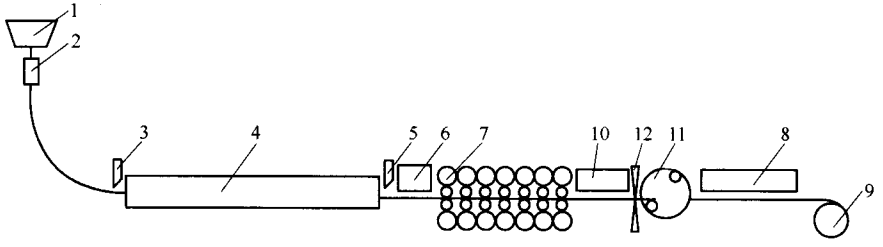


图 9－9－70　CSP 半无头轧制技术工艺配置图

1—中间包；2—结晶器；3—切断剪；4—均热炉；5—事故剪；6—除鳞机；7—精轧机；8—2 号层流冷却；9—生产厚规格的常规卷取机；10—1 号层流冷却；11—生产薄规格的旋转式卷取机；12—飞剪

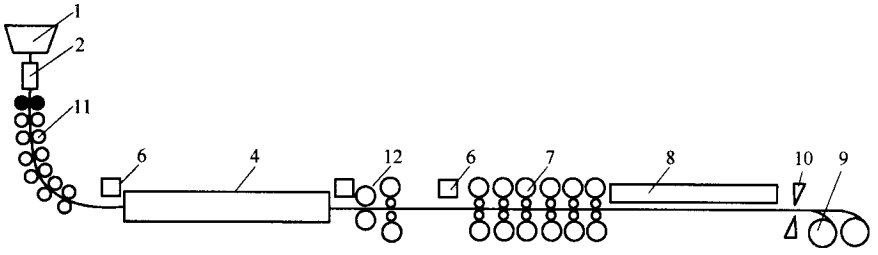


图 9－9－71　唐钢的半无头轧制工艺配置图

1—中间包；2—结晶器；4—均热炉；6—除鳞机；7—精轧机；8—层流冷却；9—卷取机；10—飞剪；11—液芯压下；12—粗轧机

德国蒂森—克虏伯公司在杜伊斯堡厂新建的薄板坯连铸连轧生产线，是这一设计思路的尝试。该生产线产品规格为厚 0.8～6.35mm，最终目标是采用半无头轧制技术生产超薄带，努力目标为 0.6～0.8mm。与第一代薄板坯连铸连轧设备参数的比较见表 9－9－28。

表 9－9－28　传统与专门生产薄规格带钢设备的参数比较

参　数		普通 CSP 设备	轧制薄规格 CSP 设备
		纽柯Ⅰ厂	蒂森厂
板坯厚度/mm		50	63
最大轧制速度/$m \cdot s^{-1}$		12	20
板坯长度(最大)/m		43	>200
产品厚度(最小/最大)/mm		1.2/12.7	0.8/6.35
均热炉长度/m		158	240
轧机功率/kW	$F_1 \sim F_2$	7000	8500
	$F_3 \sim F_4$	7000	10000
	$F_5 \sim F_6$	7000	12500，10000
	F_7		10000
轧制力/MN	$F_1 \sim F_2$	30	42.8
	$F_3 \sim F_4$	30	42.8
	$F_5 \sim F_6$	30	32.65
	F_7		32.65

参　数		普通 CSP 设备	轧制薄规格 CSP 设备
		纽柯 I 厂	蒂森厂
工作辊直径/mm	$F_1 \sim F_2$	780	820/950
	$F_3 \sim F_4$	780	660/750
	$F_5 \sim F_6$	780	540/620
	F_7		540/620

从表 9－9－28 可以看到，为生产超薄规格热轧带钢，新生产线采用 7 架精轧机；最大轧制速度提高到 20m/s；各机架工作辊直径不一样，F_1、F_2 加大为 950/820mm，以便于咬入较厚板坯，加大压下量，F_3、F_4 与传统生产线设计相近 750/660mm，F_5、F_6、F_7 有所减小，为 620/540mm；主电机功率增大为 8500～12500kW。

表 9－9－29 为唐钢薄板坯连轧采用半无头轧制技术生产超薄规格带钢的轧制厚度顺序。由表可以看到，当采用半无头轧制的工艺路线时，必须先进行分批轧制，轧制一部分过渡材。即首先单块轧制 3.0mm 的带钢 3 卷，然后再单块轧制 2.0mm 的带钢 3 卷。这样可以使轧机处于较好的工作状态。从第 7 卷钢开始进入半无头轧制程序，这时连铸坯不再切断，可以保持到加热炉所允许的最长长度 220m。当该长坯咬入轧制时，首先轧制 1.2mm 的一个带卷，第一个带卷由卷取机前的飞剪切断后，轧机动态压下到 1.0mm 再轧一个卷，然后再压下到 0.8mm 轧制超薄规格带钢数个钢卷，在结束这次半无头轧制程序之前的倒数第 2 个卷还要轧制 1.0m 钢卷，倒数第一个钢卷轧制 1.2mm，结束一次半无头轧制。之所以采用这种程序是由于在轧制超薄规格热带时板形控制的难度加大，为保证在轧制过程中轧辊有合适的热凸度，必须安排一定量的烫辊材轧制，使轧辊的热凸度适合于轧制超薄规格带钢。图 9－9－72 表示了半无头轧制时热凸度随轧制过程变化的情况。

表 9－9－29　半无头轧制技术生产超薄规格带钢的轧制厚度顺序

板　坯　号	板坯尺寸	加工方法	产品尺寸
1 2 3	33m(最大)×70mm	单块轧制	3.0mm
4 5 6	33m(最大)×70m	单块轧制	2.0mm

板　坯　号	板坯尺寸	加工方法	产品尺寸
7 第一块半无头轧制坯	220m(最大)×70mm	半无头轧制坯	1.2mm
8 第二块半无头轧制坯			1.0mm
9			0.8mm
……			0.8mm
……			0.8mm
……			0.8mm
……			1.0mm
……			1.2mm

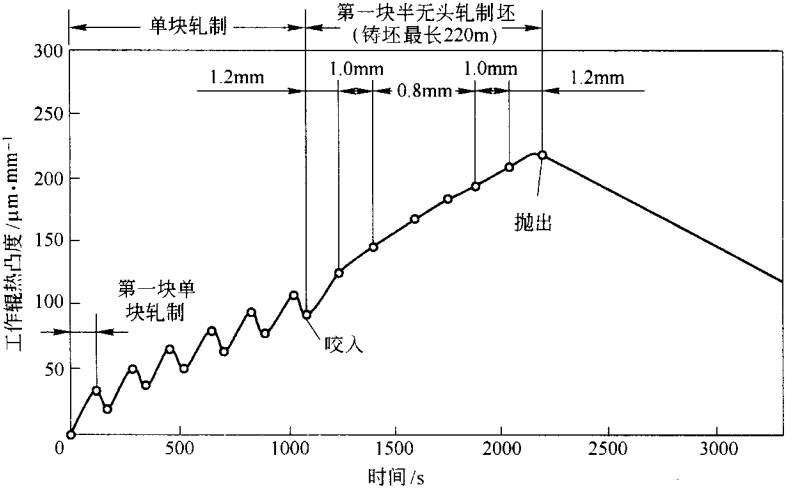


图 9－9－72　半无头轧制过程轧辊热凸度的变化

也应看到，薄板坯连铸连轧技术虽然有利于生产超薄热带，但这一技术目前尚属发展时期，从介绍的资料分析，带钢厚度小于 1.2mm 的产品的比例仍然很少。图 9－9－73 为 SMS 公司给出的墨西哥希尔沙厂某月生产超薄热带的比例。可以看到，0.91～2.05mm 的产品约占 50%，但是 1.53～2.05mm 的约占 25%，1.37～1.52mm 占 16%，小于 1.2mm 的产品仅 5%左右。希尔沙厂是专门为生产超薄带而设计的工厂，生产线上采用了许多保证轧制稳定的措施，但是真正意义上的超薄带生产量仍然不大。由此可见，目前大量生产薄规格仍有许多技术问题需解决，例如轧制过程中的动态变规格问题、高速飞剪和高速卷取机的使用问题、薄带的板形控制问题等。

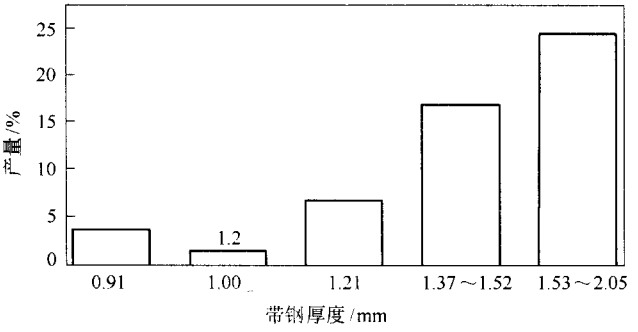


图 9－9－73　墨西哥希尔沙厂某月生产薄规格带钢的数量统计

另外，经济方面也有一个最优化的问题。从图 9－9－74 和图 9－9－75 可以看到，超薄热带生产需要有很多的中间坯，例如如果轧制 300t1.0mm 厚的热带就需要约 120t 的其他规格的过渡材，同时轧辊的磨损量也急剧的增加，并且事故率也增加。据报道，希尔沙厂在轧制 1.6mm 带钢时事故率在 2%以下，但是生产 1.0mm 的带钢时事故率可达 13%。当然，从理论上分析，如果采用半无头轧制这些问题可以缓解，但是缓解的程度尚需实际给出结论。

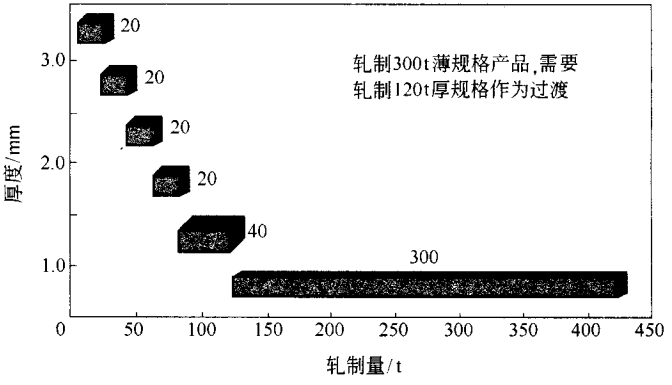


图 9－9－74　生产薄规格热带所需过渡材情况

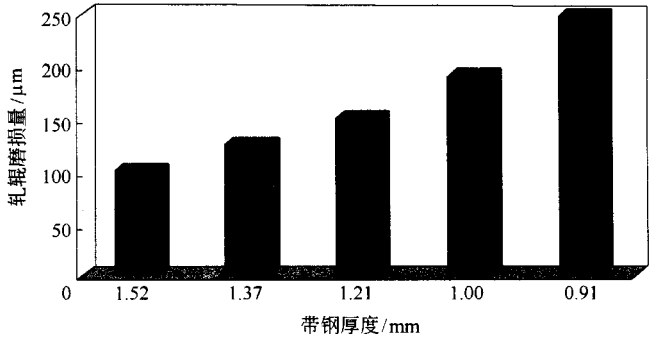


图 9－9－75　生产薄规格热带轧辊磨损量变化

二、选择适当厚度的铸坯

连铸板坯不追求太薄，而向中等厚度发展（80～120mm）。中国邯钢的薄板坯连铸连轧生产线（SMS）、南非萨尔达尼亚厂的薄板坯连铸连轧生产线（MDH）、加拿大阿尔戈马公司的薄板坯连铸连轧生产线（Danieli）、中国鞍钢改造的 1700 薄板坯连铸连轧生产线、中国唐钢的半无头轧制生产线，均采用中等厚度板坯。这种生产线采用 1～2 架粗轧机，中间保温辊道或热卷取机，5～6 机架精轧。采用粗轧和精轧两个阶段配置，有其优越性。首先是可以达到比较大的变形量，有利于生产薄规格产品。通常粗轧可以分配较大的变形量，以减少精轧的压力，而精轧由于温度、板形和轧机能力的限制往往难以安排过大的变形道次。由于粗轧和精轧之间带坯有回复和再结晶的时间，有利于产品的性能控制和优化，更容易生产性能要求高的品种。较厚的铸坯有利于实现较大的压缩比，有利于保证质量。图 9－9－76 为变形量对产品性能的影响。显然，厚的板坯和大的变形量，可使产品性能更优良。在这方面，我国在生产实际中也感到 50mm 的铸坯生产 6mm 以上的热轧板在性能控制方面有一定的难度。

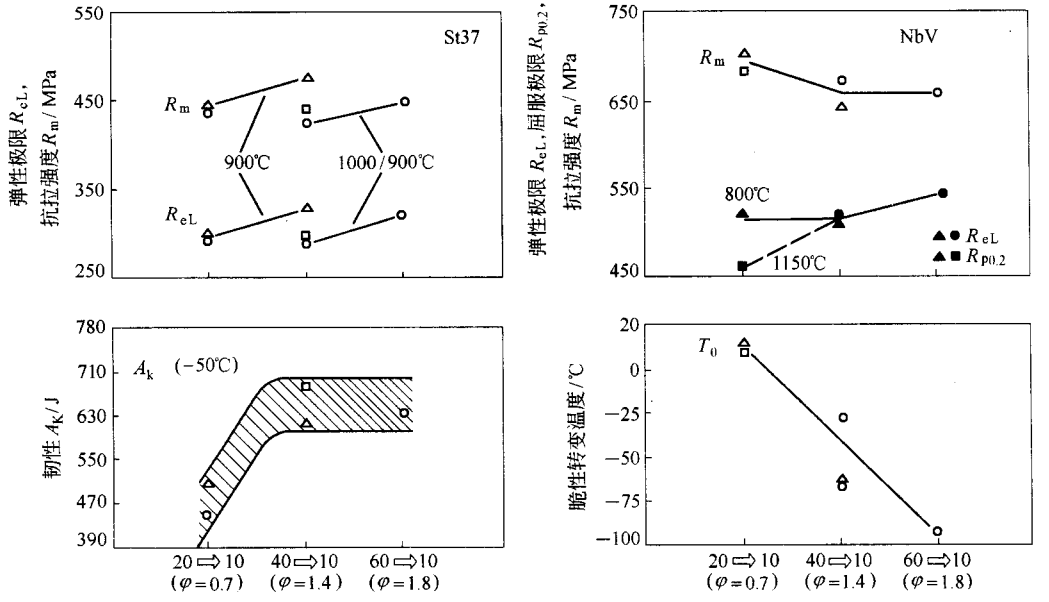


图 9－9－76　由于压缩比变化引起的钢材性能的变化

国外研究的结果和我国的经验也是类似的。研究认为，从薄板坯到成品的总变形量通常分为两部分：

$$\varepsilon_{\sum} \rightarrow \varepsilon_R + \varepsilon_C$$

式中　$\varepsilon_{\sum}$——总的变形量；

ε_R——使铸坯的铸态组织发生再结晶的临界变形量；

ε_C——保证直接热装薄板坯的奥氏体组织发生多形性转变的临界变形量。

实验表明，其基本条件是，$\varepsilon_R \geqslant 50\%$，$\varepsilon_C \geqslant 60\% \sim 70\%$，$\varepsilon_{\sum} \geqslant 80\%$。由此可以得到不同厚度的薄板坯所对应的最大热带的厚度，表 9－9－30 为研究的结果。从表中可以看到，对于 50mm 厚的板坯要满足上述的条件，最大的厚度也只有 7.5mm 左右，这和我国的实践经验相近。由此可知，铸坯厚一些对扩大品种范围、提高性能是有利的。

表 9－9－30　不同厚度薄板坯生产成品的厚度值

薄板坯厚度/mm	中间坯厚度/mm	最大成品带钢厚度/mm
40	20	6～8
50	25	7.5～10
60	30	9～12

另外，据国外计算，采用中等厚度板坯在节能、经济效益、成本方面比采用 50mm 厚的板坯有优势。而且由于结晶器的体积大，容纳钢水多，铸坯质量也容易保证，一些备件如结晶器铜板、水口寿命也更长。

三、铁素体加工技术的应用

传统的热带生产方法中，为了获得良好的力学性能，热轧工艺要求精轧温度在 A_{r3} 以上。随着精轧厚度的变薄，尤其是当轧制厚度 1.4mm 以下的低碳钢时，要想实现在完全奥氏体状态下轧制将变得更加困难，于是提出了铁素体轧制的方法。薄板坯连铸连轧生产线也在这方面进行尝试。图 9－9－77 为采用薄板坯连铸连轧技术进行低温轧制（铁索体区轧制）的工艺流程的设想图。图中，在粗轧和精轧机组之间设立了冷却段对带钢进行快速冷却，使带钢进入精轧机时已经转变为铁素体，进而达到节能和提高质量的目的。

采用铁素体轧制技术目的是要避免在 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变时的两相区轧制。$\gamma \rightarrow \alpha$ 相变时会出现流变应力的突变，尤其是当带材薄而轧制速度快时，末架精轧机产生的非均匀变形可能会导致带材的跑偏和板形缺陷。此外，在奥氏体和铁素体共存的情况下轧制，会引起带钢力学性能不均匀和最终产品厚度的波动（流变应力的变化引起轧制力的变化，使

得厚度控制难度加大)。精轧机和粗轧机之间的超快速冷却系统,使带钢温度在进入第一架精轧机前降低到 A_{r3} 以下。图 9－9－78 表示了传统(奥氏体)的轧制过程和铁素体轧制过程的比较。

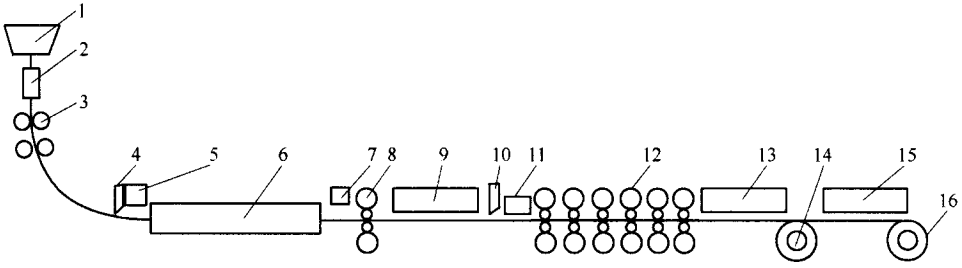


图 9－9－77　采用低温轧制的工艺布置

1—中间包;2—结晶器;3—液芯压下;4—分段剪;5—除鳞机;
6—均热炉;7—除鳞机;8—粗轧机;9—1 号冷却线;10—事故剪;
11—除鳞机;12—精轧机;13—2 号冷却线;14—薄规格卷取机;15—3 号冷却线;16—卷取机

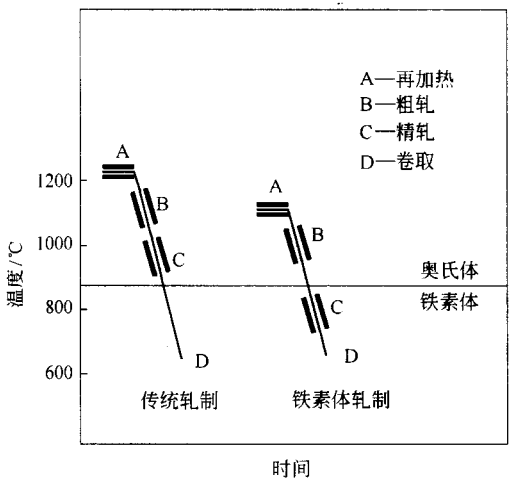


图 9－9－78　传统轧制与铁素体轧制过程的比较

铁素体轧制技术还有其他一些优点,例如减少了氧化铁皮的产生和工作辊的磨损,提高了带钢表面质量,降低了输出辊道上冷却水的消耗。另外,铁素体轧制技术还可以作为新一代钢铁材料生产的手段,例如,通过低温加工可以使钢材的性能得到提高,可以少加或不加合金元素而得到高强钢。

值得指出的是,对于低碳或超低碳钢而言,在铁素体状态下轧制力并不比在奥氏体状态下的轧制力大。例如,下列两个主要系列的钢种均可实现铁素体轧制:

(1)低碳钢,铝镇静钢(ULC):C = 0.015% ~ 0.04%,Mn < 0.3%;

(2)超低碳无间隙原子钢(ULC - IF):C < 0.005%,Mn < 0.3%。

图 9 - 9 - 79 所示的这些材料的流变曲线表明,在奥氏体温度范围内(1050 ~ 860℃)和铁素体温度范围内(850 ~ 750℃)的轧制变形阻力几乎相同。此外,这两种情况下的变形阻力会随着温度的降低而增加,而且增加的幅度(斜率)也相同。

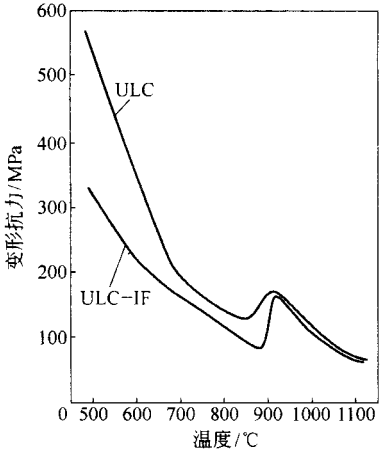


图 9 - 9 - 79　低碳和超低碳钢的变形曲线

图 9 - 9 - 79 也说明另外一个问题,为了能够精确控制轧制过程,在过程控制模型中应该考虑当 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变时会出现变形抗力及热物性参数(比热、导热系数)的突变。

但是,目前适合在铁素体状态下轧制的钢种比较有限,一般为超低碳钢和极低碳钢。其他钢种通常在铁素体区轧制时会造成轧制力的增加,对于设备刚度、强度和能力的要求将会提高。图 9 - 9 - 80 为铁碳相图。可以看到,在低温时可以是铁素体的钢只有很小的区域。所以,如何扩大能采用铁素体轧制的钢种范围是该技术今后需要解决的一个重要问题,认为马上可以采用铁素体加工技术大量生产优质的钢材现在还不现实。

四、生产更多的品种

根据国外的统计,目前薄板坯连铸连轧生产线可以生产的品种主要有:低碳钢、低合金钢、普通管线钢、可热处理钢、弹簧钢、工具钢、电工钢、耐磨钢和部分不锈钢等。其钢号见表 9 - 9 - 31。

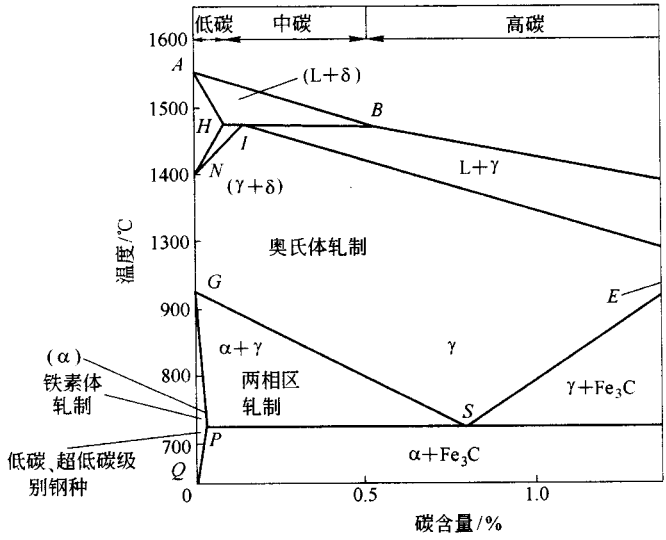


图 9－9－80　可以进行铁素体加工的钢材的成分范围

A：(1534℃，0%C)；*B*：(1493℃，0.51%C)；*G*：(910℃，0%C)；*H*：(1493℃，0.10C)；*I*：(1493℃，0.16%C)；*P*：(723℃，0.02%C)；*Q*：(20℃，0.00%C)；*S*：(723℃，0.80%C)

表 9－9－31　薄板坯连铸连轧可生产的钢材品种

序　号	钢　种	钢　号	用　途
1	**中、低碳钢**		
1.1	**冷成形用钢**	StW24(+B)	**纵梁**
1.2	**冷轧用钢**	St24	**支撑材料**
2	**结构钢和低合金高强度钢**		
2.1	**中碳钢**	St52－3	**结构管**
2.2	**具有优良成形性的低合金高强度钢**	QStE550TM	**轮毂，框架**
2.3	**可焊接的细晶结构钢**	StE500	**汽车框架结构**
		WStE420	**支撑材料**
		TStE500	**汽瓶钢**
		EStE500	
2.4	**耐大气腐蚀钢**	WStE52－3	**钢板桩**
2.5	**加磷钢**		**冷轧料**
3	**管线钢**	StE480.7	**管线建设**
		X70	

序　号	钢　种	钢　号	用　途
4	可热处理钢		
	C 钢	CK50	支撑、垫圈材料
	C－Cr 钢	41Cr4	离合器板
	C－Mn 钢	28Mn6	制管
	C－Mn－B 钢	(30MnB5)	冲压、支持架
	C－Cr－Mo 钢	42CrMo4	制动器
	C－Cr－Mo－V 钢	(30CrMoV4)	轮轴
5	弹簧钢		
5.1	非合金弹簧钢	Ck67	弯曲和螺旋弹簧
5.2	合金弹簧钢	50CrV4	弹簧尺
6	工具钢		
6.1	非合金工具钢	C70W	刀、剪
6.2	合金工具钢	C85W	犁刀
		C100W	锉刀
		75Cr1	木锯
		56NiCrMoV7	锯片材料
		75NiCrMo553	锯片
7	耐磨钢	90Mn4	耙
8	电工钢		冷轧料
8.1	非取向硅钢	Si = 1.2 ~ 3.2	电机、发电机、变压器用矽钢片
8.2	取向硅钢		

序　号	钢　种	钢　号	用　途
9	不锈钢		
9.1	铁素体不锈钢	X6Cr17	
9.2	奥氏体不锈钢	X5NiCr18 10	在试验

从现在的生产钢种看，薄板坯连铸连轧厂可以覆盖大多数的热轧带钢的品种范围，但是一些高性能要求和高附加值的品种还不能生产，通常认为目前的薄板坯技术可以生产约 70% 的传统热带可生产的钢种。各薄板坯连铸连轧厂正在进行扩大品种的研究工作，希望在短的时间内能够使薄板坯连铸连轧的产品覆盖更多的传统轧机生产的热轧带钢。目前的发展工作主要集中在低碳和超低碳深冲钢的生产、高牌号管线钢的生产、高强度钢的生产等几个方面。

目前，在传统热轧机上生产这些钢种的工艺是相当成熟的，而如低碳深冲钢板，特别是汽车外表面用的冷轧深冲板，是薄板中最难生产的品种。这是由于汽车用深冲钢一方面要求有极其优良的常规力学性能，如低的屈服强度、高的均匀延伸率和总延伸率，还要求有优良的成形性指标，如高的应变硬化指数和后向异性比；另外，要求有优良的表面质量，表面无任何夹杂、结疤、划伤、辊印、油污等，即所谓的 05 表面；有的钢板还要求强度和成形性指标同时要高，焊接、抗回弹性能好以及抗凹陷能力强等。

在传统的带钢生产中，各种生产工艺参数均要严格控制。如果采用罩式退火的方法生产深冲板，在热轧中对于工艺的控制应该是“三高一低”，即加热温度高、开轧温度高、终轧温度高和卷取温度低。因为薄板的深冲性能在很大程度上与织构有关，而氮化铝的析出时机又决定了在冷轧和退火后的织构的强弱。如果氮化铝在热轧过程不析出，而在冷轧后的退火时析出则可以获得较强的有利织构。“三高一低”的热轧工艺就是为了这个目的，高温加热、高温开轧和高温终轧都是为了使氮化铝在热轧过程中因为处于较高的温度下而不析出；低温卷取则是通过快速的冷却迅速到较低的温度，跳过氮化铝的平衡析出温度区间，使氮化铝能够固溶在钢中，留到以后退火时再析出。对于氮化铝析出的控制在薄板坯连铸连轧中也是非常重要的，也要求在轧制过程中不要有氮化铝析出，所以从这一点分析，薄板坯连铸连轧生产深冲板是有有利条件的。

但是深冲板很重要的工艺要求是钢质纯净，国外一般生产深冲板均要求 RH 真空处理，目前国外薄板坯连铸连轧的生产厂均无 RH 处理装备。另外，这些厂均使用废钢作为原料，废钢中含的夹杂元素很多，如铜、锰、硅、镍、铬等，这些元素对于提高深冲性能都是不利的。再有深冲板往往用于汽车外覆盖件，对于表面要求很高，如所谓的 05 表面

板，但是目前的薄板坯连铸连轧生产的薄板表面比传统方法生产的产品有差距。这些是不利的条件。

根据现在的情况分析，如果要使薄板坯连铸连轧生产线可以生产低碳和超低碳的深冲钢板，要采取一些必要的措施，如精炼、保护浇铸、降低钢水的夹杂、铁素体轧制等。表 9－9－32 给出了这些要求。

表 9－9－32　在 CSP 厂生产低碳、超低碳钢的关键环节

炼钢工序	薄板坯连铸工序	薄板坯冷轧工序
●洁净钢生产技术	●无碳连铸保护渣	●奥氏体轧制
●二次精炼，真空脱气	●保持高洁净度相关技术	●铁素体轧制
●保护浇铸（水口、惰性气体保护、密封）	●熔池液面平稳	●控制冷却
●中间包（流动模型优化、气体保护）	●电磁制动	

管线钢是要求比较高的产品，生产的难度比较大。它在生产中要求的钢水纯净度高，为确保韧性，硫含量要低于 0.003% ~ 0.005%，氮含量低于 0.005%。晶粒要细，国外一般的晶粒尺寸为 6 ~ 7μm，晶粒度可达 13 级以上。除了力学性能要求高以外，还要求低温冲击韧性指标、焊接裂纹敏感性指标、使用中的止裂程度指标、耐蚀性指标和工艺性能指标。在钢材的组织方面有铁素体 + 珠光体、铁素体 + 微量珠光体、铁素体 + 低碳贝氏体等几类。在轧制方面要严格轧制工艺控制，一般实施温度控制轧制或热机械轧制。前者是通过一定温度范围内变形获得与正火条件相应的最终组织。后者包含 2 ~ 3 个轧制阶段，阶段之间有一定的中间冷却时间，一般要求在 800℃以下进行 60% ~ 70% 的变形。

必须指出的是，在得到细小的原始晶粒方面薄板坯连铸连轧有其优势，但是在进行大变形以获得细小的最终组织方面薄板坯连铸连轧并无优势，这是因为薄板坯一般比较薄，造成轧制过程的压缩比比较小，和传统的板坯轧制相比，在细化晶粒方面是不利的。

因此生产高牌号的管线钢对于薄板坯连铸连轧技术而言，特别是对于采用比较薄的连铸坯（50mm）是没有什么优势的，当然通过提高炼钢技术水平和优化轧制工艺可以部分解决压缩比小的问题，但是终归有限。如果考虑生产管线钢则应当选择相当厚一些的板坯，所以现在的薄板坯发展也在向增加厚度（中等厚度板坯）的方向发展。奥钢联认为，70 ~ 120mm 厚的板坯，有利于液面稳定、防止卷渣、减少铸坯缺陷，因此宣称该厚度板坯生产的产品质量和品种优于薄板坯而与传统厚板坯相当，几乎可以覆盖全部热轧带钢产品。

现在,主要的薄(中厚)板坯连铸连轧生产流程都无一例外地把提高热轧薄带的质量、提高各类钢种(尤其是包晶和亚包晶钢)的生产能力作为重点目标。综合分析,所采取的主要措施归结起来主要有以下 7 个方面:(1)改进电炉原料构成、普遍进行铁水预处理、加强钢水精炼,所以配备真空精炼设备(如 ISP 技术的南非萨尔达尼亚厂),以从根本上改善钢水的纯净度;(2)改进结晶器的结构;(3)二冷普遍采用轻压下或软压下技术,并根据钢种、铸速对二冷区域轻(软)压下的起、终点、压下量、压下速率进行智能化控制;(4)加大铸坯厚度以增加压缩比,提高浇铸过程中结晶器液面的稳定性;(5)进行荒轧;(6)进行多道次高压水除鳞;(7)进行铁素体轧制等。应当说,这几年的努力已取得了显著的成绩。它不仅全面提高了热轧薄带卷的质量,而且有的生产线(如 ISP 生产线、FTSC 生产线)已经把包括包晶钢在内的十几个钢种纳入了正常生产范围。热轧钢带的制成品包括了一定深冲性能要求的汽车车轮轮辐、轮箍等在内的各种形状的零部件。生产的 0.8 ~ 1.5 mm 热轧酸洗板表面凸度 $\leqslant 0.4\mu m$,几何形状好,已可全面代替这一厚度规格的冷轧板供应用户。

从工艺理论上来分析,薄板坯连铸铸速高、凝固传热强度大,只要控制低的系统浇铸温度,加上电磁制动、轻压下等技术,铸坯质量可以达到或接近传统板坯连铸。快速边部加热、均热,多道次高压水除鳞,加上新流程的精轧机组配备了最新的技术装备,轧制质量可以优于大部分传统热轧机组,在同样的洁净钢生产条件下,新流程生产各种优质薄带材应当可以达到传统流程的质量水平,只是在新的压缩比和热衔接条件下,需要继续探索和完善工艺技术和装备。

五、连铸的速度更快,产量更高

薄板坯连铸连轧生产线以平均宽度 1300mm 的低碳钢品种为例,50mm 厚度薄板坯的单流铸机生产线能力已由过去的 60 万 ~ 70 万 t/a,向 100 万 t/a 过渡;50 ~ 70mm 厚度已达到 100 万 ~ 130 万 t/a;≥90mm 的可达 130 万 ~ 150 万 t/a。但是对使用 250mm 厚板坯的传统热带连轧机,采用配置 2 台粗轧和 5 ~ 6 架精轧的生产线通常可达 300 万 ~ 350 万 t/a。与此相比,70 ~ 90mm 厚度薄板坯生产线的轧钢生产能力一般为 100 万 ~ 150 万 t/a,即使配备 2 流铸机,生产能力发挥的"瓶颈"仍然是连铸机。但从双流≥90mm 厚度铸坯配备 1 ~ 2 架粗轧机及 5 ~ 6 机架精轧机生产线,生产能力 250 万 t/a 的生产线来看,这种"瓶颈"作用已大大减小了。

十年来薄板坯连铸浇铸速度不断提高,铸机生产能力大幅度提高。一般 40 ~ 50mm 厚铸坯正常浇铸速度保持在 4.5 ~ 5.0m/min 的水平上,而现在,甚至 70 ~ 90mm 厚的铸

坯浇铸速度也可达 5.5～6.0m/min(如达涅利在加拿大建设的阿尔戈马生产线和 CSP 的北极星生产线)。据介绍,目前正在计划开发更高铸速的技术,如 70mm 厚铸坯,软压下到 40～45mm 厚,铸速达到 12m/min,不切断,直接经过边部均热后进热连轧机,实现无头轧制,可以实现高生产效率的新技术。可以预计,如果这一技术获得突破,薄板坯连铸连轧将可以在产量上和传统热轧机相媲美。

第十章　连铸自动控制

第一节　计算机仿真连铸操作

一、操作步骤

(1)启动计算机,打开连铸操作程序。
(2)启动程序,进入准备模式。
(3)确认插入条件满足后,将连铸操作进入插入模式。
(4)完成引锭杆送、塞操作后,将连铸操作进入保持式。
(5)确认开浇条件满足后,将连铸操作进入铸造模式。
(6)铸坯尾部出结晶器后,将连铸操作进入引拔模式。
(7)在尾坯经切割进入冷床后,整个连铸操作程序结束,关闭计算机。

二、注意事项

(1)操作模式转化时,必须确认可转化的条件。
(2)模式转化须按顺序进行,每一模式只能做特定的工作。

三、基础知识

(一)连铸工艺基本流程

连铸工艺基本流程为:钢包(钢包运转台)→中间包(中间包车)→结晶器(结晶器振

动装置)→二次冷却支导装置(水喷淋)→拉矫装置→切割装置→出坯装置。

(二)连铸岗位及主要工作内容

根据连铸工艺流程,连铸岗位有:钢包准备、中间包准备、钢包操作、连铸浇钢操作、加渣操作、二冷操作、切割操作、出坯操作、主控操作、主电操作和精整操作。

各岗位主要工作内容如下:

(1)钢包准备。负责钢包砌筑、烘烤、清理、拆包及滑板、水口、透气塞等安装。

(2)中间包准备。负责中间包砌筑、烘烤、拆衬及滑板、塞棒等安装。

(3)钢包操作。负责钢包回转台操作,钢包钢流控制及长水口安装等。

(4)连铸浇钢操作。负责中间包车操作,结晶器液面控制、连铸机拉速控制等。

(5)加渣操作。负责结晶器保护渣加入及液面清理。

(6)二冷操作。负责检查二次冷却状况,确保二冷喷嘴位置正确,喷水畅通,铸坯冷却正常。

(7)切割操作。负责切割中间包车的操作,按定尺要求对铸坯进行切割。

(8)出坯操作。负责输送辊道、推钢机等操作,将铸坯送出连铸机。

(9)主控操作。负责对连铸机运行过程中各运行参数的设定、监察和记录。

(10)主电操作。负责对连铸电气设备运行的监视和处理。

(11)精整操作。负责按铸坯质量标准对铸坯进行检查和精整。

(12)机长。负责整台铸机运行的协调和指挥。

(三)连铸机运行模式

连铸机运行通常可分为五个模式:准备模式、插入模式、保持模式、浇注模式和引拔模式(如图 9-10-1 所示)。关系图中的箭头表示转化顺序,各模式运行含义如图 9-10-1 所示。

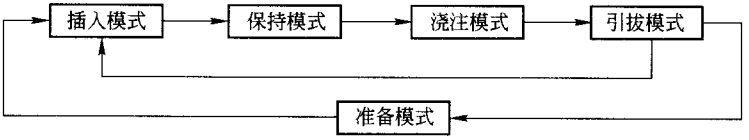


图 9-10-1　连铸机运行模式示意图

1. 准备模式

连铸机在准备模式状态下,全部设备都能进行单独运转,并保持安全运转所需要的保护联锁装置,设备之间的联动关系均被解除。在准备模式状态下,连铸设备可以进行维修和调整,为连铸机进入以后各阶段的运转模式做好准备;向连铸机提供稳定的能源、

介质供应，准备模式只能在尾坯输出模式完成后进行。

2. 插入模式（送引锭模式）

连铸机在送引锭模式状态下，能进行安装引锭杆的作业，将引锭头装入结晶器内规定的位置上。用上装式引锭杆的连铸机，送引锭模式可在准备模式完成、送引锭条件满足、确认后进行；用上装式引锭杆的连铸机，送引锭模式也可在尾坯输出模式尚在进行中进行（即铸坯末端通过某一特定驱动辊之后），从而充分发挥上装式引锭杆的优势，提高连铸机的作业率。

3. 保持模式

连铸机在保持模式状态下，处于一种等待浇注的锁定状态，它可在送引锭模式完成、确认后进行。此时引锭头在结晶器内的规定位置上不允许移动；压紧引锭杆的驱动辊处于制动状态；结晶器振动装置、拉矫驱动装置等不允许进行操作；此时应对结晶器内引锭头进行密封、铺设铁屑及冷却块等工艺操作。

4. 浇注模式

连铸机在浇注模式状态下能进行浇注作业，并使引锭杆完成引锭循环、自动回收的过程。它可在保持模式完成、浇注条件满足、确认后进行。在浇注模式状态下，钢水通过钢包滑动水口控制装置进入中间包；当中间包内的钢水重量达到规定的开浇重量时，中间包的塞棒或滑动水口打开，控制钢水注入结晶器；当结晶器内钢液面高度达到设定值时，由机长发出起步操作命令，使连铸机拉矫驱动装置开始拉坯运行、结晶器振动装置自动启动、二次冷却装置自动开始喷水。拉矫驱动装置的拉坯速度通过拉速设定器手动给定，同时铸坯跟踪控制系统会自动开始工作，连续检测引锭杆的尾部和头部等位置，控制拉矫驱动辊的升降、液压传动的压力切换及二次冷动装置中各喷嘴的喷水顺序等，并使引锭杆和铸坯能顺利通过辊列。当完成脱锭后，引锭杆将被安放在回收装置上，实现整个引锭循环过程。在浇注模式状态下，连铸机可以实施钢包交换、中间包更换等多炉连浇作业。

5. 引拔模式（尾坯输出模式含重拉坯模式）

连铸机在尾坯输出模式状态下，能进行浇注结束时的尾坯输出作业。当连铸机发生浇注故障或事故时，连铸操作人员应立即切断和撤出钢水源，防止钢水继续泄出扩大事故，要尽快清理辊列内的红热残坯，因为残坯凝塞在辊列内会给事故的处理增加难度。如辊列内的尾坯无法用正常的尾坯输出模式拉出，就应选择重拉坯模式，将尾坯强行拉出。尾坯输出模式可在钢包和中间包内钢水相继浇注完毕、结晶器内钢液面完成封顶工艺操作后进行。此时尾坯跟踪控制系统会自动开始工作，连续检测尾坯的移动位置，控

制结晶器振动装置自动停止振动，并相继抬起有关的拉矫驱动辊，各组拉矫驱动装置停止运转，二次冷却装置中各喷嘴关闭等。尾坯输出模式自动结束后，连铸设备的运转状态又自动转换到准备模式，完成一个周期的循环。

（四）连铸设备运转模式转换的周期性、方向性、顺序性

连铸机运转模式的转换具有周期性、方向性、顺序性等 3 大特点。

1. 周期性

连铸机运转模式的转换是一个呈周期性变换的封闭循环过程，有外环和内环两条路径，外环路径在尾坯输出模式后要通过准备模式才能进入送引锭模式，而内环路径在尾坯输出方式后可直接进入送引锭模式。

2. 方向性

连铸机运转模式的转换是有方向性的。它只能顺着运转模式相互关联框图的箭头方向进行转换，而不能逆向转换；因此在连铸作业的操作过程中，对设备运转模式的转换操作必须慎重，在转换之前必须检查、确认下一个运转方式的运转条件及有关设备的运行位置，待合格后才能实施运转方式的转换操作。

3. 顺序性

连铸机运转方式的转换和传递必须按照先后顺序进行。连铸操作人员只有按照每次运转方式规定的操作完成后，才可选择下一种运转方式。

（五）连铸设备运转程序

连铸设备的运转程序是指连铸机在不同运转模式状态下，各设备运转的先后顺序一般通过自动控制及手动操作来实现。

下面以上装式引锭杆的板坯连铸机为例，说明连铸设备的运转程序。

1. 准备模式设备运转程序

当尾坯输出模式完成后连铸机会自动转换为准备模式状态，连铸操作人员要全面检查，确认连铸机各系统设备是否正常、完好，及时处理设备问题和故障，并进行调整检修或更换；在准备模式完成前，还必须做好与确认送引锭的插入条件，并对连铸机的电控系统进行总复位及清零处理。

2. 送引锭模式设备运转程序

当进入送引锭模式时，连铸操作人员必须观察操作监视画面，待显示“插入准备完”信号后，才能进行引锭杆的插入作业。送引锭模式的运转程序为：

（1）引锭杆车从提升侧运行到插入侧位置，会自动停车。

（2）引锭杆车的输送链反向运转，使输送链的插入挂钩与引锭头的钩轮相钩住，然后

输送链正向运转，输送引锭杆到结晶器内，同时安装在输送链传动装置的脉冲计数器开始计数。当引锭杆尾部接近结晶器上口位置时，连铸操作人员应确认引锭杆是否在结晶器的中央位置，并进行对中操作，使引锭杆继续以低速运行。

(3)当引锭杆尾部通过结晶器后，连铸操作人员应再次确认引锭杆是否在结晶器的中央位置，如果偏离则进行对中操作。当引锭头到达插入挂钩脱钩位置后，输送链运转自动停止。在驱动辊压紧引锭杆以后，再启动输送链运转，实现引锭头与输送链之间脱钩，然后输送链运转到脱钩位置上自动停止。

(4)引锭杆车的输送链停止运转后，就可采取点动操作驱动辊使引锭杆继续插入，此时引锭杆跟踪系统进行初始化，安装在外弧驱动辊上的脉冲计数器开始计数；当引锭头顶面到达相距结晶器上口 550mm 位置时，停止对驱动辊的点动操作，此时整个引锭杆被压紧、锁定在连铸机的辊列中，送引锭过程确认结束。

(5)开始烘烤中间包。当中间包车到达烘烤位置后，将中间包由高位下降到低位，然后使中间包的滑动水口伸入到水口烘烤炉内进行烘烤，连铸操作人员将中间包烘烤装置的燃气供给系统打开、点燃并放下烘烤臂，使烘烤臂上的烧嘴对准中间包盖上的烘烤孔并进行烘烤，烘烤臂的放下角度可用手动操作调节。

3. 保持模式设备运转程序

连铸机的保持模式必须在送引锭操作全部结束、确认后才允许选择，保持模式的时间一般不大于 1h。保持模式的运转程序为：

(1)连铸操作人员首先完成引锭头在结晶器内的引流砂密封、涂胶密封、铺设铁屑及冷却块、结晶器壁涂油等工艺操作。

(2)当钢水到位开始浇注时，停止烘烤中间包，并关闭中间包烘烤装置各烧嘴的火焰燃气供给系统，抬起烘烤臂，将中间包由低位上升到高位，此时中间包的滑动水口应伸出水口烘烤炉盖外。

(3)将中间包车从烘烤位快速运行到浇注位置停车后，将中间包下降到低位，使中间的滑动水口伸入到结晶器内，然后进行左右、前后方向的对中操作。

(4)钢包回转台在出钢跨受包、称量，并进行加盖操作，然后钢包回转台开始旋转，钢包到达浇注位置后停止，夹紧装置将钢包回转台锁定。此时连铸操作人员进行钢包滑动水口液压缸的安装及钢包长水口的安装；最后将钢包回转台的转臂由高位降至低位。

4. 浇注模式设备运转程序

连铸机的浇注模式必须在保持模式以后，所有浇注条件都已满足、确认后才允许选择。连铸操作人员必须观察浇注侧的悬挂操作箱，待出现‘浇注准备完’信号才能进行开

浇作业。浇注模式的运转程序为：

(1)打开钢包滑动水口，钢水经长水口流入中间包并进行称量。在中间包内钢水重量达到规定的开浇重量后，打开中间包的塞棒，控制钢水的流量注入结晶器。当结晶器内的钢水液位上升到距结晶器上口约 100mm 时，由连铸操作人员按下“浇注起步”电钮。按所设定的拉坯初速度开浇，此时拉矫驱动装置各驱动辊按拉坯方向自动转动，结晶器振动装置自动振动，铸坯跟踪装置开始工作，二次冷却一区、二区的冷却水阀自动打开，开浇后的拉坯速度按工艺操作要求增加。当中间包、结晶器内钢液面高度稳定、拉速正常时，即可投入和切换中间包钢水重量及结晶器钢液面高度自动控制设施。

(2)铸坯跟踪装置自动投入后，即对引锭杆尾部和头部位置进行连续的跟踪、检测，当引锭头在拉坯过程中接近二冷段某一冷却区时，该区冷却水、气等阀即自动打开，并由仪表集散系统控制冷却水的流量。

(3)当引锭杆尾部到达提升位置时，光电管发出信号，引锭杆开始提升并钩住引锭杆尾部两侧的钩轮。当引锭头到达脱锭位置时，光电管发出信号，自动完成脱锭过程，将引锭头与铸坯分离。当发生引锭杆提升或脱锭失败时，连铸操作人员必须采取手动操作进行强制干预，以确保运转成功。

(4)引锭杆被提升到位时，引锭杆车输送链会自动正向运转，使输送链的提升挂钩钩住引锭杆尾部的钩轮，经光电管检测确认无误后，输送链自动将引锭杆卷上并拖拉到引锭杆车上回收，为下一个送引锭循环做准备。当发现自动运转过程出现故障时，应立即转换为手动操作。铸坯被连续拉出辊列后，被切割成定尺长度，再经去除毛刺、喷印后由推钢机、垛板台进行堆垛、冷却，等待精整处理。

5. 尾坯输出模式设备运转程序

连铸机的尾坯输出模式必须在浇注模式以后，浇注全部结束、结晶器完成封顶工艺操作才允许选择。尾坯输出模式的运转程序为：

(1)当末包钢包、中间包浇注完毕时，中间包车快速将中间包向放渣位置运行，并由浇注跨吊车将其吊离下线。此时拉坯速度已降至最低，连铸操作人员仍在结晶器内进行封顶工艺操作，待封顶完成，拉坯速度开始提升后，就可将浇注模式转换到尾坯输出模式。

(2)连铸机进入尾坯输出模式时，铸坯跟踪系统会自动进行连续的跟踪、检测，安装在内弧工作辊上的脉冲计数器开始计数。当尾坯通过结晶器、二次冷却装置时，结晶器振动装置会自动停止振动；各冷却区的冷却水、气阀会自动关闭，并按尾坯冲洗程序自动进行冲洗；当尾坯通过最后一对工作辊时，尾坯输出模式自动结束，连铸机的运转模式又

自动转换到准备模式。当尾坯已通过夹辊，但还未通过最后拉辊时，如果连铸机已做好送引锭准备，连铸操作人员可将连铸机运转模式状态切换到送引锭模式状态上，这时连铸机的运转模式状态就可以跳过准备模式状态，直接由尾坯输出模式状态进入送引锭模式状态，将引锭杆重新插入连铸机辊列，开始新的引锭、浇注循环。

（六）连铸设备运转相关条件

连铸设备的运转相关条件是指连铸机在不同运转模式下必须具备的先决保障条件，它在连铸控制室的操作监视画面上显示。

下面以上装式引锭杆的板坯连铸机为例，说明连铸设备的运转相关条件。

1. 送引锭模式应具备的运转相关条件

（1）电气、仪表系统电源供应正常，各系统的可编程序控制器（PLC）运行状态正常，各远程操作台、盘、箱状态正常；

（2）液压站供应连铸机主体设备的各机组运行正常，各级液压压力到位，蓄能器的压力正常；

（3）集中润滑站的各机组运行正常；

（4）设备的冷却水供应到位、压力正常；

（5）各驱动辊已处在运转状态，各制动器状态正常；

（6）快速更换台已处在浇注位置；

（7）结晶器的振动装置处在停止状态；

（8）各工作辊的运转、升降等操作选择自动模式；

（9）引锭杆车在浇注侧位置，传动装置与操作系统状态正常，引锭杆车的运行、输送链传动等操作选择自动模式，引锭杆车的止挡板处在下限位置；

（10）引锭杆处在引锭杆车的对中与起始位置；

（11）紧急停车信号已复位；

（12）各扇形段的框架夹紧状态正常；

（13）引锭杆的提升装置状态正常；

（14）各工作辊不允许一起抬起等。

当条件全部满足，且选择进入送引锭模式后，在连铸控制室操作监视画面上会出现“插入准备完”的信号显示。

2. 浇注模式应具备的运转相关条件

浇注模式除需具备送引锭模式的运转相关条件外，还有下列条件：

（1）结晶器的冷却水、二次冷却水供应到位，压力正常；

(2)压缩空气供气到位,压力正常;

(3)各驱动辊已处在浇注状态;

(4)结晶器振动装置的操作选择自动模式;

(5)结晶器的排烟风机运行正常;

(6)引锭杆车在提升侧位置;

(7)引锭杆的提升装置操作选择自动模式;

(8)引锭杆的脱锭升降缸在低位位置,移动缸在原始位置,脱锭操作选择自动模式;

(9)选择正常的尾坯输出模式;

(10)引锭杆的提升钩处于低位;

(11)引锭杆两侧导向板应直立;

(12)引锭杆的提升压辊处在低位位置;

(13)引锭杆的防滑落装置处在打开位置;

(14)挂钩的退回装置处在提升位置;

(15)引锭杆的宽度导向板处在打开位置;

(16)事故水箱的水位处在高位;

(17)各浇注的联锁条件不允许解除;

(18)后部辊道设备的传动装置状态正常等。

当浇注条件全部满足,且选择进入浇注方式后,在连铸控制室操作监视画面上会出现‘浇注准备完’字样。

第二节　连铸生产自动化系统

一、连铸机生产自动控制项目

连铸机生产自动化控制项目工艺如图 9 – 10 – 2 所示。

二、连铸生产自动化的意义

实现连铸生产自动化的意义有以下几点:进一步提高生产效率与铸坯质量合格率,简化操作过程、降低劳动强度,并实现全程计算机控制和管理,从而为降低生产成本、优

化生产过程提供有效的手段。

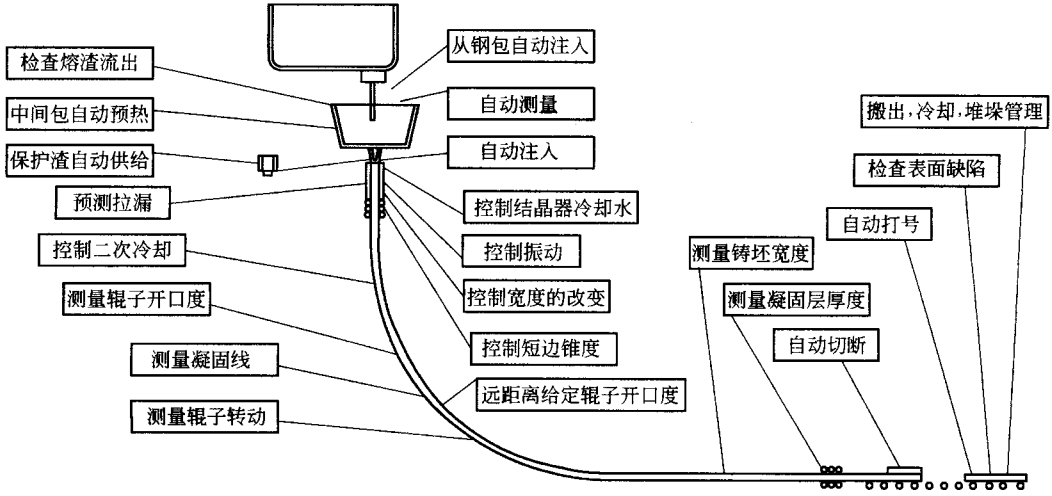


图 9－10－2　连铸机主要自动控制项目示意图

三、连铸过程自动化

连铸自动化是在连铸生产过程中,根据不同的生产设备和工艺要求,借助于检测仪表和控制设备,使连铸生产按预定方案自动进行。

连铸过程自动化应该包括以下几个主要内容：

(一)连铸过程参数的自动检测

实施连铸过程参数检测的目的是生产管理的需要、保证产品质量的需要、实现生产过程自动化的需要。连续、准确和及时的检测,是实现连铸自动化的重要前提。根据各种不同的控制对象、控制系统的特定要求,借助相应的仪表控制设置对各种必需的过程参数进行检测。

(二)基础自动化

基础自动化是在自动检测基础上,按照各设备的特殊需求实现自动控制。它通过 PLC 独立控制各个区域或单体设备,各个 PLC 之间又通过基础自动化总线共享信息,以铸流 LC 为主同步协调地控制其他 PLC 的工作。

PLC 控制设备的功能和对象如表 9－10－1 所示。

表 9－10－1　连铸机 PLC 控制对象及控制功能

PLC 名称	控制对象	控制回路	控制功能
公共 PLC	钢包旋转塔	MCC 传动	钢包塔旋转
		液压控制	钢包臂和钢包盖顺序控制
*		称量系统	钢包称重
	中间包车	MCC 传动	中间包车行走,中间包升降对中
*		测温系统	中间包钢水测温
*		称量系统	中间包称重
铸流 PLC	结晶器	给料系统	喂稀土丝,加保护渣
		MCC 传动	结晶器振动
*		漏钢预报	结晶器粘连检测
*		软夹紧装置	结晶器自动调宽装置
*		液面控制	钢包,中间包滑动水口自动控制
		冷却系统	结晶器宽窄面控制
*		电磁搅拌	结晶器电磁搅拌
	铸机本体	MCC 传动	结晶器和二次冷却室蒸汽排除
		MCC 传动	拉矫机控制
		长度测量	板坯跟踪系统
		辐射测量	板坯表面温度测量
		汽雾冷却	板坯二次冷却
		机械冷却	铸机本体冷却
铸流 PLC		MCC 传动	切头样坯收集装置
*	火焰切割机	切割机控制	板坯定尺切割
	引锭杆	MCC 传动	引锭杆车行走,传输链移动
		MCC 传动	引锭杆卷扬
		液压传动	脱引锭杆
出坯 PLC	辊道	MCC 传动	辊道组传动
	挡板	气动	挡板升降

PLC 名称	控制对象	控制回路	控制功能
	去毛刺机	液压,气动控制	板坯去切割毛刺
*	喷号机	单体控制系统	板坯喷号
*		称量系统	板坯称重
公辅 PLC	水处理	板坯铸机冷却水	水泵水阀控制和过程测量
	空气压缩机	汽雾冷却空气加压	板坯汽雾冷却
	能源介质	压力流量调节系统	搅拌、封闭、切割、冷却、气动介质
	润滑系统	MCC 传动,阀控制	机械轴承自动润滑
	液压系统	液压回路	钢包,扇形段等液压控制
	供配电	低压配电	铸机、厂房照明、维修用电器
HMI 操作站	主控室	网络	铸机
	切割控制室	网络	板坯切割
	出坯控制室	网络	板坯输出
其他设备	扇形段更换	自动天车系统	机械手更换扇形段
	开口度测量	测量仪	测量辊距和弧度等

注 标‘ * ’者为单体控制设备,由相应 PLC 提供接口连接。

(三)过程自动化和计算机功能

连铸过程自动化是在基础自动化的基础上实现全过程的自动控制,达到按工艺要求,实现产品生产的优质、高产。因为连铸设备分布广泛、功能复杂,所以连铸生产管理一般都采用多级计算机系统,如基础自动化、过程控制自动化和生产管理自动化三级管理来实现。

连铸过程控制计算机的主要功能包括:连铸系统各类控制参数的设定值、钢包和中间包钢水跟踪、切割长度定尺、动态二次冷却水调整、铸坯质量判断、连铸作业报告、过程数据存储和处理、铸坯跟踪及库存处理。

在连铸自动化系统的网络结构中,计算机先从自动检测和基础自动化总线上获得设备状态、介质数据的信息,为其数学模型和生产动态跟踪提供依据,由数学模型计算出各类控制参数,对照计算机设定值返回到人机接口,供操作人员参考和选择。现场设备和系统的操作模式分为手动、远程手动、PLC 自动和计算机自动控制等 4 种模式。

过程计算机主要由连铸过程计算机,出坯过程计算机,2、3 级计算机网络和终端设备

组成，分布在计算机房和连铸各个控制室。终端设备上的信息供现场人员监视，操作员在终端设备上实现人机对话、输入和修改数据、视生产需要输出各类生产和统计报表。

由上可见，计算机控制系统、电气传动控制系统（控制连铸所有设备的动作）和仪表控制系统是现代大型连铸设备不可缺少的重要组成部分，也是衡量连铸设备整体装备水平的标志，简称为生产过程自动控制的‘三电’系统。