

第八篇

钢水的炉外精炼技术

第一章 炉外精炼技术的发展

第一节 炉外精炼技术的发展历程及分类

炉外精炼技术是将转炉、电炉初炼的钢水转移到另一个容器(主要是钢包)中进行精炼的过程,也称“二次冶金”或钢包精炼。因此,炉外精炼把传统的炼钢过程分两步进行:(1)初炼。在氧化性气氛下进行炉料的熔化、脱磷、脱碳和合金化;(2)精炼。在真空、惰性气氛或可控气氛下进行脱氧、脱硫、去除夹杂、夹杂物变性、微调成分、控制钢水温度等。

炉外精炼是生产优质钢的必要手段,是炼钢—炉外精炼—连铸生产过程中的关键环节。虽然各种炉外精炼方法不同,但却存在许多共同点。按炉外精炼技术的作用可分为四类

(1)搅拌。采用电磁力、惰性气体或机械搅拌的方法搅拌钢水;

(2)真空脱气。应用真空、惰性气体或还原气氛等,为钢水精炼提供一个理想的精炼气氛条件;

(3)升温。采用电弧加热、埋弧加热、等离子加热等加热设施,或增加钢水中的化学热,以补偿精炼过程中钢水的温度损失;

(4)喂丝或喷粉。

20世纪50年代以来,各种炉外精炼方法相继出现。目前,全世界已有500多台炉外精炼设备投入工业生产。炉外精炼在现代化的钢铁生产流程中已成为一个不可缺少的

环节。尤其是炉外精炼与连铸相匹配,它既充当了初炼炉与连铸机之间的缓冲器,同时为连铸机提供适合需要的钢水,是保证连铸生产顺利进行、扩大连铸品种、提高铸坯质量的重要步骤。

20 世纪初,冶金工作者已开始采用合成渣处理钢水,达到了快速脱硫的目的。到 50 年代,真空脱气已初步进入工业化阶段,实现了在常压炼钢炉所达不到的脱氢效果。所以,渣洗和真空处理工艺是炉外精炼的初始方法。以后又相继开发出电磁搅拌、吹氩搅拌以及采用电弧加热、真空加热等技术。常压与真空精炼分述如下。

一、常压下精炼

常压下精炼不涉及真空作用,但能达到脱碳、脱氧、脱硫、去除夹杂、控制成分和温度等广泛的精炼效果。常压下主要精炼方法有:

(1)合成渣洗是早期发展的炉外精炼法。将合成渣($\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 系渣)置于钢包内,借助钢水倾注时的动能,形成钢与渣的乳浊液以增大钢—渣的接触面,加快了精炼反应速度,达到脱硫、脱氧的效果。

(2)钢包吹氩搅拌。为提高脱氧效率,通过从钢包底吹入氩气,进行强烈搅拌,以便使捕集的夹杂物上浮,达到钢水温度、成分均匀的目的。

(3)加合成渣的钢包吹氩。为防止吹氩处理时钢水再氧化和吸收气体,将前两项方法组合使用。吹氩搅拌时,采用沉入罩进行渣洗称 SAB 法;从钢包盖加入合成渣进行渣洗则称 CAB 法。这两种方法具有相同的精炼作用,可使中、低碳钢(包括低合金钢)的全氧含量降至 $20 \times 10^{-6} \sim 40 \times 10^{-6}$ 。大于 $20\mu\text{m}$ 的夹杂物尤其是 Al_2O_3 夹杂,大量减少。同时,添加合金和脱氧剂控制成分,与转炉配合可生产低氮钢。

(4)LF 法。电弧加热、吹氩搅拌,提高温度、促进冶金反应,使氧含量降低至 20×10^{-6} ,硫含量降至 0.002% 左右, $\geq 10\mu\text{m}$ 的夹杂物基本去除。

(5)喷粉精炼法亦称钢包喷射冶金。包括 TN 法、CAB/TN、LS 以及添加合金元素和精炼材料的其他方法。

(6)不锈钢精炼法。AOD 法在常压下精炼不锈钢,在此基础上发展了 CIU 法,两种炉型和冶炼工艺基本相似,不同点在于 CIU 法采用蒸汽代替氩气搅拌。

二、真空下的炉外精炼

真空(减压)下炉外精炼的真空度一般在 $66.66 \sim 133.22\text{Pa}$,除氢的效果好,但难于调整钢水成分和温度。

(1) 静态脱气。除氢效果不大,未广泛采用。

(2) 钢流脱气。把盛有钢水的钢包(盛钢桶)放在真空容器内脱气。

1) VC 法:铸锭脱气法处理碳钢、合金钢等大锻件的钢锭,氢降至 1.6×10^{-6} ,氧降至 20×10^{-6} 。

2) SLD 法:倒包脱气法处理结构钢等,氢降至 1.6×10^{-6} ,氧降至 20×10^{-6} 。

3) TD 法:出钢脱气法主要与电炉配合,生产各种特殊钢,氢可降至 2×10^{-6} 。

4) TD-VC 法:出钢铸锭法为两种方法组合。

5) TD-SLD 法:出钢倒包铸锭法,这两种适用各类钢处理大锻件的钢锭。

(3) 分批脱气。

1) RH 法:真空循环脱气法,使真空容器中的钢水与钢包中的钢水循环脱气。

2) DH 法:真空提升脱气法,把钢包内的钢水吸进真空容器中脱气,反复进行这一操作。

(4) 电磁搅拌脱气。钢包置于真空室内,不用氩气,采用电搅拌进行脱气。

(5) 钢包吹氩搅拌。

1) Finkl 法:钢包置于真空室内,吹氩搅拌脱气。

2) Gazad 法:钢包上加密封盖,于真空室内吹氩搅拌脱气。

(6) 吹氩脱碳精炼。

1) VOD 法:于真空室内,由顶部吹氧,底部吹氩搅拌脱气。

2) KVOD/VAD 法:装有两个可移动的密封炉盖,一个用于电弧加热装置;另一个用于真空吹氧。

3) SS-VOD 法:加强吹氩搅拌,用于生产超低碳不锈钢。

4) VODQ(VODK)法:该法与转炉联用,在顶吹氧转炉上,加一个活动的真空密封盖,底部吹氩搅拌。

5) RH-OB 法:利用 VOD 法同样的原理,在 RH 装置上加氧枪,可精炼不锈钢。

(7) 电弧加热脱气,包括 VAD 法和 ASEA-SKF 法,还发展了 Finkl-VAD 法,改进了真空钢包吹氩,增加了减压下电弧加热。

归纳起来,各种炉外精炼方法不外乎搅拌、加热、真空或气体稀释 3 个方面的不同组合。搅拌方式通常采用低频感应搅拌或吹 Ar,脱气方法利用真空或吹 Ar 气,加热方法有的利用电弧、感应或化学热,有的采用钢包预热降低钢水的热损失。

发展至今,炉外精炼方法约有 30 余种。

按炼钢→二次冶炼→连铸的精炼过程是洁净钢冶炼技术值得推荐的工艺步骤,如

图 8-1-1 所示。

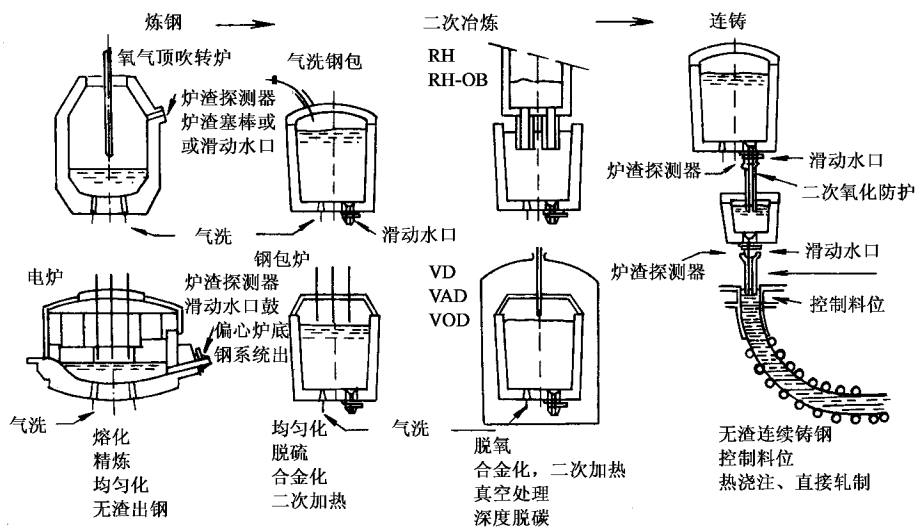


图 8-1-1 洁净钢冶炼技术的工艺步骤

第二节 炉外精炼技术发展的原因

20 世纪世纪钢铁技术的重大突破之一——炉外精炼技术 ,近 40 年来得到迅速发展 ,其原因可归结如下。

一、炼钢生产率的提高和成本下降

把调整钢水温度和成分的功能转移到钢包中去 ,使转炉和电炉的初炼炉作为熔化和脱碳单元而得到更高的生产率 ,合金收得率也得到提高。因为炉外精炼一般都具备加热升温功能 ,所以转炉和电炉的出钢温度可以下降 ,耐火材料以及其他消耗相应也明显下降。

(1)用 AOD 法精炼不锈钢 ,可使初炼炉效率提高一倍 ,用廉价的铁合金就可以生产超低碳不锈钢。

(2)用喷射冶金方法可使钢中硫含量降低 80% ~ 90% ,合金元素的收得率几乎是 100%。

(3) 真空脱气处理可去除 50% ~ 80% 的氢, 消除钢中白点等冶金缺陷。

(4) 超高功率电炉与真空双联进行快速熔炼, 约 70min 可生产一炉高质量的轴承钢, 氧含量仅 9.5×10^{-6} , 比普通电炉钢低 70% ~ 80%。

二、连铸技术的广泛应用

在 1981 ~ 1990 年间, 世界连铸比从 33.8% 上升到 64.1%, 1998 年美国连铸比 95.3%, 英国 94.4%。连铸技术对钢水温度和钢中夹杂物形态的严格要求以及连铸率的提高, 大大促进了炉外精炼, 尤其是钢包精炼的快速发展。

三、品种开发和质量的提高

在开发新品种的同时, 不仅希望合金元素的波动范围越小越好外, 对钢中杂质元素要求也极为严格。作为钢中杂质元素的 C、S、P、O、N、H 的总量达 40×10^{-6} 以下。在炼钢系统中已得到应用的炉外精炼方法共有 30 多种。但较常见的炉外精炼方法共 18 种。各种炉外精炼方法如图 8-1-2 所示。

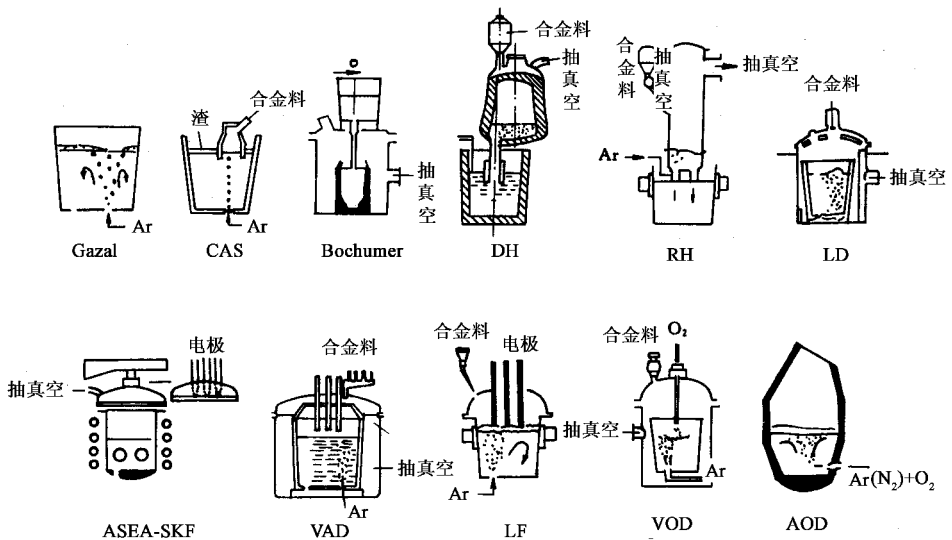


图 8-1-2 各种炉外精炼方法示意图

第二章 DH 法

第一节 DH 法设备及原理

真空提升脱气法,简称 DH。真空提升法的主要设备由真空室、提升机构、加热装置、合金加入装置以及抽气系统等组成(图 8-2-1)。

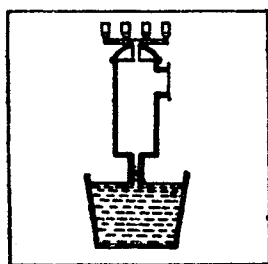


图 8-2-1 真空提升处理法(DH 法)

钢液真空提升法是根据压力平衡原理而来的。将真空室下部的吸嘴插入钢液内,真空室抽成真空后,钢液沿吸嘴上升到真空室内脱气。如果真空室内压力为 $13.3 \sim 66\text{Pa}$ ($0.1 \sim 0.5$ 毫米汞柱),提升的钢液高度约为 1.48 米。当钢包下降或真空室相对提升时,脱气后的钢锭重新返回到钢包内。当钢包上升或真空室下降时,又有一批新的钢液进入真空室进行脱气。这样,钢液一次一次地进入真空室,直到处理结束为止。

真空提升处理法的主要优点是:进入真空室内的钢液激烈沸腾,脱气表面积大,脱气

效果较好,适用于大量的钢液脱气处理。即用较小的真空室处理大吨位的钢液。可以用石墨电极、重油和煤气对真空室进行烘烤和加热,因此钢液温降较小。因沸腾激烈,具有较大的脱碳能力,可以用来生产含[C]0.002%的低碳钢。处理过程中可以加合金,合金元素的收得率高。由于这种方法具有一系列的优点,因此发展较快。

提升脱气法的设备较复杂,操作费用和投资费用较高。但容量越大,费用也越省,适用于大容量的冶炼设备。

第二节 DH 法的操作工艺

在处理前根据冶炼钢种和出钢量确定配加的合金种类和数量,并将这些合金预选加到料罐内。按钢液量与钢包的尺寸选定每次钢液吸入量,并调好提升行程与上、下限位器的标尺刻度。处理前吸嘴端部装好挡渣帽,将脱气室加热,电功率调大。

将盛有钢液的钢包运送至处理位置之后,取样,测温,并将吸嘴插入钢液内,启动真空泵抽气,当真空室内压力降到 $1.333 \times 10^4 \text{ Pa}$ (100 毫米汞柱)时,升降机构开始自动升降,进入真空室的钢液在低压作用下,开始脱气反应,产生激烈的沸腾和喷溅。处理后的钢液回流到钢包中,产生剧烈的搅拌和混匀。这样往返 30 次左右,全部钢液约经三次循环,真空度稳定到极限值,然后加入合金料,再升降数次,待合金成分混合均匀后,取样,测温并进行浇注。

钢液真空提升法主要工艺参数:钢液吸入量,升降次数,循环因数,停留时间,升降速度,提升行程等。

钢液吸入量是指每次升降时吸入到真空室内的钢液量。它取决于钢包的容量,一般为钢包内钢液量的 10~15%。

升降次数是指处理过程中钢液分批进入真空室的次数。根据在实验装置上的研究结果,为达到一定的脱气效果所必须的升降次数 n 按下式计算:

$$n = \frac{1}{\lg(1-a)} \cdot \lg \frac{(d_n - \beta)}{d_0 - \beta}$$

式中 n ——升降次数;

a ——钢液吸入量与总钢液量之比;

d_n —— n 次升降后,包内钢液的平均气体含量;

β ——处理的钢液残余气体含量;

d_0 ——脱气处理前钢液中气体含量。

按上式可计算出必要的最高升降次数,在接近于生产的条件下,即 $a < 0.1$ 时, n 的实际值与计算的偏差不到 15%。

循环因数就是在处理过程中进入真空室的钢液总量与钢包内钢液量之比,用 u 表示,计算公式如下。

$$u = \frac{n \cdot q}{Q}$$

式中 u ——循环因数;

n ——升降次数;

q ——吸入钢液量, t;

Q ——钢包内钢液量, t。

循环因数的选择应根据处理钢种,钢液中原始含气量以及处理时的真空度而定。实践结果表明,对于中、高碳钢,循环因数为 3 时,钢中气体含量才能达到要求。如在处理过程中加入合金,为了使合金元素在钢液内均匀分布以及去除合金料所带入的气体,还要再循环一次。在实际生产中,循环因数是按提升次数来控制的。处理终点一般根据真空室内的压力、废气成分以及钢水温度来决定。

钢液的脱气还与钢水在真空下处理的时间有关。一般提升的钢液要在真空室内停留 6 ~ 7s。同样在排除钢液时也要在最低位置停留 5 秒钟左右,以使钢液完全返回钢包内。

钢包或真空室的升降速度直接影响钢液在吸嘴内的流速。流速增大,相对延长了钢液接受真空作用的时间,从而增进脱气效果。钢液上升速度增大,还有利于钢液喷溅,增加脱气表面积,下降速度增大,有利于钢包内钢液均匀混合。因此最近设计的提升法处理装置的升降速度逐渐增大,已由 0.05m/s 提高到 0.2m/s。但升降速度不宜过大,以免产生冲击震动和吸嘴衬砖的严重侵蚀。

提升行程取决于处理容量、钢水吸入量及真空室和钢包的直径,也与升降装置等有关。处理镇静钢时,真空室内熔池深度一般不超过 0.45m,在处理沸腾钢时,以不超过 0.6m 为宜。

真空提升处理法的实际效果:

(1)脱氢。真空提升处理前氢含量为 2.5 ~ 6.5ppm,处理后氢含量下降到 1.0 ~ 2.5ppm。这样,可取消原来锻、轧产品为避免产生白点而采取的缓冷措施。可显著减少大钢锭的氢扩散退火时间。由于受到处理时间的限制,处理前氢含量高的,处理后残氢量也较高。为获得低的含氢量,尽量延长处理时间。在处理脱氧钢时,由于 [O] 较低,在

接近真空室底部处气泡生成比较困难。但处理未脱氧的钢时,由于 CO 平衡压力大,从熔池底部产生大量气泡,有利于脱氢反应的进行。

(2)脱氧。提升法处理未经预脱氧钢液的含氧量可降低 55 ~ 90%。同时非金属夹杂物降低 40 ~ 50%。在这种条件下,合金加入是在真空下进行的,因此合金的收得率在 95% 以上,并且成分均匀。

(3)脱氮。一般来说脱氮速度较慢。氮在铁液中的扩散系数较小,当钢中氮含量为 30 ~ 40ppm 时,短时间处理后氮含量几乎没有什么变化。不过,当氮含量高于 100ppm 时,脱氮量可达 20 ~ 30ppm。

(4)脱碳。在真空处理过程中,由于碳氧反应降低了碳的含量。因此利用真空提升法可生产超低碳钢,最低碳含量可达 0.002%,这是目前国内外都很重视的课题。

由于钢中氢、氧、氮及非金属夹杂物的减少,使钢材内、外部缺陷减少,钢的加工性能和机械性能显著提高。

第三章 RH 法

RH 法又称真空循环脱气法。在 RH 装置中,钢液的真空脱气在一座特殊的真空室中进行。这个真空室内砌有耐火砖衬,其底部有两个用耐火材料制成的并可插入钢液中的管子,当向其中一根管中通入驱动气体,就能促使钢包中的钢液,经真空室而循环。这种循环做到了用一个较小的真空设备,分批处理大量钢液。与同属分批处理的 DH 法一样,这种方法较多地用于处理平炉或氧气转炉所炼钢液。自 70 年代后期以来,在特殊钢生产车间已基本上不再选用这类真空脱气方法。

RH 法脱气效果好,处理过程中降温少,处理容量的适应性强,所以发展较快,应用较广。据统计投产的 RH 装置已有百余台,最大设备的处理容量是 350t。我国一些工厂也选用了 RH 装置,如继大冶钢厂首先安装了一台 60~100tRH 装置(1967 年投产)之后,上海重型机器厂(1972 年投产)武汉钢铁公司第二炼钢厂(1[#] RH1979 年,2[#] RH1990 年投产)和宝山钢铁总厂炼钢厂(1985 年 12 月投产)也都安装了这种设备。

第一节 工艺过程

现以某厂处理容量为 100t 的旋转升降式 RH 装置为例,介绍其操作工艺过程。脱气处理前的准备工作包括:电、压缩空气、蒸汽、冷却水的供应;驱动气体和反应气体的准备;以及合金料斗的准备。当所有准备工作全部完成,并确认设备完好,即可投入运行。其程序为:停止对真空室的烘烤及撤除烘烤器;在插入管的管口套上挡渣帽;在真空室上

装合金料斗。与上述工序同时,初炼炉出钢,盛载有钢液的钢包被吊放在处理位置后,将 RH 装置的真空室转到钢包的上方。与此同时,在钢包中取样和测温。然后降下真空室,使插入管插到钢液内,插入钢液的深度应不小于 150 ~ 200mm。启动真空泵后,随着真空室压力的降低,钢包中的钢液沿着两根插入管上升,当向一根插入管输入驱动气体(该管又称上升管,另一根无吹气装置的插入管称下降管),当真空室的压力降到 26 ~ 13kPa 时,钢液经过真空室的循环就十分明显了。由于在上升管中向钢液吹入驱动气体,这些气体以大量小气泡的形式存在于钢流中。由于高温和低压的作用,气体的膨胀功推动钢液在上升管中快速提升。当钢液离开上升管进入真空室时,线速度可达 5m/sec,因此钢液呈喷泉状进入真空室,使脱气界面显著增大,从而加速脱气过程。脱气后的钢液汇集在真空室的底部,在重力的作用下,不断经下降管以 1 ~ 2m/s 的速度返回钢包。由于返回的钢流具有一定的动能,所以将冲击着钢包中未脱气的钢液,使这两部分钢液相互搅拌和混合。钢包中的钢液将不断地从上升管进入真空室,脱气后由下降管返回钢包,这样循环若干次后,可将钢液中的气体降到相当低的水平。

在循环处理初期,要求每隔 10min 取样和测温各一次;在接近处理终了时,每隔 5min 取样测温各一次。根据取样分析的结果,如须补加合金材料(包括脱氧剂或其他添加剂)时,可操作自动控制的加料料斗(在处理前的准备阶段已安装在真空室的顶部),在不破坏真空的条件下,以恒定的加料速率将合金料加入真空室中。这种加料系统,即使成分要求较窄的钢种,例如 $\pm 0.015\%$ 的碳,或 $\pm 0.05\%$ 的锰,也能保证 99% 的炉次达到规定要求。开始加料的时间取决于加料量,一般要求在处理结束前 6min 加完,料加完后再循环几分钟,以保证成分均匀。生产条件下实测的结果表明,当添加镍后,经 0.4 次循环,钢包中各部位的含镍量与平均值的偏差不超过 0.01%。即使加入难熔或易氧化的元素,也可达到相当可靠的准确度。

处理完毕后、在关闭真空泵,提升和转开真空室的同时,再取样和测温。然后将钢包吊至浇注工段,进行浇注。

第二节 工艺参数

在设计或使用循环脱气装置时,合理地选择工艺参数对取得良好的脱气效果,比较长的内衬寿命和降低运行费用有重要意义。

处理容量、循环因数、处理时间、循环流量、真空度和真空泵的抽气能力等参数,都是循环脱气法在操作和设计时应考虑的主要工艺参数。

一、处理容量

处理容量指的是被处理钢液的数量。对于 RH 法,其处理容量的上限在理论上说是没有限制的。而处理容量的下限,即 RH 法所能处理的最小容量,则取决于处理过程中降温的情况。一般认为在炉内处理时,也只有炉顶装料的电弧炉才有可能炉内处理,不应少于 8t。在钢包内处理时,不应少于 30t。用 RH 法进行处理时,钢液的温度损失如图 8-3-1 所示。当处理容量小于 30t 时,钢液的温降相当显著。为保证一定的开浇温度,只有提高出钢温度或缩短处理时间,而这两种办法都会使处理效果降低。

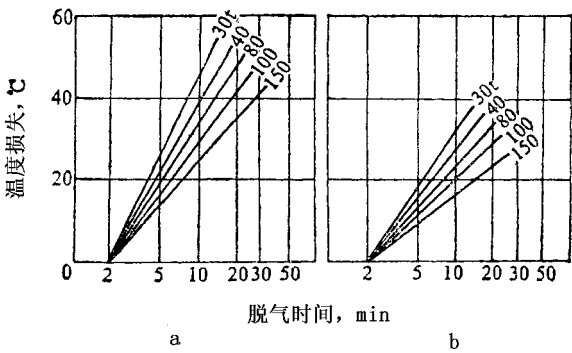


图 8-3-1 循环脱气过程的温度损失

a—真空室预热 800℃ b—真空室预热 1200℃

分批处理是 RH 法的主要特点,因此用同一套 RH 装置,可以在大致相同的时间内处理不同容量的钢液。这一特点为 RH 装置的设计、制造和选用提供了方便。根据 RH 法的操作经验和计算,以及我国炼钢炉系列等情况,可用四种不同的真空室和抽空系统就可以处理下列范围的钢液: 8~30t; 30~120t; 120~200t; 200~300t。

这样划分的处理容量,波动在将近 100t 的范围内。为了使用同一套 RH 装置能适应不同处理容量,可采用以下两种办法。一种是改变插入管的直径。例如,美国阿姆科钢铁公司的巴特楼厂用一套循环脱气设备,分别处理 70t 和 150t 两种不同容量的钢液,该脱气装置的真空室备有两种底部,其中一种底部的上升管直径为 245mm,下降管直径为 210mm,循环流量为 15t/min,用于处理 70t 钢液。另一种底部的上升管直径为 330mm,下降管直径为 273mm,循环流量为 30t/min,用于处理 150t 钢液。另一种办法是改变处理时间。例如德国莱茵钢铁公司的亨利希厂处理容量分别为 30t 和 100t 两种情况时,只

变化处理时间 ,并不改变插入管的直径。从操作角度考虑 ,这种办法更为可取。

二、处理时间

钢包在 RH 工位停留的时间称为处理时间 t 。该时间的绝大部分一直在进行真空脱气 ,所以脱气时间略短于处理时间。为了使钢液充分脱气 ,就要保证有足够的脱气时间 ,也就是应有足够长的处理时间。但是 ,在不具备加热手段的条件下 ,处理时间将取决于允许的钢液降温 T_c 和处理时钢液的平均降温速率 $\bar{V}_T$ ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)。所以处理时间可由式 (8 - 3 - 1)确定。

$$\tau = T_c \sqrt{V_T} \tag{8 - 3 - 1}$$

为了弥补处理时的温度损失 ,对于须进行脱气处理的炉号 ,其出钢温度应比不处理时要高 20 ~ 30 $^{\circ}\text{C}$ 。处理后的钢液 ,由于气体含量及夹杂物的减少 ,使钢液粘度下降 ,因此开浇温度可比未处理的同钢种低 20 ~ 25 $^{\circ}\text{C}$ 。如其他条件(操作工艺、车间布置等)相同 ,那么处理时允许的降温大约为 40 ~ 55 $^{\circ}\text{C}$ 。一般来说 ,允许的温度损失不会有太大的波动。所以 ,处理时间就决定于脱气时的平均降温速率。而降温速率主要与处理容量、钢包和真空室的预热温度、处理时加入的添加剂的种类和数量、渣层厚度、包壁材料的导热系数等因素有关。其中钢包和真空室的预热温度 ,特别是真空室的预热温度 ,对降温速率影响最大。因此 ,为了保证足够的处理时间 ,真空室要充分预热 ,预热还可以防止真空室内结瘤和提高耐火材料的寿命。由图 8 - 3 - 1 可见 ,处理过程的温度损失随处理容量和真空室预热温度的提高而减少 ,并随处理时间延长而增加。表 8 - 3 - 1 中列出不同处理容量和真空室预热温度下 ,处理过程中温降的数据。

表 8 - 3 - 1 处理容量、真空室预热温度与脱气温降情况

处理容量 t	真空室预热温度 $^{\circ}\text{C}$	脱气时间 min	总降温 $^{\circ}\text{C}$	温降速率 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$
35	700 ~ 800	10 ~ 15	35	4.5 ~ 5.8
35	1200 ~ 1400			2.0 ~ 3.0
70	700 ~ 800	18 ~ 25		2.5 ~ 3.5
100	700 ~ 800	24 ~ 28		1.8 ~ 2.4
100	~ 800	20 ~ 30	30 ~ 40	1.5 ~ 2.5
100	1000 ~ 1100			1.5 ~ 2.0
100	1500	20 ~ 30		1.5
170	1300			1.0 ~ 1.5

三、循环因数

循环因数 c 即循环次数,是处理过程中通过真空室的总钢液量与处理容量 Q 之比。
可用下式表示

$$c = \omega \cdot t / Q \tag{8-3-2}$$

式中 ω ——循环流量, t/min ;
 t ——脱气时间, min 。

在脱气条件(循环流量、驱动气体流量、真空度)一定时,返回钢包的钢液气体含量也就一定。这样,循环开始后,进入真空室的钢液的气体含量主要取决于已脱气钢液返回钢包后与包中钢液混合的状况。若用混合系数 m' 来描述,设定返回钢液立即与包中钢液完全混合时为 $m' = 1$,返回钢液与包中钢液不混合,并沉入钢包的底部,则 $m' = 0$,在 $m' = 0$ 的混合状况下,在第一个循环时进入真空室钢液的气体含量一直是原始含量,所以钢包中钢液的平均气体含量随脱气时间,也就是随循环因数 c 的增大呈直线降低(图 8-3-2),直至完成一次循环。即 $c = 1$ 时,钢包中的平均气体含量就可等于钢液离开真空室时的气体含量。在 $m' = 1$ 的混合状况下,因为在脱气过程中的任何瞬时,包中钢液的气体含量一直是均匀的,所以循环进入真空室的钢液其气体含量也一直在降低,这样就使得钢包中气体平均含量降低的速率要比 $m' = 0$ 时缓慢得多。为获得与 $m' = 0$ 时相同的脱气效果, $m' = 1$ 状况下,脱气时间必须延长 3~5 倍,即 $c = 3 \sim 5$ 。

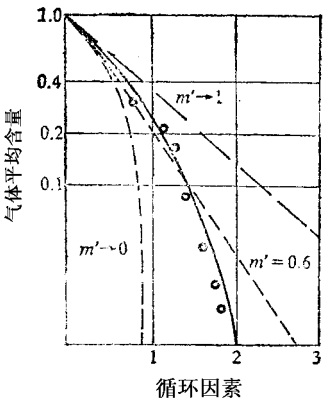


图 8-3-2 钢中气体含量与循环因数的关系

真实的脱气过程不可能象上述这两种极端情况,而是它们之间的一种过渡状况。即已脱气的钢液在钢包中部分地进行混合,在钢包的底部有一层稳定的已脱气钢液,其上

部是脱气钢液和未脱气钢液的混合物。这样,进入真空室的钢液其气体含量要高于钢包中的平均含量。因此,钢包中钢液的脱气速率将大于完全混合($m' = 1$)时的脱气速率。

根据循环脱气时废气量计算得出的测定时钢中含气量和原始含气量的比值 $[G]_1/[G]_0$ 与 c 的关系,如图 8-3-2 中按计算点所连的实线所示。实际的混合状况,大约是 $m' = 0.6$ 。这就是说,当 $c = 2 \sim 3$ 时,就可得到较好的脱气效果。应选择合适的下降管直径,以保证恰当的钢流返回钢包的流速。从而避免流速太大时,与钢包中钢液混合较好, $m' \rightarrow 1$,又不致流速太小,返回钢包的钢液又立即被吸入上升管而形成循环的“短路”。

由图 8-3-3 可知,为了使含氢量较高的钢液有效地脱氢,例如要求最终含氢量小于 1.8ppm,则循环因数必须取 5 或 5 以上。

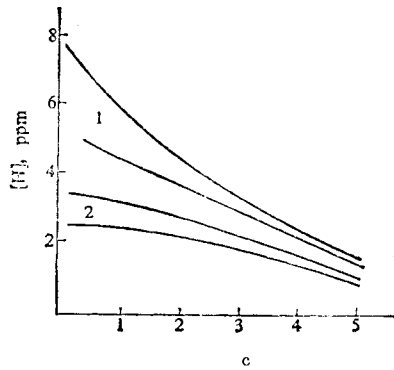


图 8-3-3 脱氢与循环因数的关系

1—平炉钢 2—电炉钢

四、循环流量

单位时间内通过真空室的钢液量称为循环流量。它的大小主要决定于上升管的直径和驱动气体流量。图 8-3-4 是由实验获得的不同上升管直径条件下,循环流量与驱动气体流量之间的关系。式(8-3-3)示出脱氧钢的循环流量与驱动气量、上升管内径的关系:

$$\omega = a \cdot d^{1.5} \cdot G^{0.33} \quad (8-3-3)$$

式中 a ——常数;

d ——上升管内径, cm;

G ——驱动气体流量, L/min。

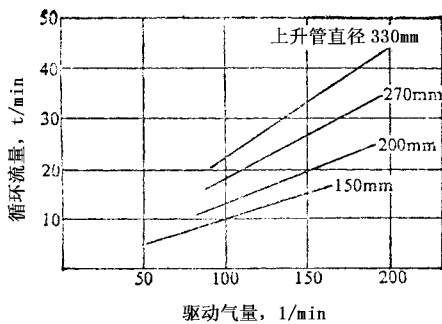


图 8-3-4 循环流量与驱动气体流量的关系

式(8-3-2)也表示循环流量与处理容量、循环因数、脱气时间之间的关系。该式表明,在给定的处理容量和循环因数的条件下,脱气时间与循环流量成反比,如图8-3-5。

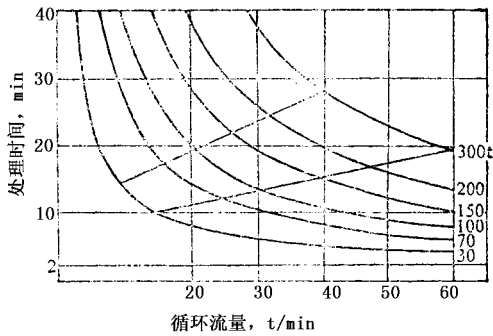


图 8-3-5 循环因数为 3.5 时,处理时间、处理容量和循环流量的关系

在循环因数为 4~5 时,根据所允许的脱气时间,不同处理容量所对应的循环流量数据列于表(8-3-2)。

表 8-3-2 不同处理容量的循环流量

处理容量 t	循环流量 t/min
30 ~ 120	15 ~ 25
120 ~ 200	30 ~ 40
200 ~ 300	40 ~ 50

五、真空度

真空度是在处理过程中 ,真空室内可以达到并且能保持的最低压力。

根据有关真空脱气的热力学和动力学分析可知 ,对于一般钢种对气体含量的要求 ,并不需要太高的真空度 ,通常都控制在 67 ~ 134Pa 范围内。

六、工作泵抽气能力

工作泵抽气能力大小 ,应根据处理的钢种、处理容量、脱气时间、循环流量以及处理过程中钢液放气规律来确定。

真空循环脱气过程中 ,气体的析出速率是不同的。在处理前期由于钢液原始含气量高 ,因此析出的气体量大 ,而后期气体析出量大为减少。如果要按脱气高峰来考虑真空泵的抽气能力 ,则所选真空泵的抽气能力会偏大 ,而按整个脱气期间的平均脱气量考虑 ,则抽气能力又会偏低。所以比较合理的方法 ,是按脱气过程中钢液放气规律来考虑真空泵的抽气能力。如果取循环因数为 3 ,根据脱气曲线(图 8-3-2 中实测的实线)可知 ,第一次循环后 ,钢液的气体含量可去除 175% 左右 ,第二次循环脱去 20% ,第三次循环只去除 0.5%。

根据经验数据 ,脱氧钢的放气量约为 0.5m³/t ,未脱氧钢约为 1.0m³/t。再结合各阶段所要求达到的真空度 ,用式(2-69 ~ 2-71)就可计算各级真空泵的抽气能力。对于未脱氧的钢液 ,其计算结果列于表 8-3-3。

表 8-3-3 不同处理容量时真空泵的抽气能力

处理容量 t	真空泵抽气能力 kg/h
30 ~ 120	200 ~ 400
120 ~ 200	500 ~ 600
200 ~ 300	700 ~ 800

第三节 RH 法的发展

常规的 RH 法只用于钢液的脱气 ,但是随着炉外精炼技术的发展和广泛应用 ,促使已安装有 RH 装置的工厂考虑如何改进和改造已有设备 ,从而扩大 RH 的精炼功能。其

中最为突出的是 RH-OB。

新日本钢铁公司的室兰厂于 1972 年提出了在 RH 的真空室中吹氧脱碳以精炼不锈钢的新方法,称为 RH-OB。该方法以氧气转炉为初炼炉,整个工艺由五个工序所组成:①铁水用 KR 法脱硫;②低硫铁水和废钢装入转炉,吹炼成低硫、磷的半成品;③出钢倒渣,不带渣的半成品钢液再兑回转炉;④加高碳铬铁,吹氧助熔和脱碳,将碳降到 0.6~0.8%,此时钢液温度为 1750℃。⑤出钢,将此钢液在 RH-OB 装置(图 8-3-6)中,吹氧脱碳至规格要求,然后调成分、脱氧。

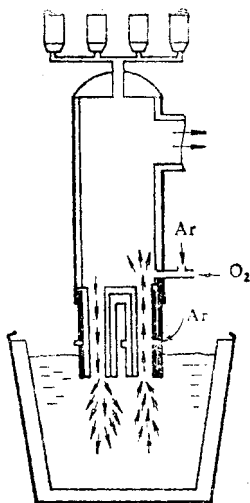


图 8-3-6 RH-OB 设备示意图

这种工艺具备以下特点:

(1)能保持氧气转炉较高的生产率。当用 50t 的转炉冶炼不锈钢半成品(出钢量为 56t)时,每炉的冶炼周期约为 50min, RH-OB 法的处理时间约为 70min,总计 120min。小时产钢量为 28t/h。而常规的电弧炉冶炼(50t 电弧炉,真空处理),产钢量为 12.2t/h。50t 电弧炉与 AOD 双联,产钢量也只有 14.7t/h。

(2)铬回收率高。RH-OB 法铬的总回收率可高达 96% 以上,而用通常的电弧炉冶炼(返回吹氧法,成品[C]≥0.08%),铬的回收率只有 88~94%。RH-OB 法铬的回收率已接近和达到了 VOD、AOD 的水平。

(3)所用的铬是廉价的高碳铬铁,故生产成本低。

(4)成品性能好,质量稳定。用 RH-OB 法生产不锈钢时,碳含量的调整比较方便,尤其是容易生产超低碳不锈钢。易于降低成品钢的含硅量。由于用高炉铁水为主要原

料,因此钢中诸如铜、锡、铅等有害元素含量低。吹氧脱碳后在真空下用碳脱氧,所以氧含量低(20~60ppm);含氢量一般为1~3ppm;氮含量为30~120ppm;纯净度为0.01~0.04%。从而改善钢的机械性能,使延伸率提高,硬度降低,质软,适合于冷加工。

RH法的另一方面的发展是与喷粉相结合。例如新日铁名古屋厂开发的RH-PB法(Powder Blowing),在RH真空室的下部增设喷吹管,向循环着的钢液喷入精炼用的粉剂,以脱磷、脱硫或脱氧。又如新日铁大分厂开发的RH-LIR(Ladle Injection Refining Process),在钢包内上升管的下方,向钢液的深处喷入精炼剂,然后随着钢流进入真空室,对钢液进行精炼净化,有效地降低钢中夹杂物的总量和控制夹杂物的形态。

日本川崎钢铁公司千叶厂采用新开发的RH-KTB(Kawatetsu Top Blowing,川崎顶吹)法,在RH真空室的顶部增设一支垂直安放的氧枪,与真空脱气的同时,吹氧进行脱碳处理,以生产含碳量极低($[C] \leq 20\text{ppm}$)的超深冲用薄板钢。吹氧所产生的化学热还可利用于钢液的调温,以满足连铸对钢液温度较严格的要求。

对RH的真空室也作了一系列的改进。如真空室和二根插入管均设计成垂直的圆筒形,这样便利制造和维修;为了处理未脱氧钢,有将真空室高度增大的趋势;增大上升管的内径,或将双管式改成三管式,即改成有两根上升管和一根下降管,这样可提高钢液的循环流量;改弥散型的吹氩环为数根不锈钢的吹氩管($\phi 3\text{mm}$),并装于上升管的两处(上下相距300~450mm)吹氩,以稳定吹氩操作和提高上升管的寿命。

第四节 RH 法的效果

一、脱氢

经循环处理后,脱氧钢可脱氢约65%,未脱氧钢可脱氢70%。使钢中的氢含量降到2ppm以下。统计操作记录后发现,最终氢含量近似地与处理时间成直线关系。由此推论,如果适当延长循环时间,氢含量还可以进一步降低。

二、脱氧

循环处理时,碳有一定的脱氧作用,特别是当原始氧含量较高,如处理未脱氧的钢,这种作用就更明显。实测发现,处理过程中的脱碳量和溶解氧的降低量之比约为3:4,这

表明钢中溶解氧的脱除,主要是依靠真空下碳的脱氧作用。

用 RH 法处理未脱氧的超低碳钢,氧含量可由 200 ~ 500ppm 降到 80 ~ 300ppm。处理各种含碳量的镇静钢,氧含量可由 60 ~ 250ppm 降到 20 ~ 60ppm。

三、去氮

与其他各种真空脱气法一样,RH 法的脱氮量也是不大的。当原始含氮量较低时,如 $[N] < 50\text{ppm}$ 处理前后氮含量几乎没有变化。当氮含量大于 100ppm 时,脱氮率一般只有 10 ~ 20%。

四、脱气钢的质量

真空循环脱气法处理的钢种范围很广,包括锻造用钢、高强钢、各种碳素和合金结构钢、轴承钢、工具钢、不锈钢、电工钢、深冲钢等。钢液经处理后可提高纯净度,使纵向和横向机械性能均匀,提高延伸率、断面收缩率和冲击韧性。对于一些要求热处理的钢种,脱气处理后一般可缩短热处理时间。

五、经济效果

为全面评价 RH 法的经济效果,必须对处理的附加费用,以及因处理的收益作综合比较才能得知。

处理的附加费用包括有:运行的费用,包括有原材料的消耗、人工、电力、蒸汽、冷却水、氩气等;炼钢厂的附加费用,如因提高出钢温度而延长了冶炼时间和增加了能源消耗等各种费用,钢包使用时间延长所增加费用,耐火材料消耗量增加所需费用等;整套真空循环脱气装置的折旧等。而处理的效益有缩短退火时间;减少废品;缩短生产周期;提高收得率;节约脱氧剂及合金元素;改善钢质量等。具体的经济效果,可根据不同的钢种,按实际情况逐项算出。实践证明,真空脱气不会增加每吨钢的生产成本,对于一些钢种却会明显地降低成本。例如我国某厂,用平炉、电弧炉混炼后经 RH 处理生产轴承钢,其质量与常规的电炉产品相当,但其成本比电炉冶炼降低 20% 左右。如再考虑交货期的缩短,钢质量的改善,其实际效益将更大一些。

第四章 ASEA – SKF 法

随着现代工业化和科学技术的不断发展,对钢材质量的要求日益提高。然而通常的炼钢设备生产的钢常常被夹杂物污染,钢中的氢和氧对钢质量危害极大,对有些钢种来说,氮的含量也必须很低。而真空脱气可以大量去氢,也能使氧含量有效地减少,特别是在低碳钢中,此外,对降低钢中的氮含量也有一定的效果。因此,真空脱气对提高钢的质量具有重要意义,从而获得很快的发展。但是,单纯的真空脱气还不能解决优质钢生产中存在的其他一些问题,例如去硫,而降低硫含量又是改善钢的横向冲击功所必需的,如调整成分,真空脱气不能使钢质量和成分进一步均匀化,更突出的是脱气过程中钢液温度下降,脱气时间受到限制,浇铸温度难于控制。

为了进一步扩大精炼功能,改进真空脱气存在的这些弱点,并克服在冶炼轴承钢时电炉出钢钢渣混出而产生的夹杂问题,瑞典滚珠轴承公司(SKF)与瑞典通用电器公司(ASEA)合作,于1965年在瑞典SKF公司的海莱伏斯(Hallefors)钢厂建成第一座ASEA – SKF钢包精炼炉。

ASEA – SKF钢包精炼炉具有电磁搅拌、真空脱气和电弧加热功能。它把炼钢过程分为两步:由初炼炉(电弧炉、感应炉、转炉等)熔化钢铁料,脱磷,在碳含量和温度合适时即可出钢,必要时可以调整合金元素镍和钼;然后在ASEA – SKF炉内将这初炼钢液进行电弧加热、真空脱气、真空吹氧脱碳、脱硫以及在电磁感应搅拌钢液下调整成分和温度、脱氧和去除夹杂物等。精炼后将钢包吊出,直接进行浇铸。因此,钢包精炼炉同时具有盛钢桶、真空脱气设备和精炼炉的作用。

ASEA – SKF炉精炼法的优点是:

(1)提高钢的质量。无论是转炉或是电炉提供的初炼钢液,经过钢包精炼后的质量

大大改善。

(2) 增加产量。与电炉双联时,由于精炼过程移入 ASEA-SKF 炉内进行,可提高电炉产量。

(3) 扩大品种。与平炉或转炉双联时,可以扩大这些炼钢炉生产的品种。

ASEA-SKF 炉的工艺操作方便且有很大的灵活性,因此引起了世界各国炼钢界的重视,使这一设备不断得到完善和发展。到 20 世纪 70 年代末除瑞典本国有 10 余台外,世界上其他国家如日本、美国、英国、意大利、巴西、前苏联及我国都先后从瑞典引进钢包精炼设备,容量从最小的 20t 到最大的 150t。现在世界上约有 100 台左右 ASEA-SKF 钢包精炼炉。下面仅就钢包精炼炉的设备、布置、工艺和精炼效果等方面进行介绍。

第一节 ASEA-SKF 炉的设备

ASEA-SKF 炉可以完成炼钢过程所有的精炼任务,因此其结构也比较复杂。主要有:盛装钢水的钢包;水冷电磁感应搅拌器及其变频器;电弧加热系统;真空密封炉盖和抽真空系统;吹氧系统;吹氩搅拌系统;渣料及合金加料系统;冷却水系统及提供压缩空气和氮气的装置;设备运转的机电和液压系统;测温、取样、操作仪表等。

这些设备的详细内容十分复杂,本节只做简单介绍。

一、钢包

钢包的外形与普通钢包相似,它们的直径大致相同,只是比一般的钢包要高一些。考虑钢包尺寸大小的主要原则是:充分发挥感应搅拌的效果,减小包衬耐火砖的损耗,以及有利于脱气时碳沸腾。

从发挥感应搅拌效果来看,钢包的直径小一些比较好。从图 8-4-1 可以看出,加大钢包直径,可使钢液的搅拌力迅速减弱。瑞典通用电器公司(ASEA 公司)推荐 $D/H = 1$ 作为设计钢包壳体的参考值。

但是钢包直径越大,对炉壁耐火砖的寿命越有利。炉壁损坏的原因主要是搅拌钢液和初炼钢液炉出钢倾入时的冲刷、熔渣的侵蚀、电弧和高温熔渣的热辐射以及温度激变引起的剥落。炉壁的寿命当然还与耐火材料质量和厚度有关。为取得最大感应搅拌效果,炉壁耐火砖不能太厚,但过薄又容易发生漏钢的危险。

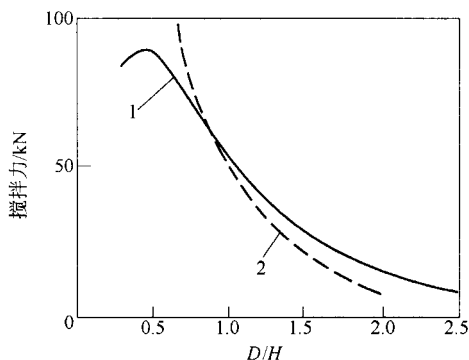


图 8-4-1 总搅拌力与钢包内径 D 、搅拌器线圈高度 H 之比的关系

1—圆筒形搅拌器(700kV·A) 2—片形搅拌器(2×700kV·A)

这种钢包除了能够盛装钢水之外,在熔池面以上至包口还要留有一定的高度,即自由空间。这是因为在进行吹气、真空脱气和真空碳脱氧等操作时,在钢水和炉渣中会形成气液两相混合体,使体积膨胀。根据钢包大小不同,自由空间的大小也不同。

钢包外壳的形状是圆柱形,通常是没有锥度的。因为采用圆锥形钢包,势必将搅拌器也要制成圆锥形,结果使制造困难,以及带来其他不利之处。

钢包外壳材料,采用无磁性奥氏体不锈钢板或围绕钢液的那一部分采用无磁性钢板,其上部 and 包底采用碳素钢板。钢液面以上的壳体外设水冷套。包底通常设有吹氩喷口。为便于把钢包放入感应器中,壳体外面还装有导轨。

二、电磁感应搅拌器

ASEA-SKF 炉与其他精炼炉最显著的不同点是它的搅拌方法。这种精炼炉采用电磁感应搅拌。产生感应搅拌的设备是由变压器和低频变频器以及感应搅拌器组成,经过水冷电缆将变压器二次电流送给变频器。

感应搅拌变频器一般采用可控硅式低频变频器,通过自动或手动方式调整频率。搅拌频率一般控制在 0.5 ~ 1.5Hz。感应运动速度一般控制在 1m/s 左右。通过感应搅拌器的不同布置可以控制感应的不同流动状态。搅拌器主要有圆筒式搅拌器和片式搅拌器。搅拌器的不同布置可以产生不同的搅拌效果,如图 8-4-2 所示。

图 8-4-4 中 a 为圆筒式搅拌器及其效果。这种搅拌状态的缺点是产生搅拌双回流,增加了流动阻力。b 为一片单向搅拌器及其产生的钢液流动状态。这种搅拌状态只产生一个单向循环搅拌力,但是搅拌力较小。c 为两个单片搅拌器以同一位相供电时的搅拌状态,钢液的流动状态类似于圆筒式搅拌器所产生的搅拌状态。d 为两个搅拌器串

联后产生的搅拌状态 ,钢液流动状态为一单向回流 ,流动阻力较小 ,没有死角 ,搅拌力强 ,搅拌效果较好。

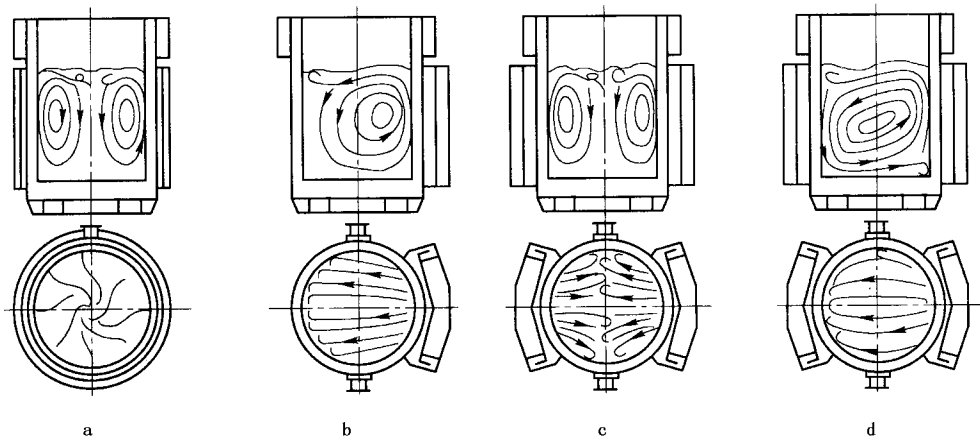


图 8-4-2 搅拌器的位置和钢液的流动状态

较小的钢包可以使用单片搅拌器 ,而较大的钢包可以使用两个搅拌器。几个搅拌器的有关参数如表 8-4-1 所示。为了使钢水更好地搅拌 ,现在设计的钢包精炼炉除了电磁搅拌之外 ,一般还配备了吹气搅拌系统。

表 8-4-1 变频器和感应搅拌器设备参数

炉 容 量/t	30	60	100	150
感应搅拌器型号	ORT34	ORT57	ORT810	ORT1215
感应搅拌器重量/kg	9000	11000	13000	16900
可控硅变频器额定容量/(A/V)	1200/310	1200/310	1200/310	1200/310
功率因数补偿设备额定功率/(kV·A/V/Hz)	620/460/50	620/460/50	620/460/50	620/460/50
变频变压器的额定功率/kV·A	400	400	400	400
冷却水消耗量(24℃)L·min ⁻¹ (包括炉体、搅拌器、加热装置)	560	665	865	1024

由于钢包需要经常移动 ,所以搅拌器不能固定在钢包上 ,而应当有其固定工位。

三、加热系统

ASEA-SKF 炉的加热系统一般包括 :变压器、电极炉盖、电极臂电极及其升降系统。这几乎与 LF 炉是相同的。但与电弧炉相比 ,ASEA-SKF 炉所需要的加热功率要低一些 ,所用的石墨电极较细 ,电极极心圆较小 ,减小电极极心圆直径可提高 ASEA-SKF 炉

壁耐火砖寿命。电极盖上设一个加料口。

ASEA - SKF 炉的电弧加热仅起补偿热损失以及加热合金和真空脱气过程中的降温,即调节钢液温度而不是熔炼作用,所以变压器的设计功率比电炉的要低得多。按 ASEA 设计的 ASEA - SKF 炉及其配备的变压器容量存在下述关系,如表 8 - 4 - 2 所示。

表 8 - 4 - 2 ASEA - SKF 炉吨位和变压器容量的关系

炉容量/t	20	40	60
变压器/kV·A	3200	5400	7000
炉容量/t	100	150	200
变压器/kV·A	9700	12200	14000

四、真空密封炉盖

ASEA - SKF 炉的真空系统由一个密封炉盖与钢包一起构成一个真空室。当钢包加热结束之后,移开加热炉盖,将钢包连同搅拌器一起移至真空盖下,盖上真空盖进行真空处理。炉盖与钢包的配合如图 8 - 4 - 3 所示。

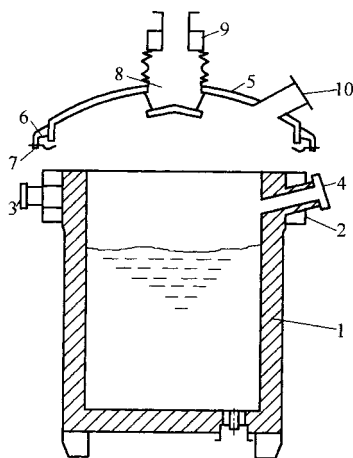


图 8 - 4 - 3 ASEA - SKF 炉炉体与真空盖的配合

- 1—炉壳 2—带凸缘的上部炉壳 3—耳轴 4—取样孔;
5—真空密封炉盖 6—密封胶圈 7—密封胶圈及凸缘防热板;
8—连接真空通道 9—活动密封 10—窥视孔

真空盖壳体由压力容器钢制成,盖口为水冷凹槽法兰圈,法兰面贴有氯丁胶 O 形密封圈,盖口外侧装有向外张开的月牙形防热片,当提起真空盖时,防热片自动向内贴在 O 形圈上,以免遭受热辐射而损坏橡胶圈。法兰盖口内还设有喷射压缩空气的管路(即风动吹扫器),用于盖口的清扫。

真空盖顶设有真空抽气的排气口、吹氧口、窥视孔和电视摄影窗。所有管口和窗孔上均为水冷法兰接口并垫上密封橡胶圈。

真空盖由机电传动提升机起落时,需设有绝缘盖衬,也可以用液压顶缸来升降。

从真空盖排气口出来的真空管路立管处,设置气体冷却器和粉尘分离器,在粉尘分离器后的管道上设总截止阀。

通过真空盖向炉内加入合金,其加料口与排气口是同一个通口,需在排气口正上方设置合金加料装置,即真空密封罐。密封加料罐的抽真空与总真空系统相连,由此可在真空中从密封加料罐通过排气口把合金加入炉内。

排气口附近的真空管道上还应设置氮气进气口和压缩空气进气口(压力调节阀),需要时可向炉内吹入氮气或调整炉内真空度。

五、真空泵

ASEA 为钢包炉提供的真空泵都是蒸汽喷射泵。这种蒸汽喷射泵的优点是可靠、真空度的范围宽而且泵的能力大、防尘好、维修少。对于不需要真空脱碳的钢包炉,一般只配备一套四级喷射泵,真空度应达到 66.7Pa 或更好;需要真空脱碳时,必须再连接上一个五级泵,使具有充足的抽气能力。不论是一套四级或五级喷射系统,为了在生产中能按需要调整真空度,应设置不同级数的分级泵。这样,在真空脱气时,就可以根据炉内沸腾情况,随时按情况开闭调整所用的分级泵的级数,以防止钢液过度沸腾。

六、铁合金加料系统

ASEA-SKF 炉的铁合金加料系统如图 8-4-4 所示。加料系统包括:①带电力振动供料器的合金储料仓,储料仓的数目有 6、8 或 9 个,根据需要决定。②自动称量料斗车,料斗车不装料时,通常停于轨道的尽头,料斗车底部设电动卸料口。③重量控制和传送信息的自动装置,自动控制系统设于操纵室内,并有记录装置,记载过秤材料和重量。④采用高架式储料仓时,料斗车在轨道尽头处可将合金料直接卸至架空皮带运输机上;如果储料仓设于地面,则需安装一座提升机,料斗车把铁合金卸至提升机料箱内,提升送至架空皮带运输机。⑤铁合金由架空皮带运输机送至炉盖上的布料器内,可以通过斜槽

漏斗经加热盖加入炉内,斜槽上设切断闸,它与加热盖的进口之间有伸缩的波纹管,炉盖进口处是水冷的。铁合金也可以从布料器经真空盖上的真空密封罐进行真空加料。

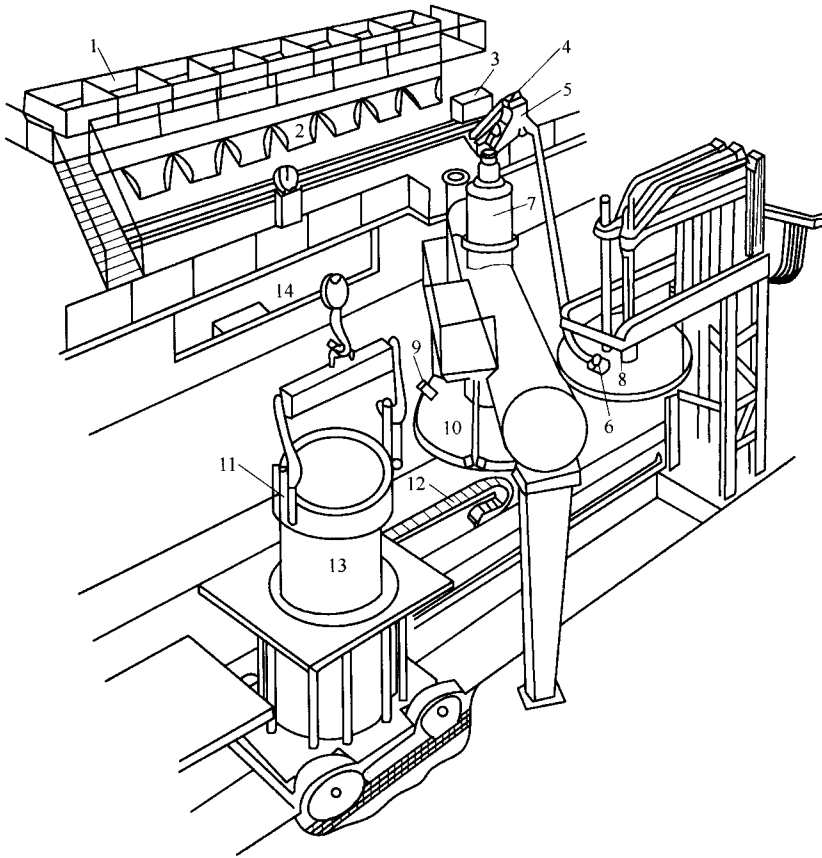


图 8-4-4 ASEA-SKF 炉的铁合金加料设施示意图

- 1—高架式储料箱 2—电力振动供料器 3—料斗轨道车 4—皮带运输机 5—布料器和斜槽漏斗;
6—加热盖上的加料口 7—真空密封罐 8—加热盖 9—窥视孔 10—真空盖;
11—旋转耳轴 12—电缆车 13—钢包 14—操作室

七、钢包车

钢包车采用坚实的横梁式结构,一般使用带固定液压式倾动装置的电缆车,使它沿轨道来往移动。车上装有感应搅拌器、定位装置以及电子称量系统。车面上设立柱,承受钢包的负荷,通过支柱受压,把称量信息传至操作室读出重量。

表 8-4-3 列出了瑞典几个厂家 ASEA-SKF 炉的装备数据。

表 8－4－3 瑞典 ASEA－SKF 炉主要装备数据

项 目	瑞典 尼比厂 30t	瑞典海莱 伏斯厂 30t	瑞典法格 士塔厂 40t	瑞典 勃伏斯厂 50t	瑞典海莱 伏斯厂 60t
占地面积/m ²				360	
钢包重(包括钢液)/t				85	
钢包高/m	3.35			3.97	
钢包直径/m	2.26			2.60	
钢液面至桶口空间高度/m	1.10	0.99		1.05	
电极直径/mm	254			254	
电极极心圆直径/mm	635			610	
变压器/kV·A	4000	3000	4400	6000	6000
感应搅拌器/kV·A	700	500	2×350	2×350	2×370
搅拌频率/Hz	1.5	约 2	1.5	1.3	1.6
真空泵(蒸气喷射泵)/级	4	5	4	4	4
容量(吸气能力)/kg·h ⁻¹			120	120	120
真空度/Pa		26.7	66.7	53.3	66.7
蒸汽耗量(8atm ,190℃下)/kg·h ⁻¹	6340		5500	5500	5150
冷却水耗量/dm ³ ·min ⁻¹			500	5000	4900
其他设备(包括变压器)用水量/dm ³ ·min ⁻¹			900	1100	1300
用水进水温度(包括喷射泵用水)/℃			20	20	20
辅助用电量(变频器、液压泵、冷却水泵)/kV·A			约 900	约 900	约 1100

第二节 ASEA－SKF 炉的布置

ASEA－SKF 炉的排列方式有两种：

- (1)炉盖旋转式布置。钢包座放在固定的感应搅拌器内 ,电极炉盖和真空密封盖能旋转交替使用 ,如图 8－4－5a 所示。
- (2)台车移动式布置。搅拌器放在一个可以移动在台车上 ,钢包座放在车上搅拌器内 ,电极盖和真空盖都固定 ,台车在这两个炉盖的位置间可以来回移动 ,如图 8－4－5b 所示。

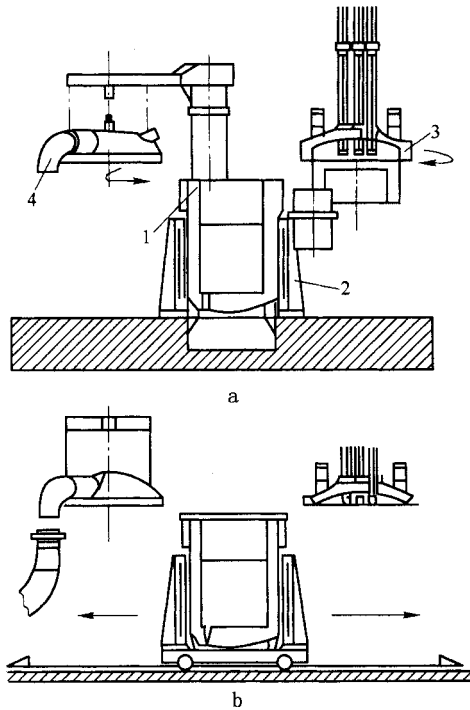


图 8-4-5 ASEA-SKF 炉的布置形式

a—炉盖旋转式 b—台车移动式

1—钢包 2—搅拌器 3—电极盖 4—真空盖

这两种布置主要根据现场和可能性等条件来选择,但根据资料来看,采用台车移动式布置比较普遍。如瑞典勃伏斯厂、法格士塔厂均采用台车移动式,海莱伏斯厂为炉盖旋转式布置。

第三节 精炼工艺及操作

ASEA-SKF 炉适用于处理碳素钢、合金钢、结构钢和工具钢,利用真空吹氧脱碳也适用于精炼低碳不锈钢。

一、初炼钢液

ASEA-SKF 炉可与任何一种炼钢炉双联,它可以由电炉、转炉和感应炉来提供初炼钢液,也可由几种炉子联合提供初炼钢液。

二、初炼炉熔渣的清除

初炼炉熔渣对 ASEA-SKF 炉是有害的,其腐蚀性比钢包内新渣大,而且还影响精炼的进行。如初炼炉熔渣清除不净,精炼中所需的渣量比要求的用量大得多。而渣量过大,则意味着会有一个高温渣层,严重地冲刷耐火材料。

除渣的办法有四种:①在电炉翻炉前将熔渣扒去,瑞典勃伏斯钢厂在 50t 电炉上采用了这个办法。②采用中间罐,法格士塔厂即使用这种方法。但这两种方法,将使 ASEA-SKF 炉开始脱气时的钢液温度很低,虽然可以采取提高电炉出钢温度来弥补,但对电炉不利。③抚顺钢厂创造的压力罐撇渣法。靠压力罐本身重量沉入钢液中,沉入深度让钢液恰好不能进入中心管管口处,由于渣比钢轻,很容易把熔渣压进管口,据称 5min 可撇渣 95%,但此法已不用。④在钢包中采用机械装置扒渣。20 世纪 80 年代在电弧炉上普遍采用无渣出钢技术,这是适应炉外精炼的要求而发展起来的最好的除渣方法。

三、两种基本精炼操作工艺

初炼钢液从电炉出钢时温度一般控制在 1620°C 。在 ASEA-SKF 炉中的精炼方法基本是中性渣和碱性渣两种操作。需要脱硫时,采用高碱度渣,钢包耐火材料在渣线区用碱性砖(96% MgO),其余部分用中性砖(75% Al_2O_3)。如不需要脱硫,可采用上述方法,也可以造中性渣,而渣线区耐火材料则用 85% Al_2O_3 砖,其余部分用 75% Al_2O_3 砖。

(一)在全高铝砖钢包内中性渣操作

在中性耐火材料包衬内的正常操作过程如图 8-4-6 所示。精炼开始时,可以通入惰性气体在常压下加热,使钢液温度从 1550°C 提高到 1580°C 。按规格下限加入铁合金,并使钢中硅含量保持在 0.10%~0.15%,以便下一步碳脱氧时能有一个适当的沸腾强度。由于加入合金造成钢液降温,需再加热使温度恢复到 1580°C ,之后进行真空脱气。

钢液脱气过程将出现激烈的沸腾,有利于去氢、脱氧。脱气规定时间为 20min,温降约 40°C 。脱气后,ASEA-SKF 炉回到加热盖位置进行取样、分析成分,并向熔池加入少量的铝进行沉淀脱氧。铝用量取决于脱气以后至精炼完毕的时间长短,以保证这段时间内维持钢中较低的氧含量,使以后的加热过程保持氧含量相对稳定。

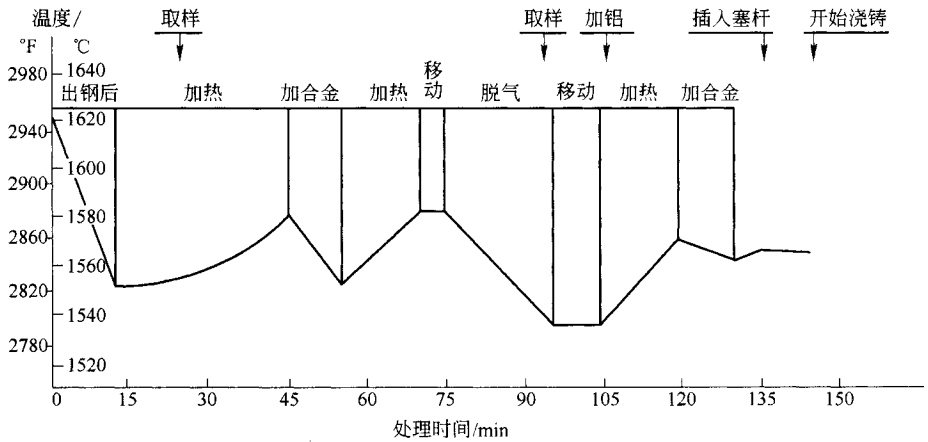


图 8-4-6 全高铝砖 ASEA-SKF 炉内中性渣操作

脱气后,钢液再加热,测温合适,即可调整最终成分,按成分中限加入少量合金,确保很快地达到规定最终钢液温度。50~100t ASEA-SKF 炉用中性渣操作时,从初炼炉出钢至 ASEA-SKF 炉浇铸平均时间为 2~2.5h。

(二) 碱性渣脱硫操作

ASEA-SKF 炉内采用碱性渣操作主要目的是为了精炼过程能够脱硫。操作实际过程如图 8-4-7 所示。

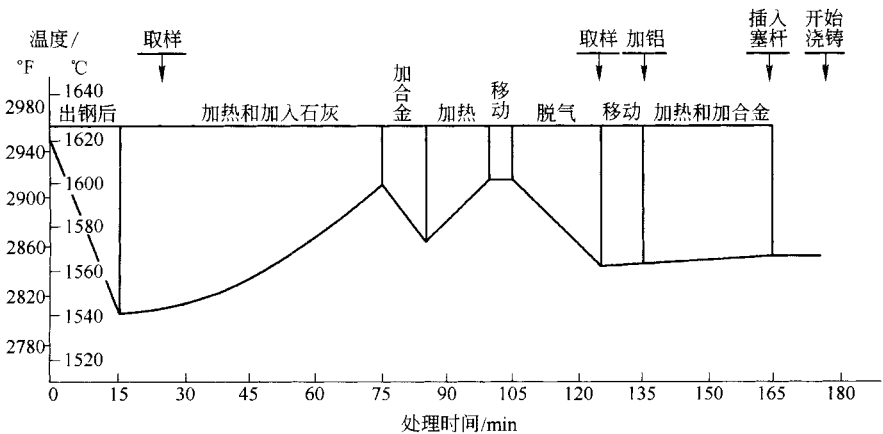


图 8-4-7 碱性渣脱硫操作

初炼钢液倒入 ASEA-SKF 炉,除去初炼炉熔渣后,加入 0.3% 石灰,加热期再补加石灰,使总量达到钢液重量的 0.8%,撒入少量铝粉以加快石灰熔化并使熔渣具有良好的

还原性,熔渣碱度为 3.5~4.5。钢液加入合金后再加热 20~30min 以补偿温度损失。然后脱气 20min,再把 ASEA-SKF 炉移回到加热位置,向熔池内加入少许铝进行沉淀脱氧,铝的用量是根据脱气完毕至精炼完毕这段时间的长短来决定,过几分钟如果需要的话,还可向渣面撒加铝粉,保持熔渣的还原性。采用碱性渣脱硫,无论是撒加铝粉或是加铝沉淀脱氧保持钢液中氧的活度在较低的水平上,都不会使钢中残铝量增高,通常铝含量都在 0.010% 以下。

四、脱硫

通常,钢液中含有一定数量的非金属夹杂物,主要有氧化物和硫化物。为限制夹杂物的数量和大小,应尽可能降低钢中的氧、硫含量。通过 ASEA-SKF 炉的处理,可有效地减少氧含量,同时也可以有效地脱硫。渣钢之间硫的平衡按下述反应式进行:



根据式 9-6-1 可知,硫从钢液向熔渣不断扩散逐渐达到平衡。但这个扩散过程很缓慢,其平衡速度与硫在渣中和钢中活度之差成正比,也与渣和熔池两者接触面积的大小成正比。因此,很好地搅拌将缩短扩散的行程。

如果在高碱度渣下,向钢液面下加入与硫有高亲和力的粉状脱硫剂,不但增加反应表面,而且脱硫元素 Me 溶解到钢中或蒸发,与硫结合成稳定的硫化物(式 8-4-2),将具有更好的脱硫效果,比仅仅造高碱度渣更有利。



式 8-4-2 的反应产物能很快沉淀出来,并被高碱度渣所吸收。而 ASEA-SKF 的电弧加热和感应搅拌促进了钢渣反应。电弧加热提高了高碱度渣的温度,并使其具有良好的流动性,感应搅拌促进了高碱度渣与钢液之间的接触,加快了钢渣界面的交换,提高了硫化物夹杂的分离速度。因此,ASEA-SKF 具备了进行有效脱硫的条件。脱硫反应需要时间,这种方法可延长处理时间。勃伏斯厂之所以选择 ASEA-SKF 炉的原因之一,在于它能脱硫,增加产量。

五、真空脱气

ASEA-SKF 炉真空脱气的主要目的是去氢。真空脱气时,大部分氢将随着不断生成的 CO 气泡而逸出。氢含量减少速度与碳氧反应速度成正比。此外,通过熔池表面的扩散也可大量去氢。这时感应搅拌起着重要作用,它把新鲜的钢液带至熔池表面,从而促进去氢过程。

脱气过程中,钢液的氧含量大大降低,其真空碳脱氧的程度取决于脱氧前的氧含量和预脱氧情况。真空碳脱氧的优点是生成的脱氧产物为气体 CO,不会造成氧化物夹杂。但要使钢中的氧含量很低,还必须加入沉淀脱氧剂充分脱氧才能达到。

真空脱气处理时,为避免钢液过度脱碳沸腾,需要调整真空度,使系统的压力维持一定的大小。

六、真空脱碳

真空脱碳的原理也是碳氧化的原理,所不同的是它需要充足的真空泵能力,造成一个激烈的沸腾以去碳。但是,正常情况下,钢中没有足够的氧充分进行脱碳沸腾,所以就要设法向钢中吹氧。

根据其他钢包炉吹氧去碳的情况表明,钢液含碳量可以很容易地从 0.7% 降到 0.03% 以下,最低达 0.015%,而铬实际上不会损失,在钢液真空脱碳后加热时可设法使铬的氧化物还原回到钢中。

应用 ASEA-SKF 炉已成功地精炼了碳含量不大于 0.025% 的超低碳不锈钢。在 ASEA-SKF 炉中对不锈钢进行真空脱碳的好处是:配上吹氧管即可进行脱碳,设备简单,不要额外的钢包,脱碳处理时间短,铬损失小,对炉衬无特殊要求,生产成本较低,钢液经处理后直接进行浇铸,二次氧化程度小。

七、搅拌钢液的作用

感应搅拌在 ASEA-SKF 炉中起着重要作用。它有利于脱气,加快钢渣反应速度,促进脱氧、脱硫,使脱氧产物和硫化物充分排出,钢液温度和成分可很快均匀。

脱氧操作的目的是为了降低氧含量和减少夹杂物。正是由于有效地搅拌钢液,所以不进行真空脱气,而用加铝沉淀脱氧的办法,也可以达到目的。有人指出,用铝或硅脱氧,钢中的氧含量与真空脱气的效果相比差不多,甚至比它还好,其根本原因在于搅拌钢液。图 8-4-8 就说明了这一点。不管碳含量多少,每加入 0.5~1.0kg/t 铝沉淀脱氧,同样可以获得低氧含量的钢,这是由于铝或硅沉淀脱氧形成的脱氧产物是些很小的悬浮质点,使其分离的过程需要时间,而搅拌钢液起到了增加小质点之间的碰撞和凝聚变大的作用,由于大的质点比小的浮向渣面的速度快,大大提高了氧化物夹杂的分离速度。图 8-4-9 和图 8-4-10 都说明了强制脱氧时搅拌力对钢中氧含量的影响。由此可见,搅拌对脱氧产物的去除有重要作用。

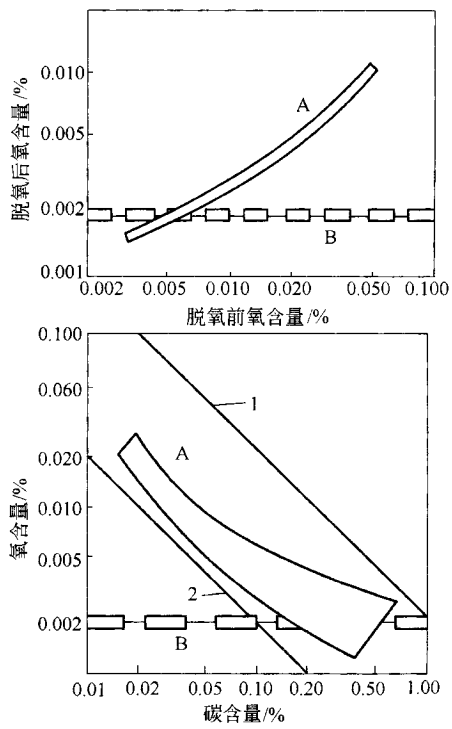


图 8-4-8 脱氧前后的氧含量

A—碳脱氧(66.7Pa) ;B—铝脱氧(101.325kPa)

1—101.325kPa 下理论平衡 ;2—10.13kPa 下理论平衡

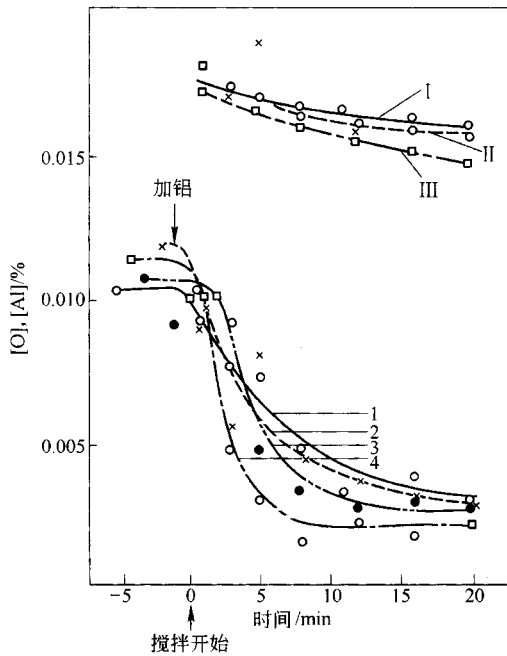


图 8-4-9 钢中氧含量和残铝量与比搅拌功的关系

I— $288\text{W}/\text{m}^3$; II— $580\text{W}/\text{m}^3$; III— $1500\text{W}/\text{m}^3$;

1— $288\text{W}/\text{m}^3$ 2— $580\text{W}/\text{m}^3$ 3— $870\text{W}/\text{m}^3$ 4— $1500\text{W}/\text{m}^3$

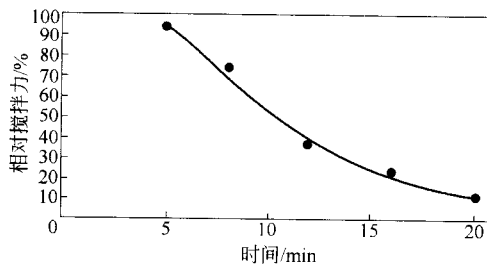


图 8-4-10 各种搅拌强度下氧含量达到 0.003% 所需搅拌时间

(钢成分 0.20% C 0.10% Si 0.50% Mn 加热后期加铝)

第四节 精炼效果

ASEA-SKF 炉适用于精炼各类钢种。精炼轴承钢得到了良好的效果,而处理低碳钢获得的质量甚至比高碳钢还好,生产高纯净度渗碳钢也非常合适。

ASEA-SKF 的精炼效果体现在:

一、增加钢产量

由于精炼操作放在 ASEA-SKF 炉中进行,初炼炉仅提供一次钢液,因而大大缩短初炼炉熔炼时间,增加了产量。

二、提高钢质量

通过 ASEA-SKF 炉精炼,可提高钢的质量,使钢的化学成分均匀,力学性能改善,非金属夹杂物减少,氢、氧含量大大降低。具体为:

(一) 气体含量

脱气的主要目的是去氢。ASEA-SKF 炉中加热之间脱气后钢中正常氢含量为 $0.0002\% \sim 0.0004\%$,加热之后脱气则达到 $0.00015\% \sim 0.0002\%$ 。多年来大量的生产实践证明,钢中的氢含量可小于 0.0002% 。

通过 ASEA-SKF 炉精炼后,钢中的氧含量也有所降低。图 8-4-11 对三个钢号在电炉用双渣操作与 ASEA-SKF 炉精炼后钢中氧含量进行了比较,一般认为 ASEA-SKF 炉精炼氧含量可降低 $40\% \sim 60\%$ 。

(二) 钢中夹杂物

低倍夹杂:ASEA-SKF 精炼法对去除钢中氧化物低倍夹杂有明显的效果,由于强力搅拌钢液,实际上已全部消除了低倍夹杂。

高倍夹杂:强力搅拌使细小、悬浮状脱氧产物质点得到充分的时间和条件聚集成较大的夹杂物而上浮到渣中去,因此 ASEA-SKF 法使高倍夹杂也得到了改善。SKF 公司发现,52100 轴承钢($1\%C, 1.5\%Cr$)的高倍夹杂面积可降低 40% 。

(三) 力学性能

由于 ASEA-SKF 炉处理后降低了钢中气体和夹杂物含量,因此也改善了钢的力学

性能。如 ASEA - SKF 炉与电炉相比较,钢的疲劳强度与冲击功一般可提高 10% ~ 20%,延伸率和断面收缩率可分别提高 10% 和 20% 左右。

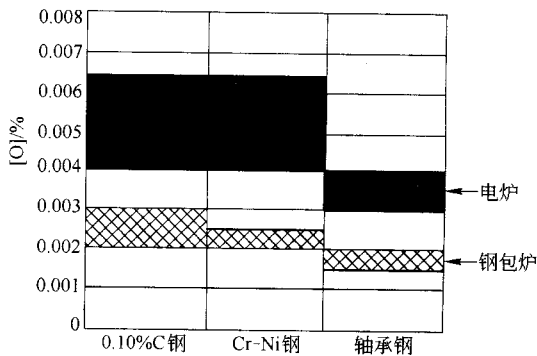


图 8-4-11 ASEA - SKF 炉与电炉双渣法冶炼钢中氧含量比较

(四) 切削加工性能

实践表明,通过 ASEA - SKF 炉精炼,钢的切削加工性也有很大改进。对含 0.35% C, 0.3% Si, 0.7% Mn, 0.035% P, 0.30% S, 1.4% Cr, 1.4% Ni, 0.20% Mo 的钢,其硬度值 HB = 285,得到刀具寿命的试验结果为:未经 ASEA - SKF 炉处理时,要得到 30min 的工具寿命,表面车削速度只能 105m/min;而经处理后,可提高到 120m/min,即工具寿命提高了 15%。对于高速钢的切削加工性能,也同样可以得到改善。

三、生产质量的稳定性

实际生产表明,经 ASEA - SKF 炉处理后的浇铸温度及成品钢的化学成分都比较稳定,这一点具有重要意义。

感应搅拌使温度均匀,所以加热时钢液温度及浇铸温度都比较精确,比电炉或感应炉中的温度要精确得多,温度偏差不超过 5℃。勃伏斯厂对 50t ASEA - SKF 炉的浇铸温度做测定,结果表明符合规定温度进行浇铸的炉次占 97%。

总之,具有电弧加热和感应搅拌的 ASEA - SKF 炉所具有的优点是一般真空脱气设备所不能兼备的。

第五章 VAD 法

VAD 是英文 Vacuum Arc Degassing 的缩写 ,代表真空、电弧加热、脱气。原联邦德国用 Heat(加热)取代 Arc 称 VAD 法为 VHD 法。

VAD 法是美国芬克尔父子(A. Finkl & Sons)公司在将早期钢包真空处理改进为钢包真空吹氩处理时 ,因吹氩钢液温度降低快 ,处理时间受到限制 ,使真空吹氩的处理效果不能充分发挥 ,为补偿温度损失与摩尔(Mohr)公司合作完善了粗真空下电弧加热手段 ,从而诞生了 VAD 法。加热调温手段的实现使原来简单的钢包处理发生了质的飞跃 ,形成了一个运用自如、行之有效的钢包精炼方法。1967 年 ,芬克尔公司建成世界上第一台容量为 65tVAD 炉。因此 ,有文章称 VAD 为 Finkl – Mohr VAD。1972 年 ,奥地利将 3 个电极之间加设了氧枪 ,发展成 MVAD。抚顺钢厂于 1997 年从原联邦德国引进一台与 VOD 组合在一起的 30 ~ 60tVHD/VOD 炉外精炼设备。据冶金部情报标准研究所 1992 年统计 ,全世界共有 VAD 设备 39 台 ,如表 8 – 5 – 1 所示。

表 8 – 5 – 1 拥有 VAD 精炼炉的厂家统计

序号	公 司	国家或地区	投产年份	容量/t
1	A. 芬克尔公司	美国	1968	65
2	舍勒 – 布勒克曼钢铁公司	奥地利	1972	20 ~ 45
3	格·基恩 – 内特尔福兹公司	英国	1972	60
4	日新钢铁公司吴厂	日本	1973	90
5	三菱钢铁公司广岛厂	日本	1973	18 ~ 30
6	莱茵钢公司铸铁厂	德国	1973	16 ~ 35
7	东方优质钢公司阿贡当日厂	法国	1974	60

序号	公 司	国家或地区	投产年份	容量/t
8	英国钢铁公司里弗唐厂	英国	1975	30 ~ 90
9	瓦卢雷公司	法国	1975	60
10	达尔明公司	意大利	1975	70
11	买布林公司	美国	1976	30
12	南非钢铁工业公司	南非	1976	155
13	卡梅伦铁公司	美国	1977	60
14	阿特拉斯铁公司特拉西厂	加拿大	1977	60
15	拜尔东钢铁厂	波兰	1978	18
16	日本钢管公司扇岛厂	日本	1978	60
17	法尔克钢铁公司米兰联合厂	意大利	1979	140
18	住友金属小仓厂	日本	1979	70
19	抚顺钢厂	中国	1979	30 ~ 60
20	雷文斯克雷格厂	英国	1980	130
21	重庆特殊钢厂	中国	1982	17 ~ 25
22	大冶钢厂二炼分厂	中国	1985	18 ~ 25
23	大冶钢厂四炼分厂	中国	1986	50 ~ 60
24	西宁钢厂	中国	1989	17 ~ 25

VAD 法不但具有良好的脱氧去气功能 ,而且简化了初炼炉工艺 ,使冶炼时间缩短、产量增加、质量提高。抚钢第二炼钢分厂两台公称 10t 普通功率电炉与之配合曾创月产轴承钢 6400t 的记录。VAD 法精炼后钢的纯净度如表 8 – 5 – 2 所示。

表 8 – 5 – 2 VAD 法精炼钢的纯净度水平(%)

C	S	P	N	O
0.001	0.0004	0.025	0.0015	0.0005

尽管 VAD 法有上述许多优点 ,但是因为建一台 VAD 炉不仅一次性设备投资高 ,而且设备结构复杂、易损件多、设备维护保养费用也高 ,加之钢包寿命低、耐火材料消耗高等诸多因素影响 ,造成 VAD 法处理费用居高不下(冶炼费用约增加 4%) ,因此与其他炼钢方法相比缺乏竞争能力。20 世纪 90 年代后新建 VAD 设备很少。

第一节 VAD 法的主要设备及其布置

VAD 精炼的设备主要包括 :真空系统、精炼钢包、加热系统、加料系统、吹氩搅拌系统、检测与控制系统、冷却水系统、压缩空气系统、动力蒸汽系统等。

VAD 炉可与电炉、转炉双联 ,设备布置可与初炼炉在同一厂房跨内 ,也可以布置在浇钢跨。精炼设备布置有深阱和台车两种形式。抚钢 VOD/VAD 与初炼炉在同一厂房跨内 ,采用深阱式布置 ,如图 8-5-1 和图 8-5-2 所示。

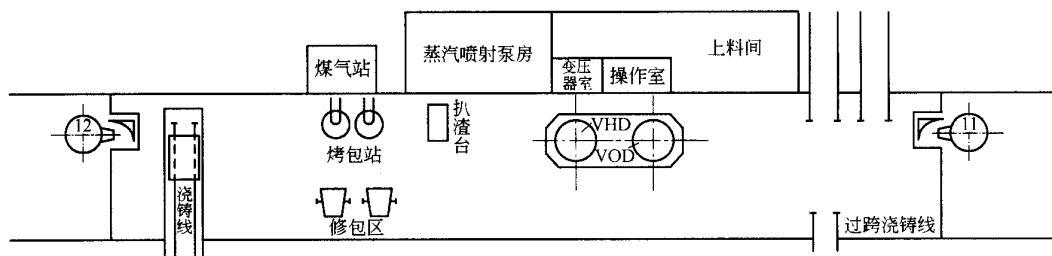


图 8-5-1 抚钢二炼钢车间炼钢跨平面布置图

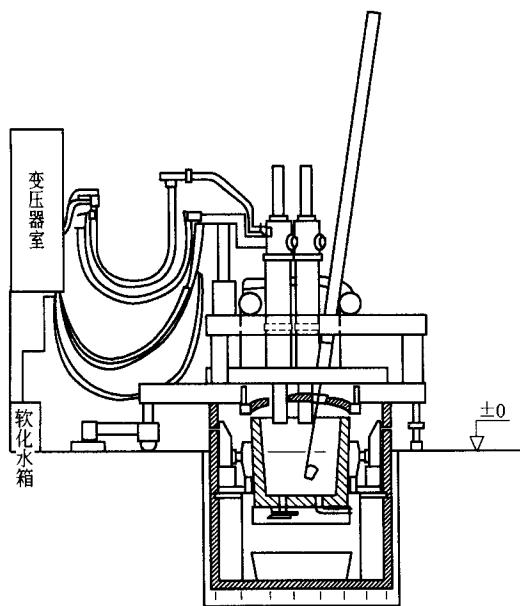


图 8-5-2 抚钢 VAD 设备布置图

为了满足特殊钢企业多品种的需要 VAD 常与 VOD 组合在一起 ,不同容量 VAD/VOD 精炼设备的技术参数如表 8－5－3 所示。

表 8－5－3 VAD/VOD 精炼炉技术参数

项 目	VAD/VOD 20t	VAD/VOD 40t	VAD/VOD 60t	VAD/VOD 100t	VAD/VOD 150t
钢包额定容量/t	15	30	50	90	125
钢包最大容量/t	20	40	60	100	150
钢包直径/mm	2200	2900	3100	3400	3900
熔池直径/mm	1740	2280	2480	2800	3300
钢包高度/mm	2300	3150	3450	3900	
抽气能力/kg·h ⁻¹	150	250	350	450/500	550/600
蒸汽消耗量/t·h ⁻¹	7/8	10/12	10/12	10/12	10/12

一、真空系统

真空系统由真空罐、真空管路、真空检测仪表和真空泵 4 部分组成 ,如图 8－3－6 所示。

(一)真空罐

真空罐由罐体、罐盖、水冷密封法兰、VAD 钢包盖、钢包支架、防漏盘、罐盖提升旋转机构(或罐盖提升罐体开出机构)组成。30～60t 真空罐结构如图 8－2－5 所示。

(二)真空管路

真空管路包括：

(1)主管路 φ900mm ,起点为真空罐 终点为一级泵混合室。

(2)辅助管路 φ250mm ,起点为 VAD 罐真空主管路入口 ,终点为进气调压喷嘴。进气喷嘴 4 个 ,内径 14mm2 个 ,23mm2 个 ,用于调整加热期真空罐内压力。

(3)测量管路 :1in(25.4mm)管 ,起点为主管路 ,终点为真空仪表和膜盒开关。

(三)蒸汽喷射泵

蒸汽喷射泵由喷射器(又称喷嘴)、冷凝器、蒸汽管路、降水池组成。通常蒸汽喷射泵由几个喷射器串联起来使用 ,布置在冷凝器前的为高真空泵(又称增压泵) ,布置在冷凝器后面的为预抽真空泵(又称抽气泵)。抚钢 6 级蒸汽喷射泵基本结构如图 8－3－3 所示。

用于 VAD 蒸汽喷射泵主要工艺参数如表 8-5-4 所示。

表 8-5-4 蒸汽喷射泵主要工艺参数

项 目	工艺参数	抚钢	Finkl	Hcurtey
喷射泵	喷射器个数	6	5	
真空度/Pa	工作真空度	< 100		133.322
	极限真空度	20	39.99	66.66
抽气能力 /kg·h ⁻¹	66.66Pa 时	250	200	
	133.32Pa 时	340		
工作蒸汽	压力/MPa	1.6		12
	过热温度/℃	210		
	最大用气量/kg·h ⁻¹	8605		5000
冷却水	压力/MPa	0.2		
	进水温度/℃	32		
	最大用水量/t·h ⁻¹	580		120

二、精炼钢包

VAD 法所使用的钢包和电炉、转炉等炼钢炉一样 ,是高温液体钢水的二次精炼设备 ,初炼钢液在钢包中要实现造渣、加热升温、真空脱气、合金化等一系列冶金过程。因此 ,对其结构和选用的耐火材料有如下要求 :

- (1)安全可靠 ,在整个冶炼过程中不发生漏钢事故。
- (2)耐火材料的材质对钢的化学成分的影响可以控制。
- (3)钢液面上方要留有足够的自由空间 ,VAD 法取 800 ~ 1000mm 是合适的。

30tVAD 精炼钢包的结构图如图 8-3-2 所示。钢包所用的耐火材料及砌筑尺寸如表 8-5-5 所示。

表 8-5-5 30t 精炼钢包砌筑与材质

部 位	绝 热 层		保 安 层		工 作 层	
	材 质	厚度/mm	材 质	厚度/mm	材 质	厚度/mm
自由空间(7 层)	黏土砖	30	高铝砖	65	镁碳砖、高铝砖	150
渣线(12 层)	黏土砖	30	高铝砖	65	镁碳砖	150
熔池(9 层)	黏土砖	30	高铝砖	65	高铝砖、镁碳砖	150
包底	黏土砖	30	高铝砖	65	高铝砖、镁碳砖	200

注 ①高铝砖为一级高铝砖 ,Al₂O₃ 含量为 85 % ;
②镁碳砖为电熔镁砂、石墨、环氧树脂高压合成砖 ,固定碳含量为 12 % ~ 15 %。

为防止高温对真空罐盖的辐射 ,VAD 真空罐盖内挂有水冷钢包盖 如图 8-5-3 所示。

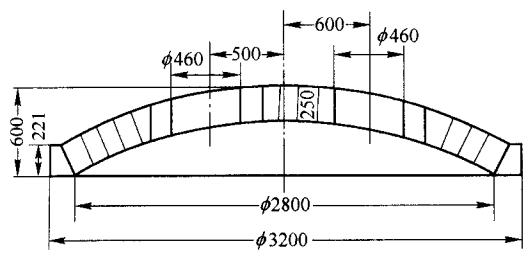


图 8-5-3 VAD 钢包盖砌砖图

三、加热系统

VAD 法通过 3 根高功率石墨电极在低真空条件下(30 ~ 80kPa) ,对钢液和炉渣进行加热。加热系统由变压器、水冷电缆、电极横臂、电极夹持器、超高功率电极、电极密封套筒、液压升降系统和加热系统控制柜等部分组成。VAD 变压器高压供电系统如图 8-5-4 所示。抚钢 30 ~ 60tVAD 加热系统主要工艺参数如表 8-5-6 所示 ,抚钢 30 ~ 60t VAD 变压器参数如表 8-5-7 所示。

表 8-5-6 抚钢 30 ~ 60t VAD 加热系统主要工艺参数

项 目	主 要 参 数	
变压器	额定功率/kV·A	10000
	输出电流/kA	28.9 ~ 8.5
	输出电压/V	240 ~ 85
电极	直径/mm	355
	电极圆直径/mm	1000
电极升降	速度/mm·min ⁻¹	100
	最大行程/mm	1500
加 热	升温速度/℃·min ⁻¹	8 ~ 0.9
	真空度/kPa	25 ~ 80
	吹氧量/L·min ⁻¹	15 ~ 30

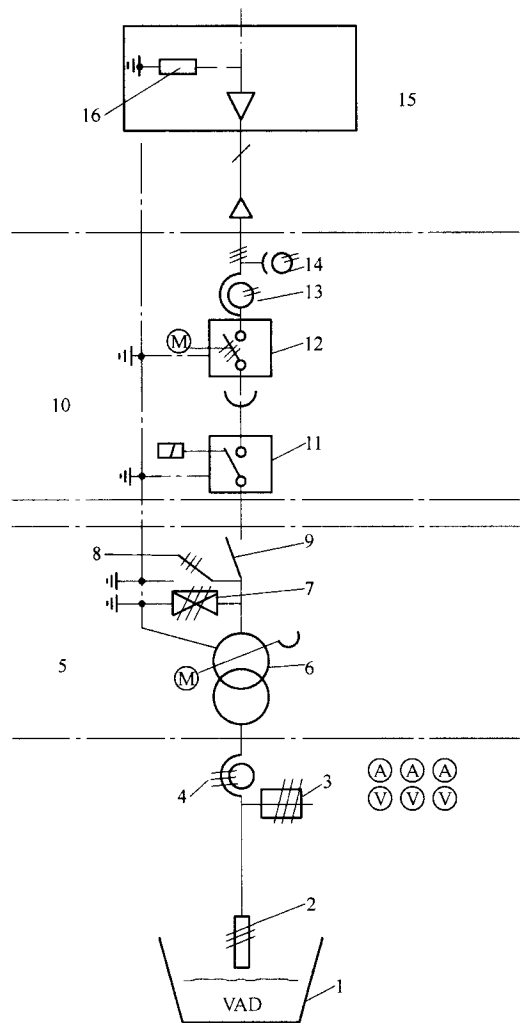


图 8-5-4 VAD 变压器高压供电系统

1—VAD 2—电极 3—熔断器 4—电流互感器 5—变压器室 6—变压器 10MV·A；
7—过电压抑制器 8—接地隔离开关 9—隔离开关 10—高压室 11—真空开关；
12—线路断路器 13—电流互感器 14—电压互感器 15—总压降变电所 16—避雷器

表 8－5－7 抚钢 30～60t VAD 变压器参数

电 压 序 号		1	2	3	4	5	6	7	8
电压/V		240	209	177.5	147.2	138.6	120.7	102.5	85
电流强度/kA		28.9	26.3	22.3	17.5	15.8	12.3	10.3	8.5
升温速度/℃·mm ⁻¹		8.2	6.2	4.4	3.0	2.7	1.9	1.4	0.9
真空度/kPa	最低	80	60	50	40	40	40	35	30
	最高	60	50	40	35	30	25	25	25
Ar 流量/L·min ⁻¹		30	25	20	20	20	20	15	15

注 :升温速度为 28t 钢液与包衬温度一致后的加热升温速度。

VAD 法的突出特点是电极加热在低真空状态下进行 ,3 相电极由水冷不锈钢双筒套密封。

加热电极每相由 4 根 1800mm 长的电极连接而成 ,总长 7200mm。要求电极抗折强度高 ,单位面积允许通过的电流密度大 ,因此必须选用超高功率电极 ,而且表面光滑 ,平整无麻坑、裂纹以减少漏气。国内外超高功率电极理化指标如表 8－5－8 所示。

表 8－5－8 超高功率电极理化指标

产 地		德国	日本	吉林
真密度/t·m ⁻³		2.2～2.5	2.23	2.24
假密度/t·m ⁻³		1.55～1.7	1.54	1.55
气孔率/%		20～30		
灰分/%			0.04	0.11
抗压强度/kg·cm ⁻²		200～450	154	439
抗拉强度/kg·cm ⁻²	轴向	35～175	43	36
	径向		29	25
抗折强度/kg·cm ⁻²	轴向	60～250	53	62.5
	径向		36	40
弹性模量/kg·cm ⁻²	轴向	2.5～7×10 ⁴	703	633
	径向		338.6	262
热膨胀系数/kg·cm ⁻²	轴向		1.4	1.33
	径向		2.71	2.74
20℃导热性 /kcal·(m·h·℃) ⁻¹		100～160		
比电阻/Ω·mm ² ·m ⁻¹			6.4	6.6

四、加料系统

为在真空条件下短时间内准确、快捷、连续地将各种合金材料、造渣材料、脱氧剂加入钢包中 ,VAD 设备配置有自动加料系统 ,它由料仓、电磁振荡给料器、称量料斗、皮带运输机、回转斜筒、上/下料钟和 PLC – 780 计算机等组成。

为满足自动称量、避免加料过程出现卡料和冶炼工艺的需要 ,VAD 用合金料、造渣材料的粒度应符合表 8 – 5 – 9 的要求。

表 8 – 5 – 9 合金料、造渣材料的粒度要求

名 称	合金料	渣 料	Al 粒	FeSi 粒	电极粒
粒度/mm	30 ~ 50	30 ~ 50	3 ~ 5	5 ~ 10	1 ~ 3

为实现真空条件下加料 ,炉顶上布置上下两个容积为 0.3m³ 的料钟。当合金料进入上料钟时 ,下料钟开始充气 ,压力达到 40kPa 时上料钟闸门抬起 ,炉料漏入下料钟 ,停 10s 上料钟闸门关 ,下料钟开始抽真空。压力不大于 10kPa 时下料钟闸门抬起炉料落入包中 ,停 10s 下料钟闸门关闭 ,加料过程结束。为实现准确称量 ,对料仓放料速度和称重预定值进行控制 ,自动称重预定值为 1kg ,当质量不大于 60kg 时放料速度由快速转为慢速 ,称量误差为 2kg。

五、吹氩系统

VAD 法依靠安装在钢包底部的透气砖进行吹氩搅拌钢液。钢包入罐首先接通氩气 ,以 1MPa 的高压气流将透气砖吹开 ,然后关闭旁路阀调整流量。整个精炼过程自始至终都要不停地进行吹氩搅拌 ,如果氩气不通 ,加热易产生渣线部位烧穿。

透气砖一般安装在包底半径 1/2 或 1/3 处 ,弥散型透气砖有镁质和刚玉质耐火材料烧结成的。

氩气不通是 VAD 精炼常遇到的事故 ,其原因一般有 3 种 :

(1)氩气管路漏气(多数是钢包底部位)或透气砖外包铁皮漏气。表现为流量计显示流量很大 ,但钢水表面平静或微动(后者)。 处理办法为换管或倒包。

(2)透气砖顶部被冷钢堵塞。表现为打开氩气阀门时瞬间氩气流量很大 ,之后逐渐减少至零。处理办法为短时间加热 ,仍不通倒包。

(3)氩气管路在冶炼中途突然断裂、烫漏(罐内管路部分)。表现为冶炼中途氩气流量自动增大 ,减压阀后压力表指示为零。处理办法为终止冶炼开罐检查。

表 8-5-10 为 30tVAD 吹氩参数。

表 8-5-10 30tVAD 吹氩参数

参 数	Ar 压力/kPa	Ar 流量/L·min ⁻¹
开 吹	1000	≥ 150
加 热	≤ 300	15 ~ 20
脱 气	≤ 300	40
合金化	≤ 300	60 ~ 80

六、测温取样系统

测温采用纸管插入式热电偶头 ,取样采用外涂 Al₂O₃ 涂料的活底金属样杯 ,转动方式为正齿轮减速机带动齿条做上下运动 ,最大行程为 4.9m ,插入钢水深度为 0 ~ 800mm 升降速度为 0.5m/s。

七、冷却水系统

VAD 设备用水共分 3 类：

(1) 净水 ,用于设备冷却、软化水冷却、变压器油冷却 ,流量为 90t/h 左右 ,进水温度不高于 32℃ ,回水温度不高于 40℃ ,硬度不大于 2.67mmol/L(CaCO₃ ,15 德度)。

(2) 蒸汽喷射泵冷凝器冷却水 ,6 级喷射泵用水量为 580t/h 左右 ,进水温度不高于 32℃ ,此水可闭路循环使用 ,水中含尘量允许 ≤ 500mg/L。

(3) 软化水 ,用于加热系统结构件的冷却 ,用水量为 50t/h 左右 ,压力为 0.3MPa ,进水温度不高于 20℃ ,回水温度不高于 40℃ 45℃ 报警。整个软化水路组成一个密封循环系统。

八、压缩空气系统

VAD 设备用压缩空气分两个压力等级：

(1) 通用压缩空气 ,压力不低于 0.4MPa ,用于开闭各种风动闸门及电极气鼓密封圈充气。

(2) 高压压缩空气 ,工作压力为 (3.3 ~ 3.7)MPa ,用于放开电极夹紧板和给电极升降乳化液罐充压。

九、动力蒸汽

蒸汽是喷射泵工作的动力 ,供汽必须及时 ,通常蒸汽喷射泵所用蒸汽压力为 0.8MPa 左右。蒸汽供应有两种方式 :①专用快速锅炉 ;②普通锅炉和其他用汽设备并网统一供汽。对比发现 ,后者往往不能满足抽真空瞬间大量用汽的要求 ,影响精炼操作的正常进行 ,抚钢采用 12t 快速锅炉单独为精炼炉供汽 ,喷射泵开停自如 ,精炼设备的作用得到有效发挥。

第二节 VAD 精炼设备的基本功能

VAD 精炼设备具有抽真空、电弧加热、吹氩气搅拌、测温取样、自动加料等多种冶金手段。整个冶金过程在一个真空罐内即可完成 ,不像 SKF 和 LF 那样加热和脱气在两个工位 ,钢水包需移动 ,因此 VAD 的各种冶金手段可以随意组合 ,从而灵活、方便、快捷、机动性强 ,可根据产品的不同质量要求 ,上下工序衔接配合制定出经济合理的精炼工艺路线。

一、造渣

VAD 在真空条件下电弧加热 ,可以将固体渣料迅速熔化 ,因此可以通过添加渣料造酸性、中性、碱性炉渣 ,也可以通过测量入罐渣厚 ,根据初炼渣的原始成分添加硅石或耐火砖块、石灰调整炉渣酸碱度 ,达到控制夹杂物形态、脱硫或增硫的目的 ,如表 8-5-11 所示 ,彻底去除氧化渣可以有效防止回磷 ,冶炼低磷钢 ,如表 8-5-12 所示。

表 8-5-11 加入硅石调整炉渣碱度 B 的效果(14 炉)

项 目		CaO/%	SiO ₂ /%	B	硅石加入量/kg
入 罐	范 围	44.13 ~ 60.45	16.00 ~ 19.50	2.7 ~ 3.7	25 ~ 40
	平 均	55.4	17.5	3.2	
出 罐	范 围	44.13 ~ 59.06	18.35 ~ 24.70	1.9 ~ 2.9	
	平 均	51.2	21.1	2.4	

表 8-5-12 通过彻底除去初炼渣冶炼工业纯铁 VAD-VOD 过程磷的变化

钢 种	炉 数	出 炉 P /%	入 罐 P /%	出 罐 P /%
纯 铁	10	0.001 ~ 0.0013	0.001 ~ 0.002	0.0022 ~ 0.0035

当初炼炉造还原渣出钢 ,碱度在 3.5 左右 ,可按入罐渣量 × 0.5(kg)计算硅石加入量 ,调整炉渣碱度到 2.5 左右。

图 8-5-5 为在碱度 1.8 下精炼 GCr15 ,成品[S]0.016% [Al]0.04% [O] 0.00149%所得到的氧硫复合夹杂物形态。

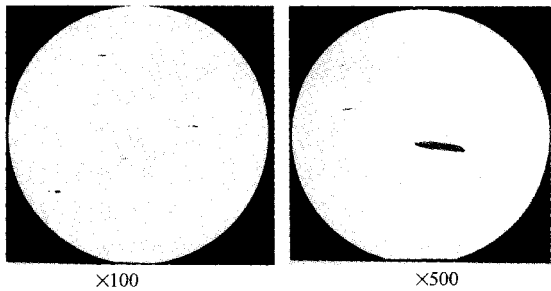
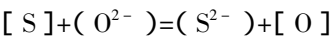


图 8-5-5 精炼 GCr15 所得到的氧硫复合夹杂物形态

二、脱硫

根据碱性还原渣脱硫反应式：



[S]= 1/K_s $\frac{(S)O]f_{[O]}}{n_{O^{2-}} \cdot f_{O^{2-}}}$

可知 ,钢中硫含量取决于钢中初始硫含量、炉渣碱度、渣中硫含量及脱氧程度。通过造高碱度渣 ,铝深脱氧或换渣脱硫冶炼超低硫 WFG36Z 合金结构钢 ,成品硫的统计如表 8-5-13 所示。

表 8-5-13 VAD 精炼 WFG36Z 钢成品硫含量

炉 数	成品 S /%		脱硫率 /%	
	范 围	平均	范围	平均
20 炉	0.0009 ~ 0.0025	0.00146	75 ~ 95	84

实践证明 ,若使成品硫含量降到 0.001% 以下 ,入罐硫含量必须小于 0.010% ,如

表 8－5－14 所示。

表 8－5－14 入罐硫含量与换渣次数的关系

钢水成分/%		入罐硫含量/%	VHD 换渣次数	成品硫含量/%	炉 数
C	Si				
0.30～0.35	0.60	0.008～0.011	1	0.0006～0.001	3
0.30～0.35	0.40～0.60	0.011～0.013	2	0.001	2
0.30～0.35	0.40	0.015～0.018	2(延长真空时间)	0.001	2

三、脱氧、去夹杂

VAD 法以 3 种方式脱除钢液中的氧 :①真空碳脱氧 ;②精炼炉渣扩散脱氧 ;③强脱氧剂 Al、CaSi 终脱氧。脱氧产物主要靠吹氩过程氩气泡上浮将夹杂物带入渣中。

从表 8－5－15～表 8－5－17 和图 8－5－6～图 8－5－11 中的数据可以看出 ,VAD 法在 40～50kPa 压力下通过三根石墨电极对炉渣和钢液进行加热升温 ,石墨电极氧化生成 CO 气体 ,在钢水包熔池上面形成很强的 CO 还原气氛 ,使炉渣中的 FeO 减少 ,形成白色泡沫还原渣 ,取得明显脱氧脱硫效果。

表 8－5－15 VAD 精炼轴承钢时各阶段氧及夹杂物含量的变化(平均值)

阶 段	(FeO) /%	[O]/%	夹杂物测定	
			电解杂质/%	图像仪测定/%
出钢前		0.0072	0.0074	0.0294
入 VAD 罐	1.49	0.0068	0.0080	0.1114
加热后	0.88	0.0023	0.0039	0.0225
真空脱气后		0.0022	0.0028	0.0040
出罐	0.63	0.0018	0.0023	0.0033

表 8－5－16 VAD 精炼轴承钢各阶段炉气成分测定(%)

日 期	加 热 期			真 空 脱 气		
	O ₂	CO ₂	CO	O ₂	CO ₂	CO
12.19	8.8 12.8	0.4	10.8 7.2	13.4 11.4	1.6	5.6 5.4
12.20	14.4 14.4	0.4	8.2 8.0	11.4 11.2	1.2	6.4 5.6
12.22	10.0 10.8		6.6 6.6	10.0 12.0	2.2	10.2 6.2

注 :炉气成分中的氧来自调压阀进入的空气和泄漏。

表 8-5-17 VAD 精炼轴承钢各阶段 (FeO) [O] [S] 测定 (%)

阶 段	(FeO)	[O]	[S]
入 VAD	1.26 ~ 1.7	0.0043 ~ 0.0065	0.0052 ~ 0.0078
	1.49	0.0054	0.00652
加热后	0.80 ~ 0.95	0.0022 ~ 0.0027	0.0044 ~ 0.0060
	0.88	0.00247	0.00522
出 VAD	0.37 ~ 0.80	0.0010 ~ 0.0023	0.0025 ~ 0.0037
	0.63	0.0018	0.00318

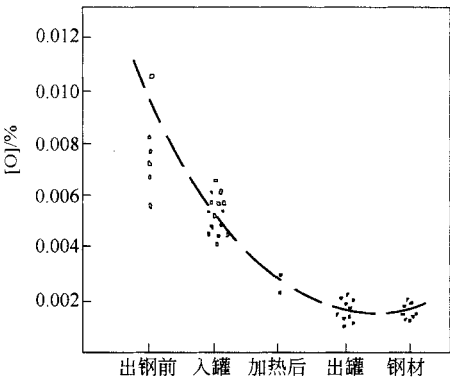


图 8-5-6 VAD 精炼轴承钢时各阶段氧及夹杂物含量的变化

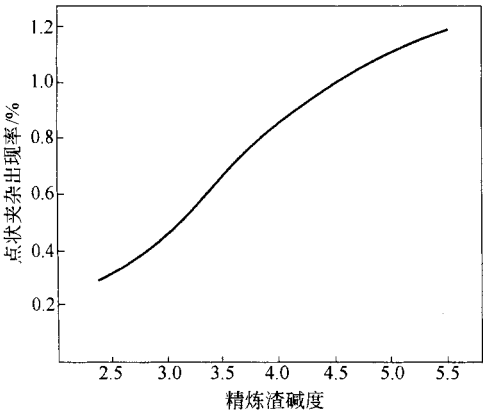


图 8-5-7 VAD 精炼渣碱度对点状夹杂的影响

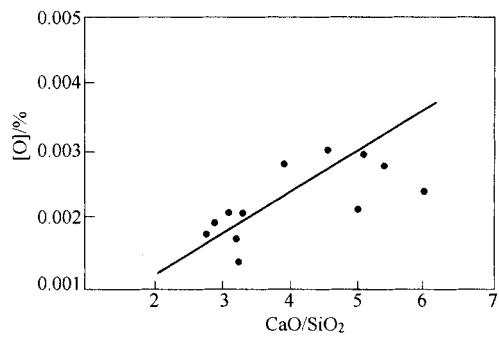


图 8-5-8 VAD 终渣碱度对氧含量的影响

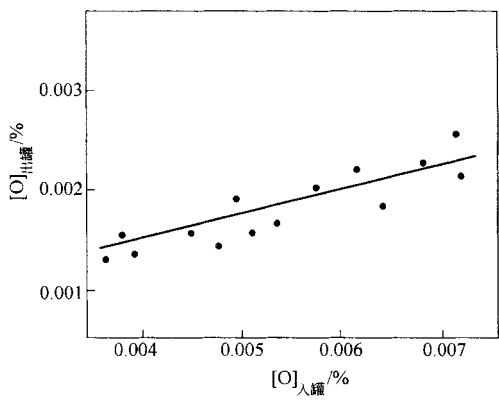


图 8-5-9 VAD 精炼前后氧含量的关系

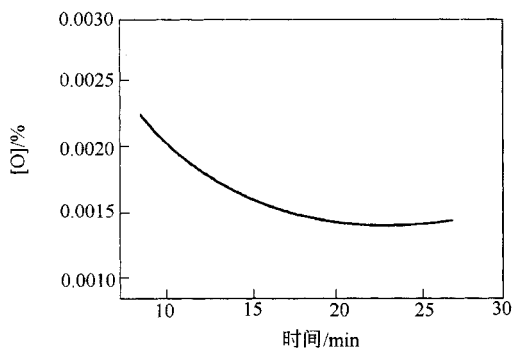


图 8-5-10 真空处理时间对脱氧效果的影响

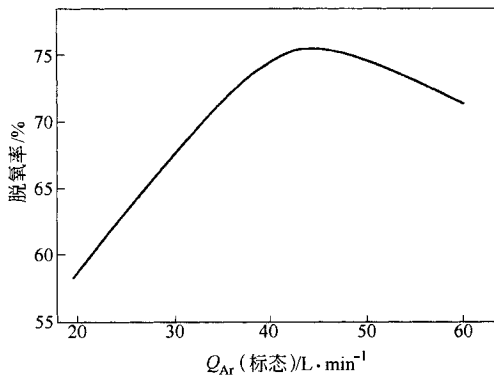


图 8-5-11 氩气流量对脱氧效果的影响

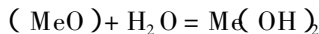
四、脱氢

根据氢在钢液中的溶解反应方程：

$$H_2(g) = [H]$$

$$[H] = K_H \sqrt{p_{H_2}}$$

可知,热力学计算抽真空降低气相中氢的分压力 p_{H_2} 小于 562.62Pa 即可使钢中氢小于 0.0002%。据徐世铮教授研究发现,氢以 (OH^-) 和氢化物形式存在于还原性炉渣中,渣中氢按渣钢间分配定律 L_H 向钢中扩散,削弱真空脱氢的效果。炉渣吸氢的反应式如下：



$$a_{M(OH)_2} = K a_{MeO} p_{H_2O}$$

由热力学计算可知,若使钢中氢小于 0.0002%,气相中水蒸气的分压力 p_{H_2O} 必须小于 4Pa,远远低于 VAD 极限真空度值。生产实践证明,钢包精炼过程水蒸气主要来源于造渣材料,因此使用干燥的渣料、降低气相中水蒸气的分压,是提高真空脱氢的一项重要措施。

真空脱氢与下列因素有关：

(1) 入罐前钢液氢含量。VAD 脱氢率为 46%,为保证精炼后氢含量小于 0.0003%,原始含氢量应小于 0.00056%,如图 8-5-12 所示。

(2) 高真空保持时间越长,脱氢率越高,如图 8-5-13 所示。

(3) 造渣材料中水分含量高,真空精炼脱氢效果差,如图 8-5-14 所示。

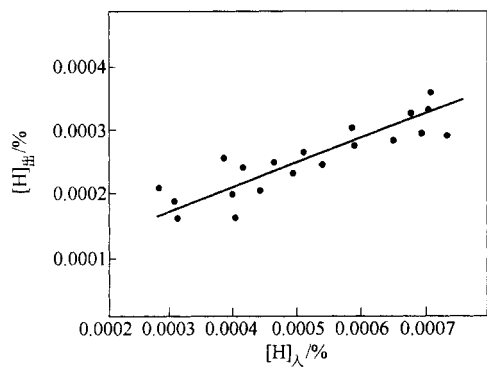


图 8-5-12 原始氢含量与精炼后氢含量的关系

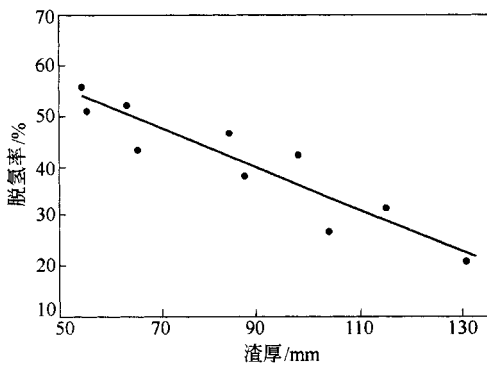


图 8-5-13 渣厚对去氢的影响

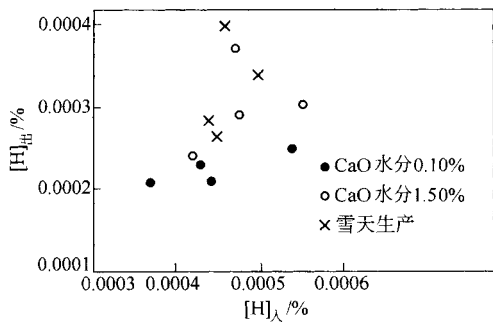


图 8-5-14 渣料水分对脱氢的影响

(4) 为保证脱氢效果,造渣材料应在真空脱气前加入,如图 8-5-15 所示。

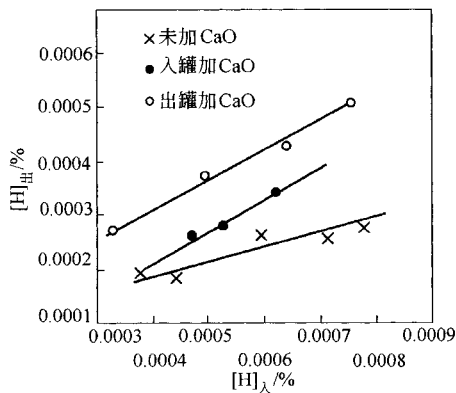


图 8-5-15 造渣材料加入时间对脱氮的影响

五、脱氮和增氮

根据氮在钢中溶解反应式：

$$N_2 = [N]$$

$$[N] = K_N \sqrt{p_{N_2}}$$

可知 ,降低气相中氮的分压力可以使钢液脱氮 ,但由于许多合金元素与氮生成氮化物分解压力很低 ,使单纯依靠提高真空度脱氮的效果不明显 ,如表 8-5-18 所示。

表 8-5-18 VAD 过程真空度与钢中氮含量的关系

真空度/Pa	炉 数	精炼后 [N] 含量/%	
		范 围	平 均
≤1000	7	0.0050 ~ 0.0064	0.00561
≤100	11	0.0045 ~ 0.0069	0.00562

大生产数据统计 ,VAD 法脱氮效果 η_N 一般在 50% ~ 60% ,高于 ASEA-SKF 和 LF 精炼法 ,氮的脱除主要是真空条件下氩气搅拌能大 ,搅拌时间长。

当吹氩改为吹氮时 ,可以使钢水增氮 ,且吸氮反应为一级反应。当钢液含氮量低于饱和溶解度值时 ,吹入的氮立即被钢液吸收 ,氮的收得率为 95% 左右。

六、合金化

如 4.4.1 节所述 VAD 设备既可真空下连续加料 ,也可以大气下包中加料 ,即可以进行成分微调 ,也可以一次加入大量合金料终调成分 ,成分控制稳定 ,收得率高。

第三节 VAD 生产工艺

图 8-5-16 所示为几个经常用到的典型 VAD 工艺路线。实际生产中 ,通过真空、加热、吹氢、合金化的不同组合 ,能演变出多种多样的工艺路线。

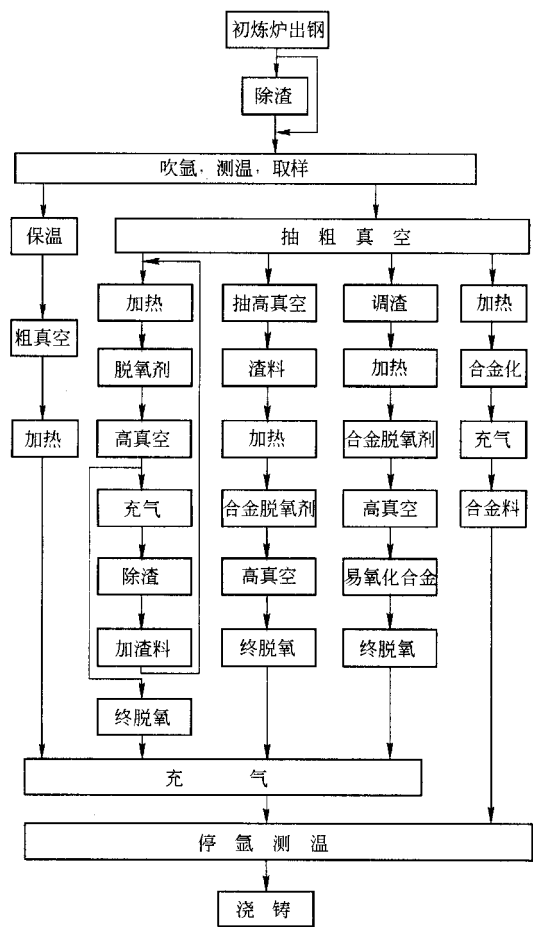


图 8-5-16 VAD 法工艺路线图

一、普通电炉与 VAD 双联操作工艺

(一)双真空处理工艺

该工艺适用于冶炼纯净度高、氢含量要求低的合金结构钢、超低硫钢、但冶炼时间长,因一次真空后需添加渣料,新渣料带入的水分往往造成[H]重新增高,所以一般很少采用这种工艺。现以 WFG36Z 钢为例介绍此工艺的操作要点,如表 8-5-19 和图 8-5-17 所示。PCrNi1Mo 钢双真空精炼与电炉合成渣洗的质量水平比较如表 8-5-20 所示。

表 8-5-19 双真空处理工艺操作要点

工 位	取样	操作程序	工 艺 参 数
EH(28t)	装料	配碳规格上限 + 0.60 %	
		熔化,氧化	熔清取碳、磷
		扒渣	[C]D.10%[P]D.010% ,T1650℃
		造新渣	渣量控制 3 % ~ 4 %
			FeS(75 %) 2.5kg/t ,
		脱氧,合金化	Al 1.5kg/t ,SiC 粉一批 15min
		出钢	[C]≤0.15% [S]≤0.025 %
		↓	T ≥ 1650℃
		扒渣,取样	扒渣 60 % ~ 70 %[C] 0.13 % ~ 0.15 %
		↓	[Mn]1.20 % ~ 1.40 % [Si]D.15 % ~ 0.35 %
钢包		吹氩,测温	吹氩 p _{Ar} 1MPa ,T ≥ 1610℃
VAD		↓	
		扣罐盖,泵 6 ~ 1 级	p _{Ar} ≤ 0.3 MPa ,v _{Ar} = 30L/min
		↓	p _真 ≤ 100h ,保持 10min
		测温,加铝粒 0.5kg/t	
		↓	
		充气泵 6 级加热	p _真 = 40 ~ 50kPa ,时间 20 ~ 30min
		↓	
		测温调成分	T = 1660 ~ 1680℃ ,Ar60 ~ 70L/min
		↓	
		加渣料、铝粒	
		↓	
		泵 6 ~ 1 级	p _真 ≤ 100Pa ,保持 20minAr40 ~ 50L/min

第八篇 钢水的炉外精炼技术			
工 位	取样	操作程序	工 艺 参 数
时间 ≈ 2h		↓	
		终脱氧	Al 1kg/t
		↓	
		充气	
		↓	
铸锭		测温 ,停氩	
		↓	
		浇铸	13.1t 钢锭

表 8－5－20
 PCrNiMo 钢双真空精炼与电炉合成渣洗的
 质量水平比较气体含量($\times 10^{-4}$,%)

工 艺		[H]		[O]		[N]	
		范围	平均	范围	平均	范围	平均
VHD	入罐	2.7 ~ 5.3	4.2	35 ~ 80	47.6	61 ~ 121	82.2
	出罐	1.5 ~ 3.0	2.3	10 ~ 24	15.7	20 ~ 59	35.2
	脱气率/%		45.2		67.0		57.2
渣洗		5 ~ 7		50 ~ 80		80 ~ 100	

非金属夹杂物含量						
工 艺	氧化物 级别	硫化物 级别	稳定夹杂物含量/%			
			总量	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiN
VHD	1.5 ~ 1	1 ~ 0.5	0.0048	0.00260	0.00048	0.00106
渣洗			0.0114	0.00703	0.00180	0.00113
降低率/%			27.8	63	73.3	6

力学性能				
工 艺	炉 数	σ _b /MPa	ψ/%	A _K /J
VHD	13	935	53.48	55
渣 洗	32	947	44.60	42

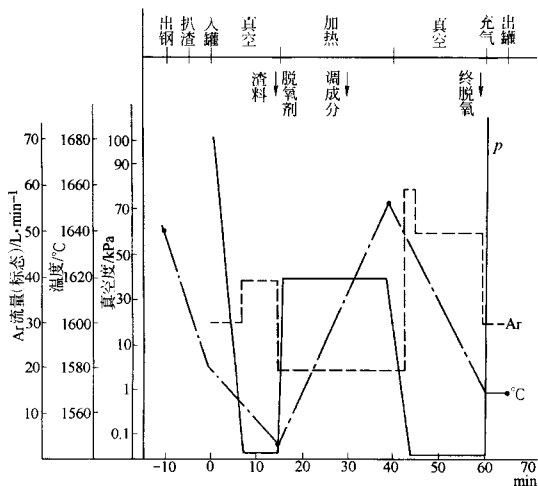


图 8-5-17 EF + VAD 双真空精炼操作工艺曲线

(二)一次真空处理工艺

这种工艺是 VAD 法精炼的基本工艺 ,轴承钢、合金结构钢、工模具钢精炼普遍采用这种工艺。现以轴承钢为例介绍此工艺的操作要点 ,如表 8-5-21 和图 8-5-18 所示。

表 8-5-21 一次真空处理工艺操作要点

工 位	取样	操作程序	工 艺 参 数
EF		装料	配碳 规格上限 + 0.60%
		↓	
	✓	熔化氧化	$T \geq 1540^{\circ}\text{C}$ [C] $\geq 1.10\%$, 深吹氧去碳 $\geq 0.20\%$
		↓	
	✓	除渣	[C] 0.70% ~ 0.90% , [P] $\leq 0.010\%$ $T \geq 1630^{\circ}\text{C}$
		↓	
		造新渣还原	CaO 16 ~ 18kg/t ,CaF ₂ 5 ~ 7kg/t , FeSi ₂ ~ 3kg/t ,Al 1kg/t
		↓	
		脱氧合金化	锰、铬调至下限 ,硅 碳粉一批保持 15min
		↓	

第八篇 钢水的炉外精炼技术			
工 位	取样	操作程序	工 艺 参 数
时间 $\approx 3\text{h}$	✓	出钢	碳、锰、铬调至中下限， [S] $\leq 0.030\%$, $T \geq 1630^{\circ}\text{C}$
		↓	
扒渣台	✓	除渣取样	除渣 60% ~ 70%
		↓	
VAD		测温吹氩	渣厚 50 ~ 80mm ,自由空间 $\geq 900\text{mm}$ 氩气吹开后调至 30L/min(标态)
		↓	
		扣罐盖抽真空	开 6 级泵 ,真空度 30 ~ 50kPa
		↓	
VAD		加热	15 ~ 20min ,Ar 流量 20L/min(标态)
		↓	
		调整化学成分	碳、锰、铬、硅中限 , $T \geq 1620 \sim 1640^{\circ}\text{C}$ Ar 流量 60L/min(标态)
		↓	
		真空精炼	开 6 ~ 1 级泵 ,真空度 100Pa ,保持 15min , Ar 流量 40L/min(标态)
		↓	
		终脱氧	加铝粒 0.5kg/t ,保持 2 ~ 3min
		↓	
		充气解除真空	
		↓	
时间 $\approx 1\text{h}$		测温	$T = 1510 \sim 1530^{\circ}\text{C}$
		↓	
喂线机		(根据需要)	可将解除真空前加铝、钛、硅钙改为喂线
		↓	
		浇铸	

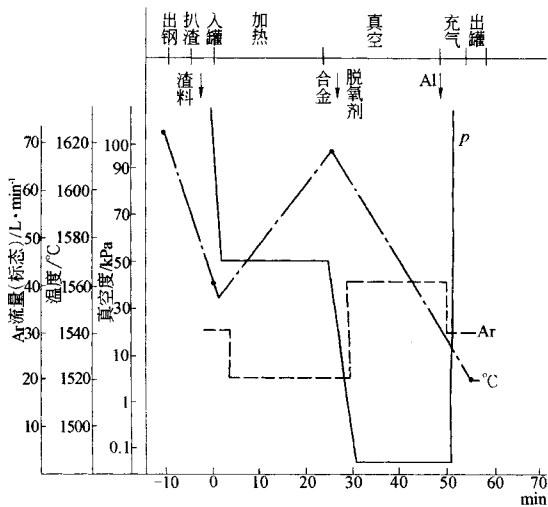


图 8 - 5 - 18 VAD 一次真空处理工艺曲线

通过 VAD 精炼 ,钢中气体含量可降低 50%左右(表 8 – 5 – 22) ,非金属夹杂物减少 50% ~ 60% ,且夹杂物颗粒细小、分散(表 8 – 5 – 23 和表 8 – 5 – 24) ,轴承钢额定疲劳寿命 L_{10} 提高 50% 以上 ,模具钢的综合力学性能指标得到改善。

表 8 – 5 – 22 VAD 冶炼 4Cr5MoV1Si 真空处理前后
平均气体含量(%)变化(10 炉)

气 体	[H]	[O]	[N]
脱气前	0.000538	0.00526	0.01306
脱气后	0.00028	0.00328	0.00744
脱气效率/ %	0.00470	0.00376	0.00430

表 8 – 5 – 23 电解法和图像仪法测定
GCr15、H11 夹杂物结果

工 艺	电解法测定夹杂物含量/ %			图像仪法测 定氧化物沾污度/ %
	总量	Al ₂ O ₃	SiO ₂	
GCr15	0.0032	0.0014	0.00037	0.0057
H11	0.0046	0.0028	0.00010	

表 8 – 5 – 24 VAD 冶炼模具钢 4Cr5MoV1Si 钢材低倍组织、夹杂物评级

冶炼工艺	钢材规格/ mm	一般疏松	中心疏松	方形偏析	氧化物评级	硫化物评级	夹杂物总量/ %
电炉	φ150	0	0.5	1	2	1.0	0.0085
VAD	φ160	0	0	0.5	1	0.5	0.0051
	φ300	0.5	0	0			

与电炉相比 ,VAD 冶炼的模具钢 4Cr5MoV1Si(H11) ,氧化物总量质量分数降低了 45.2% ,平均尺寸减小 27%(图 8 – 5 – 19) ,夹杂物形态变成圆滑球形的氧硫复合型夹杂物。

(三)汽阀钢 5Cr21Mn9Ni4N 氮合金化操作

电炉根据料源情况采用单渣法或返回吹氧法冶炼 ,按化学成分中限计算 ,留出加氮化铬(氮化锰)量调加锰、铬 ,钢渣同出 ,钢包除渣 50% ,入 VAD 炉。

VAD 操作有两种方式：

(1)真空下吹氩加热升温 ,温度为 1660 ~ 1670℃ ,解除真空 ,大气下加入烤红的氮化铬和终脱氧铝 1kg/t ,氩气流量(标态)为 80 ~ 100L/min ,搅拌 5 ~ 6min ,合金料全熔 ,温度

为 1470 ~ 1490℃ ,停氩出钢。氮收得率为 96%。

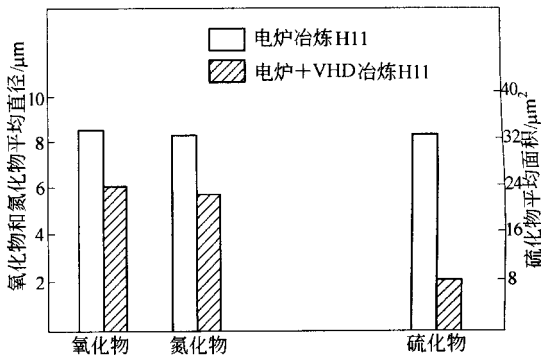


图 8-5-19 统计检测夹杂物尺寸的对比

(2)真空下吹氮、加热、吹氮 真空度为 80 ~ 90kPa ,氮流量(标态)为 150 ~ 300L/min ,按流量 × 时间 ÷ 22.4 × 28(氮气相对分子质量)计算进氮量 ,氮收得率为 75% ~ 100% ,取样分析氮 ,解除真空 ,大气下加入烤红的氮化铬(氮化锰)调整成分 ,因氮化铬加入量减少 ,加氮化铬时钢液温度降低至 1620 ~ 1640℃。

不同冶炼方法氮化铬铁耗量如表 8-5-25 所示。

表 8-5-25 不同冶炼方法的氮化铬铁耗量(kg/t)

冶炼方法	炉数	平均加 CrN	降低率/%
返回法 + VAD 吹氮	3	107.8	
返回法 + VAD 吹氮	5	92.5	14
单渣法 + VAD 吹氮	3	62.4	42

(四)VD 工艺生产高碳铬轴承钢

大冶钢厂与北京科技大学合作 ,50t 高功率电炉粗调成分出钢 ,60tVAD 抽真空计算机控制吹氩时间和吹氩量 ,实现恒功率搅拌 ,真空吹氩精炼 GCr15 ,平均氧含量为 0.00095%。

二、转炉与 VAD 双联

(一)合金结构钢冶炼工艺

转炉与 VAD 双联冶炼低合金钢典型操作工艺曲线如图 8-5-20 所示。操作工艺要点如表 8-5-26 所示。VAD 处理过程中元素变化如图 8-5-21 和图 8-5-22 所

示。低合金结构钢真空处理效果如表 8-5-27 所示。

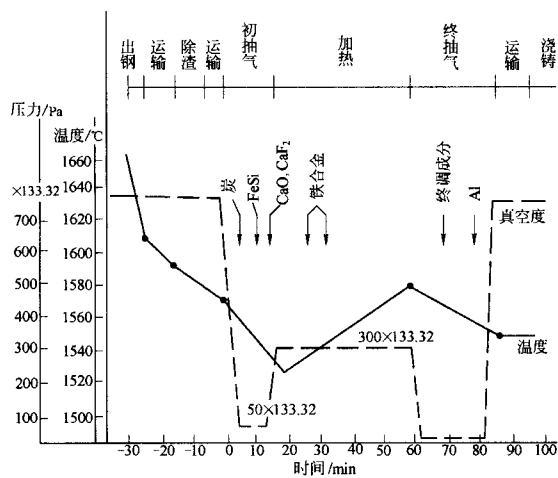


图 8-5-20 低合金钢典型操作工艺曲线

表 8-5-26 转炉与 VAD 双联操作工艺要点

工 位	取样	操作程序	工 艺 参 数
LD		装铁水	
转炉		吹氧	
		出钢	[C]≈0.10% [S]≈0.015% [P]≤0.015% T = 1650 ~ 1670℃ 加锰铁
钢包		除渣	
VAD 90t		吹氩测温	观察氩气确实吹开,调流量(标态)40L/min
		开 6 ~ 4 级泵	压力≈6.6kPa,保持 10min 加 CaO ,CaF ₂ 增碳 , 加硅铁到规格中限 吹氩气搅拌
		加热	压力 40kPa ,Ar 流量(标态) 40L/min 时间 40 ~ 60min , 升温速度为 1.6℃/min
		测温合金化	加锰铁、铬铁、镍到规格要求 ,Ar 流量(标态) 80 ~ 100L/min ,T = 1580 ~ 1600℃
		第二次真空	开泵 6 ~ 1 级 压力≤133Pa,保持 20 ~ 30min , Ar 流量(标态)50 ~ 60L/min
		终脱氧	加铝 0.5 ~ 0.8kg/t
		充气测温	
		出罐	

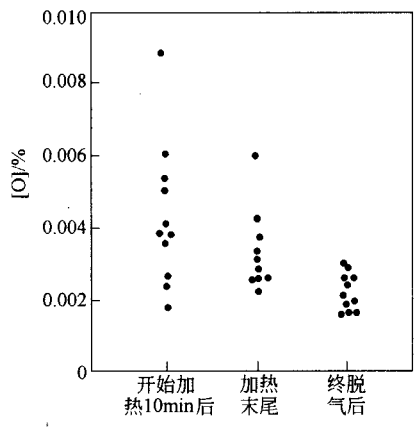


图 8-5-21 VAD 处理低合金钢过程中 [O] 的变化

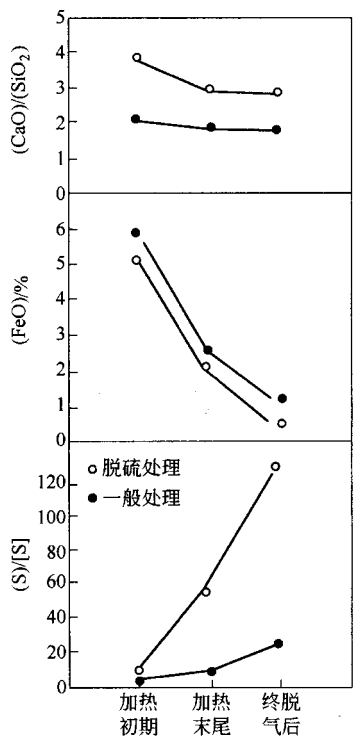


图 8-5-22 VAD 处理低合金钢过程中 (CaO)/(SiO₂)(FeO)(S)/[S] 的变化

VAD 处理 SCM4 钢 6t 锭轧成 160mm×620mm×L 钢板,头中尾取片与电炉钢相比氧含量降低 0.0015%,B、C 类夹杂显著减小,如表 8-5-28 所示。

表 8-5-27 低合金结构钢真空处理效果

[S]/%	脱硫率/%	[O]/%	[H]平均/%	元素收得率/%		
				C	Si	Cr
0.0085	0.004	0.0010~0.0035	0.00015	80	87	97

表 8-5-28 VAD 与电炉生产的 SCM4 钢板残余元素、
显微洁净度、夹杂物数量比较

工 艺	取样 部位	残余含量/%			JIS 法测定洁净度				夹杂物量(60 视场 400) 尺寸范围(长度) μm			
		[N]	[O]	[S]	dA	dB	dC	dT	10~20	20~50	50~100	>100
VAD	顶	0.0072	0.0025	0.0090	0.035	0.004	0.008	0.047	6	0	0	0
	中	0.0069	0.0031	0.0080	0.025	0.008	0.017	0.050	6	1	0	0
	底	0.0074	0.0028	0.0060	0.025	0.008	0.018	0.051	8	2	0	0
EF	顶	0.0068	0.0035	0.010	0.040	0.008	0.013	0.061	6	2	0	0
	中	0.0075	0.0046	0.010	0.025	0.013	0.025	0.063	10	4	1	0
	底	0.0070	0.0048	0.0080	0.029	0.009	0.030	0.068	9	5	1	0

(二)超低碳钢真空处理工艺

该工艺适用于铝脱氧 C]≤0.01% 的超低碳钢种。操作工艺曲线如图 8-5-23 所示。操作要点如表 8-5-29 所示。

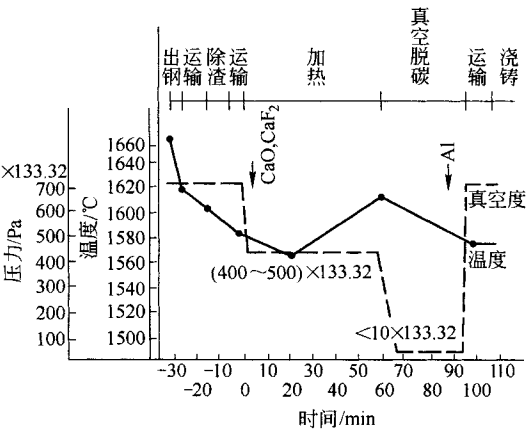


图 8-5-23 超低碳钢操作工艺曲线

表 8－5－29 VAD 冶炼超低碳钢操作要点

工 位	取 样	操作程序	工艺参数
LD 转炉		装铁水	
		吹 氧	
		出 钢	[C]0.04% , $T = 1650 \sim 1670^{\circ}\text{C}$ [P] $\leq 0.015\%$
钢包		除 渣	
VAD		吹氩测温	$T = 1580 \sim 1590^{\circ}\text{C}$,CaO2 ~ 3kg/t ,
90t		加渣料	CaF ₂ 0.5kg/t
		抽真空	真空度为 53 ~ 66kPa
		加 热	
			$T = 1620 \sim 1630^{\circ}\text{C}$,开泵 6 ~ 3
		测温真	级 ,压力为 1.33kPa ,保持
		空脱碳	30min 注意观察液面反应 ,
			缓慢抽真空防止溢钢
		加 铝	加铝后保持 5min
铸锭		充气测温	$T = 1560 \sim 1580^{\circ}\text{C}$
		浇 铸	

第六章 LF 法

LF 是 20 世纪 70 年代由日本开发成功。其初意是把 EAF 中的还原操作移到钢包中进行,因其投资少,并能显著提高电炉钢的产量,成为电炉与连铸间匹配的主要设备。另外,LF 精炼可提高钢液的纯净度及满足连铸对钢液成分及温度的要求,使得转炉配 LF 也得到迅速发展,几乎所有的钢厂都配有 LF。LF 已在炉外精炼设备中占了主导地位,大大地提高了我国转炉钢和电炉钢的炉外精炼比。

通过 LF 精炼主要达到以下目的:

- (1) 钢水温度满足连铸工艺要求;
- (2) 处理时间满足多炉连浇要求;
- (3) 成分微调能保证产品具有合格的成分及实现最低成本控制;
- (4) 钢水纯净度能满足产品质量要求。

第一节 LF 设备简介

LF 是以电弧加热为主要技术特征的炉外精炼方法,包括电极加热系统、合金与渣料加料系统、底透气砖吹氩搅拌系统、喂线系统、炉盖冷却水系统(有的没有冷却系统)、除尘系统、测温取样系统、钢包及钢包车控制系统等。从电极加热方式分为交流钢包炉和直流钢包炉。

目前国内基本上是用交流钢包炉,LF 设备如图 8-6-1 所示。国内典型钢厂 LF 炉

有关情况如表 8 - 6 - 1 所示。

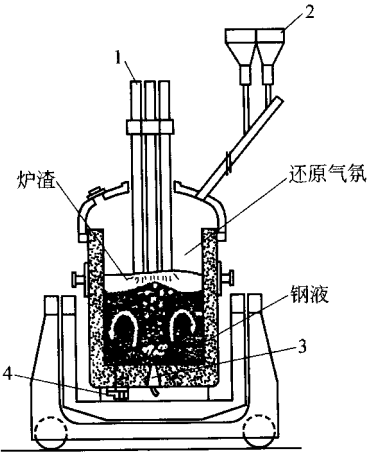


图 8 - 6 - 1 LF 设备示意图
1—电极 2—合金料仓 3—透气砖 4—滑动水口

表 8 - 6 - 1 国内典型钢厂 LF 炉有关情况

厂名	生产钢种	LF 容量 /t	变压器容量 /MV·A	电极直径 /mm	升温速度 /℃·min ⁻¹	处理周期 /min
武钢一炼钢厂	硬线钢、弹簧钢、重轨钢、低合金钢、焊丝、冷镦钢等	100	22 + 20%	457	3 ~ 5	25 ~ 40
上钢五厂	弹簧钢、调质钢、高压锅炉管钢等	100	18	400	4 ~ 5	36
攀 钢	普碳钢、低合金钢、优碳钢、深冲钢等	120	20	400	约 2	24 ~ 34
宝钢电炉厂	油井管、高压锅炉管、中低压锅炉管、一般管线钢等	150	22		3 ~ 5	30
包 钢	重轨钢、管线钢、气瓶钢、低合金钢、合金结构钢、优碳钢	80 × 2	14 + 20%	400	4 ~ 5	33 ~ 35
鞍钢一炼钢厂	重轨钢、低合金钢、合金结构钢、优碳钢等	80 × 2	16	400	3 ~ 5	37
兴澄钢厂	普碳钢、低合金钢、结构钢、优碳钢等	100			3 ~ 5	

厂名	生产钢种	LF 容量 /t	变压器容量 /MV·A	电极直径 /mm	升温速度 /℃·min ⁻¹	处理周期 /min
张家港润忠公司	Q235 钢、20 钢、45 钢、20MnSi 钢等	100	13.5	400	3 ~ 5	20 ~ 25
南京钢厂	普碳钢、45 钢、65 钢、70 钢、80 钢、62B 钢等	70	12 + 20%		3 ~ 5	20 ~ 38
安阳钢铁公司	碳素结构钢、桥梁低合金钢	100	18			
抚顺特殊钢公司	碳钢、合金结构钢弹簧、轴承 不锈钢	60	10 + 20%			
张家港沙景钢铁公司	碳素结构钢、合金结构钢弹簧	80	13.5			
贵阳钢厂	碳素结构钢、合金结构钢弹簧	60	10			
涟源钢厂	碳素结构钢、合金结构钢弹 簧、油、气管钢	70	10			
八一钢厂	碳素结构钢、合金结构钢弹 簧、低合金钢	70	12			
淮阴钢厂		70	12			
沙钢润忠钢厂		90	13.5			
沙钢永新钢厂			13			
锡兴二炼钢厂		40	6			
锡钢三炼钢厂		40	5.5			
江阴兴澄三炼钢厂		40	6			
武进大众钢厂		40	6			

对于小容量钢包炉(50t 以下)采用交流形式会加重包衬的热负荷 ,造成钢包寿命大 幅度下降 ,宜采用直流形式。直流钢包炉包括：

一、单电极直流钢包炉

采用中空石墨电极吹氩和底电极的匹配。

二、双电极直流钢包炉

在英国 Brymbo 研制成功如图 8-6-2 所示的第一台双电极直流钢包炉。

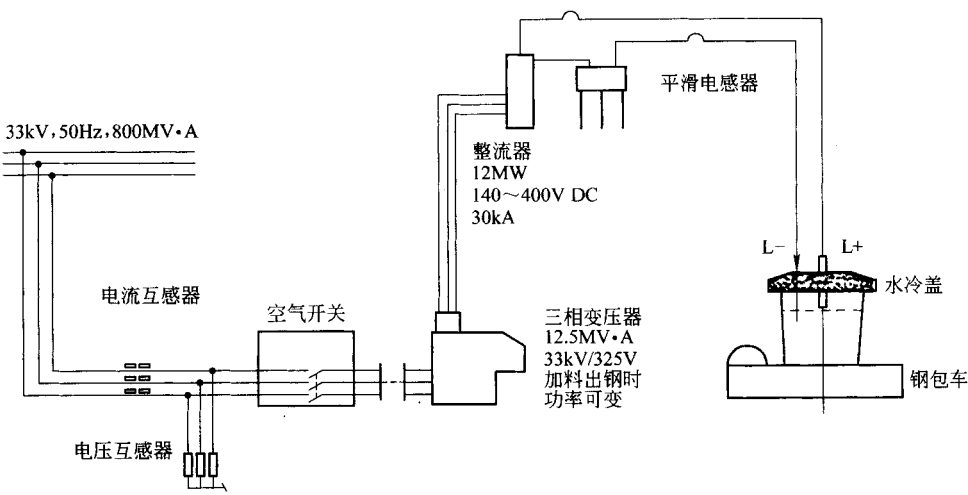


图 8-6-2 英国 Brymbo 厂的双电极直流电弧钢包炉

三、三电极直流电弧电渣钢包炉

三电极直流电弧电渣钢包炉原理如图 8-6-3 所示。采用连接钢包 1 外壳和金属熔池 2 的信号极 6 和专门的控制系统将两根石墨阳极 4 控制在具有一定电阻的熔炉渣层 3 中的一定位置,使阳极端部与金属熔池间保持一定的电压 U_{ES} ,以实现电弧(阴极 5 与金属熔池 2 之间)电渣(阳极 4 与金属熔池 2 之间)加热。系统电参数间有以下关系：

$$U = U_{ARC} + U_{ES}$$

$$I_{ARC} = I_{ES1} + I_{ES2}$$

$$P = U_{ARC} I_{ARC} + U_{ES} (I_{ES1} + I_{ES2})$$

- 式中 U ——负载电压；
 U_{ARC} ——电弧电压；
 U_{ES} ——电渣电压；
 I_{ARC} ——阴极电流；
 I_{ES1} ——阳极 1 电流；
 I_{ES2} ——阳极 2 电流；

P ——加热功率。

通过调节 U_{ES} 可调节电弧与电渣供热比例。

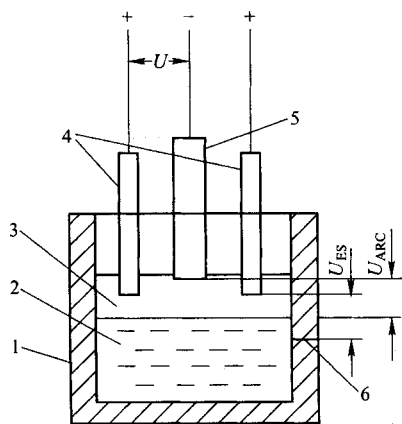


图 8-6-3 直流电弧电渣钢包炉原理图

1—钢包 2—金属熔池 3—渣层 4—石墨阳极 5—石墨阴极 6—信号极

第二节 LF 精炼过程的温度控制

一、钢包预热对钢液温度的影响

以 60t 钢包为例 ,钢包各部分尺寸及使用耐火材料如图 8-6-4 所示。包壁不同温度下 ,包衬的温度分布如图 8-6-5 所示 ,钢包预热温度对钢水温降的影响如图 8-6-6。

由图 8-6-6 可以看出 :

(1)包壁预热温度越高 ,钢水的温降越小。预热温度为 500℃ 与预热温度为 900℃ 的钢包 ,钢水温降相差约 50℃。

(2)前 20min 内钢液温度几乎呈直线下降 ,35min 后包壁蓄热基本达饱和。钢水入 LF 炉用小功率加热一段时间后 ,钢液温度仍比未加热时低 ,这是因为包衬蓄热量大于电极供给热。

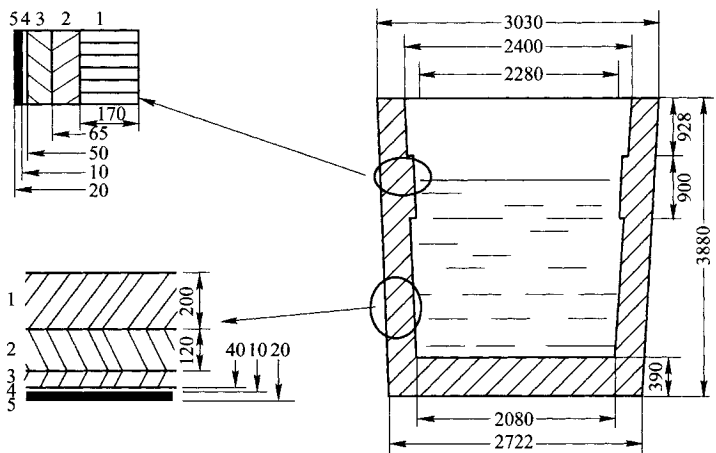


图 8-6-4 60t 钢包炉各部分尺寸及使用的耐火材料
1—镁碳砖 2—重质高铝砖 3—轻质高铝砖

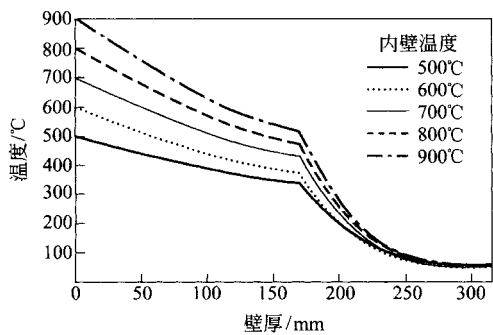


图 8-6-5 60t 钢包衬内温度分布

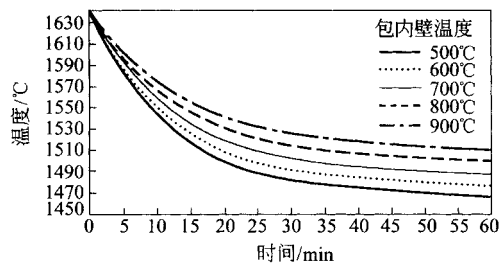


图 8-6-6 钢包预热温度对钢水温降的影响

二、渣层厚度对钢液温度的影响

渣越薄,表面散热量越大,如图 8-6-7 所示。渣厚小于 50mm 时,渣厚对渣表面散热量影响较大,渣厚大于 50mm 时,不同渣层厚度对渣表面的热损失基本相同,如图 8-6-7 中渣厚为 100mm,150mm,200mm 情况下,引起的钢液温降也小,20min 后仅为 0.1℃。所以从减少钢水热损失方面来说,有必要保证大于 50mm 的渣层厚度。

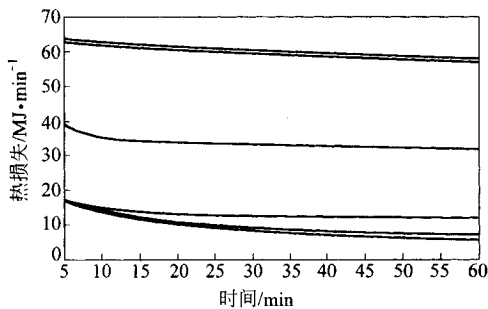


图 8-6-7 不同渣厚条件下,渣表面热损失随时间的变化

(图中由上至下曲线分别为渣厚 30mm,40mm,50mm,100mm,150mm,200mm)

渣表面温度降得很快,5min 内便降到 900℃ 以下。20min 以后温降逐渐减小,甚至没有变化,也即渣表面温度基本保持不变,表明此时渣散热达稳定状态,通过渣表面损失的热量较少,渣阻止了钢液的热量损失。50mm 渣层厚度内渣温度分布如图 8-6-8 所示。

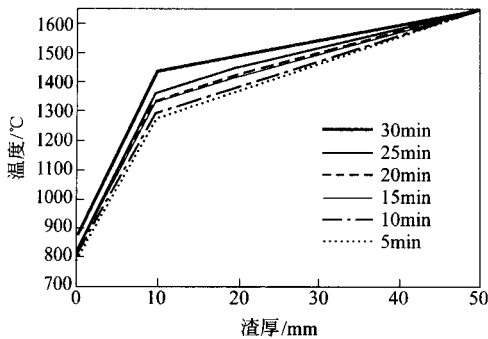


图 8-6-8 50mm 渣层内温度分布

三、合金加入对钢液温度的影响

合金加入钢液对钢液温度的影响分为 3 个阶段：

- (1)合金被加热 从初始环境温度上升到与钢水相同温度；
- (2)合金熔化；
- (3)合金溶于钢液。

表 8－6－2 为钢液中加入 1%元素时对钢液温度的影响。

表 8－6－2 钢液中加入 1%元素时对钢液温度的影响(℃)

钢液温度	硅铁 (45)	硅铁 (75)	钛铁 (25)	钒铁 (40)	锰铁 (75)
1570	+ 0.5	+ 16.5	+ 1.0	- 9.1	- 13.2
1620	+ 8.8				- 10

钢液温度	铬铁 (60)	钼 铁	硅 锰 (20 ,70)	硅 锰 (17 ,70)
1570	- 15.3		- 6.7	- 7.8
1620	- 12.5	- 12.1	- 0.6	- 2.3

注 括号中的数据为合金中主元含量(%)。

四、吹氩搅拌对钢液温度的影响

氩气升温造成的钢液温降为：

对 40t 钢水引起的钢水温降为 0.0075℃/min ；

对 60t 钢水引起的钢水温降为 0.005℃/min ；

对 80t 钢水引起的钢水温降为 0.0037℃/min。

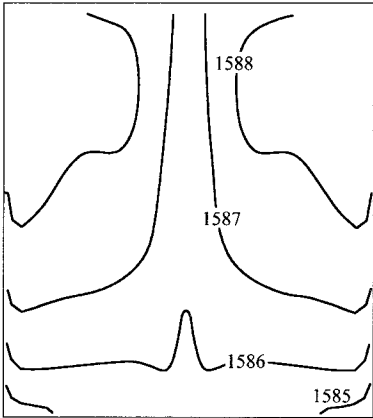


图 8－6－9 吹氩搅拌钢包内钢水的温度分布(℃)

由此可见 吹氩氩气升温不是引起钢水温降的真正原因。由于吹氩引起钢液温降的

主要因为 吹氩搅拌消除了包内钢液的温度分层 ,如图 8-6-9 所示 ,增加了钢液向包壁的热传导能力 ,吹氩搅拌时钢液面裸露 ,散热增加。

五、LF 过程成渣热及渣钢反应热对钢液温度的影响

60tLF 精炼过程成渣热及渣钢反应热使钢液升温速度达 $0.075^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。相对 60t 钢包钢液平均温降 $1.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 及加热速度大于 $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 是很小的 ,几乎对钢液温度没有影响 ,可以忽略。

六、电极供热

(一) 电弧功率的损失

三相电弧加热中 ,对于变压器—电弧炉体系 ,电极供热为 :

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} P_i dt \quad (8-6-1)$$

式中 P_i ——某时间内由短网输入钢包炉的有功功率 ,kW ;

t ——供电时间 ,min。

若讨论电弧炉内电弧发热的问题 ,其电弧供热为 :

$$Q_{i_in} = \sum 60 P_a t \quad (8-6-2)$$

式中 Q_{i_in} ——单位时间电弧供给的热 ,J/min ;

P_a ——某时间内的电弧功率 ,kW ;

t ——某时间间隔 ,min。

电弧功率不是全部用来加热钢水 ,因为电弧要通过辐射和对流对外散热。显露于钢液面上的电弧长度是造成电弧功率损失的主要原因。其损失功率为 :

$$P_{loss} = P_a [1 - \lambda (\phi_c I_a + \phi_{sl} h_{sl}) / V_a - 0.5 \gamma / V_a] \quad (8-6-3)$$

式中 P_{loss} ——电弧功率损失 ,MW ;

ϕ ——比例系数 ;

λ ——电弧柱上的电压梯度 ,V/mm ;

ϕ_c ——冲击凹坑与弧流的比例系数 ;

I_a ——电弧电流 ,kA ;

ϕ_{sl} ——埋弧长度与渣厚的比例系数 ;

h_{sl} ——渣层厚度 ,mm ;

V_a ——电弧电压 ,V ;

γ ——相应于电弧斑点损失的电压降, V。

式 8-6-3 的参数取值为:

$$\phi = 0.75 \quad \phi_c = 0.36$$

$$\phi_{sl} = 0.15 \quad \lambda = 1 \quad \gamma = 40$$

电弧加热很重要的一点是电极加热效率问题, 炉大小不一, 加热效率也不一样, 电弧炉炼钢中达 60% ~ 70% , 40t 钢包炉达 20% , 120t 钢包炉 20% ~ 40% , 300t 钢包炉 30% ~ 50% , 炉子越大, 加热效率越高。也有文献报道达 60% 以上。

(二) 电弧功率的确定

确定电弧加热功率的经验公式为

$$W' = C_m \Delta t + S\% W_s + A\% W_A \quad (8-6-4)$$

式中 W' ——精炼 1t 钢液所需补偿的能量, kW·h/t;

C_m ——1t 钢液升温 1℃所需的能量, kW·h/t;

Δt ——钢液的升温, ℃;

$S\%$ ——渣料的用量与钢液总量的百分比;

W_s ——熔化 10kg 渣料所需的能量, 一般 $W_s = 5.8 (\%1) \text{ kW} \cdot \text{h/t}$;

$A\%$ ——合金料的加入量占钢液总量的百分比;

W_A ——熔化 10kg 合金料所需的能量, 一般 $W_A = 7 (\%1) \text{ kW} \cdot \text{h/t}$ 。

通过上式计算可求出所需的功率, 选择此电弧功率下的变压器抽头。

电弧的辐射对钢包炉衬寿命影响很大, 所以在选电弧功率时要考虑耐火材料指数的因素。耐火材料指数反应了电参数、热参数、几何参数对包壁热点区的综合破坏作用。其定义公式为:

$$R = P_p U_p / a^2 \quad (8-6-5)$$

式中 R ——耐材损耗指数;

P_p ——弧柱上有功功率, kW;

U_p ——弧柱上的电压降, V;

a ——电极与炉壁的距离, cm。

K. Mackenziec 通过用自动测渣厚设备测量渣厚、用监视器控制钢包内吹氩搅拌情况, 同时考虑渣成分不同, 分析不同弧长情况下的电流光谱, 建立数据库, 然后在生产实际中定时收集有关信息, 形成电流光谱, 与数据库中的电流光谱比较, 选定弧长, 从而确定电弧功率。其原理如图 8-6-10 所示。

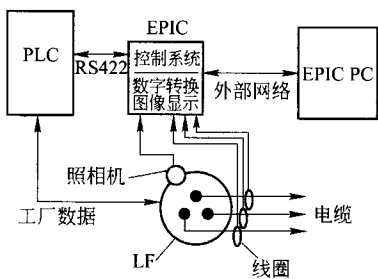


图 8-6-10 电弧功率选定原理图

七、LF 精炼过程的温度变化及控制精度

考虑上述因素对钢液温度的影响,建立 LF 过程钢液温度控制模型,如图 8-6-11 所示跟踪一炉钢液温度变化与计算值的比较。

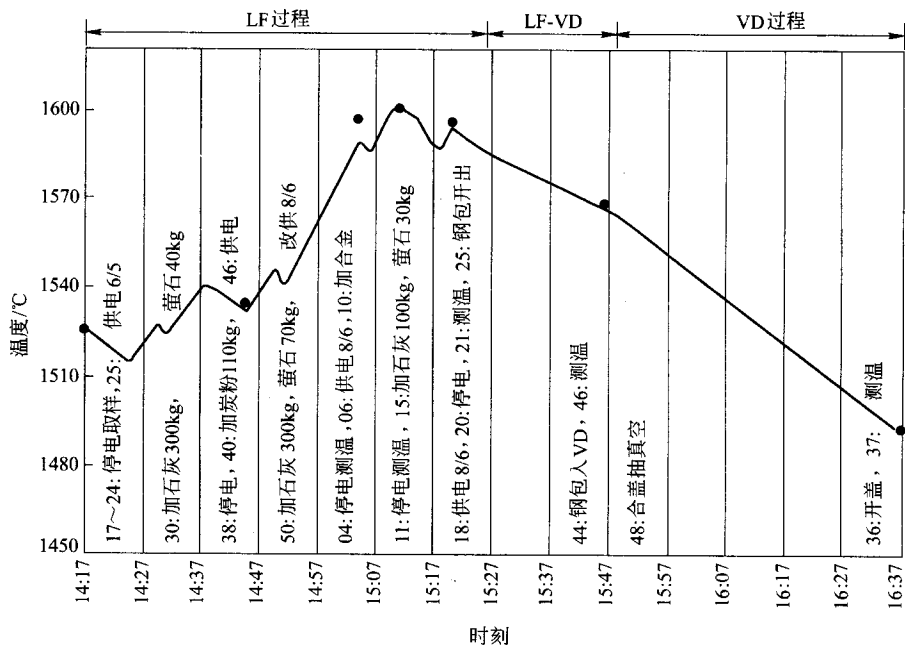


图 8-6-11 LF 精炼过程温度变化曲线

曲线—计算结果;圆点—实测值

冶金自动化研究院采用人工智能的方法对 LF 过程钢液温度进行预报和控制,节约了电能。LF 炉采用计算机动态控制终点可保证终点温度偏差 $\leq \pm 50^{\circ}\text{C}$ 。

第三节 LF 精炼过程的成分控制

为确保成分微调的精确性 ,在计算各种合金料用量时 ,必须考虑加入的所有合金对钢液量的影响。因为增加的那部分钢液也同样需要达到成分的要求 ,特别要考虑合金中的磷对最终成分中磷含量的影响。合金料用量的计算公式为：

$$P_i = G(a_i - b_i)(f_i c_i) + M_i P'_i \tag{8-6-6}$$

- 式中 P_i ——某种合金用量 kg；
 G ——钢液质量 kg；
 a_i ——某种元素的目标含量，%；
 b_i ——某种元素在钢液中的含量，%；
 c_i ——某种元素在合金料中的含量，%；
 f_i ——某种元素的收得率，%；
 M_i ——某种合金的补加系数；
 P'_i ——各种合金的初步总用量 kg；
 $M_i P'_i$ ——某种合金的补加量。

其中：

$$M_i = \frac{a_i(f_i c_i)}{1 - \sum_{i=1}^n (a_i(f_i c_i))}$$

$$P'_i = \sum_{i=1}^n P_i \frac{a_i - b_i}{f_i c_i}$$

- 式中 $a_i(f_i c_i)$ ——某种合金在钢液中所占的比分，%；
 $1 - \sum_{i=1}^n [a_i(f_i c_i)]$ ——不含合金的纯钢液所占的比分，%。

LF 成分控制精度如表 8-6-3 所示。日本几家公司有关 LF 处理钢液主要成分 C、Si、Mn 标准偏差范围分别为：C0.008% ~ 0.012%；Si 0.006% ~ 0.017%；Mn0.008% ~ 0.017%。

表 8-6-3 LF 成分控制精度

成 分	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al _s
精度控制 ± %	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.009

第四节 LF 精炼过程的纯净度控制

一、氧的控制

LF 精炼过程一方面要用脱氧剂最大限度地降低钢液中的溶解氧 ,在降低溶解氧的同时 ,进一步减少渣中不稳定氧化物 (FeO + MnO)的含量 ;另一方面要采取措施使脱氧产物上浮去除。

用强脱氧元素铝脱氧 ,钢中的酸溶铝达到 0.03% ~ 0.05% 时 ,钢液脱氧完全 ,这时钢中的溶解氧几乎都转变成 Al₂O₃ ,钢液脱氧的实质是钢中氧化物夹杂去除问题。

(一)溶解氧的变化

铝脱氧后钢液中的溶解氧变化如图 8-6-12 所示。随着精炼过程的进行 ,溶解氧有所升高。钢液中溶解氧与回磷率的关系如图 8-6-13 所示。钢液中溶解氧与全氧的关系如图 8-6-14 所示。

(二)渣成分的变化

图 8-6-15 为冶炼轴承钢时 ,LF 精炼过程渣中氧化物的变化。图中渣成分是近 20 炉数据的平均值。

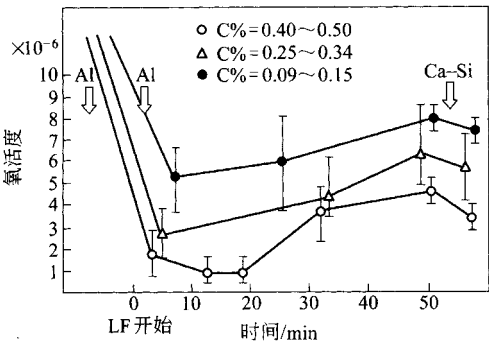


图 8-6-12 LF 精炼过程溶解氧的变化

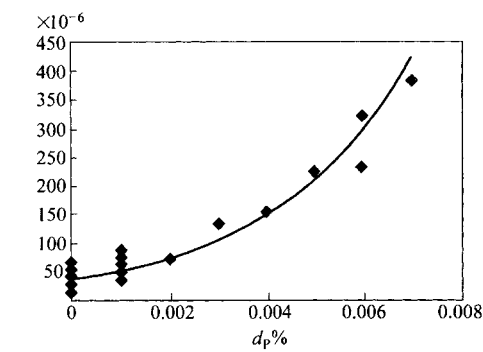


图 8-6-13 钢液中溶解氧与回磷率的关系

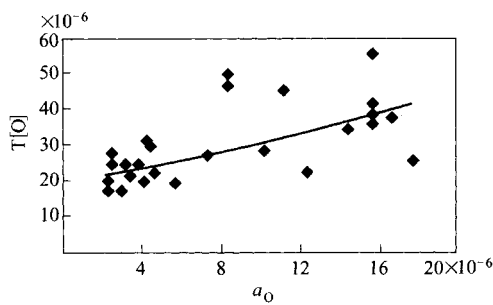


图 8-6-14 钢液中溶解氧与全氧的关系

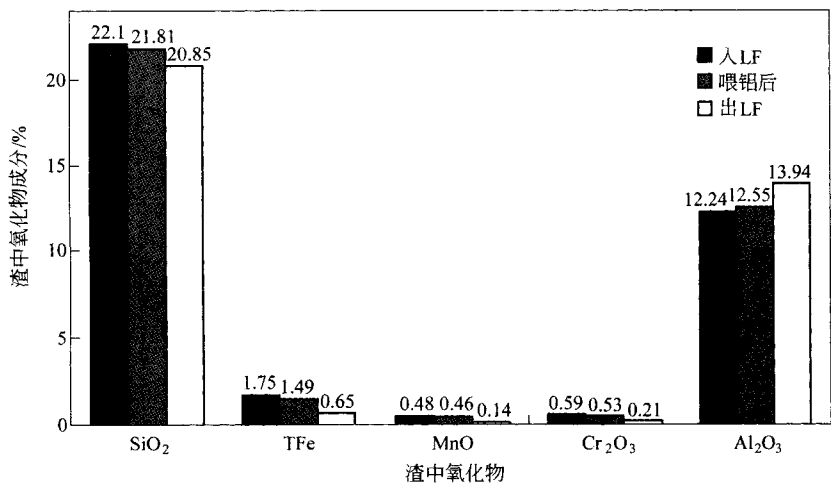


图 8-6-15 LF 各阶段渣中氧化物的变化

(三) 酸溶铝的变化

LF 精炼过程中,引起钢液中酸溶铝氧化的主要有渣中 SiO_2 、 MnO 、 FeO 、 Cr_2O_3 以及大气的氧化。因而定义钢液中酸溶铝变化的速度常数 k 为:

$$k = a(\% \text{SiO}_2) + b(\% \text{MnO}) + c(\% \text{Cr}_2\text{O}_3) + d(\% \text{TFe}) + e[\text{N}]$$

式中 a, b, c, d, e ——分别为渣中 SiO_2 、 MnO 、 FeO 、 Cr_2O_3 以及大气的氧化引起钢中酸溶铝的氧化速度常数, $10^{-6}/\text{min}$ 。

在一定渣系下,根据钢液中各成分的变化确定常数 a, b, c, d, e ,从而可求得 LF 精炼过程中酸溶铝的变化。在图 8-6-13 条件下求得 LF 精炼过程中酸溶铝的变化为:

$$k = 15.6t_1 + 4.7t_2 + 11.6t_4$$

(四) 夹杂物的上浮

LF 精炼要保证精炼时间,使氧化物夹杂充分上浮。

钢液中总氧的去除速度为:

$$-\frac{d[\text{O}]}{dt} = k_1[\text{O}] - k_2 \quad (8-6-7)$$

等式左边为总氧的去除速度;

等式右边第一项为总氧的去除速度项,即由于夹杂物上浮导致的总氧去除速度, k_1 为夹杂物上浮去除的速率常数;

等式右边第二项 k_2 为总氧的增加速度项,即由于二次氧化造成的钢水氧的增加速度,由钢液中酸溶铝 $[\text{Al}]$ 的氧化速度 k_3 确定,依据 $[\text{Al}]$ 氧化生成 Al_2O_3 ,有如下关系式:

$$k_2 = \frac{48}{54}\alpha k_3 \quad (8-6-8)$$

式中 α ——钢渣界面与钢液反应生成的夹杂物在钢液中残留比例。

在 $t=0$ 时, $[\text{O}] = [\text{O}]_0$ 则某时刻的总氧量为:

$$[\text{O}] = \frac{k_2}{k_1}[1 - e^{-k_1 t}] + [\text{O}]_0 e^{-k_1 t} \quad (8-6-9)$$

(五) 合理的搅拌功率

控制吹氩搅拌功率,以促进夹杂上浮,并防止钢液的二次氧化。由于在入 LF 前不喂铝,所以要特别注意钢液的二次氧化。针对不同操作目的搅拌功率的控制如表 8-6-4 所示。

表 8-6-4 LF 炉搅拌功率的选择

工艺过程目的	搅拌功率选择/ $W \cdot t^{-1}$
加热升温	100
加合金之后,测温取样前的混匀	150~200
脱硫及钢渣反应	150
脱氧及去夹杂物,弱搅拌	30~50

根据式(8-6-9)计算出氩气流量为：

$$\epsilon = \frac{6.18 T_{st}}{M} \left[1 - \frac{T_{Ar}}{T_{st}} + \ln \left(\frac{p_b}{p_t} \right) \right] Q \tag{8-6-10}$$

(六)喂 CaSi 线

当 $[Ca](Al_2O_3)_I < 1$ 时 $(Al_2O_3)_I$ 为钢水中 Al_2O_3 夹杂的含量,易生成 $CaO \cdot 6Al_2O_3$ 水口结瘤、断浇。当 $[Ca](Al_2O_3)_I > 0.15$ 时,生成 $CaO \cdot 2Al_2O_3$ 占多数,可有效防止水口结瘤。

喂线前的钢水条件为 $[S] < 0.010\%$, $a_0 < 5 \times 10^{-6}$ 。对于 150t 钢包,喂线速度为 4~5m/s;对于 60t 钢包,喂线速度为 1.95~2.3m/s。喂线后酸溶铝为 0.020%~0.030%, Al_2O_3 夹杂为 0.002%以下,可避免水口结瘤。

(七)LF 精炼结束时的弱搅拌

钢水弱搅拌净化处理技术是指通过弱的氩气搅拌促使夹杂物上浮,吹入的氩气泡可为 10 μ m 或更小的不易排出的夹杂颗粒提供黏附的基体,使之黏附在气泡表面排入渣中。另外,变性的夹杂物也需要有一定的时间上浮。弱搅拌的功率一般为 30~50W/min,弱搅拌的时间为 3~5min。喂线后夹杂指数与软吹氩气弱搅拌的关系如图 8-6-16 所示。软吹时间对钢材中全氧的影响如图 8-6-17 所示。

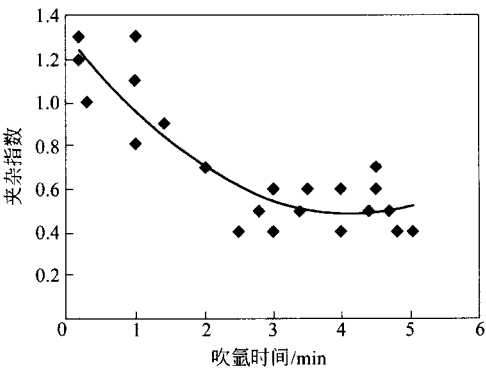


图 8-6-16 喂线后夹杂指数与软吹氩的关系

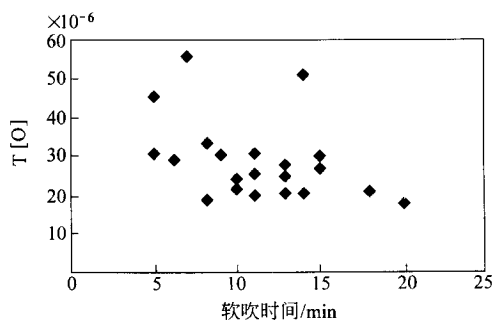


图 8-6-17 软吹时间对钢材中全氧的影响

二、硫的控制

在 LF 内可以创造极为优越的脱硫热力学和动力学条件,适合于生产低硫、超低硫钢。

LF 精炼过程脱硫反应为：



$$\Delta G^\ominus = -RT \ln \frac{a_{\text{CaS}}^3 a_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{a_{\text{CaO}}^3} \frac{1}{a_{\text{Al}}^2 a_{\text{S}}^3} \quad (8-6-11)$$

$$a_{\text{CaS}} = f'_{\text{CaS}}(\% \text{S}) \quad a_{\text{S}} = f'_{\text{S}}(\% \text{S})$$

$$\left[\frac{\% \text{S}}{\% \text{S}} \right] = \frac{a_{\text{CaO}}}{f'_{\text{CaS}} a_{\text{Al}_2\text{O}_3}^3} f'_{\text{S}} a_{\text{Al}}^{2/3} \exp\left(\frac{-\Delta G^\ominus}{3RT}\right) \quad (8-6-12)$$

由上式知,增大硫在渣钢间的分配比,要高碱度,高温,而 LF 精炼满足了上述的要求,它可以造高碱度还原渣,渣量大,可达 25kg/t;电弧加热,炉渣温度高;可以控制吹氧量,保证较强烈搅拌钢水。一般硫含量小于 0.001% 的超低硫钢都可以通过 LF 精炼生产。

(一) 渣中不稳定氧化物对脱硫的影响

LF 精炼渣中不稳定氧化物越低,脱硫越好,如图 8-6-18 和图 8-6-19 所示。

(二) 初始硫含量对脱硫的影响

初始硫含量越高,精炼终了硫含量也越高,增加精炼时间有利于脱硫,如图 8-6-20 所示。

(三) 渣量对脱硫的影响

渣量越大,脱硫效果越好,如图 8-6-21 所示。

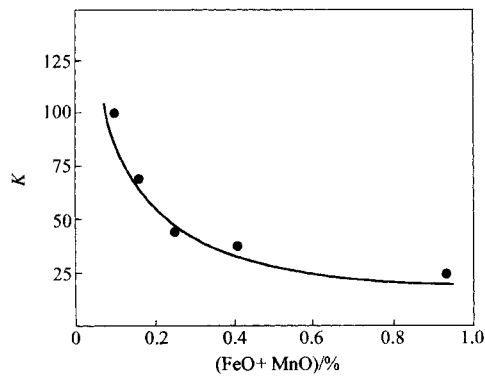


图 8-6-18 硫分配系数与(FeO + MnO)的关系

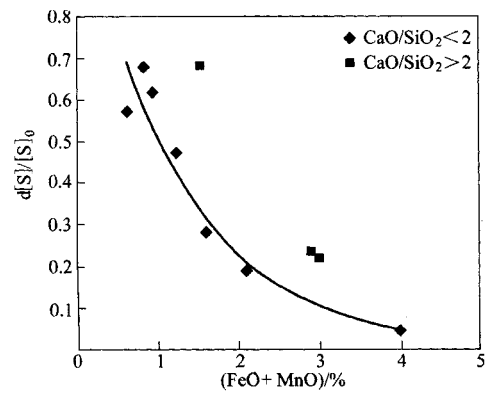


图 8-6-19 渣碱度和渣中不稳定氧化物对脱硫率的影响

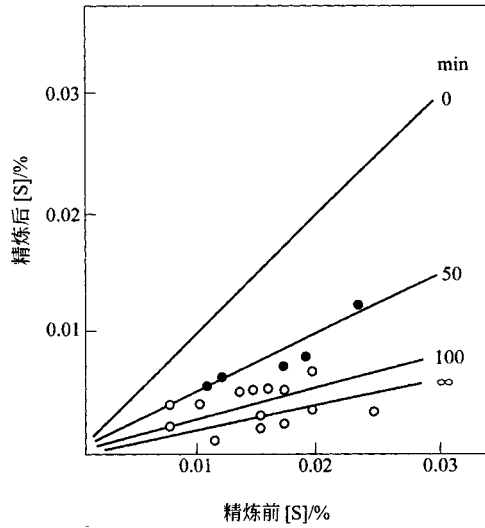


图 8-6-20 LF 精炼前后硫含量与处理时间的关系

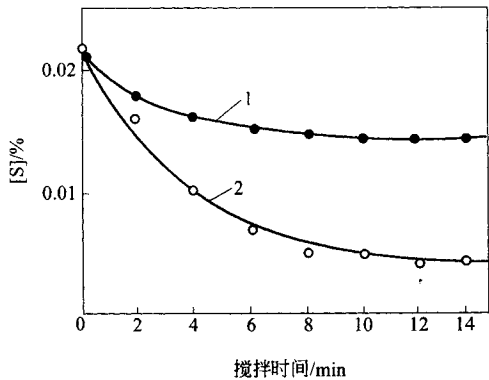


图 8-6-21 渣量及搅拌时间对脱硫的影响(钢包中钢液重 120t)

1—渣量 1420kg 2—渣量 2300kg

(四)渣流动性对脱硫率的影响

渣流动性对脱硫率的影响如图 8-6-22 所示。

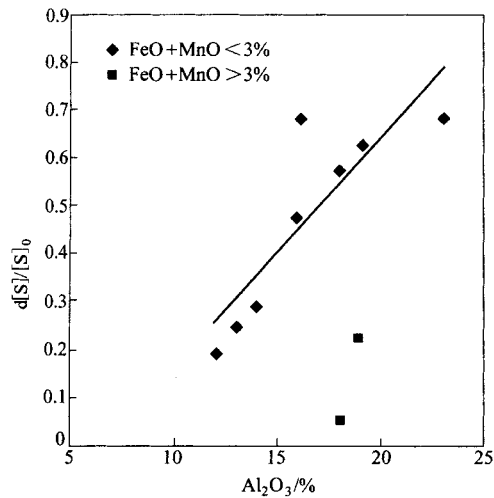


图 8-6-22 渣流动性对脱硫率的影响

(五)渣成分对脱硫的影响

脱硫率与渣成分的关系如图 8-6-23 所示。

(六)冶炼时间对脱硫的影响

冶炼时间对脱硫的影响如图 8-6-24 所示。

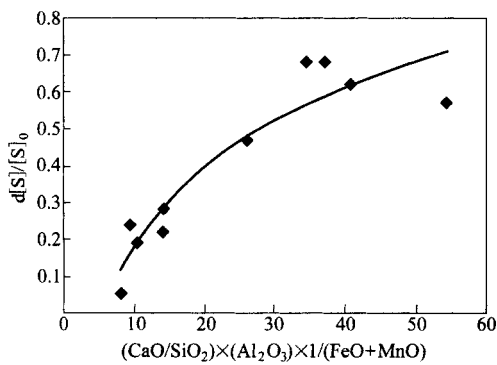


图 8-6-23 脱硫率与渣成分的关系

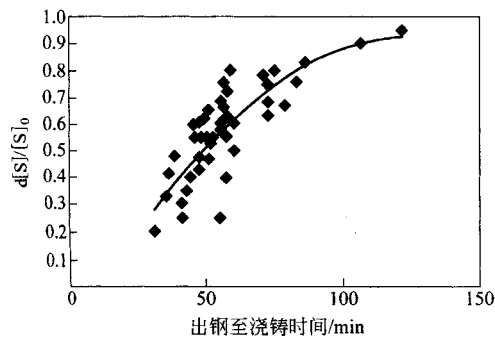


图 8-6-24 脱硫率与出钢至浇铸时间的关系

三、LF 精炼过程中防止钢液吸氮

LF 精炼过程可以保证增氮量小于 0.0005%。LF 增氮的主要原因是钢液与大气的接触、电弧电离、原材料中氮 ,同时供电制度也会对其产生影响。

(一)脱氧对钢液吸氮的影响

钢液经铝脱氧后 ,钢液平均溶解氧含量控制在小于 0.002%的水平 ,钢液吸氮情况如图 8-6-25 所示。钢液在熔清保持过程中不用铝脱氧 ,钢液中的溶解氧在 0.02% ~ 0.03%之间 ,钢液的吸氮情况如图 8-6-26 所示。脱氧钢液吸氮严重 ,在 LF 精炼过程中要避免钢液裸露与大气接触。

(二)硫含量对钢液吸氮的影响

图 8-6-27 表示钢液充分脱氧([O]<0.002%)后 ,硫含量分别为 0.005% 及 0.018% 两种情况下钢液的吸氮情况。低硫钢液都表现出易吸氮 ,硫含量为 0.005% 钢液的吸氮速度大于硫含量为 0.018% 钢液的吸氮速度。对于高硫含量对钢液增氮的影响如

图 8-6-28 所示。入 LF 时钢液中硫含量平均为 0.038% ,出 LF 时硫含量平均为 0.025% ,LF 精炼过程大部分时间是在高硫态下进行的。另外 ,氮在渣中的溶解度很低 ,只要不在精炼过程中大搅拌 ,渣层如同一个保护层可有效地防止氮在钢液和气相间的传质 ,因此保证钢液不吸氮的临界硫含量比文献中所提到的 0.06% S 要低得多。

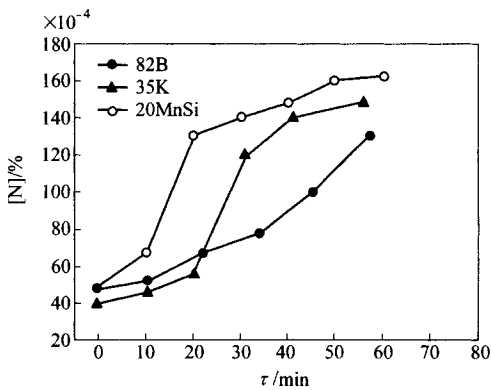


图 8-6-25 脱氧条件下钢液吸氮情况

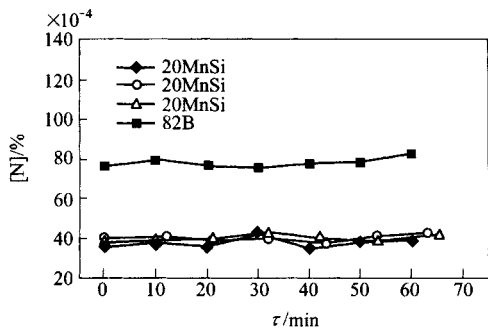


图 8-6-26 不脱氧条件下钢液吸氮情况

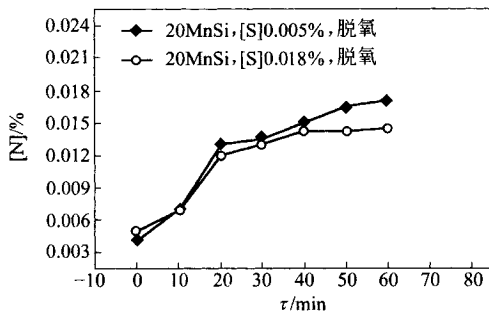


图 8-6-27 低硫含量对吸氮的影响

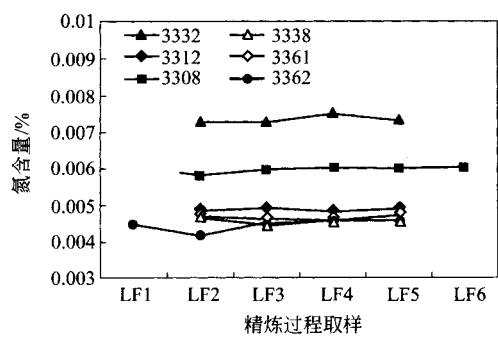
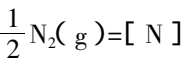


图 8-6-28 LF 精炼过程氮含量的变化

(三) 电弧电离对钢液增氮的影响

在电极加热时,电弧的阴极和阳极轮流位于石墨和钢液上。电弧作用钢液上时,使这部分钢液较其他部位的钢液温度高,当其为阴极时温度为 2400K,为阳极时为 2600K。而当钢液温度超过 2130℃时,氮气在钢液中的溶解反应为:



平衡常数为:

$$K = a_N / \sqrt{p_{N_2}} = [\%N] f_N / \sqrt{p_{N_2}}$$

从而:

$$[\%N] = \frac{K}{f_N} \sqrt{p_{N_2}} \tag{8-6-13}$$

- 式中 a_N ——钢液中[N]活度;
- p_{N_2} ——钢液中[N]平衡分压, kPa;
- f_N ——钢液中[N]活度系数。

氮溶解反应常数与温度的关系为:

$$\lg K = \frac{a}{T} - b \tag{8-6-14}$$

式中 a, b ——两正常数。

当氮分压一定时,钢液中氮的溶解度与氮溶解反应常数及其活度系数有关。当温度升高时, K 值增大,由式(8-6-13)可知,钢液中氮的溶解度也增加。

因此,在 LF 精炼过程中,必须要造好泡沫渣,防止弧区钢液面裸露,减少电弧区钢液的增氮。

(四) 供电制度对钢液氮含量的影响

在硫含量较高(大于 0.035%)的情况下,由于硫的表面活性作用,阻碍了钢液与大气接触吸氮,在此情况下,研究了没有泡沫渣条件下,不同供电挡位钢液增氮的情况,如图 8-6-29 所示,其值是多炉的平均值。

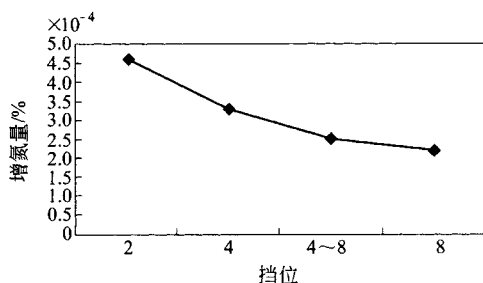


图 8-6-29 不同挡位供电钢液的增氮量

供电挡位越低,增氮越严重,试验中最大的增氮量为 $4.6 \times 10^{-4} \%$;挡位越高,增氮量的差别越小,如 4~8 挡(即为在 4 挡与 8 挡之间)与 8 挡仅差 $0.3 \times 10^{-4} \%$ 。

第七章 VOD 法

VOD 是 Vacuum(真空), Oxygen(氧), Decarburization(脱碳) 3 个词大写第一个字母的组合, 代表真空条件下吹氧去碳。由于在真空条件下很容易将钢液中的碳和氮去除到很低的水平, 因此该精炼方法主要用于超纯、超低碳不锈钢和合金的二次精炼。

20 世纪 60 年代以前, 不锈钢主要由电弧炉采用返回吹氧法生产, 利用吹氧合金元素氧化放热使钢液升温到 2000℃, 利用高温实现高铬钢液去碳保铬。电弧炉冶炼不锈钢成本高, 炉体寿命低, 目前已很少采用。20 世纪 50 年代, Hilty 等人提出降低冶炼过程一氧化碳分压使碳在较低的温度优先于铬氧化的理论, 于是 1965 年德国维滕(Witten)特殊钢厂制造出世界上第一台容量为 50t 的 VOD 炉, 1976 年日本川崎公司在 VOD 钢包底部安装 2 个透气塞, 增大吹氩搅拌强度, 称之为 SS-VOD, 专门用于生产超纯铁素体不锈钢([C] 0.0003% ~ 0.0010%, [N] 0.0010% ~ 0.0040%), 美国 A. 芬克尔公司开发了 KVOD/VAD 双联精炼炉。据冶金工业部信息标准研究院 1992 年统计, 世界上共建 VOD 炉 76 台, 容量最大的 150t, 建于日本新日铁八幡制铁厂, 最小容量为 5t。

我国大连钢厂与北京科技大学合作, 1978 年将原有钢包真空脱气设备改造成 13tVOD 并投入工业性试生产, 1979 年抚顺钢厂从德国海拉斯(Heraeus)公司引进 1 台 30 ~ 60t VOD/VHD 精炼设备。据不完全统计, 目前全国共有 VOD 14 台套, 如表 8-7-1 所示。

近年来, 不锈钢的主要生产炉型已扩展为顶底复吹转炉、AOD 和 VOD。VOD 法的生产工艺路线也由电炉(或转炉)—VOD 演变为电炉—复吹转炉—VOD, 与顶底复吹转炉和 AOD 相比, VOD 设备复杂, 冶炼费用高, 脱碳速度慢, 初炼炉需要进行粗脱碳, 生产效率低。优点是在真空条件下冶炼, 钢的纯净度高, 碳氮含量低, 一般 $C + N < 0.02\%$, 而

AOD 法则在 0.03% 以上 因此 VOD 法更适宜生产 C、N、O 含量极低的超纯不锈钢和合金。

表 8－7－1 中国拥有 VOD 设备的冶金厂家统计

厂 家	炉 型	容量/t	真空泵抽气能力/kg·h ⁻¹	
			66.66Pa	7999.32Pa
大连钢厂(2 台)	VOD	16 ,20	200	1300
抚顺钢厂	VOD/VAD	30 ~ 60	250	1800
上海钢研所	VOD/VAD	6	60	360
首 钢	VOD	18	100	900
上海第三钢铁厂	VOD	15 ~ 30	120	1300
大冶钢厂(2 台)	VOD/VAD	18 ,60	350	
西宁钢厂	VOD/VAD	25	200	1200
重庆特殊钢厂	VOD/LFV	15	150	387
长城四分厂	VOD	40	250	1800
齐齐哈尔钢厂	LF/VOD	60	250	1800
本 钢	VOD	40	280	2300
珠江钢铁厂	LF/VOD	150	400	
江西钢铁厂	VD/VOD	30 ~ 40	280	2300
无锡钢铁厂	VD/VOD	30 ~ 40	280	2300

第一节 VOD 法的主要设备

图 8－7－1 为 VOD 法设备原理图 表 8－7－2 为不同厂家 VOD 的设备组成。由图可以看出 ,VOD 设备主要由钢包、真空罐、抽真空系统、吹氧系统、吹氩系统、自动加料系统、测温取样装置和过程检测仪表等部分组成。因为 VOD 吹氧过程喷溅比较严重 ,测温取样装置的打开关闭阀门易出现故障 ,所以国内多数 VOD 没有安装此装置。

表 8－7－2 VOD 设备主要组成部分

厂 家	真空罐	钢包	真空泵	氧枪	加料系统	终点控制 仪 表	测温取 样装置
维 腾 特钢(EF - VOD) 50t	有	自由空间 800 ~ 1000mm ,设有 防溅盖 ,包底中 心装有透气砖	1 个水环泵 ,4 级蒸汽喷射泵 , 66.7Pa , 133.32Pa , 533.28Pa , 5.3328kPa , 26.664kPa	水冷直管氧 枪氧流量 700 ~ 1000 m ³ /h(标态)	有	用 CaO 稳定 ZrO ₂ 氧浓差电 池	有

厂 家	真空罐	钢包	真空泵	氧枪	加料系统	终点控制 仪 表	测温取 样装置
住友 金属(EF - VOD) 50t	内径 φ4850mm , 高度 4400mm , 拱顶高 1600mm	内径 φ3000mm ,高度 3220mm , $H/D \approx 1$,自由空 间 1100mm ,透气 砖偏心 ,氩流量 最 大 200L/min (标态)	6 级蒸汽喷射 泵 ,5 级冷凝器 , 66. 7Pa , 160kg/ h , 5. 3328kPa , 1900kg/h , 26. 664kPa , 1900kg/ h ,极限真空度 26. 7Pa ,蒸汽耗 量 11. 5t/h ,冷却 水耗量 1000m ³ /h	非水冷不锈 钢拉瓦尔喷 枪 , 喉 径 φ20mm , 出 口 径 φ41mm ,马 赫数 3 ,扩张半 角 5° ,氧流量 最大 1500m ³ / h(标态) ,氧枪 高度 1600mm	9 个 带 电 磁 给 料 器 的料仓	真空度	自动 升 降 式 各 1 个
新日 铁 (LD— VOD) 60t	内径 φ5800mm , 高度 6274mm , 盖高 2200mm	内 径 φ2200mm , 高度 4050mm ,自 由空间 1000mm , 透气砖置于中 心 ,氩流量最大 300L/min(标态)	6 级蒸汽喷射 泵(辅助 3 级) , 667Pa , 160kg/h , 极 限 真 空 度 26. 7Pa ,蒸汽耗 量 14t/h ,冷却水 耗量 1000m ³ /h	氧流量最大 2000m ³ /h (标 态)	8 个 合 金 料 仓 ,自动 称量 ,自 动添加	红 外 线 分 析 器 分 析 CO , CO ₂ ;热磁 式定氧仪 分析 O ₂ 及 真空度	真 空 下自动
大 连 钢 厂 (EF— VOD) 13t	内径 φ3850mm , 高度 4520mm , 盖高 1200mm	内 径 φ1450mm , 高度 1950mm ,自 由空间 850 ~ 900mm ,透气砖 置于中心 ,氩流 量 50 ~ 100L/min (标态)	ZYK - 27P2 水 环泵 2 台 4 级蒸 汽 喷 射 泵 (66. 7Pa , 160kg/ h)	水冷拉瓦尔 喷 枪 , 喉 径 φ10mm , 出 口 径 φ20. 5mm , 马赫数 3 ,扩张 半角 5° ,氧流 量 240 ~ 340m ³ /h (标 态) ,氧枪高度 900 ~ 1200mm	4 室 合 金 和 渣 料 料 仓	用下列 方法综合 控制 : (1) CaO 稳定 ZrO ₂ 氧浓 差 电 池 ; (2) 真 空 度 ; (3) 废 气 温 度 和 成分	无

一、钢包

VOD 法和其他炉外精炼方法所用钢包相比 ,工作条件要苛刻许多 :

- (1)工作温度高 ,约为 1700℃。
- (2)精炼过程钢液搅动激烈 ,包衬砖受化学侵蚀和机械冲刷严重。因此 ,尽管使用高温烧成的耐火材料 ,其寿命一般也只有 10 ~ 30 次。
- (3)为防止吹氧过程钢液上涨从包沿溢出 ,VOD 钢包自由空间较大 ,为 900 ~ 1200mm。
- 30t VOD 钢包结构尺寸如图 8 - 7 - 2 所示。

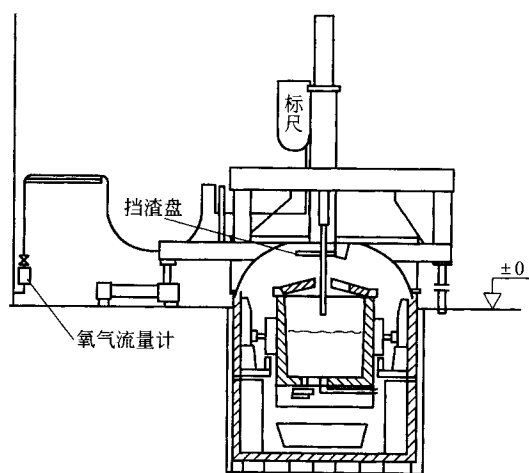


图 8-7-1 VOD 法设备原理图

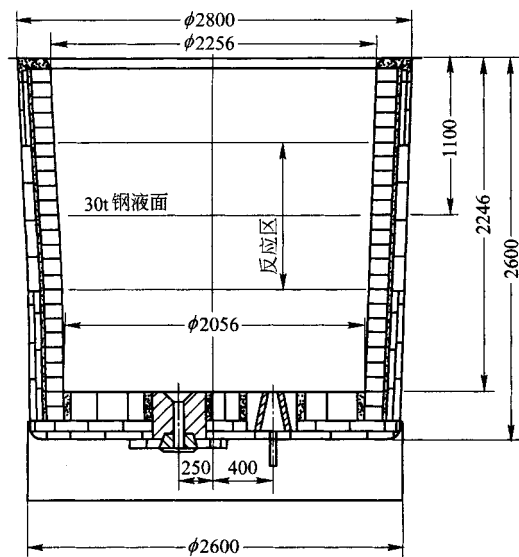


图 8-7-2 30t VOD 钢包结构尺寸图

(一) 吹氩透气塞

通常 VOD 在钢水包包底中心或半径 $1/2 \sim 1/3$ 处安装吹氩透气塞。为保证良好的透气性,透气塞由上下两块透气砖组成,如图 8-7-3 所示。透气砖一般采用刚玉质或镁质耐火材料烧制而成,透气方式有弥散式、狭缝式、管式 3 种,通常采用弥散式,透气能力约为 $500\text{L}/\text{min}$ (标态)。透气砖寿命为 5~10 次。

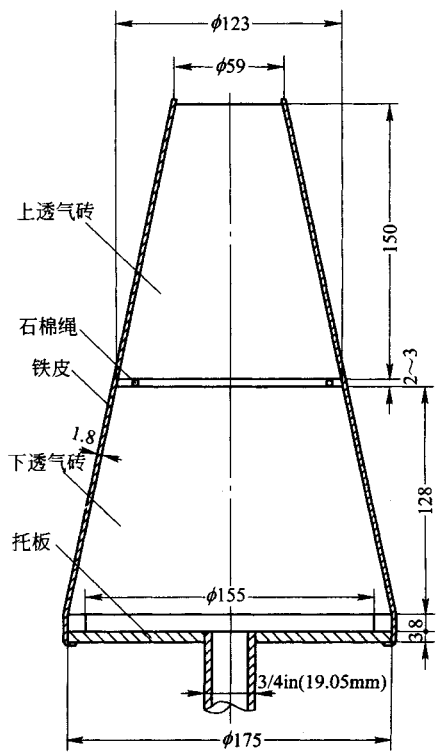


图 8-7-3 透气塞装配图

(二) 钢包盖

为减少喷溅和热量损失 ,VOD 钢包上扣有钢包盖。该盖可以悬挂在真空罐盖内 ,也可以不挂 ,炼钢时用吊车吊扣在钢包上。后者真空罐盖内温度低 ,罐盖开出人就可以到盖下作业 ,如处理加料筒卡料、换氧枪套砖等。包盖圈坐在钢包沿上不通水冷却 ,包盖圈由 15mm 厚钢板焊成 ,圈内拱型砌筑高铝砖 ,如图 8-7-4 所示。

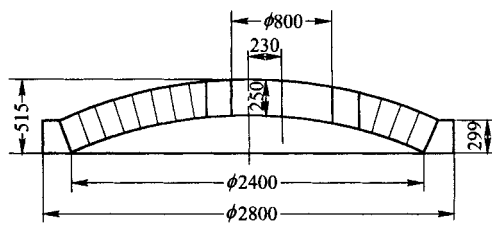


图 8-7-4 30t VOD 钢包盖结构尺寸

(三) 钢包砌筑

VOD 钢包由熔池、渣线、自由空间 3 部分组成。渣线部位寿命最低 , 一般一个熔池可用两个渣线 , 30t 钢包的砌筑材质如表 8-7-3 所示。

表 8-7-3 30t 精炼钢包砌筑与材质

部 位	绝 热 层		保 护 层		工 作 层	
	材 质	厚度/mm	材 质	厚度/mm	材 质	厚度/mm
自由空间(7 层)	黏土砖	30	高铝砖	65	高铝砖	150
渣线(12 层)	黏土砖	30	高铝砖	65	铬镁砖	150
熔池(9 层)	黏土砖	30	高铝砖	65	高铝砖	150
包 底	黏土砖	30	高铝砖	65	高铝砖	200

注 ①高铝砖为一级高铝 Al_2O_3 含量 $\geq 85\%$ ；
②包底包壁衔接处用马丁砂捣打。

二、真空罐

真空罐是盛放钢包 , 获得真空条件的熔炼室。它由罐体、罐盖、水冷密封法兰和罐盖开启机构组成 , 如图 8-7-5 所示。

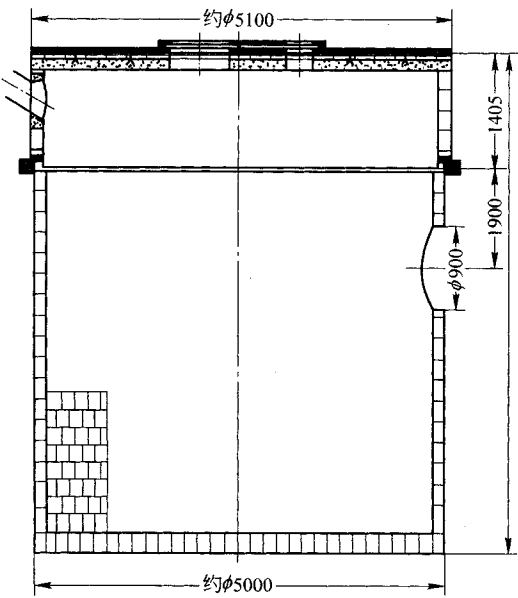


图 8-7-5 30~60tVOD 真空罐结构图

真空罐罐体可以坐在地下阱坑内 , 罐盖做升降旋转运动 , 罐体也可以坐在台车上做

往复运动 ,罐盖定位做升降运动。

真空罐内设有钢包支架 ,钢包支架起支撑钢包和钢包入罐时导向、定位作用。钢包支架是易损件 ,分上下两部分 ,上部可在设备中修时更换。钢包下方放置防漏盘 ,用于一旦包底漏钢水起盛接作用 ,有效容积应能盛下熔炼钢水量。

真空罐盖内为防止喷溅造成氧枪通道阻塞和顶部捣固料损坏 ,围绕氧枪挂一个直径 3000mm 左右的水冷挡渣盘 ,通过调整冷却水流量控制吹氧期出水温度在 60℃左右 ,使挡渣盘表面只凝结薄薄的钢渣 ,并自动脱落。

不同容量 VOD 的真空罐结构参数如表 8－7－4 所示。

表 8－7－4 不同容量 VOD 的真空罐结构参数

容 量 /t	真空罐直径 /mm	有效容积 /m ³	罐体质量 /t
5～10	2500	12	10
10～20	3000	20	12
20～30	3500	33	15
30～40	4000	45	18
40～60	4500	65	22
60～80	5000	100	27
80～120	5500	120	33
120～160	6000	160	40
160～250	6500	200	50
250～450	7000	250	60

注 :有效容积 = 罐体容积 + 罐盖容积 - 钢包体积。

三、真空系统

真空系统由蒸汽喷射泵、冷凝器、抽气管路、真空阀门、动力蒸汽、冷却水系统、检测仪表等部分组成 ,如图 8－7－6 所示。

由表 8－7－2 看出 ,用于 VOD 的真空泵有水环泵 + 蒸汽喷射泵组或多级蒸汽喷射泵组两种。水环泵和蒸汽喷射泵的前级泵(6～4 级)为预抽真空泵 ,抽粗真空。蒸汽喷射泵的后级泵(3～1 级)为增压泵 ,抽高真空 ,极限真空度不大于 20Pa。

30～60tVOD 6 级蒸汽喷射泵基本工艺参数如表 8－7－5 和表 8－7－6 所示。

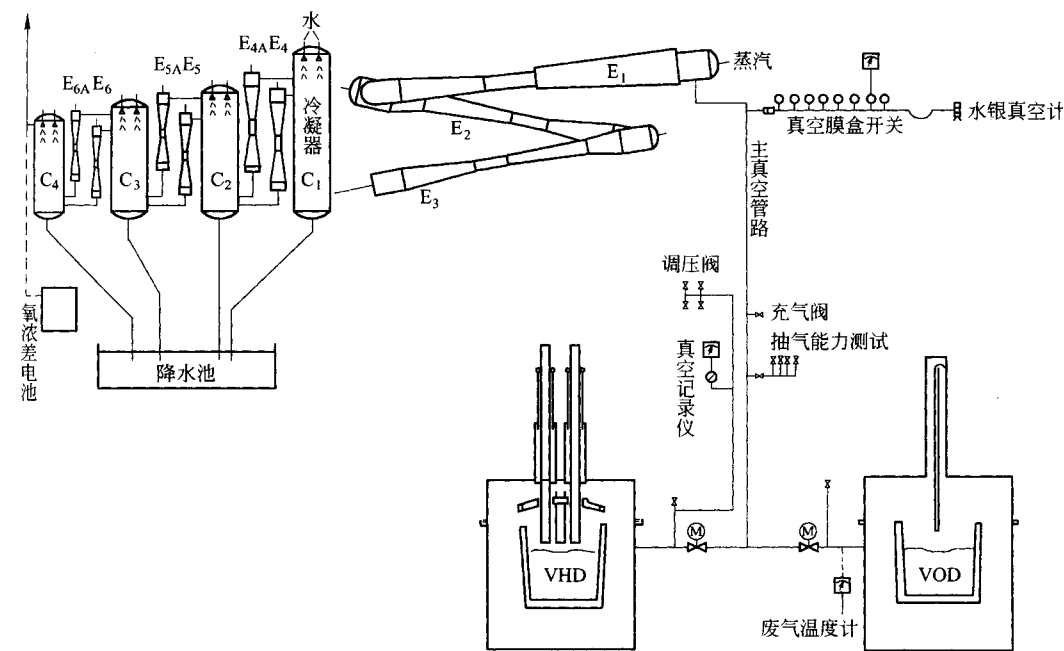


图 8-7-6 真空系统结构示意图

表 8-7-5 30~60t VOD6 级蒸汽喷射泵基本工艺参数 I

泵级	压力分配 /Pa	蒸汽用量/kg·h ⁻¹		冷却水用量/m ³ ·h ⁻¹	
		VOD 程序	VD 程序	VOD 程序	VD 程序
E ₆	33330.5	1175	1175	70	70
E _{6A}		1175		70	
E ₅	9332.54	1400	1400	75	75
E _{5A}		1400		75	
E ₄	2666.44	1250	1250	85	85
E _{4A}		1250		90	
E ₆	199.983	2850	2850	185	185
E ₆	93.3254		1510		
E ₆	19.9983		420		
合计		10500	8605	650	580

表 8－7－6 30～60t VOD6 级蒸汽喷射泵基本工艺参数Ⅱ		
项 目	工艺参数	指 标
蒸 汽	工作压力/MPa	1.6
	过热温度/℃	210
	最大用汽量/t·h ⁻¹	10.5
冷却水	工作压力/MPa	0.2
	进水温度/℃	≤32
	最大用水量/m ³ ·h ⁻¹	650
真空度/Pa	工作真空度	< 100
	极限真空度	20
抽气能力 /kg·h ⁻¹	133.322Pa 时	340
	5332.88Pa 时	1800
	1600Pa 时	1800

真空泵抽气能力测定方法为 :关闭连接真空罐的主阀门 ,启动真空泵抽管道到极限真空度 ,打开主管道上进气喷嘴的阀门 ,通过更换不同直径的进气喷嘴 ,在压力稳定时计算出 20℃干空气喷嘴通导能力(进气量) ,即为此压力下泵的抽气能力。

真空泵抽气能力(kg/h)的计算公式为：

$$G = D_0^2 \times \frac{\pi}{4} \times 233.8829 \times 3600$$

式中 D₀——喷嘴直径 ,m。

6 级蒸汽喷射泵抽气能力测定记录如表 8－7－7 所示。

设 计 值		实 测 值	
真空度 /Pa	抽气能力 /kg·h ⁻¹	真空度 /Pa	抽气能力 /kg·h ⁻¹
19.9983	0	10.66	25
66.661	250	22.66	250(φ13mm×2 个) ^①
133.322	340	33.33	350(φ23mm×1 个) ^①
5332.88	1800	4200	1800(φ30mm×3 个) ^①
		1600	1800(φ30mm×3 个) ^①

①喷嘴直径×喷嘴个数。

四、吹氧系统

吹氧系统由高压氧气管路、减压阀、电动阀门及开口大小指示盘、金属流量计及流量显示记录仪表、氧枪及氧枪链条升降装置、氧枪冷却水和枪位标尺等组成。氧枪有水冷和消耗两种。

30t VOD 消耗氧枪为长度 2750mm 的 $\text{Ir}(25.4\text{mm})$ 吹氧管,外包耐火泥,吹氧时枪口距液面 250 ~ 500mm,下降速度为 20 ~ 30mm/min。消耗氧枪吹氧喷溅严重,吹氧时间受限制。

30t VOD 水冷拉瓦尔氧枪长为 1650mm,下部外套耐火砖长为 1520mm,枪头结构尺寸如图 8-7-7 所示。氧枪升降由马达链条传动,最大行程为 3m,升降速度为 3.4m/min,氧气工作压力为 0.1MPa,最大流量为 $25\text{m}^3/\text{min}$;冷却水流量为 $16\text{m}^3/\text{h}$,压力为 0.8MPa,吹氧时枪口距液面 1000 ~ 1200mm,枪位开吹时碳高取上限,碳低和吹氧后期取下限。

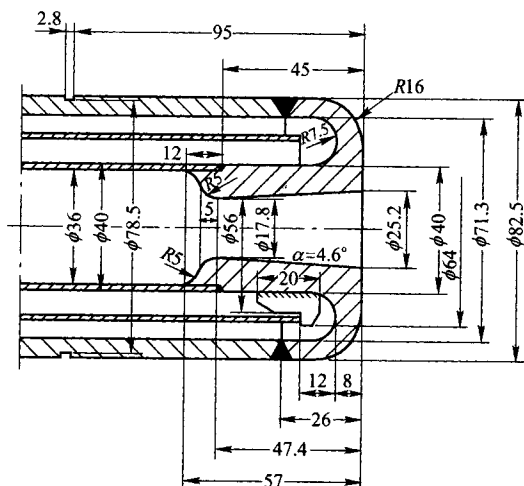


图 8-7-7 30t VOD 水冷拉瓦尔氧枪喷头结构尺寸图

五、吹氩系统

VOD 法氩气用量少,一般用瓶氩,经汇流排 3 ~ 5 瓶一组减压至 1MPa 送到炉前,工作压力为 0.3MPa,氩气纯度为 99.99%。钢包入罐首先用 1MPa 的压力吹开透气塞,然后改用工作压力经流量计调整流量。

六、加料系统

VOD 设备配置有自动加料系统 ,它由料仓、称量料斗、皮带运输机、回转溜管、上/下料钟和 PLC - 780 计算机等部件组成 ,如图 8 - 7 - 8 所示。

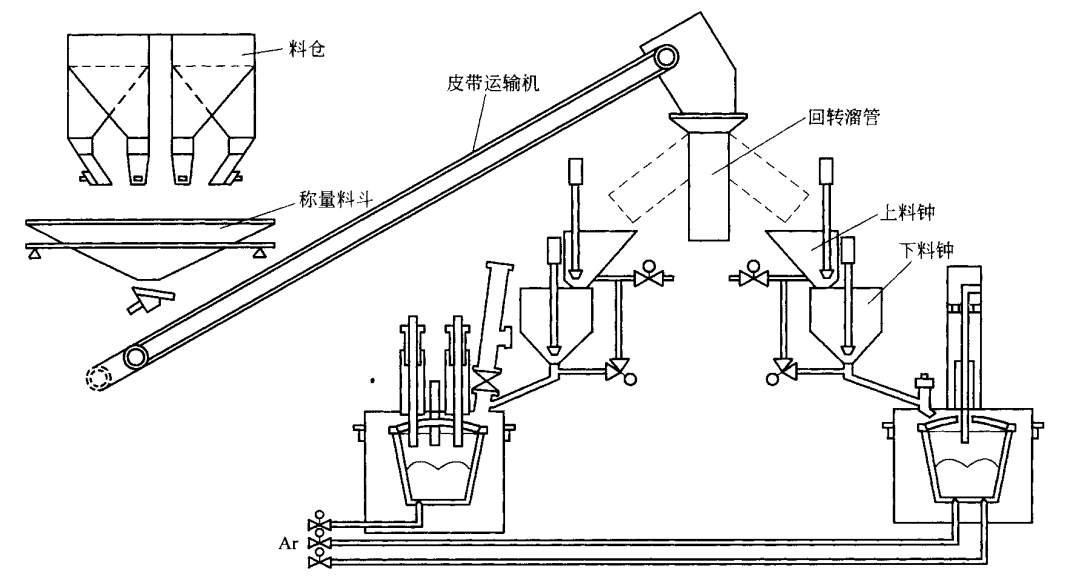


图 8 - 7 - 8 自动加料系统流程图

为防止卡料和满足合金化脱氧要求 ,原材料粒度规定如表 8 - 7 - 8 所示。

表 8 - 7 - 8 原材料种类及粒度

材料种类	合金料、 造渣材料	硅铁粒	铝粒	硅钙	电极粒
粒度/mm	30 ~ 50	1 ~ 10	5 ~ 15	2 ~ 5	1 ~ 3

除自动加料外 ,还经常采用外部加料 ,包括 :①降温用返回钢锭或钢材 ,用吊篮加入包中。②一次加入量大、预先加热烘烤的合金料 ,用漏斗直接倒入钢包中。

七、冶炼过程控制仪表

VOD 精炼过程 ,尤其是吹氧期操作 ,完全靠各种计量检测仪表的显示做指导 ,吹氧终点靠对各项仪表数值的综合分析确定 ,因此用于冶炼过程计量仪表必须准确可靠。这类仪表有 :

(一) 氧气金属浮子流量计

显示氧气流量和累计流量。冶炼碳大于 0.03% 的钢种时, 通过耗氧量计算确定吹氧终点。德国乌纳厂和维滕(Witten) 厂的计算公式分别为:

$$t = \left([\% \text{C}] + \frac{1}{2} [\% \text{Si}] \right) G \wedge \eta_{\text{O}_2} Q_{\text{O}_2}$$

$$t = [\% \text{C}] G \wedge \eta_{\text{O}_2} Q_{\text{O}_2}$$

式中 t ——吹氧时间, min;

G ——钢水量, kg;

η_{O_2} ——氧利用率, 乌纳厂取 45% ~ 50%, 维滕厂取 65%;

Q_{O_2} ——吹氧量, L。

北京重型机器厂 SKF 采用消耗氧枪插入钢水内吹氧, 耗氧量计算公式为:

$$Q = G \{ 9.3 [\% \text{C}] + 8.5 [\% \text{Si}] - 0.05 \} + 2.89 \Delta [\% \text{Cr}] + 2.1 [\% \text{Mn}] - 0.1 \} + 0.4 \}$$

采用耗氧量确定吹氧终点冶炼非超低碳钢, 可以缩短吹氧时间, 减少铬氧化从而减少还原剂加入量。

(二) 废气温度记录仪

由安装在 VOD 真空罐抽气管路入口处的热电偶测量, 显示吹炼过程反应放出气体的温度变化。发生喷溅或漏包事故时, 温度会突然升高很多。

(三) 真空计和真空记录仪

测量点在主真空管路上, 显示并记录冶炼过程真空罐内气体压力变化。碳氧反应开始压力升高, 反应结束压力降低。

(四) 微氧分析仪

气体取自真空系统排气管道处, 以空气为参比电极与被抽气体构成氧浓差电池, 产生电动势, 通过记录氧浓差电动势的起落, 显示碳氧反应的开始和结束。它是指导 VOD 操作的主要依据。

(五) CO/CO₂ 气体分析仪、质谱仪等

用于分析排出气体中的 CO、CO₂ 含量, 算出氧化去除的碳量确定吹氧终点。

第二节 VOD 的基本功能

VOD 具有吹氧脱碳、升温、氩气搅拌、真空脱气、造渣合金化等冶金手段 ,适用于不锈钢、工业纯铁、精密合金、高温合金和合金结构钢的冶炼 ,尤其是超低碳不锈钢和合金的冶炼。

一、吹氧脱碳

真空吹氧脱碳过程可分为两个阶段：

(1)高碳区($C 0.05\% \sim 0.08\%$) ,脱碳速度与钢中含碳量无关 ,是一常数 ,由供氧量大小决定。

(2)低碳区($C < 0.05\% \sim 0.08\%$) ,脱碳速度随钢中含碳量减少而降低 ,如图 8 - 7 - 9 所示。

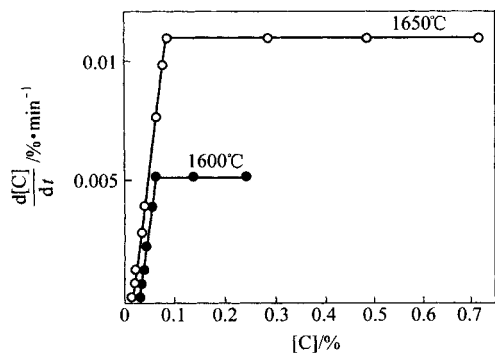


图 8 - 7 - 9 脱碳速度与钢中含碳量的关系

在高碳区 ,脱碳速度随温度升高、吹氧量增大、真空度提高、吹氧枪位降低而增加 ,如图 8 - 7 - 9 ~ 图 8 - 7 - 12 所示。因此 ,在温度和压力一定时 ,可以通过增大供氧量、降低枪位 ,提高脱碳速度。但过快的脱碳速度容易导致喷溅和溢钢事故 ,所以 VOD 在高碳区脱碳速度一般控制在 $0.02\% \sim 0.03\% / \text{min}$ 。

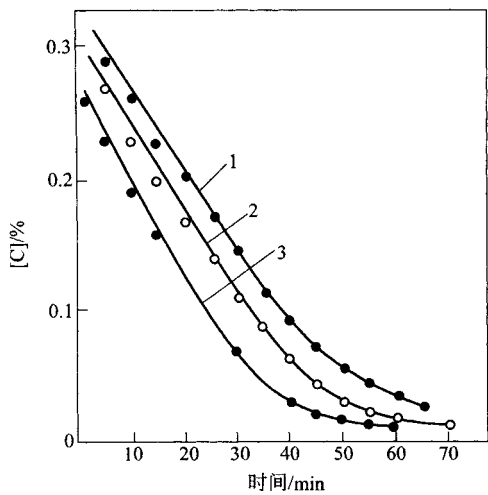


图 8-7-10 吹氧时温度对[C]-时间关系的影响

图例	炉号	T/℃	气体流量/L·min ⁻¹
1	13	1600	1.79
2	11	1700	2.06(0 ~ 60min) 2.53(60 ~ 70min)
3	14	1800	1.60

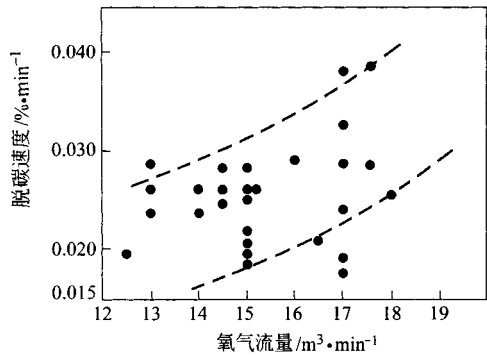


图 8-7-11 吹氧量与平均脱碳速度的关系

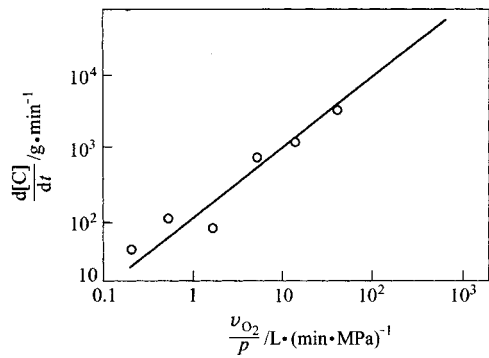


图 8-7-12 不同研究者所得的 $\frac{d[C]}{dt}$ 与 v_{O_2}/p 关系的比较

在低碳区,碳在钢液内的扩散是脱碳反应的限制环节。通过增大吹氩量、提高钢水温度、提高真空度等措施可以降低吹氧终点含碳量,如图 8-7-13 ~ 图 8-7-15 所示。

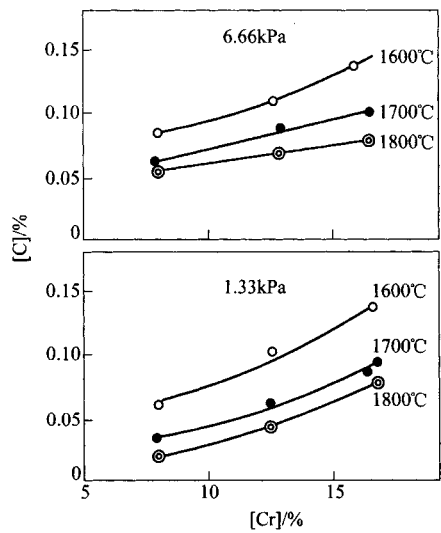


图 8-7-13 临界含碳量与 $[Cr]$ 、温度、真空度的关系

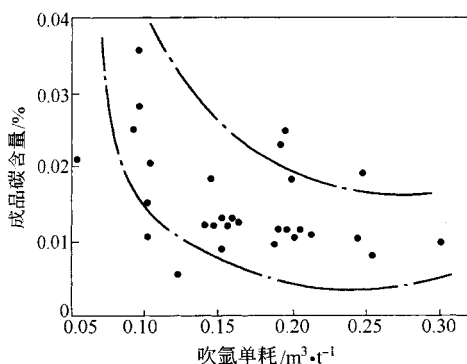


图 8-7-14 吹氩单耗与成品碳含量的关系

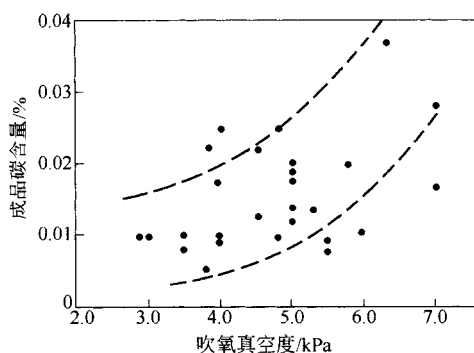


图 8-7-15 平均吹氧真空度与成品碳含量的关系

二、去碳保铬

VOD 法吹炼不锈钢铬的收得率一般为 98.5% ~ 99.5%。提高铬回收率的具体措施是：

- (1) 提高开吹钢水温度；
- (2) 提高吹氧真空度；
- (3) 减少过吹；
- (4) 增大氩气搅拌强度；
- (5) 加入足够脱氧剂，保证还原反应时间不少于 10min；
- (6) 造碱性还原渣。

图 8-7-16 ~ 图 8-7-18 反映了一些因素对铬回收率的影响。

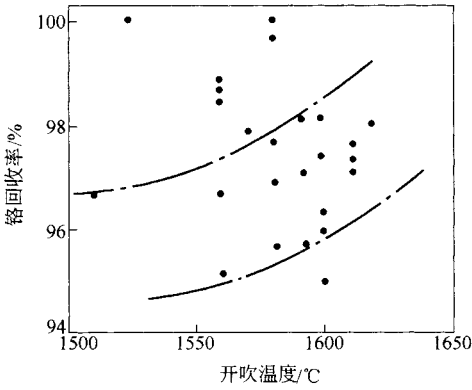


图 8-7-16 开吹温度与铬回收率的影响

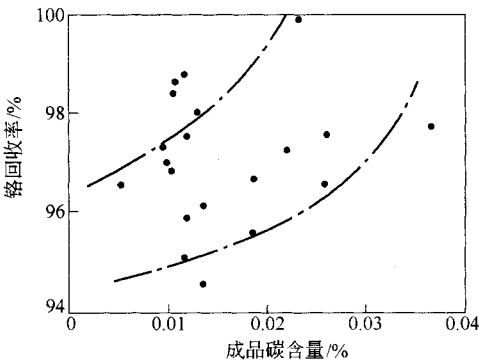


图 8-7-17 成品碳与铬回收率的关系

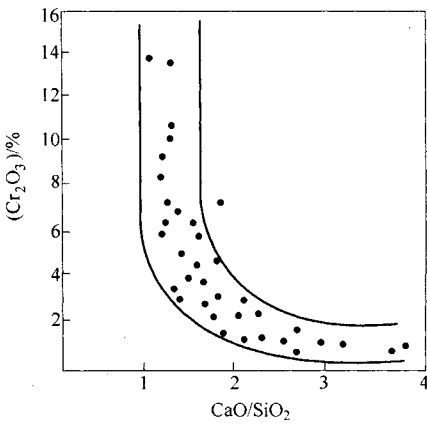


图 8-7-18 精炼渣碱度与渣中 Cr₂O₃ 的关系

三、吹氧升温

VOD 法主要靠合金元素的氧化放热提高钢水温度 ,主要放热元素有碳、硅、锰、铬、铁、铝等。VOD 精炼过程吹氧平均温升 $2.36^{\circ}\text{C}/\text{min}$,停氧后平均降温 $1.30^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。碳素钢和不锈钢吹氧精炼中元素氧化升温图如图 8-7-19 和图 8-7-20 所示。

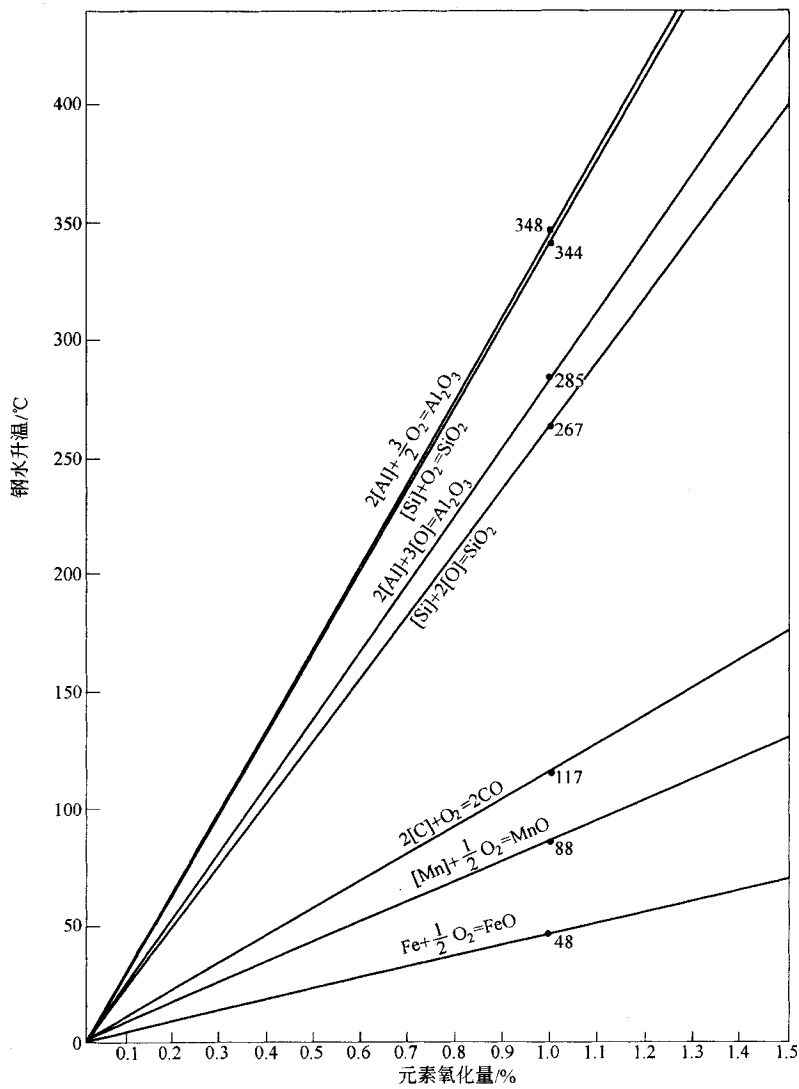


图 8-7-19 碳素钢吹氧精炼中元素氧化升温图

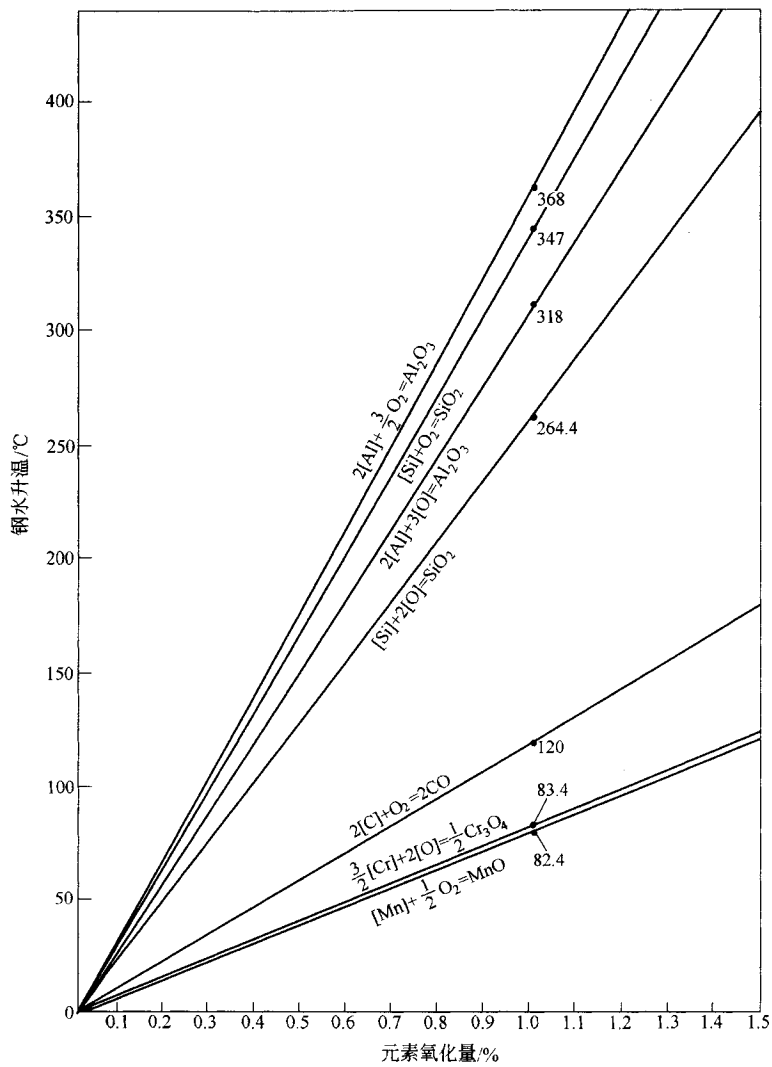


图 8-7-20 不锈钢吹氧精炼中元素氧化升温图

吹氧温升与元素氧化速度、开吹温度、供氧强度、吹氧期真空度、氧枪高度、钢水包与罐体温度高低有关,如图 8-7-21 ~ 图 8-7-23 所示。使用新的钢包或包盖、设备检修后首次生产,也会因环境和耐火材料吸热造成钢液温升低。

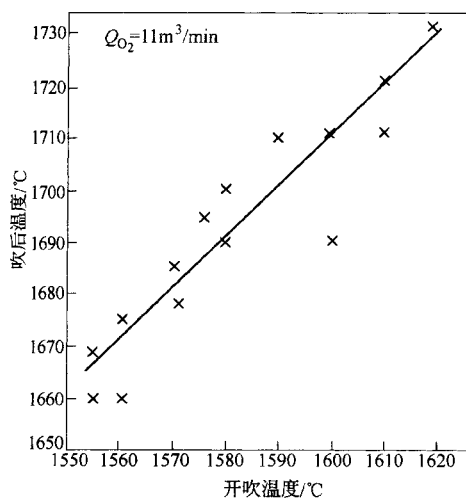


图 8-7-21 开吹温度对吹后温度的影响

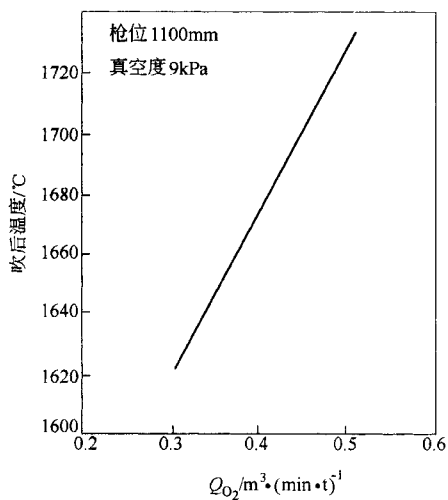


图 8-7-22 供氧强度对吹后温度的影响

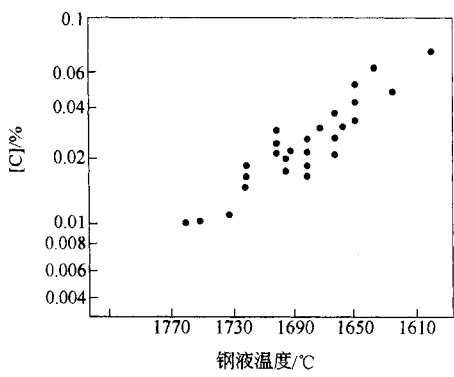


图 8-7-23 吹氧终点碳与吹后温度的关系

还原期由于加入铁合金和渣料造成温度降低 温降值(℃)可用下面的回归方程式估算：

$$\Delta T = -595.0 + 0.338 T_2 + 2.960 G_{\text{CaO}}/G + 1.466 G_{\text{FeTi}}/G + 0.341 G_1/G + 1.187h$$

式中 T_2 ——吹氧结束后钢水温度,℃；
 G_{CaO} 、 G_{FeTi} 、 G_1 ——还原期加入的石灰、钛铁、冷却剂质量 kg；
 h ——还原处理时间,min。

在大生产过程中温度控制可能有两种情况出现：

(1)停氧后钢水温度低,这时可以采用过吹或二次吹氧的办法使钢水升温,一般过吹温升为 5~6℃/min。需要注意的是,应根据过吹量增加脱氧剂用量。

(2)吹后温度过高,此时可以加入本钢种返回锭或材降温,以缩短还原精炼时间。

添加钢水量 1% 不同材料的冷却效果如表 8-7-9 所示。加冷锭对还原时间的影响如图 8-7-24 所示。

表 8-7-9 添加钢水量 1% 不同材料的冷却效果

材 料	温降值/℃	材 料	温降值/℃
不锈钢回钢	20	FeMn(高碳)	12
碳素返回钢	20	FeMn(低碳)	18.5
Ni	18	FeCr(高碳)	15.5
FeMn(70%)	18	FeCr(低碳)	20
CaO	17	FeSi 75%	+ 5
Al	+ 3	FeTi 37.5%	16.5

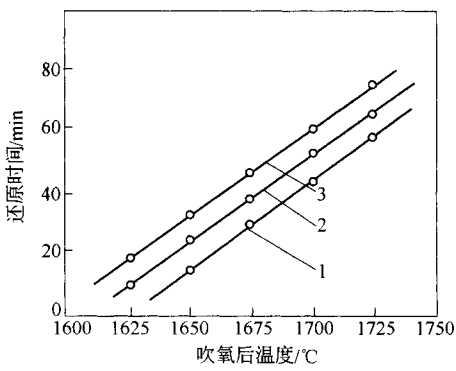


图 8-7-24 加冷锭对还原时间的影响
(每支冷锭重 680kg 出罐温度 1570℃ 钢水量 6.37t)
1—未加 2—加 1 支锭 3—加 2 支锭

四、脱气

VOD 法因为吹氧脱碳产生钢液沸腾 ,加上吹氩搅拌 ,为去除钢中气体创造了良好的动力学条件。脱气效果如表 8-7-10 所示。工艺因素对脱气效果影响如图 8-7-25 ~ 图 8-7-28 所示。渣料和合金料加入量对脱氢率的影响如表 8-7-11 所示。

表 8-7-10 1992 年统计不同钢种 VOD 处理脱气效果

钢 种	炉 数	入罐气体含量/%		出罐气体含量/%			脱气率/%	
		H	N	H	O	N	H	N
1Cr18Ni9Ti	34	$\frac{2.4 \sim 7.0}{3.88} \times 10^{-4}$	$\frac{69 \sim 295}{181.2} \times 10^{-4}$	$\frac{1.5 \sim 6.0}{2.54} \times 10^{-4}$	$\frac{11 \sim 141}{41.6} \times 10^{-4}$	$\frac{69 \sim 203}{109.6} \times 10^{-4}$	42.9	39.5
0Cr13Ni5Mo	9	$\frac{3 \sim 5}{3.6} \times 10^{-4}$	$\frac{71 \sim 236}{215} \times 10^{-4}$	$\frac{1.5 \sim 3}{2} \times 10^{-4}$	$\frac{11 \sim 30}{20.4} \times 10^{-4}$	$\frac{58 \sim 130}{84.6} \times 10^{-4}$	51	62.7
0Cr1Ti4Cu4Nb	3			$\frac{2.5 \sim 4}{3} \times 10^{-4}$	$\frac{19 \sim 24}{21} \times 10^{-4}$	$\frac{63 \sim 79}{74} \times 10^{-4}$		

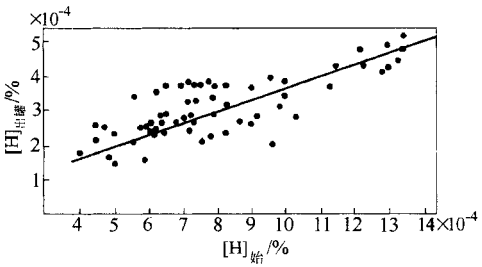


图 8-7-25 原始氢含量与精炼后氢含量的关系

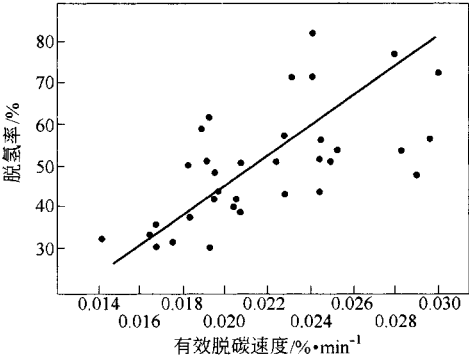


图 8-7-26 有效脱碳速度对脱氢率的影响

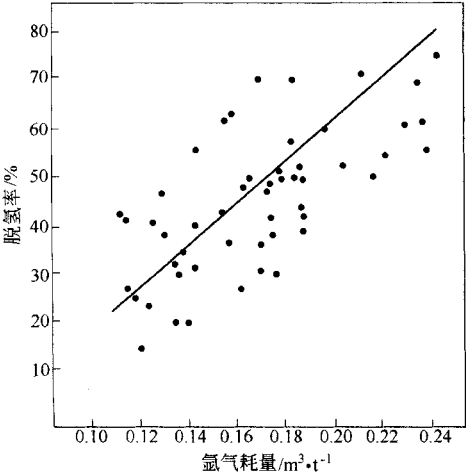


图 8-7-27 氩气耗量对脱氢率的影响

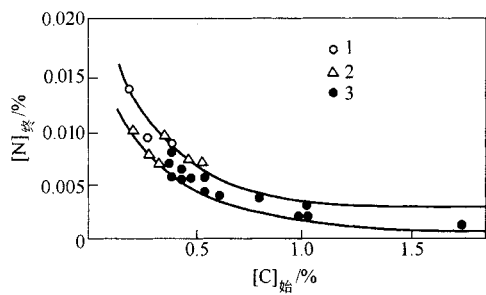


图 8-7-28 原始碳含量对 16% Cr 钢终点氮的影响
[N]_始 :1—0.025% ~ 0.029% ;
2—0.02% ~ 0.0249% 3—0.02%

表 8-7-11 渣料和合金料加入量对脱氢率的影响

1 炉冷料加入量/kg	> 500	< 400
炉 数	25	32
平均脱氢率/%	35.61	53.62

提高 VOD 脱气效果的措施有：

- (1)降低初炼钢液的氢、氮含量；
- (2)提高冶炼过程的真空度；
- (3)增加有效脱碳速度；
- (4)增大氩气流量；
- (5)使用干燥的原材料 ,尤其石灰应防止吸收水分；
- (6)减少设备泄漏；
- (7)浇铸超低氮钢种时采取保护措施防止吸氮。

五、造渣、脱氧、脱硫、去夹杂

VOD 法利用吹氧产生的高温熔化渣料 ,形成碱度 1.5 ~ 2.5 流动性良好的炉渣 ,添加硅铁、铝、硅钙等颗粒脱氧剂 ,还原氧化铬同时对钢液进行脱氧 ,脱硫。精炼效果如表 8-7-12、表 8-7-13 和图 8-7-29 ~ 图 8-7-30 所示。

VOD 法脱硫率为 0 ~ 82% ,平均为 40.3%。不锈钢成品硫含量最低达到 0.001%。

VOD 法生产高纯净度不锈钢的技术措施有：

- (1)精料。初炼炉提供温度 1580 ~ 1610℃ ,C0.30% ~ 0.50% ,Si ≤ 0.15% ,S ≤ 0.15% 的钢液 ,VOD 还原期不大量补加合金料。

表 8-7-12 VOD 精炼不锈钢夹杂物检验结果

钢 种	炉 数	夹杂物级别/级			稳定夹杂物含量/%			
		氧化物	硫化物	TiN	总 量	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiN
1Cr18Ni9Ti	42	0.5~1	0.5~1	0.5~2				
0Cr13Ni5Mo	2	0.5	0.5		0.00865	0.00110	0.0063	痕量

表 8-7-13 VOD 精炼前后钢中有害杂质元素变化

炉号	钢种	取样时间	元素含量/%			
			Pb	Sn	Bi	Sb
110223	00Cr18Ni10	初炼钢水	0.0011	0.0038	<0.005	0.0028
		精炼后	0.00075	0.0029	<0.003	0.0027
110275	1Cr18Ni9Ti	初炼钢水	0.0012	0.0035	<0.005	0.0026
		精炼后	0.001	0.003	<0.003	0.0023

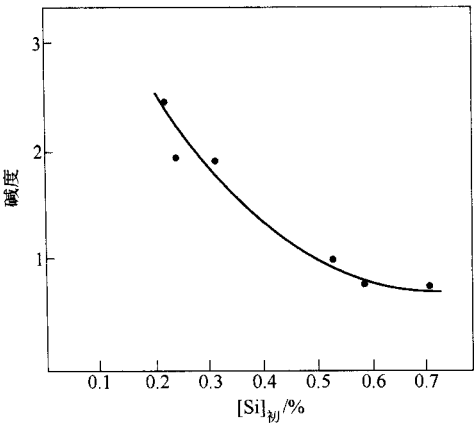


图 8-7-29 初炼钢液硅含量对精炼渣碱度的影响

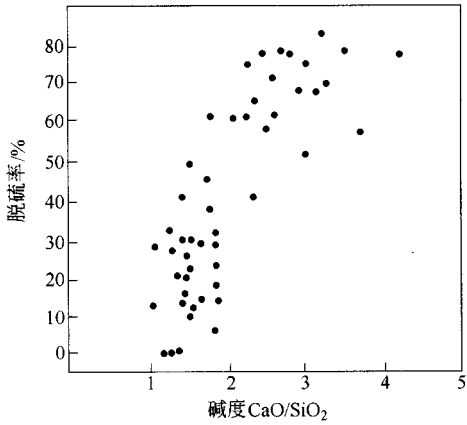


图 8-7-30 炉渣碱度与脱硫率的关系

- (2)提高冶炼过程真空度。
- (3)准确控制吹氧终点 ,杜绝过吹。
- (4)进行真空碳脱氧操作 ,在温度允许情况下延长真空碳脱氧时间。
- (5)当吹后温度过高时 ,加冷却剂降温 ,使还原期不长于 25min。
- (6)除净初炼渣 ,合理使用脱氧剂种类和用量 ,保证高碱度白渣精炼。

六、合金化

通过初炼炉出钢过程钢水激烈混冲 ,VOD 钢包内取化学分析样能准确反映合金元素含量 ,VOD 精炼过程中不用再取样就可以一次性调加合金料 ,使成品化学成分达到控制目标值。各种合金料通过自动加料系统 ,在真空条件下直接加入钢水包内 ,合金料加入时间和收得率如表 8 – 7 – 14 所示。

表 8 – 7 – 14 合金料加入时间、方法和收得率

合金料	调整元素	加入时间	加入方法	收得率 / %	钢种举例
高碳铬铁	C	脱氧后 5 ~ 10min	真空自动加料	97	1Cr18Ni9Ti
	Cr	分析结果报回后	真空自动加料	98 ~ 99	1Cr18Ni9Ti
高碳锰铁 中碳锰铁 金属锰	C	脱氧后 5 ~ 10min	真空自动加料	97	1Cr18Ni9Ti
	Mn	脱氧后 3 ~ 5min	真空自动加料	85 ~ 95	1Cr18Ni9Ti
镍 板	Ni	停氧后大气下	手工加料	100	1Cr18Ni9Ti
铜 板	Cu	停氧后大气下	手工加料	100	17 – 4PH
钼 铁	Mo	停氧后	自动或手工加料	100	00Cr13Ni6MoN
钒 铁	V	解除真空前 5min	真空自动加料	90 ~ 100	A286Ti
铌 铁	Nb	解除真空前 5min	真空自动加料	85 ~ 100	00Cr13Ni6MoNb
钛 铁	Ti	解除真空前 5min	真空自动加料	55	1Cr18Ni9Ti
		出罐扒部分渣	手工加料	85	1Cr18Ni9Ti
硅 铁	Si	脱氧剂	真空自动加料	80 ~ 90	1Cr18Ni9Ti
		出罐前	手工加料	95 ~ 98	00Cr14Ni14Si4
铝	Al	脱氧剂	真空自动加料	约 13	GH132
		解除真空前 3min	真空自动加料	100	GH132
硼 铁	B	出罐前	钢包插入	75 ~ 100	17 – 4PH
氮化铬(锰)	N	解除真空前	自动加料	约 100	
电极粒	C	脱氧后 5 ~ 10min	真空自动加料	95	1Cr18Ni9Ti

第三节 VOD 精炼操作工艺

VOD 精炼过程能否正常的关键环节有：

- (1)初炼钢水的化学成分(C、Si)和温度；
- (2)合适的吹氧真空度、氧流量、氧枪高度和吹氩流量；
- (3)准确掌握吹氧终点,减少过吹。

因各厂初炼炉条件、VOD 的设备能力与生产条件、原材料状况等诸多因素不同,操作工艺参数不可能完全一样,必须在实践基础上总结归纳得出自己的操作工艺。

一、EF→VOD 冶炼不锈钢工艺

(一)配料

炉料组成:炉料由本钢种或类似本钢种的返回钢、碳素铬铁、氧化镍、氧化钼、高硅返回钢、硅铁和低磷返回钢等组成。

配料成分如表 8-7-15 所示。

表 8-7-15 EF→VOD 冶炼不锈钢配料成分(%)

钢 种	C	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	P(≤)	S(≤)
C≤0.01	1.5~2.0	0.8~1.5	110		95		上限-0.05	上限
C<0.16	0.6~1.6	0.8~1.5	107	96	96	96	上限-0.05	上限
C≥0.16	0.6~1.6	0.8~1.5	100	95	96	96	上限-0.05	上限

注:Cr、Ni、Mo、Cu 按规格中限为 100% 计算。

(二)EF 操作工艺

采用返回吹氧法冶炼。EF 吹氧脱碳工艺参数如表 8-7-16 所示。

表 8-7-16 EF 吹氧脱碳工艺参数

方 法	氧 枪	吹氧方式	停电吹氧时间	氧气压力
I	吹氧管	无渣,液面下 200mm	全熔 T≥1550℃	≥0.7MPa
II	偏流水冷氧枪	带渣,液面上 500m	熔化 80%~90%	≥0.5MPa

为减少铬氧化损失,止吹碳不小于 0.30%。

EF 还原工艺如表 8-7-17 所示。

表 8-7-17 EF 还原工艺

方 法	预 还 原
I	无
II	加 FeSi 粉 ,保持 10min 除渣 60%
方 法	还 原
I	CaO25 ~ 30kg/t ,FeSi10kg/t
II	CaO20kg/t ,CaC ₂ 8kg/t

EF-VOD 冶炼不锈钢出钢化学成分控制如表 8-7-18 所示。出钢温度一般铬镍不锈钢不低于 1630℃ ,超低碳氮不锈钢不低于 1650℃。

表 8-7-18 EF-VOD 冶炼不锈钢出钢化学成分控制

钢 种	C	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu
CrNiTi 型	0.3 ~ 0.6	≤0.30	≤规格	≤规格-0.02	规格中限+0.2	规格中限	规格中限	规格中限
CrN 型	0.3 ~ 0.6	≤0.30	≤规格	≤规格-0.02	规格中限	规格中限	规格中限	规格中限
超低碳 N 型	0.6 ~ 0.8	≤0.25	≤规格	≤规格-0.02	规格中限+0.2			

钢渣混冲出钢 ,出钢后扒渣台彻底扒净初炼渣 ,并取化学分析样 2 个。

(三)VOD 操作工艺

钢包接通氩气放入真空罐 ,吹氩、调整流量到 20 ~ 30L/min(标态) ,测温 1570 ~ 1610℃ ,测自由空间不小于 800mm。然后 ,扣 VOD 包盖、真空罐盖、抽真空、吹氧。VOD 水冷氧枪吹氧工艺参数如表 8-7-19 所示。

当入罐碳大于 0.60% 甚至到 1.00% 以上时 ,为避免发生喷溅 ,应延长预吹氧时间 ,晚开 5 级、4 级泵 ,低真空度小吹氧量将碳去到 0.50% 后再进入主吹。

停氧条件即吹氧终点判断 ,应以氧浓差电势或气体分析仪为主 ,结合真空度。废气温度变化、累计耗氧量进行综合判断。决定停止吹氧的条件是：

- (1) 氧浓差电势下降为零。真空吹氧脱碳过程氧浓差电势变化曲线如图 8-7-31 所示。
- (2) 真空度、废气温度开始下降或有下降趋势。
- (3) 累计耗氧量与计算耗氧量相当(±20m³)。耗氧量计算系数如表 8-7-20 所示。
- (4) 钢液温度满足后期还原和加合金料降温需要。

表 8-7-19 VOD 水冷氧枪吹氧工艺参数

阶 段	钢水量/t	枪位/m	真 空 度		氧压力 /MPa	氧流量 /m ³ ·min ⁻¹	氩流量 /L·min ⁻¹	时间/min
			开泵/级	压力/kPa				
预吹	28	1.1~1.2	6~5	≤20	>0.7	6~7	20~30	至 E↑
	6	0.9~0.95		15~10	0.6	3.3	5~10	
主吹	28	1.2	6~4	10~4	>0.7	9~10	30	至 P≤4
	6	0.9~0.95		10~5	0.6	3.3	5~10	
缓吹	28	1.0~1.1	6~4 (3)	≤4	>0.7	7	50~60	至 E↓
	6	0.9~0.95		≤5	0.5	2.5	15~20	

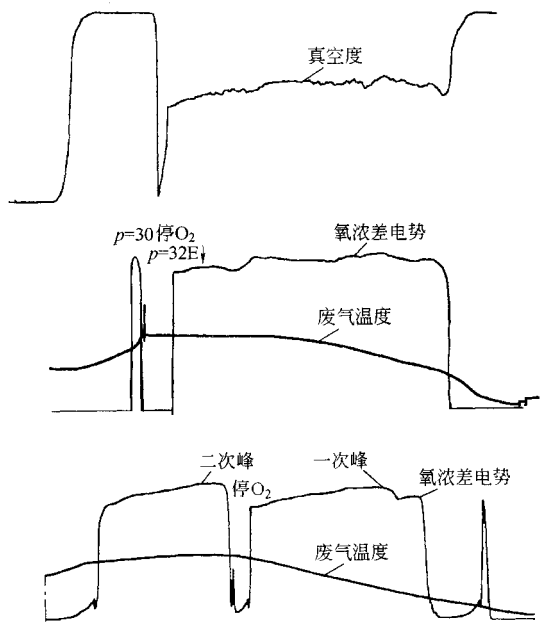


图 8-7-31 VOD 脱碳过程真空度、
氧浓差电势、废气温度变化曲线

表 8-7-20 水冷氧枪吹氧耗氧量(标态)计算(m³/t)

开吹碳、硅 含量之和/%	成品碳含量/%			
	<0.1	<0.06	<0.03	<0.01
0.4	7.6	8.0	8.4	9.2
0.5	8.4	8.8	9.2	10.0
0.6	9.2	9.6	10.0	10.8

开吹碳、硅 含量之和/%	成品碳含量/%			
	< 0.1	< 0.06	< 0.03	< 0.01
0.7	10.0	10.4	10.8	11.6
0.8	10.8	11.2	11.6	12.4
0.9	11.6	12.0	12.4	13.2
1.0	12.4	12.8	13.2	14.0

冶炼碳大于 0.03%的不锈钢、合金结构钢碳高时吹氧去碳 ,可以采用耗氧量计算决定吹氧终点 ,即当累计耗氧量达到计算耗氧量时停氧。这样可以缩短吹氧时间 ,减少合金元素氧化。

冶炼 C > 0.03%一般技术条件不锈钢时 ,不用进行真空碳脱氧操作 ,停氧后直接进行测温加渣料、合金料、脱氧剂及后续操作 ,用高碳料或增碳剂调碳到成品规格。冶炼 C ≤ 0.03%和质量有特殊要求的不锈钢时 ,需要进行真空碳脱氧操作。即停氧后立即打开高真空喷嘴 ,抽真空到极限真空度 ,同时增大氩气流量(标态)到 2 ~ 3L/(min · t) ,此时氧浓差电势再次升起 ,称为二次峰 ,时间大约 5 ~ 15min ,二次峰再次下降到零 ,真空碳脱氧结束。

真空中或解除真空后 ,测温加渣料、合金料、脱氧剂。渣料和脱氧剂的种类和加入量如表 8 - 7 - 21 所示。

表 8 - 7 - 21 渣料和脱氧剂的种类和加入量(kg/t)

技术条件	渣 料		脱 氧 剂			
	CaO	CaF ₂	75% FeSi	CaSi	Al	FeTi
一般	13 ~ 17	2 ~ 3	10 ~ 12			
特殊	18 ~ 22	3 ~ 4	5 ~ 8	3 ~ 4	2 ~ 3	10

注 :FeTi 用于高温合金 GH132 的冶炼。

抽真空 3 ~ 5min 渣料熔化 ,加入脱氧剂和合金料。含钛钢解除真空前 3 ~ 5min ,温度为 1630 ~ 1610℃时 ,加入钛铁。终脱氧铝解除真空前 3min 加入。最后 ,解除真空 ,测温 ,停氩气 ,出罐浇铸。VOD 还原操作工艺参数如表 8 - 7 - 22 所示。

如果温度高 ,可通过吹氩降温 ,温度过高 ,可抽真空降温 ,此时含钛钢需补加钛铁 2 ~ 4kg/t。不同钢种的出罐温度如表 8 - 7 - 23 所示。

表 8－7－22 VOD 还原操作工艺参数

技 术 条 件		真空度/Pa	保持时间/min	氩流量(标态)L·min ⁻¹		终脱氧铝用量 /kg·t ⁻¹
				加料	精炼	
抚 钢	一 般	≤300	≥10	60	40～50	
	特 殊	≤100	≥15	60	40～50	1
上海钢研所		≤133	15～20	30	20	

表 8－7－23 不同钢种的出罐温度(℃)

钢 种	1Cr18Ni9Ti	0Cr19Ni9	1Cr13	00Cr14Ni14Si4	00Cr18Ni12Mo2Cu2
温 度	1560～1580	1555～1575	1580～1600	1550～1570	1560～1580

二、EF→VOD 冶炼纯铁及精密合金工艺

工业纯铁及镍(钴)精密合金的 VOD 冶炼工艺与不锈钢基本相同 ,只是因为 没有铬参与氧化反应 ,在相同的吹氧条件下 :①脱碳速度快 ,更容易发生喷溅和溢钢 ;②氧化反应放热少 ,容易出现吹后温度低。因此 ,冶炼工艺参数应做适当调整。

(一)配料

炉料组成 :为满足产品高纯度、低硫磷的要求 ,选用低硫磷碳素返回钢、生铁或废电极 ,精密合金则加配电解镍、氧化镍和镍钴返回料等。

配料成分如表 8－7－24 所示。

表 8－7－24 纯铁及精密合金配料成分(%)

品 种	C	Si	S	P	Ni ,Co
工业纯铁	0.2～0.3	≤0.40	≤0.030	≤0.020	
精密合金	0.3～0.4	≤0.40			规格中限

(二)EF 操作工艺

装料顺序为 :垫炉底石灰 20kg/t。炼工业纯铁装铁矿石 10kg/t ,废电极。炼精密合金装氧化镍或电解镍。最后装入返回钢。

供电 ,炉底形成熔池后吹氧助熔 ,自动流渣。熔化末期补加石灰 10～15kg/t ,增加炉渣碱度早期去磷。

若冶炼 P≤0.005% 的工业纯铁 ,换渣去磷使 P≤0.001% ,温度不低于 1600℃。

除净氧化渣 ,加石灰、萤石。炼工业纯铁加 AD 粉还原 ,出钢。炼精密合金加硅铁粉 + 碳粉还原 ,调整成分后出钢。

(三)VOD 操作工艺

钢包彻底除渣 ,入罐、吹氩、测温、取样、测自由空间不小于 1300mm。入罐钢水化学成分及温度规定如表 8-7-25 所示。

抽真空吹氧。纯铁及精密合金 VOD 吹氧制度如表 8-7-26 所示。

表 8-7-25 入罐钢水化学成分(%)及温度规定

品 种	C	Si	S
工业纯铁	0.20 ~ 0.30	≤0.25	≤0.002
精密合金	0.30 ~ 0.40	≤0.30	≤0.010
品 种	P	Ni ,Co	温度/℃
工业纯铁	≤0.003		≥1620
精密合金	≤0.015	规格中限	≥1580

表 8-7-26 纯铁及精密合金 VOD 吹氧制度

钢水量 /t	阶段	真空度		枪位 /mm	氧流量 /m ³ ·min ⁻¹	氩流量(标态) /L·min ⁻¹
		开泵	kPa			
30	预吹	6 ~ 5	10 ~ 9	1300	7	15 ~ 20
	主吹	6 ~ 4	8 ~ 2	1300	9	20 ~ 30

停氧条件为 :氧浓差电势下降到零。停氧后开(6 ~ 1 级)泵抽至极限真空度 ,增大氩气流量(标态)至 50 ~ 60L/min ,无氧浓差电势二次峰出现 ,保持 3 ~ 5min。

真空或大气下测温、加渣料 ,石灰 15 ~ 20kg/t ,萤石 3 ~ 5kg/t ,调整化学成分 ,脱氧剂铝 2kg/t (硅钙 1kg/t)。抽真空保持不少于 10min。

出钢温度 :工业纯铁 1600 ~ 1620℃ ,精密合金 1540 ~ 1560℃。

(四)质量水平

VOD 冶炼工业纯铁及精密合金的质量水平如表 8-7-27 和表 8-7-28 所示。

表 8－7－27 纯铁及精密合金的元素含量(%)

厂家	品种	C	Mn	Si	S	P	Ni	Co	O	N
抚钢	纯铁	0.002 ~ 0.006	0.02 ~ 0.05	0.02 ~ 0.045	0.001 ~ 0.0017	0.0024 ~ 0.0035			0.0081	0.004
	Ni36	0.006	0.28	0.30	0.005	0.009	35.6			
大连钢厂	纯铁	0.004	0.08	0.06	0.009	< 0.02			0.0031	0.005
	4J58	0.017	0.24	0.30	0.013	0.012	56.17			
	4J29	0.014	0.21	0.13	0.007	0.005	29.5	17.24		

表 8－7－28 VOD 与 ESR 生产的 Ni36 合金薄板性能对比

工艺	薄厚 /mm	热处理制度	σ_b /MPa	δ /%	A_K /J	线膨胀系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ($\times 10^{-6}$)				
						100 $^{\circ}\text{C}$	200 $^{\circ}\text{C}$	300 $^{\circ}\text{C}$	400 $^{\circ}\text{C}$	500 $^{\circ}\text{C}$
VOD	2.0/4.0	850 $^{\circ}\text{C}$ /h	460/480	35/44	> 247	1.10/1.75	2.49/2.84	5.10/5.65	7.80/8.40	9.43/10.27
ESR	2.0/4.0	850 $^{\circ}\text{C}$ /h	490/500 505/510	37/40 38/40	> 267	1.29/1.34	2.73/2.94	5.79/5.67	8.14/8.23	10.33/10.11

三、转炉→VOD 冶炼不锈钢工艺

以转炉为初炼炉给 VOD 提供粗炼钢水是不锈钢生产的又一途径。转炉 ,特别是顶底复吹转炉 ,去碳速度快 ,可以换渣脱硫 ,因此可以提供温度高、含碳量低的初炼钢液 ,从而减轻 VOD 去碳负担 ,缩短精炼时间 ,实现以最低的成本生产不锈钢。

巴西 Timotco 的 Acesita 钢厂用 75tMRP－L 转炉为 72tVOD 提供钢水 ,生产 AISI304 钢 ,VOD 吹炼参数如表 8－7－29 ~ 表 8－7－31 所示。

表 8－7－29 VOD 冶炼过程化学成分(%)和温度变化

阶 段	C	Si	Cr	Ni	Mn	$T/^{\circ}\text{C}$
转炉出钢	0.37	0.09	18.04	8.47	1.23	1632
VOD 入罐	0.41	0.03	18.66	8.39	1.40	1595
吹氧结束	0.021	0.01	18.24	8.45	1.16	1639
VOD 出罐	0.037	0.26	18.66	8.21	1.30	1610

表 8－7－30 VOD 冶炼过程工艺参数

参数	O ₂ 流量/m ³ ·min ⁻¹			Ar 流量(标态)/L·min ⁻¹			时间/min				
阶段	预吹	主吹	缓吹	吹氧	还原	脱氧	预吹	碳脱氧	总脱碳	还原	全程
指标	18.3	25	15	2500	2350	2300	2	15	57	12	96

表 8－7－31 VOD 冶炼过程材料消耗

氧气/m ³ ·t ⁻¹	氩气(标态)/L·t ⁻¹	75%硅铁/kg·t ⁻¹	白灰/kg·t ⁻¹	萤石/kg·t ⁻¹	铬收得率/%
6.6	0.44	6	9.7	1.9	99.1

第八章 AOD 法

不锈钢的工业性生产开始于 1920 年。自那以来,它的冶炼工艺技术一直在发展和改进 ①允许选用更廉价的原料,降低生产成本。如采用高碳或中碳铬铁代替价格昂贵的微碳铬铁或金属铬。应用不锈钢返回料以回收合金元素。②能生产出高纯度、高均匀性的不锈钢,特别是生产超纯不锈钢。在冶炼过程中能大幅度地去除原材料中带入的碳、硫、磷、气体、夹杂以及其他有害元素。使这些杂质元素的含量只有按常规方法冶炼的同钢种中含量的几分之一或几十分之一。如要求碳小于 20ppm,磷、硫小于 50ppm,氮小于 30ppm 等。③冶炼工艺能更好地与浇注配合,特别是与连铸的配合。如冶炼的生产率能适应连铸的要求。

AOD 法就是为了解决上述问题而发展起来的一种冶炼高铬不锈钢的专用方法。由于这种方法可以在不太高的冶炼温度下,在大气中将高铬钢液中的碳降到极低的水平,而铬又没有明显的烧损。此外,这种氩氧精炼工艺还有投资省、生产效率高、生产费用低、产品质量高、操作简便等优点。所以,在世界各国得到迅速推广。现在世界上约有 AOD 设备 140 台,最大容量 160t。据资料介绍全世界不锈钢总产量的 75% 以上是由 AOD 生产的。西欧、美国、日本等主要的不锈钢生产国,生产着世界不锈钢总产量的 93%,在这些国家 AOD 法生产不锈钢的比例,美国为 95%,芬兰为 100%,英国 88%,意大利 95%,原西德为 75%,日本 65%。我国应用 AOD 法生产不锈钢的研究起步不算太晚(1973 年开始),但发展缓慢,至今尚处于发展初期,该法的产量只占我国不锈钢总产量($25.6 \times 10^4 \text{ t}$)的 17%。目前,AOD 炉只有 6 台,最大容量 18t。

第一节 设备特点

AOD 炉的炉体类似于氧气转炉,是由钢板围制的炉壳和内砌耐火材料的炉衬所组成。由于耐火炉衬的寿命较短,目前平均只有一百炉,最高炉龄为 525 次,是由日本新日铁老厂的一座 60t 炉创造的,所以炉体拆修频繁。为了提高炉子的作业率,普遍采用了活动炉壳。新砌好的炉体被固定在一个与倾动驱动轴相联接的旋转支撑轴圈内。炉体可以向前或向后旋转 180° ,倾动速度通常分为两种,即冶炼操作时使用低速,其他作业时选用高速。

炉膛的内形为圆台体的炉帽部分,炉体中部的圆柱体和下部的倒置圆台体所组成。炉容比为 $1 \sim 0.7 \text{ m}^3/\text{t}$,从而保证了有较大的熔炼室空间,以减少喷溅。熔池深度、熔池直径、炉膛的有效高度三者之比,通常选取 $1:2:3$ 。我国 18tAOD 炉所取的比例为 $1:2.1:3.3$ 。吹入精炼用混合气体的风口,安装在出钢口侧对面、靠近炉底的侧壁上。当装料和出钢时,炉体前倾一定角度,风口处于钢液面以上。正常吹炼时,风口沉入熔池深部。根据炉容量的大小,可安有二个或二个以上风口。由于炉体下部设计成 20° 倾斜的圆台形,所以由风口喷出的气体在熔池中上浮时,不会冲刷风口上方的炉壁。AOD 炉风口的型式是特有的,它是用气体冷却的消耗式风口。风口采用双层套管结构,其外管只通氩气以冷却风口,内管通氩氧混合气体。

精炼用混合气体的输送和调节系统是氩氧炉的主要控制系统之一。由制氧车间生产的气体经管道分别输送入车间附近的贮气罐中,经计量、减压、调节、混合,最后按工艺要求的流量和比例的混合气体,通过风口送入炉内。该系统还备有能够保证安全运行的连锁装置和为了节省氩气的气体切换装置。在非精炼时期,如出钢、装料等,为防止堵塞风口,该系统可自动切换改吹压缩空气或氮气。AOD 吹炼时排出的烟尘,由专门的除尘系统收集和处理。我国 18tAOD 炉选用布袋式除尘,处理能力为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$,入口粉尘浓度小于 $10 \text{ g}/\text{m}^3$,出口小于 $0.15 \text{ g}/\text{m}^3$ 。要求入袋烟尘温度小于 120°C 。

氩氧炉的装备除炉体的机械倾动装置和支撑该装置的金属结构外,还有料仓、称量、输送和投入炉内等部件组成的加料系统。该系统可以在吹炼过程中,按工艺要求自动加入还原剂、脱硫剂、铁合金或冷却剂等。测温取样系统可以保证在吹炼过程中测温取样,并在操作室中显示和记录测量的结果。此外还有炉体的干燥和预热装置等。

第二节 工艺过程

在 AOD 炉中精炼不锈钢,可用电炉或氧气转炉作为初炼炉。当用电炉熔炼供 AOD 炉精炼的半钢时,电炉的炉料可由废钢、不锈钢的返回钢、高碳铬铁、高碳镍铁等原料组成,按需要还可使用少量的铬矿。电炉所炼的半钢对碳含量没有严格的要求,通常波动于 1%~2%。它比 VOD 法对原料选择的自由度要更大些。考虑到 AOD 炉的炉衬寿命,硅的含量一般控制在 0.2%~0.4%。电炉熔化终了,如果硅高,可以进行脱硅处理。脱硅用氧化剂可以是氧气、氧化镍或氧化铁皮,但考虑到钢液温度,一般建议吹氧。为了还原炉渣中的氧化铬,初炼炉出钢前可加硅铁和碳化硅等还原剂。AOD 炉吹炼时,具备较强的脱硫能力,所以在初炼炉中一般不强调脱硫。初炼炉的出钢温度控制在 $1620 \pm 10^{\circ}\text{C}$ 。

初炼炉出钢后,在运往 AOD 炉的过程中,对钢液称量和除渣,然后兑入 AOD 炉中。为防止钢液灌入风口,兑钢液时由风口吹入氩或氮气。根据初炼炉出钢的碳、硅、锰含量和钢液的质量,计算出吹入氧的总量。为了尽量减少铬的氧化和防止钢液温度过高,在吹炼时要改变氩氧的混合比。在理想的情况下,应按照熔池的含碳量和温度,连续地变化混合比。但是,由于操作、检测、控制等方面的原因,在实际操作中,则是分三或四个阶段变化氩氧比例。每个阶段所用的混合比,按该阶段终了时的含碳量和温度来确定。当吹炼初期,碳含量较高,可用 $\text{O}_2:\text{Ar}=4:1$ (或 3:1)。在这个比例下,将熔池中含碳量降到 0.2% 左右。这时的温度大约为 1680°C 左右。第二阶段按 $\text{O}_2:\text{Ar}=2:1$ 的比例供气。将含碳量降到 0.1% 左右,此时熔池温度大约为 $1690 \sim 1720^{\circ}\text{C}$ 。第三阶段按 $\text{O}_2:\text{Ar}=1:2$ 的比例,将碳含量降到 0.02%,此时的温度约为 $1700 \sim 1730^{\circ}\text{C}$ 。当吹炼碳含量小于 0.01% 的极低碳钢种时,可增设第四阶段,以 $\text{O}_2:\text{Ar}=1:3$ (或 1:4)的比例继续脱碳。为了保护炉体耐火材料,钢液温度不宜超过 1750°C ,因而在氧化期可加入清洁干燥的同钢种的返回钢,以冷却钢液。此外,在原料中使用氧化镍,对于缩短氧化时间,减少吹炼用气体的消耗和降低原材料费用,都是有利的。

氮含量要求低的钢种,应使用纯氩。但是对于氮含量不会引起钢质量上问题的钢种,许多工厂都部分地使用粗氩,或以氮气代替氩气。

在吹入预定的氧量,并且钢中含碳量达到要求的数值之后,即停止吹氧结束氧化期。

此时大约有 2%左右的铬被氧化而进入炉渣 ,锰也有一定数量的氧化 ,钢中的含氧量将高达 1400ppm 左右。为还原渣中的铬和锰 ,和脱除钢中的氧 ,加入硅铁 ,铝和石灰进入还原期 ,为确保较高的还原效率 ,希望在高于 1700℃ 的温度下进行还原。同时为了防止风口被钢液灌死和改善熔池中冶金反应的动力学条件 ,在停吹氧气后一直继续吹入氩气。在上述条件下 ,铬的回收率可达 99% ,锰的回收率可达 90% 以上。这样单渣操作 ,脱硫也能顺利进行。若原始硫含量过高 ,或成品硫要求很低[S]≤50ppm 时 ,才采用双渣法。

最后进入精炼期 ,其任务是终调成分和使温度达到出钢要求。AOD 炉冶炼比电弧炉返回吹氧法冶炼容易操作 ,炼成率几乎是 100% ,许多钢厂都是第一炉就炼出成品。这种冶炼方法不存在电极的增碳作用 ,其他元素玷污钢液的可能性也小 ,所以特别适用生产低碳类型的钢种。

AOD 法的冶炼时间约为 1.5 ~ 2h。因此 ,可用一座 AOD 炉与一座电炉双联。由于采用一些机械化和自动化操作(如自动加料、自动测温和取样等) ,可将冶炼时间缩短到 1h 左右。若不相应提高作为初炼炉电炉的生产率 ,就可以考虑一座 AOD 炉与两座电炉配合。

AOD 法吹炼过程中 ,每个时期炉渣的成分不同 ,其波动范围列于表 8 - 8 - 1。

表 8 - 8 - 1 AOD 吹炼过程中渣的成分

成 分		Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	FeO	MnO	$\frac{CaO}{SiO_2}$
含量 ,%	冶炼期								
氧化期渣	开始	23	7	15	23	12	13	7	1.53
	结束	25 ~ 40	5 ~ 9	18 ~ 24	7 ~ 20	8 ~ 15	6 ~ 10	10 ~ 20	0.3 ~ 1.5
还原期渣	开始	8	4	34	34	15	2	3	1.0
	结束	1 ~ 3	7 ~ 9	30 ~ 40	15 ~ 48	6 ~ 18	1 ~ 6	1 ~ 6	1 ~ 2
脱硫渣		< 1	9 ~ 10	16 ~ 25	52 ~ 59	5 ~ 9	< 1	< 1	2.3 ~ 3.6

我国某厂 6tAOD 炉的基本操作制度如表 8 - 8 - 2。

表 8 - 8 - 2 AOD 操作工艺

钢 种	1Cr18Ni9Ti	00Cr19Ni10
配料	1. 装料量 6.2t 2. 配料 :C = 1.2 ~ 1.8% ;Si < 0.5% ; Ni = 9.8% ;P ≤ 0.028% ; Cr = 19%	1. 装入量 6.2t 2. 配料 :C = 1.2 ~ 1.8% ;Si < 0.5% , Cr = 20% ;Ni = 10% ;P < 0.028%

钢 种	1Cr18Ni9Ti	00Cr19Ni10
电 炉	3. 不吹氧助熔 ,防止铬损失。 4. 熔清加石灰、硅铁、硅钙和铝。 5. 出钢温度 > 1600℃。	同 左
氩氧炉	6. 第一阶段 :O ₂ : Ar = 3 : 1 脱碳至 C = 0.2 % 温度 T = 1680 ~ 1720℃ 7. 第二阶段 :O ₂ : Ar = 2 : 1 脱碳至 C = 0.05 % 温度 T = 1690 ~ 1720℃ 8. 加入 :Si - Cr60kg ;Si - Ca40kg ; Al 块 12kg ;Al 粉 30kg ; 石灰 80 ~ 120kg。 吹 Ar 200m ³ /h 共 2min 100m ³ /h3 ~ 5min 9. 扒渣 :40 ~ 50 % 10. 出钢前 2 ~ 3min 加 Ti - Fe 11. 出钢温度 :1580 ~ 1630℃	6. 第一阶段 :O ₂ : Ar = 3 : 1 脱碳至 C = 0.15 % 温度 T = 1690 ~ 1720℃ 7. 第二阶段 :O ₂ : Ar = 2 : 1 脱碳至 C = 0.05 % 温度 T = 1700 ~ 1730℃ 8. 第三阶段 :O ₂ : Ar = 1 : 2 脱碳至 C = 0.02 % 温度 T = 1700 ~ 1730℃ 9. 吹 Ar 200m ³ /h 共 2 ~ 3min 10. 加入 :Si - Cr50kg ;Si - Fe100 ~ 120kg ; Al 块 20kg ;石灰 100 ~ 120kg ; 吹 Ar200m ³ /h2min , 吹 Ar100m ³ /h3 ~ 5min 11. 扒渣 12. 出钢温度 :1580 ~ 1630℃

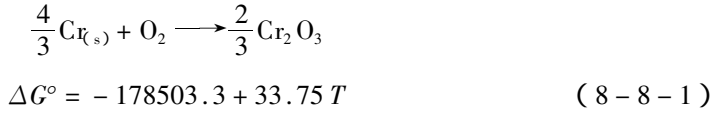
第三节 工艺参数

AOD 吹炼过程的工艺参数可分为两类。一类是与冶炼工艺有关的参数 ,如炉容量、入炉半钢的化学成分、半钢的温度、吹氧脱碳时间等。另一类是与吹炼供气系统有关的参数 ,如氧氩比、氧气流量、氩气流量、吹纯氩的时间、风口直径、风口个数、风口距熔池表面距离、混合气体压力等。在这些工艺参数中 ,除在工艺过程的叙述中已作过介绍的外 ,最主要的是氧氩比和氧气、氩气的流量。

一、氧氩比

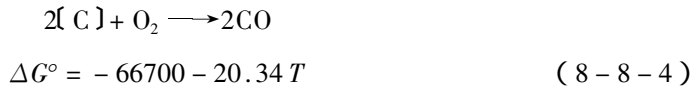
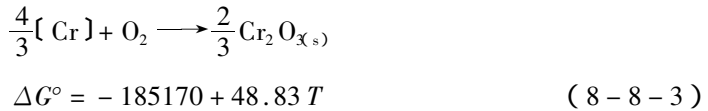
AOD 吹炼所用的混合气体中 ,氧气与氩气的体积比称为氧氩比。该参数在较大程度上影响着 AOD 炉的脱碳速率、铬的氧化速率及熔池的升温速率。为了尽可能减少铬的氧化量和控制熔池的温度 ,在吹炼过程中将根据熔池的含碳量和温度来调节该参数。氧氩比的理论值 ,可以根据 Fe - Cr - C - O 四元系的平衡条件 ,用化学热力学的方法进行计

算。现以 18-8 型不锈钢为例介绍一种计算方法作为参考。具体的热力学数据,特别是高铬钢液中铬氧化产物的组成上,尚存在一些不同的看法。但是,这不影响确定氧氮比的思路和计算方法。本例题中所用的热力学数据如下:

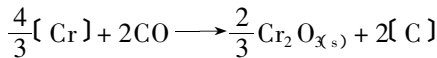


$$\text{Cr}_{(s)} \longrightarrow [\text{Cr}]_{1\%}$$

$$= 5000 - 11.31 T \quad (8-8-2)$$



式(8-8-3)-式(8-8-4)得:



因为

$$\Delta G^\circ = -118470 + 69.17 T$$

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K \quad (8-8-5)$$

所以

$$-118470 + 69.17 T = -4.575 T \lg \frac{a_{\text{Cr}_2\text{O}_3}^{\frac{2}{3}} \cdot a_{[\text{C}]}^2}{a_{[\text{Cr}]}^{\frac{4}{3}} \cdot p_{\text{CO}}^2} \quad (8-8-6)$$

假定吹炼过程在相对固定的温度(以下计算分别取 1650 ;1700 ;1750℃三种温度)下进行,则为达到降碳保铬的效果,必须降低 CO 的分压。因此,在钢液中铬不被烧损的前提下,与某一含碳量对应地存在着某一 p_{CO} 值,在此值下,优先氧化的是钢中的碳,该 p_{CO} 值可由式(8-8-7)求得。

取

$$a_{\text{Cr}_2\text{O}_3} = 1$$

$$a_{[\text{C}]} = f_{\text{C}} [\% \text{C}]$$

$$a_{[\text{Cr}]} = f_{\text{Cr}} \cdot [\% \text{Cr}]$$

代入式(8-8-6)得

$$2 \lg p_{\text{CO}} = -\frac{25895.1}{T} + 15.12 + 2 \lg f_{\text{C}} + 2 \lg [\% \text{C}] - \frac{4}{3} \lg f_{\text{Cr}} - \frac{4}{3} \lg [\% \text{Cr}]$$

$$(8-8-7)$$

因为

$$\lg f_e = e_C^{Cr} \cdot [\%Cr] + e_C^{Ni} \cdot [\%Ni] + e_C^C \cdot [\%C] + e_C^{Si} \cdot [\%Si] + e_C^{Mn} \cdot [\%Mn] + e_C^O \cdot [\%O] \tag{8-8-8}$$

$$\lg f_{Cr} = e_{Cr}^{Cr} \cdot [\%Cr] + e_{Cr}^{Ni} \cdot [\%Ni] + e_{Cr}^C \cdot [\%C] + e_{Cr}^{Si} \cdot [\%Si] + e_{Cr}^{Mn} \cdot [\%Mn] + e_{Cr}^O \cdot [\%O] \tag{8-8-9}$$

有关相互作用系数 e_i^j 列于表 8-8-3。假定 AOD 炉吹炼时 ,钢液的最初及吹炼终了的成分如表 8-8-4 所列。由于 $[\%O]$ 、 $[\%Si]$ 、 $[\%Mn]$ 与相应的相互作用系数的乘积很小 ,故忽略不计。将表 8-8-4 假定的钢液成分 ,以及相应的 e_i^j 值分别代入式 (8-8-8) 和式 (8-8-9) ,则可计算出在假定条件下的 $\lg f_e$ 和 $\lg f_{Cr}$ 。再假定吹炼过程中铬和镍的含量不变。这样就可整理成

$$\lg p_{CO} = 0.22[\%C] + \lg[\%C] - \frac{12947.54}{T} + 7.25 \tag{8-8-10}$$

由式 (8-8-10) 可计算在特定温度下 ,为降碳保铬 ,应保持的临界 p_{CO} 值。计算结果列于表 8-8-5。

表 8-8-3 相互作用系数

e_i^j j i Cr C Ni O Si Mn						
Cr	-0.0008	-0.12	0.0002	-0.14	-0.0043	0
C	-0.024	0.14	0.012	-0.34	0.08	-0.012

表 8-8-4 假定的钢液成分

成分 ,%	C	Cr	Ni	Si	Mn	O	温度 ,℃
吹炼初始	~ 0.6	18.0	10.0	0.50	1.0	0.016	~ 1550
吹炼终点	0.07 ~ 0.01	18.0	10.0	0.10	0.80	0.05	1700

在 AOD 吹炼中 ,利用氩气的稀释作用来使碳氧反应生成的一氧化碳的分压低于临界界的 p_{CO} 。故吹入氧氩混合气体的氧氩比值 (O_2/Ar) 就是决定 p_{CO} 值的关键。为此需要确定 O_2/Ar 与 p_{CO} 的关系。假设吹入的氧气只与碳反应 ,并且能全部作用完 ,根据碳氧反应式可得 ,每消耗 1mol 的氧气 ,可去除 2mol 的碳 ,生成 2mol 的一氧化碳。当去除 $d[C]$ kg 碳时 ,消耗氧气的摩尔数 n_{O_2} 为

$$dn_{O_2} = \frac{d[C]}{24} \tag{8-8-11}$$

生成 CO 的摩尔数为

$$dn_{CO} = \frac{d[C]}{12} \tag{8-8-12}$$

在氧氩混合气体吹入钢液后 ,氧气与钢中碳反应生成一氧化碳 ,而氩气仍留在气泡中 ,根据道尔顿分压定律 ,它们的压力之比为

$$\frac{p_{CO}}{p_{Ar}} = \frac{dn_{CO}}{dn_{Ar}} \tag{8-8-13}$$

如果气泡的总压为 10⁵ Pa ,而气泡中只有氩气和一氧化碳 ,则

$$p_{Ar} = 1 - p_{CO} \tag{8-8-14}$$

根据氧氩比的定义 ,O₂/Ar 的理论值为

$$\begin{aligned} \left(\frac{O_2}{Ar}\right)_{理} &= \frac{dn_{O_2}/1.429}{dn_{Ar}/1.784} \\ &= 1.25 \cdot dn_{O_2}/dn_{Ar} \end{aligned} \tag{8-8-15}$$

式中 1.429——氧气的密度 ,kg/m³ ;
1.784——氩气的密度 ,kg/m³。

以式(8-8-11)(8-8-12)(8-8-13)(8-8-14)代入式(8-8-15)整理后得

$$\left(\frac{O_2}{Ar}\right)_{理} = \frac{0.624 \cdot p_{CO}}{(1 - p_{CO})} \tag{8-8-16}$$

按式(8-8-10)计算的理论临界 p_{CO} 值代入 ,就可得到不同含碳量下理论的 O₂/Ar 比值。

按式(8-8-16)计算的结果列于表 8-8-5。

表 8-8-5 理论计算的临界 p_{CO} 和氧氩比

计算值 温度 项目 [% C]	1650℃		1700℃		1750℃	
	p _{CO}	O ₂ : Ar	p _{CO}	O ₂ : Ar	p _{CO}	O ₂ : Ar
0.25	0.933	8.7 : 1	1.384	—	2.009	—
0.20	0.728	1.7 : 1	1.079	—	1.567	—
0.15	0.532	1 : 1.4	0.789	2.3 : 1	1.146	—
0.10	0.346	1 : 3.0	0.513	1 : 1.5	0.745	1.8 : 1
0.05	0.169	1 : 7.9	0.250	1 : 4.8	0.363	1 : 2.8
0.01	0.033	1 : 47.0	0.049	1 : 31.1	0.071	1 : 21.0

通过上述计算可见 ,在 1700℃、[Cr]= 18% 时 ,当[C]> 0.20% 的阶段可以吹入纯氧气。而当[C]< 0.20% 时 ,再逐渐增加氩气的比例。

当然实际情况要比理论计算时假定的条件复杂得多。如吹炼过程温度不可能恒定 ,

实际由 1550℃升至 1750℃左右。其次钢液成分也处在不断变化之中。特别是反应区气相和液相的成分、温度、压力 ,均不同于系统的平均值。吹入的氧气也不可能全部被利用 ,并全部与碳作用生成一氧化碳。所以上述计算在实际应用时 ,应该按取样分析结果来校正。在生产中一般不连续变化氧氩比 ,这样就必然要多用一些氩气 ,即每阶段都按该阶段的最低碳含量来控制氧氩比。国外已有根据钢液温度、含氧量来连续改变氧氩比 ,以实现闭环控制的专利。不过大部分炉座还是分成三个或四个阶段 ,送入不同比例的氧氩混合气体。

二、混合气体的流量

在氧氩比已确定的情况下 ,混合气体的流量只取决于氧气的流量。AOD 吹炼中 ,氧气的需用量是按入炉钢液的成分而确定的。考虑到最合理的脱碳速率、吹氧脱碳的时间 ,即可确定氧气的流量。我国一座 18tAOD 炉吹炼各阶段所用的氧、氩流量如表 8 - 8 - 6 所示。

表 8 - 8 - 6 AOD 吹炼所用氧、氩流量的实例(18t 炉)

精炼阶段		O ₂ : Ar	流 量 ,m ³ /h		阶 段 末 状 态	
			O ₂	Ar	[%C]	T℃
脱 碳 期	I 阶段	3 : 1	720	240	0.20 ~ 0.30	1700 ± 10
	II 阶段	1 : 1	480	480	0.04 ~ 0.06	1730 ± 10
	III 阶段	1 : 3	240	720	≤0.03	
预还原期				480		
脱硫期				480		

第四节 AOD 法精炼的效果

AOD 法是一种全新的适用于低碳钢种的精炼方法。这种方法有没有生命力 ,能不能得到推广和发展 ,主要取决于这种精炼方法所炼钢质量 ,以及这种方法的经济效果。近年来的实践证明 ,这种方法在产品质量、品种、技术经济指标、操作的技术要求、经济效益等方面均优于常规的电炉冶炼法。所以当今世界上不锈钢总产量的四分之三以上由 AOD 法生产。

一、气体

AOD 法精炼的不锈钢 ,其气体含量明显地低于电弧炉返回吹氧法冶炼(以下简称电炉冶炼)的产品。我国 AOD 炉吹炼的几种不锈钢的气体含量列于表 8-8-7。由于氢的降低 ,不锈钢针孔缺陷明显减少。据介绍不锈钢的针孔与氢含量有明显的对应关系 ,当氢含量大于 6ppm 时 ,随氢含量的增加 ,针孔出现率急剧提高。

表 8-8-7

钢 号	吹炼气体	[O] _{ppm}	[N] _{ppm}	[H] _{ppm}
410	Ar	40 ~ 60	80 ~ 150	2
304	Ar	40 ~ 50	100 ~ 200	3
304	N ₂ 代 Ar	40 ~ 50	300 ~ 400	3 ~ 4
304L	Ar	40 ~ 60	100 ~ 200	3 ~ 4
304L	N ₂ 代 Ar	40 ~ 60	300 ~ 450	3 ~ 4
321	Ar	40 ~ 50	100 ~ 200	3 ~ 4
321	N ₂ 代 Ar*	40 ~ 50	250 ~ 400	3 ~ 4
国外水平		50 ~ 80	150 ~ 350	3 ~ 5

* 代氩率为 35%。

氮含量比电炉冶炼要低 30% ~ 60% ,降低氮含量对改进铬不锈钢冲击性能有重要作用。

氧含量大约比电炉冶炼低 25% ~ 30%。虽然 AOD 法常用单渣法操作 ,出钢时炉渣没有变白(实际上也很难变白) ,但是大量的分析结果表明 ,AOD 法精炼的钢 ,其氧含量不仅仅电炉冶炼的低 ,甚至比电炉加 DH 真空脱气的钢 ,还要低 10ppm。通常 AOD 炉出钢前钢液的氧含量为 70ppm 左右 ,浇注钢包中降到 50ppm 左右。

二、夹杂

由于在整个冶炼过程中 ,特别是在预还原和精炼时仍喷吹气体 ,所以 AOD 法所炼的钢中 ,基本上消除了大颗粒夹杂 ,细小夹杂也比电炉所炼的同钢种要低。夹杂物主要是由钙硅酸盐组成 ,其颗粒细小 ,分布均匀。AOD 法与电炉冶炼 304 钢的清洁度比较见表 8-8-8。

表 8－8－8 AOD 法与电炉法冶炼 304 钢的清洁度比较				
指标 工艺	总氧含量 ,%		视场玷污度 ,%	
	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差
电炉法	0.0062	0.0011	0.020	0.012
AOD 法	0.0055	0.0006	0.017	0.014

三、脱硫

AOD 法吹炼的还原阶段 ,具有极为优越的脱硫条件。由氧化钙系炉渣的脱硫反应分析可知 ,在冶炼的预还原和精炼阶段 ,具备了高温、高碱度、低氧势炉渣等热力学条件 ,高强度(0.45m³/t·min)的吹气搅拌创造了加速传质、扩大反应界面等动力学条件。因此 ,钢液能够被深度脱硫。对于超低硫的钢种 ,还可以采用双渣法 ,将钢中的硫脱到 10ppm 以下。这种深度脱硫的效果是不锈钢的真空精炼法所难以达到的。

AOD 法的脱硫效率极高 ,这可由下列的实测数据证明。入 AOD 炉钢液的原始含硫量高达 0.097% ,脱碳终了预脱氧并还原以氧化物形式存在于渣中的铬时 ,硫含量仍达 0.082% ,但是经过还原期渣钢的激烈搅拌 ,出钢后钢包中的硫含量已降到 40ppm。脱硫率高达 95%。再考虑到整个还原期仅为 20min 左右 ,所以这种方法的脱硫速率也是其他炼钢方法所不及的。

四、有害微量元素的去除

随着返回钢用量的增大 ,不可避免地导致诸如铅、铋、锑、锡等有害微量元素含量的增加。特别是铅 ,因为不少国家发展了含铅的易切削不锈钢 ,然而在废钢中 ,这类不锈钢难以和其他钢种分开 ,从而导致成品钢中铅含量的增加 ,而影响钢的热加工性能。在 AOD 法精炼中 ,能够有效地去除这些有害的微量元素。如我国的一座 18tAOD 炉所炼的不锈钢 ,这些有害元素一般都在 10ppm 以下。

五、机械性能

氩氧炉精炼产品的抗张和屈服强度可以达到电炉冶炼的同钢种的水平 ,延伸率和断面收缩率却略有提高。对铬 13 型的钢 ,由于夹杂级别的改善和氮含量的降低 ,其冲击韧性显著提高。例如其纵向冲击值几乎无例外地比电炉冶炼的产品提高了一倍。

此外 ,钢材的被切削性能较好 ,切削速率可以提高 ,刀具的磨损降低 ,工件表面的光洁度提高。

六、工艺控制方便 ,重现性好

AOD 法的另一个特点是工艺控制方便。如温度控制 ,调节气体输入量就可将熔池温度控制在预定的范围内。此外 ,当温度偏低时 ,可加硅铁 ,以硅氧化放热来提温。而温度偏高又可加废钢或矿石作为冷却剂。又如成分控制 ,只要知道炉内的钢液量和化学成分 ,就可在脱碳期内计算出总的冶炼时间和各成分所要求的调整数量。合金成分回收稳定 ,所以无论老厂或新厂 ,AOD 法的炼成率都是极高的。有些厂炼了上千炉从未出过成分废品。

由于工艺重现性好 ,因而有利于实现自动控制。

七、经济效果

与电炉冶炼相比 ,AOD 法具有以下经济效果。

由于 AOD 法精炼允许炉料中配入较高的碳 ,以及铬可以配到规格范围 ,因此可以大量使用不锈钢废钢和高碳铬铁 ,从而使炉料费用降低。炉料中配铬高 ,吹氧脱碳时铬的氧化损失又少 ,所以微碳铬铁的用量大幅度减少。若以我国一座 18tAOD 炉的生产数据为例(下同) ,可少用微碳铬铁 133kg/t。在 AOD 精炼时 ,电炉的主要任务是熔化废钢 ,所以电炉的冶炼时间缩短 ,电能消耗降低 112kWh/t ,电极消耗减少 0.3kg/t。AOD 法吹炼时 ,铬的回收率大于 98% ,若考虑到电炉初炼时铬的损耗 ,铬的总回收率仍可达到 96% ~ 97% ,这比电炉单炼时提高了 6% 以上。对有些钢种 ,可以用氮气来部分代替氩气 ,从而节约了氩气的费用。此外 ,钢中的氮还能部分地代镍。如炼 304 钢时 [N] 可代替 0.6% 的镍 ,从而每吨钢可节镍 6kg。冶炼中还可使用一定量的铬矿和不锈钢的磨屑 ,如每吨钢配入 30kg 铬矿 ,可降低费用 29.5 元/t ,配入 12kg 磨屑可降低费用 16.3 元/t。综上所述可使每吨钢的利润比电炉单炼时增加 267 ~ 657 元/t。此外 ,生产的低碳及超低碳不锈钢部分取代了进口 ,为国家节省了外汇 ,少用微碳铬铁和降低电极消耗的间接节电 ,都将取得可观的社会效益。

此外 ,用 AOD 精炼可提高电炉生产率 50% 左右。由于操作条件的改善 ,例如不再在电炉内吹氧脱碳 ,钢液温度较低等 ,使电炉的耐火材料单位消耗明显降低。AOD 炉的基建费用也较低 ,它的投资只有 VOD 炉的一半。

AOD 法精炼增加的主要消耗是氩气和耐火材料。18tAOD 炉的主要消耗指标列于表 8-8-9。这些消耗所增加的费用远低于上述所列的直接经济效益。所以这种方法颇受欢迎 ,是当前发展和推广最快的炉外精炼技术之一。

表 8－8－9 AOD 炉主要消耗指标

项 目	气 体 ,m³/t			炉 龄		铬回收率 %
	O₂	N₂	Ar	次	kg/t	
我国 18tAOD 炉	25	10	15 ~ 25	40	50 ~ 60	96.5
国外水平	24	11	8 ~ 20	50 ~ 100	7 ~ 9	97

第五节 AOD 与 VOD 的比较

AOD 和 VOD 两种方法都是当前精炼低碳钢种的主要方法。在初期 ,这两种方法的发展是相差不多的。但是七十年代中期以来 ,AOD 炉的发展速度就远远超出了 VOD 炉。设置 AOD 炉的年平均速度是 7.5 台 ,而 VOD 只有 2.5 台。更多钢厂选择 AOD 法的原因 ,有人归纳为：“AOD 法虽失去了真空所赋予的化学自由 ,却得到了真空所没有的操作自由”。具体来说 ,它能被直接观察 ,可以取样 ,好造渣 ,原材料适应性强 ,能接受 VOD 法倾向于不用的高碳钢液 ,在要求低含硫量时也可以达到。而且其远景是更容易实现计算机的动态控制。这两种方法的比较见表 8－8－10。

表 8－8－10 AOD 与 VOD 的比较

项 目		AOD 法	比较	VOD 法
操作条件	入炉钢液	[C]= 0.5 ~ 2.0% [Si]= 0.03 ~ 0.5% [Cr]规格中上限 [S]< 0.15%	>	[C]= 0.3 ~ 0.5% [Si]= 0.3% , [Cr]规格中上限 [S]< 0.06%
	成分控制 温度控制	大气中操作 ,取样调整方便 用改变氧氩比和冷却剂控制	> >	真空下操作 ,只能间接控制调温不方便
质量	脱氧	40 ~ 80ppm	=	40 ~ 80ppm
	脱硫	脱硫率大于 80 ~ 90%	>	脱硫率不及 AOD 法
	脱氢	[H]< 4ppm	<	[H]< 2ppm
	脱氮	[N]< 200ppm	<	[N]= 50 ~ 80ppm
	脱碳	脱碳量大 ,脱碳速率高 ,	>	脱碳量一般不超过 0.5%
成本	原材料	可用高碳铬铁部分铬矿等 ,费用低	>	返回钢和碳素铬铁
	操作费	Ar 和 Si - Fe 用量大	<	用量少
	铬总回收率	96 ~ 98%	=	96 ~ 98%
	设备费	低	>	高

项 目		AOD 法	比较	VOD 法
其 他	冶炼周期	80 ~ 120min	<	60 ~ 90min
	提高电炉生产率	50 ~ 100%	>	30 ~ 50%
	适用性		<	较 AOD 法强
	对环境影响	要设除尘系统	>	不需要设除尘系统

注：> 代表高于或优于；
“<”代表低于或差于。

AOD 法虽有许多优点 ,但是也存在一些不足。如炉龄低 :吹炼过程中铬的氧化也较多 ,必须在最后阶段用大约 10kg/t 硅铁来还原渣中的铬 ;由于加入硅铁和石灰会使〔 H 〕回升 ;在炼超低碳和氮的钢种方面也赶不上 VOD 法 ,据介绍 VOD 法可生产〔 C 〕+〔 N 〕< 200ppm 的超纯铁素体不锈钢 ;此外 ,在吹炼过程中炉子的颤动 ,以及炼成后还要经过出钢等。所有这一切都影响到 AOD 法的效果 ,也是 AOD 法改进和提高的方向。

第九章 钢桶吹氩及吹氧升温精炼法

第一节 钢桶吹氩

在大气压下,将氩气吹入钢桶进行钢水氩气处理,可以均匀钢水的温度和成分,加速合金料或脱氧剂的熔化,减少钢中氧化物夹杂的含量及改善钢水的凝固性能,为此,钢桶吹氩技术在世界各国的冶金工业中得到比较广泛的利用。

一、吹氩的方式

钢桶吹氩的方式基本上分为两种:一种是使用氩枪,另一种是使用透气砖。

(一)氩枪吹氩

吹氩的氩枪是由厚壁钢管和高铝或粘土袖砖组成,顶端装有一个多孔塞砖。氩气是由钢管引入,经顶端的多孔塞砖吹入钢液中。氩枪装在平台上并由机械带动可升可降。当出钢后装满钢液的吊车运行到氩枪下时,下降氩枪入钢液中吹氩。目前国内有不少转炉厂就是采用此种方法吹氩搅拌钢液的。也有些钢厂在炼钢车间内按装一个吹氩台,由吊车将钢桶吊过来进行吹氩搅拌。这样就不须给每个炉子都配备一支氩枪了。吹氩台如图 8-9-1 所示。

(二)透气砖吹氩

吹氩用的透气砖是由耐火的高铝质或镁质材料制成。其形状如截头圆锥,外面包有钢套。钢套底部焊有空心螺栓,如图 8-9-2 所示。用钢套包住透气砖,是为了防止氩

气从透气砖的边上跑掉,使全部氩气从透气砖上面流出以搅拌钢液。透气砖的安装位置,通过模拟试验得知:为了搅拌钢液的最佳位置是在钢桶底半径的中心。此时,吹入的氩气带动钢液运动,生成大的涡环流动,促进了钢液的混合,特别是对底部钢液的搅拌有利。如果透气砖的位置过份的靠近桶壁时,所产生的流动虽对搅拌有利,但对桶壁有冲刷,对桶衬的寿命不利。所以,最佳的吹气位置应是在钢桶底半径的中心。这是目前使用最多的情况。此外,还有将透气砖安装在钢桶壁上的。

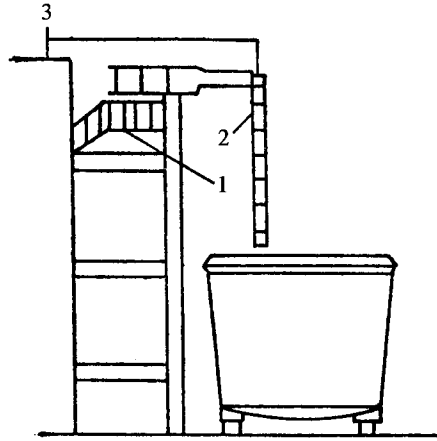


图 8-9-1 吹氩台

1—吹氩平台 2—氩枪 3—流量计

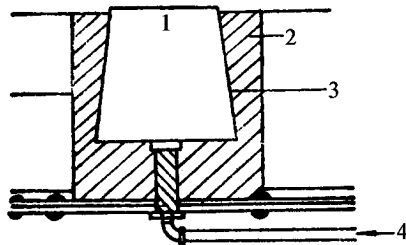


图 8-9-2 透气砖安装图

1—透气砖 2—耐火泥 3—钢套 4—通氩管

不同吹氩方式对比如表 8-9-1 所示。

由表 8-9-1 可以看出,采用底部透气砖吹氩搅拌比较方便,可以随时吹氩。它适用于对钢液质量有较高要求的场合,特别是当钢液还须进一步精炼时,一般都采用底部吹氩的方法。

表 8－9－1 钢桶吹氩方式的对比

特 点	氩气吹入方式		
	透气砖		氩枪
	装在桶底	装在桶壁	
设备投资费用	少	少	高
随时吹气的可能性	可以	可以	不可以
钢液搅拌情况	好	中等	好
是否出现金属裸露区	出现	出现	出现
装透气砖及砌桶衬时要附加的劳动	可能很多	少	不必要
透气砖附近出现漏钢	当砌砖不按规程操作时要出现		不出现
吹气时损坏的可能性	具有中等可能性		不可能

二、吹氩工艺

（一）吹氩的压力和流量

大气下吹氩搅拌钢液时 ,希望不吹破钢液面上覆盖的渣层 ,这样可以减少大气对钢液的二次氧化 ,又达到了搅拌钢液去除夹杂物的目的。为此要求吹入的氩气压力不要太大 ,一般以能克服钢液的静压力 ,刚好能在透气砖表面上形成气泡为合适。如压力过大时 ,气体会迅速地冲出钢液 ,要冲破钢液面上覆盖的渣层 ,而使钢液受到大气的氧化。可见 ,大气下吹氩时 ,氩气的压力要与钢液的静压力相适应 ,如钢液深 ,则所需的氩气压力大 ,反之 ,所需氩气压力小。一般随钢液量而变化 ,波动在 0.1 ~ 0.3 MPa 表压之间。氩气压力的上限是钢水不发生喷溅。

大气下搅拌钢液所需的流量与钢液量有关。用透气砖吹氩时所用的吹氩强度一般为 1 ~ 5 L/(t · min)。吹氩时间一般为 3 ~ 5 min。

（二）吹氩搅拌时钢液温度的变化

吹氩搅拌要引起钢液温度的下降。不同容量 ,不同吹气量时钢液温度降低情况如图 8－9－3 所示。随着气体消耗量增加 ,温降速度增加。随着钢液量加大 ,温降速度降低。对于 200t 钢液当吹氩量为 500L/min 或 2.3L/(t · min)时 ,金属的温降速度为 1.5℃/min。而当 40 吨钢液用 200L/min 或 5L/(t · min)氩气吹时 ,其温降速度为 4℃/min ,可见 ,钢桶吹氩的平均温降速度为 2 ~ 4℃/min 并与氩气的消耗量有关。吹氩搅拌时 ,钢液的冷却与其表面的热辐射及桶衬的蓄热、热传导有关。如吹氩时钢液表面不发生强烈的

沸腾,在使用前加强钢桶的烘烤,则可降低钢液的温降速度,一般此种温降速度为 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

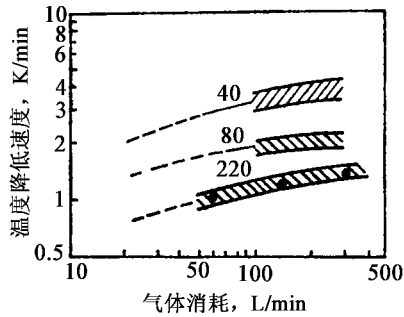


图 8-9-3 不同吹氩量与钢液的温降速度

加冷却剂及合金元素可加速钢液的温降,一般 1kg 小块废钢加入 1t 的熔融钢液中,可使温度降低 1.7°C 。

(三) 炉渣的影响

吹氩搅拌钢液要加速钢渣之间的传质。已脱氧钢在含有氧化铁及氧化磷渣下吹氩搅拌时,要发生回磷及脱氧剂的烧损。 250t 纯氧顶吹转炉钢带氧化渣与去掉氧化渣并加入 $1\sim 3\text{t}$ 石灰吹氩结果示于图 8-9-4。从图可看出,带氧化渣吹氩时,随着渣层厚度的增加,回磷量增加。若去掉氧化渣并少量加入石灰时,则回磷量很小,为 $0\sim 0.002\%$ 。

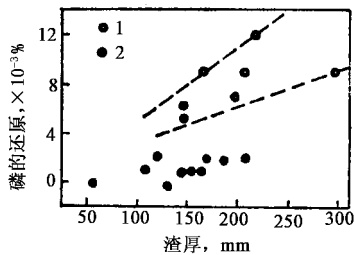


图 8-9-4 钢桶吹氩时回磷与渣的关系

1—带渣吹氩,渣面加 $0\sim 1\text{t}$ 石灰 2—去渣吹氩,渣面加 $1\sim 3\text{t}$ 石灰

185t 转炉钢吹氩时,钢中铝的氧化情况示如图 8-9-5。从图可看出,随着渣中铁含量的增加,钢液中铝的氧化速度增加,图中左下角为出钢时不带渣,此时铝的氧化速度最慢。可见去掉氧化渣,另加新渣搅拌对提高钢的质量意义很大。

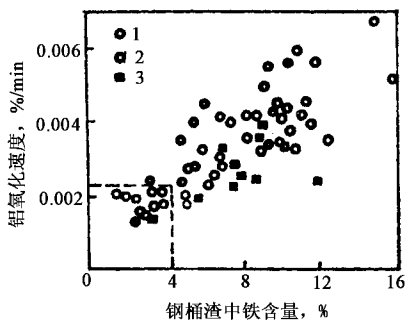


图 8-9-5 渣中铁含量与钢中铝的氧化速度

1—0.06% Al 2—0.04~0.06% Al 3—<0.04% Al

(四) 桶衬材料的影响

吹氩搅拌不仅提高钢渣之间的传质,而且也加速了钢、渣与桶衬的作用。为此,在吹氩搅拌时要采用比较稳定的碱性桶衬,这对提高钢材质量有较大的好处。前苏联一家钢厂对电炉生产的轴承钢(GCr15)进行了钢桶吹氩搅拌。吹氩量为 $0.6\sim0.7\text{m}^3/\text{t}$,在桶底用透气砖吹氩10min。吹后浇成3.5t的钢锭。吹氩前后渣成分变化如表8-9-2。从表可以看出:在碱性桶衬中吹氩后,渣中硫有所增加,在粘土桶衬中吹氩后渣中 SiO_2 增加了。在轧后的 $\phi 52\sim 72\text{mm}$ 材上取样作金相评级,结果列于表8-9-3。从表可看出:用铬镁砖桶衬吹氩处理时,其结果优于粘土砖。由此可见,吹氩处理时桶衬影响是很大的,吹氩时的强烈搅拌,加速了钢液与炉渣、桶衬之间的作用。此时必须采用比较稳定的桶衬材料才能保证吹氩处理的结果。

表 8-9-2 轴承钢吹氩前后在不同桶衬中渣成分的变化
(分子为吹氩前,分母为吹氩后)

CaO%	MgO%	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	FeO%	S%	碱度	桶衬
$\frac{58.2}{52.4}$	$\frac{11.8}{11.7}$	$\frac{12.6}{15.6}$	$\frac{16.3}{15.9}$	$\frac{1.5}{1.0}$	$\frac{0.10}{0.25}$	$\frac{4.19}{4.16}$	铬镁砖
$\frac{42.6}{42.0}$	$\frac{18.6}{19.3}$	$\frac{14.0}{14.4}$	$\frac{17.0}{16.5}$	$\frac{1.8}{1.6}$	$\frac{0.14}{0.24}$	$\frac{2.86}{2.91}$	铬镁砖
$\frac{48.2}{47.2}$	$\frac{15.0}{16.8}$	$\frac{13.8}{12.7}$	$\frac{17.3}{18.2}$	$\frac{1.7}{1.3}$	$\frac{0.05}{0.11}$	$\frac{3.49}{3.72}$	铬镁砖
$\frac{44.6}{44.7}$	$\frac{19.4}{16.1}$	$\frac{13.6}{15.4}$	$\frac{18.7}{19.6}$	$\frac{1.8}{1.2}$	$\frac{0.15}{0.21}$	$\frac{3.28}{2.90}$	粘土砖
$\frac{43.8}{43.2}$	$\frac{18.6}{17.9}$	$\frac{14.1}{15.5}$	$\frac{15.5}{16.1}$	$\frac{1.7}{1.5}$	$\frac{0.23}{0.26}$	$\frac{3.10}{2.78}$	粘土砖
$\frac{46.9}{45.0}$	$\frac{11.6}{8.5}$	$\frac{16.6}{18.1}$	$\frac{16.1}{18.9}$	$\frac{0.5}{0.8}$	$\frac{0.36}{0.24}$	$\frac{2.83}{2.47}$	粘土砖

表 8-9-3 $\phi 52 \sim 72\text{mm}$ 材金相平均评级

氧化物	硫化物	点状	吹氩桶衬
1.16	1.32	0.37	铬镁砖
2.28	1.82	1.25	粘土砖

三、吹氩的效果

(一) 均匀钢液温度

钢液在炼钢炉内的温度是不均匀的。出钢后在盛钢桶内的温度也是不均匀的。一般说来,在盛钢桶中心部位钢液的温度是比较高的,而在靠近桶壁及最下层钢液,由于散热,温度是比较低一些的。在这种不均匀的温度下浇注,要引起铸件表面及内部缺陷。为此,要得到良好表面质量及内部结构的铸锭,就应使钢液的温度均匀或处于很小的被动范围内。这是模铸及连铸的要求。100t 平炉在浇注时温度的变化示于图 8-9-6,从图可看出,在不吹氩的炉次,开始钢液流出的温度为 1545℃。以后温度逐渐增加至 1570℃,然后重新下降,这是由于桶中钢液减少,单位钢液的辐射损失增加所致。底部钢液温度较低的原因,是最先进入的钢液遇冷散热比较快,而特别冷的与比较致密的钢液易于下沉到桶底。由于温度差要引起流动,这种流动的速度比较明显,有人计算了 2m 高 1600℃ 的钢液,其流动速度为 30m/min。较冷的钢液留在底部并继续散热,从而有可能在底部冻结一层。相反,吹氩搅拌的钢液浇铸时不发生此种较大的温度差。在吹氩后的浇铸过程中钢液温度缓慢下降,较冷的与较热的互相混合均匀。由于吹气表面散热,所以,温度变化线位于不吹气的下面。

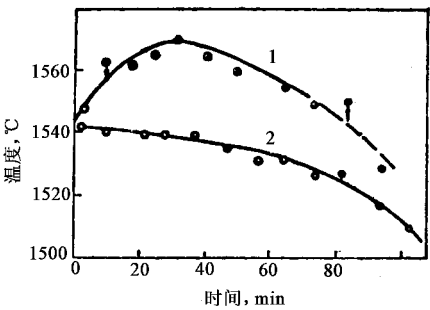


图 8-9-6 浇注时钢液温度的变化

1—不吹氩 2—吹氩

图 8-9-7 是 200t 转炉出钢后温度变化情况,不吹气搅拌的温差很大为 50℃,而吹

气搅拌的在 20℃ 以内。由此可见 ,吹氩搅拌均匀钢液的作用是非常明显的。

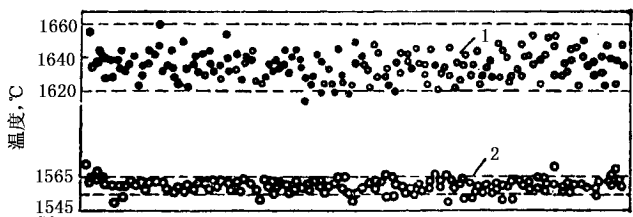


图 8-9-7 转炉钢液温度

1—不吹氩 2—吹氩 ;点线为要求的温度上下限

由于吹氩搅拌可以准确控制桶中钢水的温度。从而能改善沸腾钢浇铸时 ,在模内的沸腾情况 ,这样能减少与模壁焊接的锭子数。改善锭子表面质量及提高锭模的使用寿命 ,总之 ,控制温度对模注及连铸都是非常必要的。

(二)均匀钢液成分

盛钢桶中的钢液成分是不够均匀的。如图 8-9-8 所示 ,吹氩搅拌前后转炉钢液中碳含量的波动情况。从转炉内取出的试样中碳含量波动在 0.06 ~ 0.16% 之间 ,而在合金化及吹氩后 ,碳的波动减小在 0.15 ~ 0.20% ,其中 90% 的炉号碳含量为 0.16 ~ 0.18% ,由此可见吹氩搅拌可均匀成分。吹氩搅拌对钢中铝的影响示于图 8-9-9。从图可见 ,搅拌时间大于 4min 时连铸坯上铝含量很均匀 ,否则将出现差别。

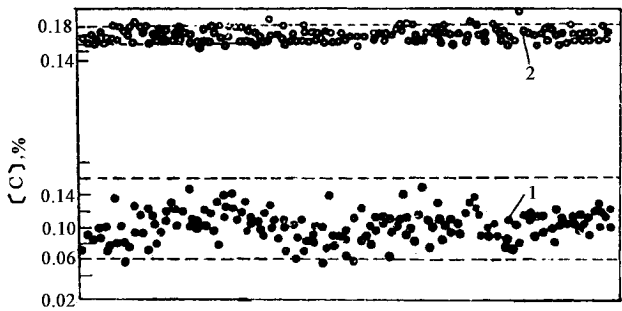


图 8-9-8 转炉钢的碳含量

1—未吹氩搅拌的试样 2—吹氩搅拌的试样

往桶中加入定量铝 ,吹氩搅拌的试样[Al]波动在 0.015 ~ 0.055% 之间 ,如图 8-9-10 所示 ,而不搅拌的[Al]波动范围增大至 0.005 ~ 0.080%。由此可见 ,吹氩搅拌的重要性。

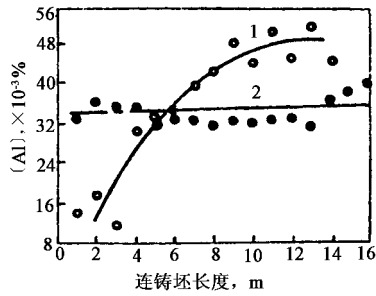


图 8-9-9 搅拌时间对连铸坯中铝含量的影响

1—吹氩时间小于 4min 2—吹氩时间大于 4min

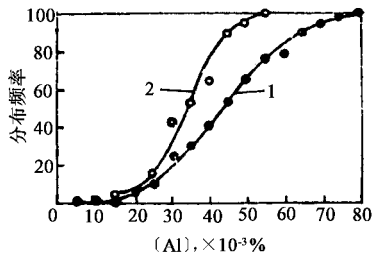
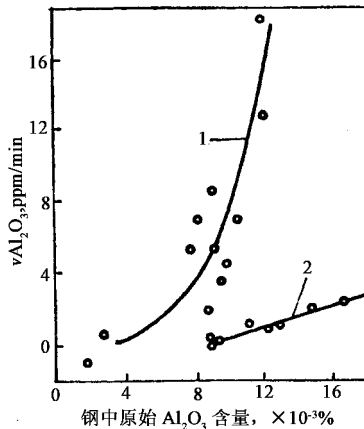


图 8-9-10 吹氩对钢中铝含量的影响

1—不吹氩 2—吹氩

炼高硅钢时一定要进行桶内搅拌,否则钢锭内的硅偏析达 0.30%,而搅拌时硅偏析降至 0.05%。国内某钢厂在炼 12MnB 钢时,第一、二盘接样分析时 $[Mn]$ 相差 0.50%,而当钢锭开坯取样时相差更大,达 1.00%。但吹氩搅拌后化学成分基本一致,可见,吹氩搅拌有利于合金元素的均匀化。

图 8-9-11 搅拌对钢中 Al_2O_3 粒子上浮速度的影响

1—吹氩 2—不吹氩

(三)降低非金属夹杂物含量

吹氩搅拌要加速夹杂物的聚合及上浮。从图 8-9-11 即可看出 :当吹氩搅拌后 ,在原始含量相同时 , Al_2O_3 的上浮速度增加数倍。沸腾钢吹氩搅拌时 ,也有类似的效果 ,如图 8-9-12 所示 ,可提高沸腾钢的纯净度。

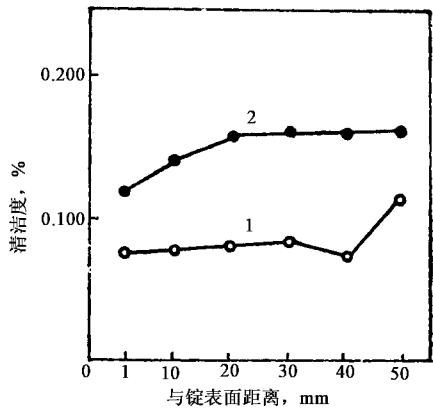


图 8-9-12 吹氩处理对沸腾钢锭纯净度的影响
1—吹氩 2—不吹氩

对转炉钢吹氩处理 ,可使夹杂物下降。现将不同钢种夹杂物的下降情况列于表 8-9-4。从表可见 :16Mn 钢吹氩后夹杂物的下降率最大 ,达 45%。其中 Al_2O_3 下降 44.5% , SiO_2 下降 5.8%。

电炉钢吹氩搅拌 ,同样能提高纯净度 :轴承钢吹氩处理后 ,可使大颗粒夹杂物减少 ,氧化物夹杂下降及一次合格率提高 10%。

表 8-9-4 转炉钢吹氩后夹杂物的下降情况

钢种	夹杂物总量 平均降低 ,%	降低率 %	Al_2O_3 平均降低 ,%	降低率 %	SiO_2 平均降低 ,%	降低率 %
20MnSi	0.0045	28	0.0062	47	0.00083	41.5
16Mn	0.0081	45	0.0068	44.5	0.00011	5.8
D21P	0.0045	9.77	0.0053	16	0.00220	20

(四)改善钢液的流动性

吹氩处理后 ,钢液的密度稍有增加(由 7.8619 增至 7.8721 或 8.3275 增至 8.3405 kg/m^3) ,表面张力增加 ,运动粘度降低 ,导磁率增加。由于流动性改善 ,从而改善

了钢液的凝固性能,使钢锭表面质量改善,内部缺陷减少,钢锭的收得率提高,直接经济效益增加。

国内某厂对普通沸腾钢、镇静钢、硅钢及锅炉钢等 13 个钢种、数万吨钢液进行吹氩后,使合格率由 97.98% 增至 98.86%。

前苏联对 Cr23Ni18 进行吹氩试验后,由于钢液流动性改善,质量提高,使钢管生产的消耗系数由 1.216 降低至 1.084。

国外对轴承钢 100Cr6 进行了吹氩试验:钢是在 30t 电炉用氧化法冶炼的,扒掉氧化渣,预脱氧及合金化,造白渣出钢。出钢温度为 1580℃。在白渣下吹氩,氩气压力使渣发生摆动,而不吹破渣皮为度。温度降低视吹入时间长短波动在 20~50℃,由于吹氩后流动及凝固性能改善,使钢锭的废品率降低如图 8-9-13 所示。从图可看出:吹氩处理使钢锭缺陷废品减少三分之一左右。其中疏松、缩孔等内部缺陷比表面缺陷下降更多一些。

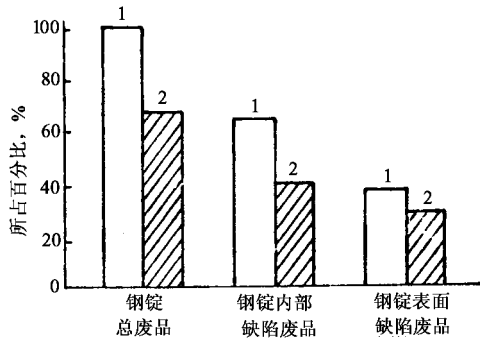


图 8-9-13 吹氩处理对 100Cr6 钢废品的影响

1—不吹氩 2—吹氩

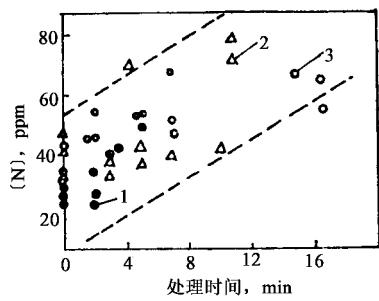
成都无缝钢管厂通过吹氩处理降低了易裂钢锭的废品率,由不吹氩的 3.51%,下降至 0.197%,与此同时,简化了易裂钢锭的退火工艺,使生产周期平均缩短 30h,从而提高了生产率。

吹氩处理后,由于浇注温度降低,可以阻止柱状晶的发展,从而可以提高连铸钢坯的内部及表面质量。

总之,大气下钢液吹氩处理具有设备简单,操作容易,效果明显等优点。

第二节 用氮气处理钢液

用氮气代替氩气处理钢液时 ,要在钢液中增加[N]。且钢中的[N]量随温度的提高及吹氮时间的延长而增加 ,如图 8-9-14 所示。当温度大于 1575℃时 ,可使钢中[N]增加 0.003% ,对于薄板钢[N]增加 0.001% 时 ,要使屈服极限平均增加 2.5H/mm² ,可见 ,此时就不能以氮代氩处理钢液了。



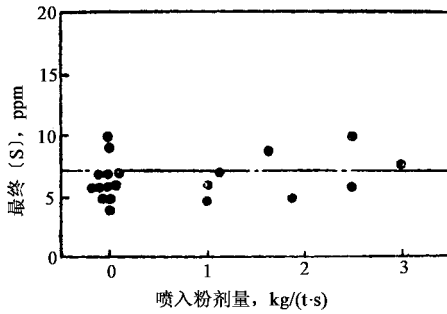


图 8-9-15 脱硫率与喷吹粉剂的关系

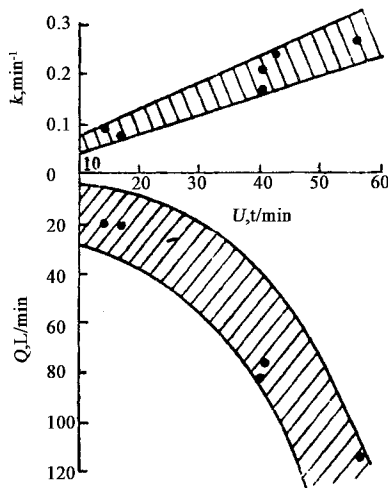
在钢桶中钢液的氧含量实际上是高于与脱氧元素相平衡的含量。这是因为脱氧产物都悬浮于钢液中,所以必须使这些脱氧产物上浮去除之,在搅拌的熔池中 Al_2O_3 与 SiO_2 上浮的比例增加,这些夹杂物上浮的数量与渣、耐材质量及搅拌情况有关。在实际中脱氧产物的上浮分离可用下公式表示

$$x_t = x_0 \exp(-\kappa t)$$

式中 x_0 ——原始夹杂物含量;

x_t —— t 时刻夹杂物浓度;

κ ——表观分离速度常数。

图 8-9-16 VOD 过程中吹氩强度 Q 、循环流量 U 与 κ 的关系

影响表观分离速度常数的因素较多,搅拌强度是其中重要因素之一。增加吹氩强度,如图 8-9-16 所示,可提高 VOD 过程中的 κ 值。有利于夹杂物的上浮。但在大气

下吹氩时,吹氩量的增加有一定的限度。若吹氩量过大,使钢液面露在大气下,如图 8-9-17 所示,不仅钢液要增氮,还要使钢液中溶解的铝含量降低,这是不可取的。由此可见,大气下吹氩时,其流量受到一定的限制。为了进一步提高钢液质量,人们在钢桶上加盖吹氩处理以减少大气的氧化作用,从而出现了各种密封或带盖吹氩处理钢液的工艺。

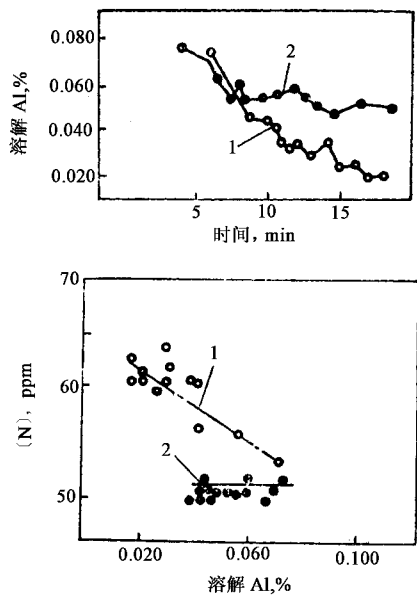


图 8-9-17 吹氩搅拌时间、钢液面露出程度对钢中铝和氮含量的影响
1—吹氩量 10L/min ,钢液面露出 10% 2—吹氩量 3L/min ,钢液面不露出

第四节 带盖钢桶吹氩法的设备和工艺

一、吹氩设备

带盖钢桶吹氩法所用的钢桶,其浇钢口必须采用滑动水口。不能用掏塞杆式的开浇口,在钢桶底部半径中心处开口,以安装吹氩用透气砖。

在钢桶上部有钢桶盖,此盖外壳为钢板焊成,内衬耐火砖。盖上一一般有测温口(也可取样及微合金化)及窥视孔。在制作中要求钢桶与盖比较密封。

钢桶内衬一般采用熔点高,性能比较稳定的高铝砖,最好不要采用粘土砖,因为粘土

砖中含 SiO_2 高,吹氩搅拌时要给钢液供氧。

吹氩用透气砖一般采用含 Al_2O_3 大于 85% 的高铝砖。在使用时,透气砖周围先用 0.5mm 的薄铁皮全部包紧焊好,只留下与钢液接触的一端不包铁皮,与此相对的另一端焊一个吹氩嘴,以便与氩气管连接。

钢桶盖上的合金投入口,要求设在吹氩口的上方,这样有利于合金的均匀熔化。带盖钢桶吹氩法的简图示于图 8-9-18。

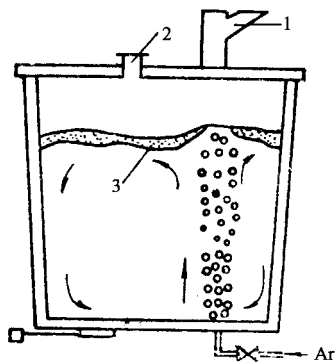


图 8-9-18 带盖钢桶吹氩法简图

1—合金加入口 2—测温及窥视孔 3—合成渣

二、吹氩工艺

(一) 吹氩量

由于 CAB 是靠合成渣处理钢液的,为了提高处理钢质量,必须保证充足的钢渣之间的搅拌。在钢液温度允许的条件下必须加强吹氩,以促进钢渣之间接触,保证钢液的脱氧、脱硫及去除夹杂过程的顺利进行。

吹氩量国外报导为 $10 \sim 32 \text{ L/t}$,国内钢厂有的用量为 $10.4 \sim 17.4 \text{ L/t}$,也有的用量大于此数。

足够的吹氩量,可以保证钢渣之间的良好搅拌,促进夹杂物的上浮,特别是 Al_2O_3 的上浮速度,如图 8-9-11 所示,吹氩能加速其上浮去除。但吹氩量的增大,要与钢液温度相配合,过大时,钢液温降太大,不利于下一步浇注。此外,还应特别注意到开盖以后一定要停止吹氩,以避免钢液的二次氧化。

(二) 吹氩搅拌时桶内气氛的变化

钢桶加盖吹氩后,桶内气氛的变化如图 8-9-19 所示。由于加盖吹氩,防止了空气

的进入。从图可看出,吹氩后 1~2min,桶内气氛中氧含量就减少至几乎完全消失。而 CO 、 CO_2 及 Ar 量逐渐增加。由此可以看出,吹氩后 2 分钟,桶内气氛就变成还原性的了,这是加盖吹氩的作用。由于加盖,就能保证桶内的还原气氛,有利于钢液的精炼。在钢液温度允许的条件下,可以适当增加吹氩量,或延长精炼的时间,这样就更有利于钢液质量的提高。

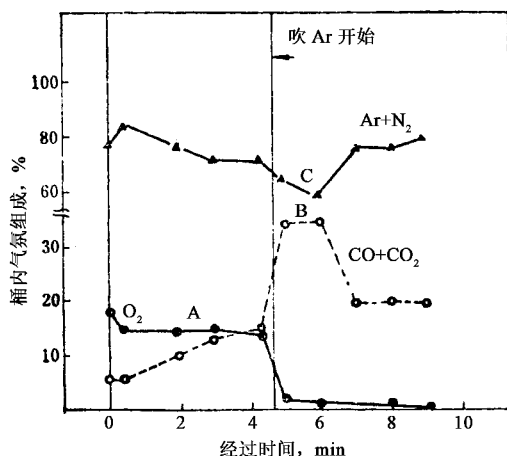


图 8-9-19 带盖钢桶吹氩时桶内气氛的变化

(三) 吹氩搅拌时钢液的温降及处理时间

带盖钢桶吹氩处理过程中,由于加盖可起保温的作用,处理中钢液温降较慢,对 100 吨钢桶而言,其平均温降为 $1.5 \sim 1.8^\circ\text{C}/\text{min}$ 。由于温降较慢,一般处理时间为 13~15min,处理过程中钢液的温降速度还与钢桶烘烤温度有关。按国内的经验,要求钢桶的烘烤温度大于 700°C 。停止吹氩的温度,要求达到钢液的浇注温度。可见吹氩处理的时间与钢液的温降密切相关。

(四) 处理用渣成分

在带盖钢桶吹氩处理过程中,要采用含氧低的合成渣或还原渣对钢液进行处理。顶吹转炉的氧化渣一定要扒掉,再加入合成渣进行吹氩处理,对合成渣的要求是熔点低与流动性好,对上浮夹杂物有较好的吸收能力。一般用渣的成分为 $\text{CaO}:\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3 = 40:40:20$ 。如要求脱硫时,可以适当地提高渣的碱度。

渣中 FeO 含量,影响钢中总氧量。为了降低处理后钢中氧含量,要求渣中 FeO 含量要低于 1~2%。不同桶衬时,钢中氧含量与渣中 FeO 的关系示于图 8-9-20。从图可看出:当渣中 FeO 为 1~2% 时,钢中氧含量可低于 40ppm。

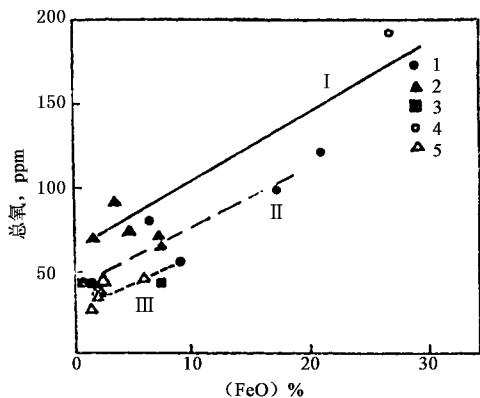


图 8-9-20 带盖钢桶吹氩时渣中氧化铁与钢中总氧含量关系

I—酸溶 Al0.030% 以下的粘土砖；

II—酸溶 Al0.030% 以上的粘土砖；III—高铝砖

包衬	氧化渣	I 型渣	II 型渣
粘土砖	1	2	3
高铝砖	4	5	

第五节 吹氩效果

一、降低钢中氧含量

中碳铝脱氧钢及铝、硅脱氧钢经带盖钢桶吹氩及合成渣处理后 ,钢中氧含量的变化示如图 8-9-21 ,从图可看出 ,经过 17min 吹氩处理 ,可使钢中氧含量降至 30ppm 以下。

国内用低碱度渣(CaO/SiO₂ ≈ 2)带盖钢桶吹氩处理轴承钢 ,可使钢中氧含量降到 20ppm 以下 ,平均达到 16ppm ,从而使钢材的疲劳寿命提高 83% 以上。

二、钢中夹杂物的变化

经吹氩处理后 ,钢中夹杂物降低。特别是 Al₂O₃ 系夹杂物 ,其变化情况示于图 8-9-22。经吹氩处理 15min 后 ,钢中大于 20μm 的夹杂物已基本去除。从图还可看出 :Al

脱氧钢的处理效果优于 Al-Si 脱氧钢。钢中 Al_2O_3 夹杂物降低,不仅使钢质提高,钢坯表面缺陷改善,而且有利于浇铸过程的顺利进行。特别对连铸有利,可使中间包水口基本上不发生堵塞。表 8-9-5 为立弯式连铸机中间罐水口堵塞指数。从表可看出,经带盖钢桶吹氩处理后,水口堵塞现象得到改善。

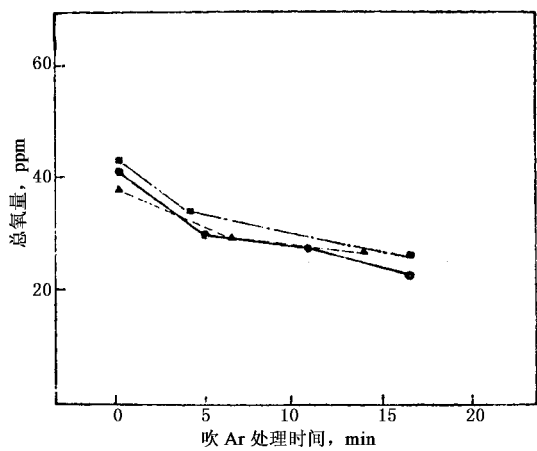


图 8-9-21 钢中氧随时间的变化

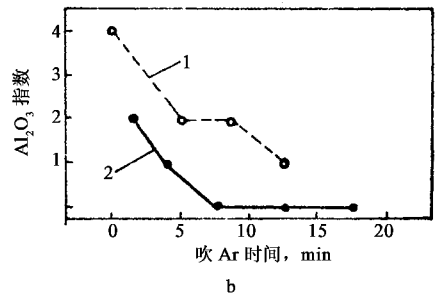
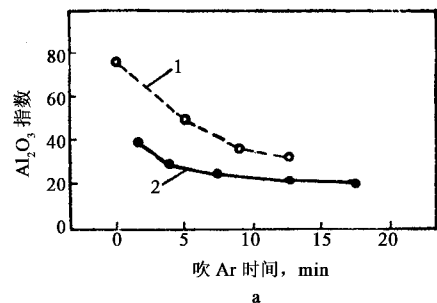


图 8-9-22 处理中 Al_2O_3 的变化

a— $10\mu\text{m}$ 以下杂质 b— $10\sim 20\mu\text{m}$ 的变化

1—Al 脱氧钢 2—Si、Al 脱氧钢

表 8-9-5 立弯式连铸机中间罐水口堵塞情况
(以 40mm 水口第二次使用堵塞指数为 100% 计)

钢液处理	使用次数		
	第一次	第二次	第三次
带盖吹氩	1	46	94
不处理	28	100	—

三、钢中元素的变化

在吹氩处理过程中,会使加入合金元素的收得率提高,如表 8-9-6 所示。值得指出的是:低碳铝脱氧钢或硅,铝脱氧钢吹氩处理时钢中酸溶铝有减少的倾向。对铝有严格要求的钢种,在处理时,需要考虑铝的加入量。

表 8-9-6 吹氩处理时合金元素的收得率

成 分	镇静钢		沸腾钢	
	吹氩处理材,%	未处理材,%	吹氩处理材,%	未处理材,%
C	100	50 ~ 80	45 ~ 78	38 ~ 83
Si	100	100	90 ~ 100	80 ~ 100
Mn	100	50 ~ 100	80 ~ 90	80 ~ 100
S	100	60 ~ 92	100	40 ~ 100
Al	50 ~ 70	40 ~ 50	—	—
Ti	100	50 ~ 80	—	—

带盖钢桶吹氩法具有设备简单和操作容易的特点。由于吹氩时桶内气氛中氧含量降至 1% 以下,精炼钢液处于还原的气氛中,再加上合成渣的精炼效果,从而可使钢液内部及表面质量提高,钢中夹杂物含量,特别是 Al_2O_3 明显下降。可见带盖钢桶吹氩法是生产优质钢比较理想的方法。

四、透气砖的寿命

所有的钢液搅拌,除电磁搅拌外,都是靠安装在钢桶底部的透气砖吹氩气进行搅拌的。如透气砖本身材质不好,耐火度不高,或安装不当,就有可能发生漏钢的事故。如何防止它,一直是冶金工作者非常关心的问题。经过试验研究得出从透气砖材质、结构以及吹氩过程的操作上采取措施,可以提高透气砖的使用次数及避免漏钢事故。

(一)采用耐火度高的材料

日本千叶制铁所将透气砖的座砖,改为耐火度高的 ZrO_2 砖,增加透气砖的长度,使

100t 钢桶透气砖长为 256mm。与此同时采用微细气孔的刚玉质砖 ,以上措施可使透气砖的使用次数增至 38 次。

(二)吹氩操作中对透气砖的管理

在吹氩操作中要注意做到：

- 1)每次浇注完毕 ,一定要用氧气烧掉透气砖上残存的钢渣；
- 2)更换透气砖时 ,尽可能不在刚浇完 ,钢桶温度很高的条件下进行 ,一定要等钢桶温度下降后 ,再更换透气砖；
- 3)控制透气砖的使用厚度。如 100t 钢桶采用的透气砖长度为 265mm ,当使用至 125mm 时 ,即停止使用 ,而更换新透气砖。

由于采用以上措施 ,创造了 2100 次无漏钢事故。

日本的千叶制铁所又研制了一种比较安全的透气砖 ,其结构如图 8 - 9 - 23 所示。这种透气砖分上、下二层。上层靠近钢液为透气部分。下层是不透气的耐火砖。在两层之间装有通氩气的金属小管。由于金属管的冷却作用 ,可使侵入小管的钢液立即凝固 ,从而可以防止漏钢。这种透气砖在形状上有一定的要求。为了防止漏钢 ,要求与钢液接触端 ,小于与氩气管道相连的安全端。

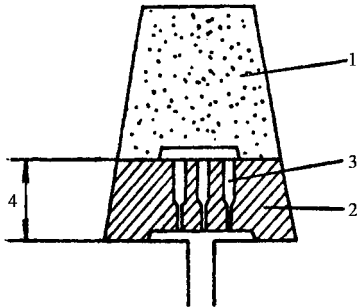


图 8 - 9 - 23 安全型透气砖(直径上端大于下端)
1—透气部分 2—非透气部分 3—导管 4—砖全残厚部

第六节 吹氧升温精炼法

一、成分调整密封吹氩法(CAS)

成分调整密封吹氩法是用来在钢桶内对合金元素含量进行微量调整的方法。如图 8

- 9 - 24 所示 ,它的作法是 将一个带盖的耐火材料管插入钢液内吹氩口的上方 ,并挡掉炉渣。管内可加各种合金元素进行微合金化。由于钢液受底部透气砖的搅拌从而可以提高合金元素的回收率 如表 8 - 9 - 7 所示 ,在处理的 7 ~ 8min 内能使总氧降到 40ppm 以下。

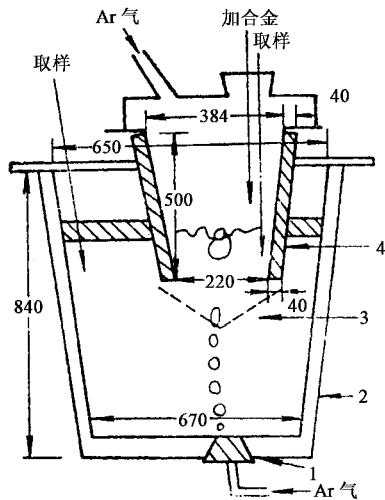


图 8 - 9 - 24 成分调整密封吹氩法(CAS)

1—透气砖 2—盛钢桶 3—装入盛钢桶时的档渣帽；
4—高铝耐火管(Al_2O_3 85% , SiO_2 4%。)

表 8 - 9 - 7 CAS 法的合金元素回收率实际结果

成分	镇静钢		半镇静钢		沸腾钢	
	CAS 材 %	比较材 %	CAS 材 %	比较材 %	CAS 材 %	比较材 %
C	100 ^①	50 ~ 80	75 ~ 90	68 ~ 84	多 53 ~ 78 ^② 少 45 ~ 50 ^③	38 ~ 83
Si	100	100	100	80 ~ 100	90 ~ 100	80 ~ 100
Mn	100	50 ~ 100	50 ~ 95	40	80 ~ 90	80 ~ 100
S	100	60 ~ 92	100	40 ~ 100	100	40 ~ 100
Al	80 ~ 90	40 ~ 50				
Ti	100	50 ~ 80				

①Si - Mn 脱氧 ②多 = 0.06% ③少 = 0.04%

二、吹氧升温精炼法

近年来 CAS 法又有了新的发展 ,即在插入钢液中的耐火材料管盖上插入氧枪 ,如图

8-9-25 所示 ,而成为 CAS - OB 法。它与另一种吹氧精炼法 IR - UTC 的区别 ,在于氩气的吹入方法不同。IR - UT 的氩气是由钢液顶部吹入的 ,如图 8-9-26 所示。

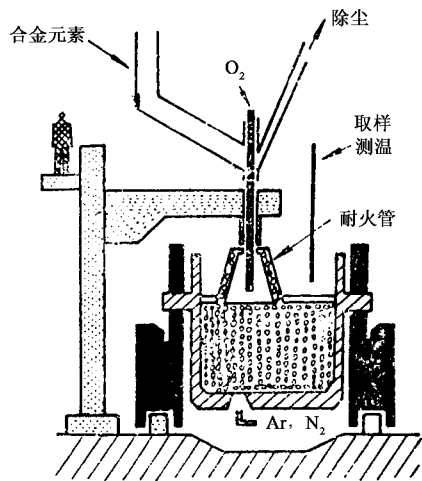


图 8-9-25 CAS - OB 吹氧升温精炼法

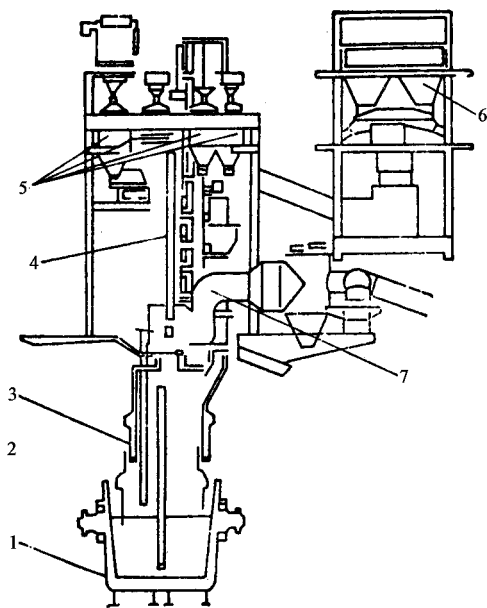


图 8-9-26 IR - UT 升温精炼法

1—钢桶 2—操作室 3—烟罩 4—氧枪 5—粉状粉仓 6—合金粉仓 7—排气管

这些方法的好处 ,是可以在精炼的同时加热钢液 ,如此可弥补钢液温度的不足 ,增大钢液的连铸比。由于加热是采用化学热法 ,故升温速度快 ,达 $5 \sim 13^{\circ}\text{C}/\text{min}$,大大地快于

电弧加热法。同时省掉电弧加热设备。可见,这是一种既经济、效率又高的精炼方法。

升温所用的氧气用量:最快的升温速度 $12.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时其用量为 $13.4\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{t}$,一般升温速度 $7^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时的氧气流量为 $10.72\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{t})$ 。吹氧加热时的热、氧平衡关系示于图 8-9-27,从图可以看出:吹氧时有 70% 的氧,用于铝的氧化。如此,可使钢液升温 11.6°C ,占总升温量 15°C 的 77.3%。可见,主要是靠铝氧化使钢液升温的。铝一般加入耐火管中。由于管内先渣又有氩气保护,如此可提高铝的收得率,减少铝的消耗量。铝的加入量由最初取的第一个钢样中氧含量而定。

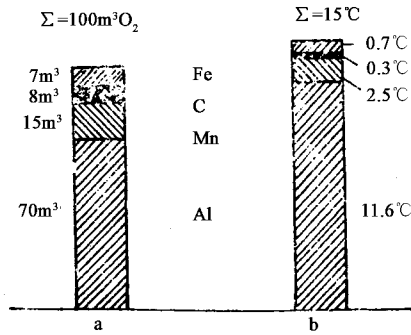


图 8-9-27 CAS-OB 精炼时氧、热的平衡关系

a—氧平衡 b—热平衡

钢的清洁度:由于吹氧升温后再吹氩(或氮)净化钢液,可使钢的总氧量与吹氧前相同,大部分 Al_2O_3 夹杂物上浮,如图 8-9-28 所示,使精炼钢液的纯净度,达到清洁钢的水平。

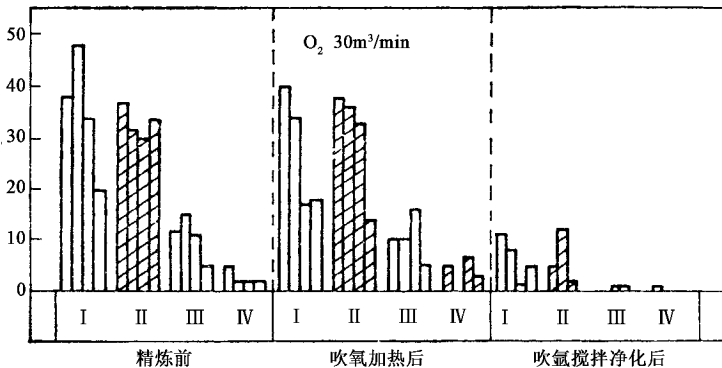


图 8-9-28 精炼前后钢中非金属夹杂物的变化 纵坐标表示 6cm^2 试样上夹杂物数

I— $30\sim 50\mu\text{m}$;II— $51\sim 100\mu\text{m}$;III— $101\sim 200\mu\text{m}$;IV— $\geq 201\mu\text{m}$

第十章 钢水喷粉处理与喂线处理

钢水喷粉处理与喂线处理是炉外精炼技术的一个方面,自 20 世纪 70 年代以来发展较快,已在实际生产中广为应用。可用于多种钢类,可强化终脱氧,改善钢的纯洁度。

第一节 钢水喷粉处理

早在 20 世纪 60 年代就有研究者试用喷射冶金技术,到 70 年代发展迅速,成为炼钢炉外精炼技术的一个重要分支。这一技术用于铁水预处理可以脱硅、脱硫、脱磷等,脱硅使用的粉剂为石灰粉与氧化剂,脱硫为石灰粉、萤石粉或有的使用电石粉(CaC_2),而同时脱硅与脱磷则使用苏打粉。钢水的喷粉处理作用是深脱硫、深脱氧及使非金属夹杂物变性,成为球状物。因此,钢水喷粉处理多用于冶炼超低硫钢种,如石油管线用钢,海上采油平台用钢,其实际含硫量控制在 $\leq 0.002\%$,以及有抗 z 向撕裂性能要求的 z 向钢等。

自 1970 年到 80 年代初,全世界已有上百台喷粉设备投入生产,其中主要是德国的 TN 设备和瑞典的 SL 型设备。我国于 20 世纪 70 年代中期开始工业性生产试验。喷粉处理技术的发展不但适用于特钢厂的电炉生产,对各大钢铁联合企业的氧气顶吹转炉、平炉炼钢亦同样有效,更有发展前途。

喷射技术不仅可在盛钢桶中进行(其主要作用是脱氧、脱硫及控制夹杂物的形态),而且也可以在炉内喷粉,用于炉中快速脱磷(使用含有氧化剂的粉剂)和喷粉增碳(使钢水增碳或电炉熔化期造泡沫渣)。

通常,喷吹所用粉料由冶金粉料(粉剂)专业生产厂供应,炼钢车间只需设置贮存仓库或存放场地(要求安全、干燥的环境);如果无此供应条件,或某些粉料不能取得外部货源时,则炼钢厂或本车间应设有粉料的制备、干燥及储存设施。

一、喷粉设备

喷粉站的主要设备是喷粉罐、储料仓、粉料回收罐、喷射器、喷枪、输气管道及计量仪器等。图 8-10-1 为 SL 喷粉站总装图。

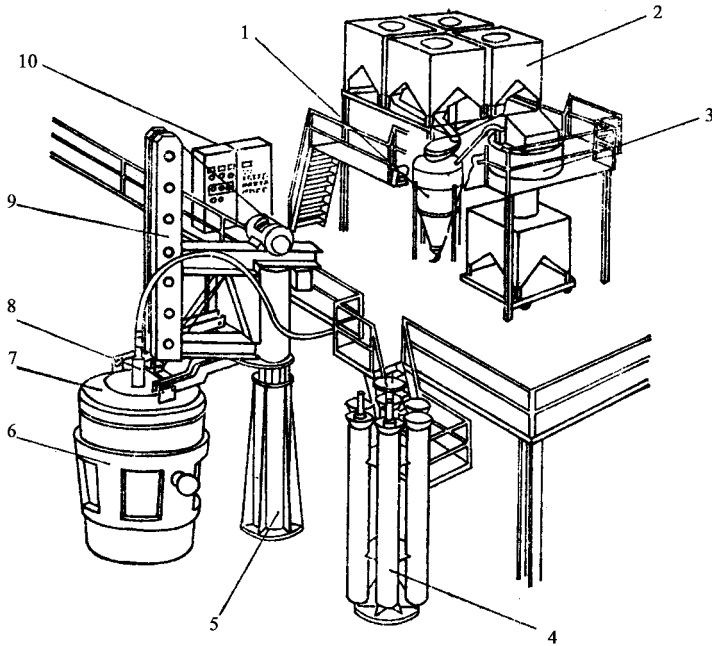


图 8-10-1 SL 喷粉站总装示意图

- 1—喷粉罐 2—储料仓 3—回收罐 4—喷枪存放架 5—喷枪支架立柱;
6—钢包 7—喷粉钢包盖 8—喷枪 9—喷枪升降机构 10—仪表、控制盘

(1) 喷粉罐。喷粉罐又称喷吹罐、分配器,是喷粉系统的关键设备。喷粉罐的结构属压力容器,必须按压力容器规范设计和制造。一般设计压力为 $1.01 \times 10^6 \text{ Pa}$ (10atm),也有按 $1.5 \times 10^6 \text{ Pa}$ (15atm) 计算的。我国各厂实际使用压力多在 $< 6.07 \times 10^5 \text{ Pa}$ (6atm)。

对喷粉罐的设计要求:1)能把粉料连续、均匀、稳定地输出,不应有脉动现象和堵塞;2)可在一定范围内调节送粉速度;3)能把粉料吹净,保证不挂料、不搭桥;4)结构简单、安全、可靠。

1) 喷粉罐形状与容积 喷粉罐体是圆柱形 ,下部为倒锥形(图 8-10-2、8-10-3)。

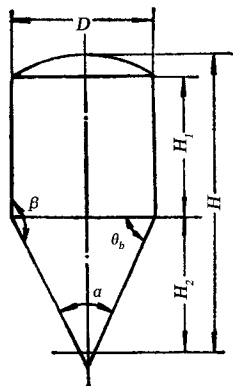


图 8-10-2 喷粉罐尺寸

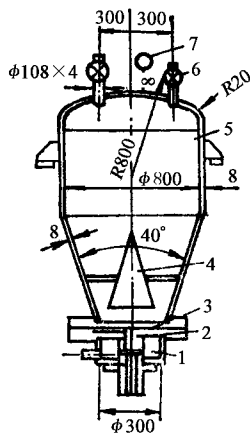


图 8-10-3 喷粉罐结构(110t 钢包用喷粉罐实例)

1—气室 2—喉口 3—沸腾床 4—锥帽 5—罐体 6—球阀 9—压力表

喷粉罐容积按下式计算：

$$V = k \frac{W_p}{\rho_p} \tag{8-10-1}$$

式中 V ——喷粉罐容积 m^3 ；
 W_p ——粉料装入量 kg ；
 ρ_p ——粉料堆积密度 kg/m^3 ；
 k ——罐内空间的余量系数 $k = 1.15 \sim 1.20$ 。

粉料装入量 W_p 应能满足 2~3 炉用料 ,或一个班的生产用量。某些粉料的堆积密

度 ρ_p 见表 8-10-1。

表 8-10-1 常用粉料的自然歇角

粉料种类	堆积密度 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	自然歇角(休止角)度
粉状 CaO	433	43 有的 50)
CaSi	1000	47
褐铁矿	3800	40
石灰石粉	1360	47
焦炭粉	400	34
60% CaO + 25% CaCO_3 + 12% C + 3% CaF_2 (28 ~ 200 目)		39

罐体的主要参数(图 8-10-2)有总高(H)与直径(D)之比 H/D 和圆锥部分锥角(α)。耐压容器上盖不用平面而为拱形,拱顶部分冲压成形(或分成几块拼焊组成)再与圆柱形部分焊接成整个罐体。并按压力容器检验标准作耐压试验和焊缝的探伤检查。

罐体内型的 β 角要大于粉料的休止角 θ_b 。各种常用粉料的休止角如表 8-10-1。则锥体部分的锥角 α 为：

$$\alpha < (180^\circ - 2\theta_b)$$

(8-10-2)

α 角一般小于 60° , α 越小则料柱越高。罐体总高也加大,不利于粉料的流态化。

$H/D = 1.7 \sim 2.3$, H/D 比值的选取要视下料量而定,要求较大下料速度时取较小值,即为较大直径的罐体;反之,则取较大的比值。喷粉罐内型尺寸近似计算如下。

首先,根据工艺需要确定喷粉罐的装料量(W_p)或称罐的容量,由式(8-10-1)计算出罐的实际容积(V)。

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 H_1 + \frac{\pi}{12} D^2 H_2$$

(8-10-3)

设 : $H_1/D = K_D$

式中 K_D ——系数, $K_D = 1.0 \sim 1.5$;

$$H_1 = K_D \cdot D$$

由图 8-10-1 可知, $H_2 = \frac{D}{2} / \text{tg} \frac{\alpha}{2}$ 将 H_1 、 H_2 代入式(8-10-2),得

$$V = \frac{\pi}{4} K_D D^3 + \frac{\pi D^3}{24 \text{tg} \frac{\alpha}{2}}$$

(8-10-4)

$$\therefore D = \left[\frac{4V}{\pi \left(K_D + \frac{1}{6 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \right)} \right]^{1/3}$$

(8 - 10 - 5)

由式 (8 - 10 - 5) ,在选定 α 与 K_D 之后 ,即可计算得罐径 D ,并计算出 H_1 H_2 和 $H = H_1 + H_2$ 。确定上述主要尺寸之后 ,应验算其容积 V 是否满足粉料装入量的要求。如不满足 ,要重新计算。

喷粉罐容积与处理钢水量的相应关系有如表 8 - 10 - 2 之推荐值 ,表 8 - 10 - 3 是沈阳冶金机械厂标委会提出的喷粉罐主要参数 ,可供参考。表 8 - 10 - 4 是国内炼钢厂所使用的喷粉罐与钢包容量的配合。

表 8 - 10 - 2 钢包容量与喷粉罐容量

钢包容量 t	喷粉罐容量 L
5 ~ 20	< 150
20 ~ 40	500
50 ~ 100	800
> 100	> 800

表 8 - 10 - 3 喷粉罐尺寸

型号	公称容量 L	D ,mm	H ₁ ,mm	H ,mm	a	进料口 ,mm	出料口 , mm	送粉速率 kg·min ⁻¹	罐体重 kg
PF 100	100	600	240	835	40	100	16	20 ~ 60	110
PF 170	170			1095					130
PF 240	240			510					1345
PF 500	50	800	550	1450		150	19	20 ~ 80	270
PF 700	700		950	1850		200			395
PF 1500	1500		1000	1270		2160		25	20 ~ 100

表 8 - 10 - 4 喷粉罐容积与钢水包容量配用关系(国内实用资料)

炉子或钢包容量 (t)	喷粉罐容量 (m ³)	备 注
10	0.07 ~ 0.12	
12	0.07 ~ 0.12	

炉子或钢包容量 (t)	喷粉罐容量 (m ³)	备 注
14	0.07	
15	0.07	
16	0.12	
16.5	0.03(炉内) 0.035(炉内)	
17	0.055 0.07	
17.5	0.08 0.8(脱 P)	
20	0.12	
32	0.5	SL—40 喷粉系统
34	0.33	
50	0.2(转) 0.3 0.7	
100	0.6 0.8	平炉用

2)流态化装置 :为使粉料平稳、连续、均匀地自喷粉罐流出 ,保证在罐内不挂料、不搭桥 ,并顺利经喉口进入喷射器 ,在圆锥体部分应使粉料局部流态化 ,设置流态化装置。如在罐内设有棒状或螺旋管 ,其上开有通气小孔以使粉料松动 ,称松动棒、松动管。或装设板状、或在圆锥体部分与底部都开通气孔 ,称流态化床。

目前流态化装置的设计计算还比较困难 ,其面积、开孔率、通入的最小气体流量等还不能有精确的理论计算 ,一般根据经验 ,先通过适当的试验 ,再确定某些参数。

喷粉罐工作时 ,为流态化送入的气体大部分随粉料一起流出 ,小部分气体留在罐内以补充粉料输出后留下的空间 ,保持罐压 ,实现均衡供料。此外 ,上升的气体又有翻动罐内料层的作用 ,使粉料不断下降到出料口。

根据临界流态化速度来计算出上出料喷粉罐流态化所需的最小气体量：

$$G_{mf} = KU_{mf}A\rho_g \tag{8-10-6}$$

式中 G_{mf} ——上出料流态化所需最小气体流量 g/s ；

K ——罐形系数 ,直筒形圆罐为 2.2 ~ 3.86；

U_{mf} ——气体的临界流态化速度 cm/s ,可查表 8-10-5；

A ——喷粉罐圆筒部分的截面积 cm^2 ；

ρ_g ——出料时罐内平均压力下气体的密度 g/cm^3 。

表 8－10－5 不同粉料的临界流态化速度 U_{mf}

粉剂种类	密度 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	粒度 μm	气体	$U_{mf} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
石灰	2000	0.01	N_2	0.653
萤石(90% CaF_2 , 5% SiO_2)	3150	0.01	N_2	1.03
碳粉(95% C)	2200	0.01	Ar	0.586
硅钙(30% Ca , 60% Si)	2250	0.01	Ar	0.679
钛铁(27.8% Ti , 70% Fe)	6000	0.01	Ar	0.932
硅铁(75% Si 25% Fe)	3500	0.01	Ar	1.598

3)出料喉口 喷粉罐的供粉能力取决于喷吹工艺参数与喷粉罐的结构 ,它的下料口称为喉口 ,出料速度可按下式计算 :

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_m}} \tag{8-10-7}$$

式中 ΔP ——喉口处上下的压差 ,Pa($\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}^2$);

ρ_m ——气粉混合物的密度 kg/m^3 。

若喉口截面积为 A_0 (m^2) ,则理论送粉量 m :

$$m = A_0 v \rho_m = A_0 \sqrt{2\Delta P \rho_m} \quad \text{kg/s} \tag{8-10-8}$$

式(8－10－8)表明供粉速度是喉口断面和压力差的函数 ,可用来调节送粉量。喉口断面能保证在较宽的压差范围内均匀送粉 ,在工艺参数略有波动时 ,如粉料粒度、喷枪插入深度、软管长度等变化不大时 ,也能保持均匀送粉。当送粉强度变化较大时 ,则可采用更换喉口来达到调节的目的。

(2)储料仓。如喷吹粉剂单一 ,则储料仓数目少。如果为了适应不同喷粉处理目的或粉料需用量大时 ,则需有较多储料仓。要求朗储备较多粉料 ,如铁合金粉和渣料要有 1 ~ 3 天的储存量。

有的粉料易吸收水分 ,或在空气中易氧化 ,储料仓必须有良好气密性 ,必要时充入惰性气体。料仓内如装电石 ,则需设有气体浓度自动报警器 ,当 C_2H_2 浓度达到 0.5 % 时自动报警 ,确保安全。

通常储料仓(多个料仓)设置在喷粉罐上方 ,分别有下料管和振动给料器与喷吹罐连通 ,以便直接给料入罐减少运输 ,在整体结构上也紧凑 ,占地面积小。

图 8－10－4 示出多种粉料与喷粉罐连接 ,由螺旋给料器向喷粉罐下料。图 8－10－5 示出多个储粉仓与二个喷粉罐接通 ,在同一喷吹系统中设二个或二少以上喷粉罐 ,则可

以实施多种粉剂顺序喷吹。

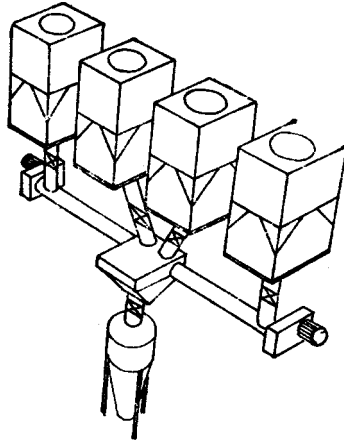


图 8-10-4 带有螺旋给料器的多料仓供料系统(一个喷粉罐)

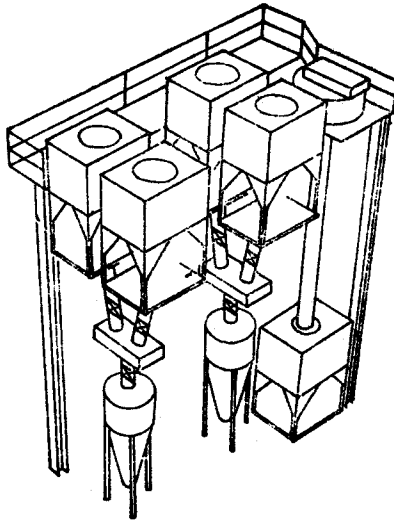


图 8-10-5 多料仓多喷粉罐系统

(3)回收罐。喷粉罐内剩余的粉料喷吹到回收罐内回收,后者还可供设备系统的冷态试验之用。

为使粉—气流之粉气分离,从喷粉罐喷出的粉—气流沿切线方向进入回收罐,由于气流突然膨胀,气流速度下降,加之离心力作用使粉粒沿罐壁旋转,下沉于罐底。为使气粉分离良好,进入罐内的气—粉流速度应小于粉粒的沉降速度。分离后的气体经罐内的

过滤器放入大气。当进行冷态试验时(为了寻求合适的喷吹工艺参数与掌握喷吹系统的工作特性),回收罐内先充入气体 ,使其内压力模拟喷枪出口处金属液与渣液的静压力或略高一点 ,而回收罐排出口处以溢流阀控制 ,保持罐内恒压 ,超过时自动溢出。

回收罐的结构如图 8 - 10 - 6 所示。

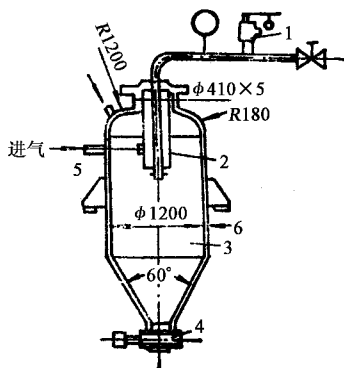


图 8 - 10 - 6 回收罐结构

1—溢流阀 2—过滤器 3—罐体 4—阀门 5—进气口

回收罐圆筒部分直径可按下式确定：

$$D = 1.13 \sqrt{\frac{\dot{V}_g}{\alpha V_t}} \tag{8 - 10 - 9}$$

式中 $\dot{V}_g$ ——气体流量 m^3/s ；
 V_t ——粉粒沉降速度 m/s ；
 α ——系数 ,一般为 0.03 ~ 0.05。

圆筒部分的高度约为 $(1 \sim 2)D$ 。

(4) 喷枪及其升降结构。

1) 喷枪结构 喷枪直接插入钢液 ,粉料喷入钢液深部 ,多采用钢管外砌(或外包)耐火材料。钢管套上圆形或方形套砖(或称袖砖)的称装配式 ,外部用耐火材料浇注(打结)成的称整体式(如图 8 - 10 - 7)。根据国内外使用经验 ,整体式的比装配式的寿命长 ,这是由于装配式喷枪外套的砖缝多而易受侵蚀的缘故。

喷枪外套使用寿命一般 1 ~ 3 次 ,有使用长达 20 次的。

我国整体式喷枪的耐火浇注料是以 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 细粉为基质的刚玉质($\text{Al}_2\text{O}_3 > 98\%$)或高铝质料($\text{Al}_2\text{O}_3 75 \sim 88\%$) ,以纯铝酸钙水泥为结合剂 ,用柠檬酸钠作减水剂 ,效果很好 ,寿命长达 15 次 ,累计喷吹平均达 75 分钟。成本与使用寿命均优于某种进口材料。

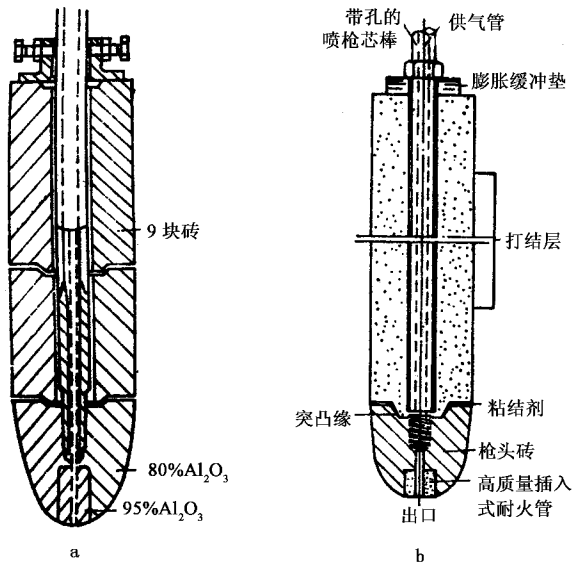


图 8-10-7 装配式(a)与整体式(b)喷枪

图 8-10-8、图 8-10-9 是喷枪与升降机构连接,与输粉管接通的方法,前者是自动快速连接结构,后者是手工操作结构。

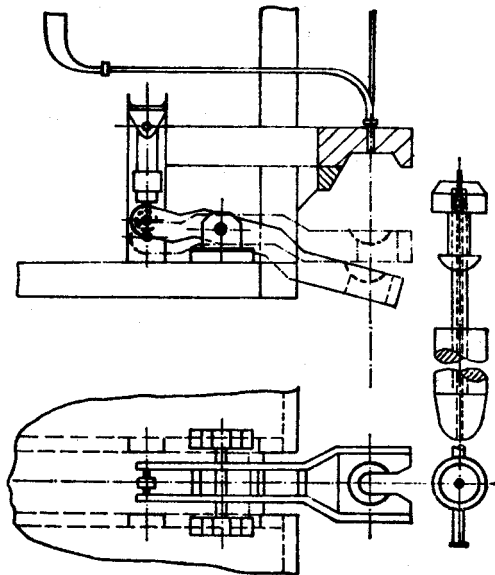


图 8-10-8 喷枪自动装接

2) 喷枪支架与升降机械, 喷枪支架与升降机构必须有一定的刚度, 以支持喷吹时喷枪定位和抵抗喷枪的振动, 保持机构的工作稳定性。

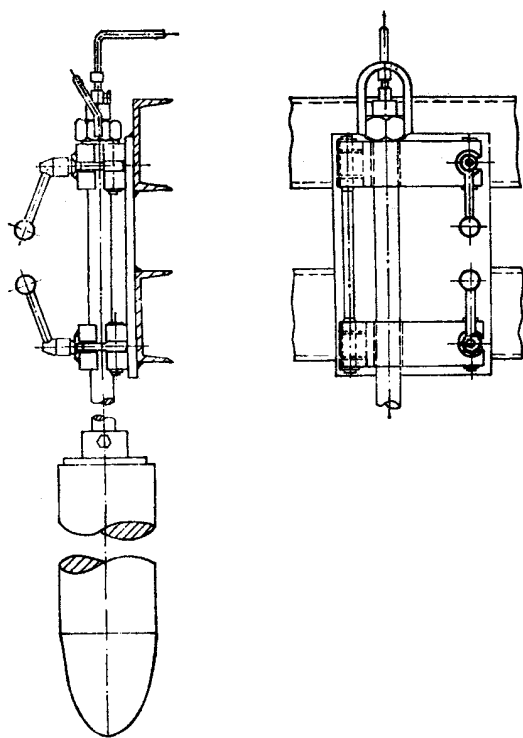


图 8-10-9 喷枪装接结构

图 8-10-10 是 SL 型喷枪支架和枪的尺寸, 参见表 8-10-6, 可供设计选用。

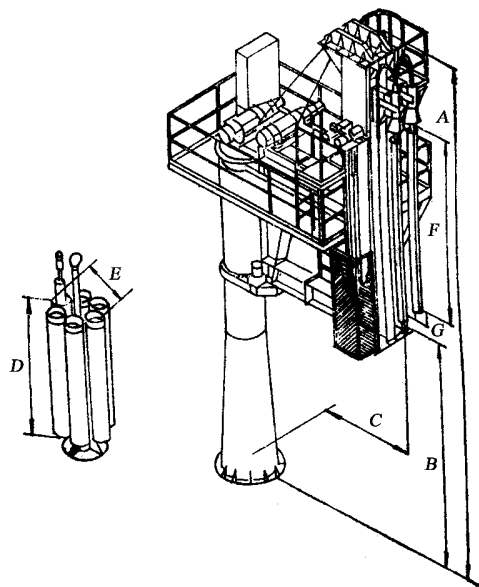


图 8-10-10 喷枪支架与升降机构、喷枪存放架

表 8 - 10 - 6 喷枪支架及喷枪尺寸

钢包容量 t	喷枪支架 ,mm			喷枪烘烤架 ,mm			喷枪 ,mm
	A	B	C	D	E	F 高度	G 直径
- 29	8000	3000	2500	2500	800	2600	150
30 ~ 49	8700	3700	2750	3000	1400	3500	200
50 ~ 99	9400	4000	3100	3500	1400	4500	200
100 ~ 149	11500	4800	3500	4000	1400	4900	200
150 ~ 199	12900	6000	3900	4100	1400	5200	200
200 ~ 249	14100	6500	4100	4500	1400	5300	200
250 ~ 299	15300	7300	4700	4500	1400	5400	250
300 ~ 349	15520	7800	4900	4500	1400	5600	250

喷枪插入钢液深度应尽量大一些 ,但不允许气粉流直接冲刷包底 ,一般喷枪出口距包底宜在 300 ~ 400mm。由于喷吹时枪身振动激烈 ,容易引起枪体耐火材料和连接件的损坏 ,较小容量钢水包 ,喷枪采用悬臂状态 ,大容量钢包($\geq 50\text{t}$ 容量)喷吹时采用固定式 ,即将枪头部顶住包底 ,喷吹时振动可大为减少。此时喷枪的喷出口在喷头侧面 ,喷口距包底约 300 ~ 400mm。

(5)喷射器。喷射器又称引射器 ,是供给二次气流使粉料进入输粉管道 ,并喷吹入喷枪。喷射器装在喷粉罐出料阀之后。当关闭出料阀停止下料时 ,继续供气可将管路中的粉料吹扫干净。

喷射器多设计成拉瓦尔管 ,使粉料得到加速 ,如图 8 - 10 - 11 所示。

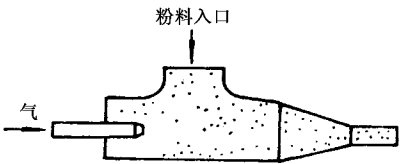


图 8 - 10 - 11 拉瓦尔管式喷射器

也有在粉料入口处接设挡板 ,由于助吹气流和从喷粉罐中出来的气粉流交角减小 ,减少了卷流的形成 ,使喷吹更加稳定 ,如图 8 - 10 - 12。

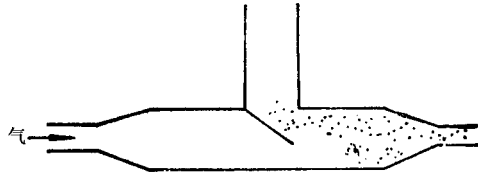


图 8-10-12 挡板式喷射器

二、喷粉处理管路设计

气力输送粉料,气体与粉料在管路中形成复杂的粉—气二相流动,由粉—气比(又称混合比) μ 的不同以及管路长度,弯头多少,管道垂直或倾斜或水平等因素,和粉料本身的特性等使管路计算复杂化。气力输送按系统内压力可分为负压输送和正压输送,喷射冶金都采用正压输送。

从粉—气比(μ , kg/kg)又可分为浓相输送和稀相输送,浓相输送是指粉—气比达 80 ~ 150kg/kg 的状况,而喷射冶金喷粉时粉—气比为 20 ~ 40kg/kg,故属于稀相输送。粉料只占混合物体积的 1 ~ 3%,出口速度在 20m/s 左右。浓相输送对喷射冶金很有吸引力,因为可以少用载气(一般为氩气),减少由于载气膨胀引起的喷溅,钢包中因喷粉而冲开顶渣,易引起钢水裸露被空气氧化和吸氮。但浓相输送时单位长度管路的阻力损失比稀相大得多,例如对内径 2 ~ 5.4cm 管道浓相输送时阻力损失为每米 150 ~ 250mmH₂O (1471 ~ 2452Pa),而稀相输送时阻力损失为每米 50mmH₂O (490.3Pa)。所以浓相输送应用于喷射冶金还应加以研究。

喷吹管路设计的理论计算很复杂且难以精确,故一般均用经验设计公式,根据已有设备的情况进行较粗略的计算和选用。管路设计中需确立的几个重要参数是系统工作压力,喷吹输粉管道的管径,喷枪出口直径和型式。

(1)系统工作压力。供给喷吹系统的载气压力(气源压力)应稍大于计算由的工作压力。工作压力是克服整个系统各项压力损失(各种阻损)和钢包中钢水、炉渣的静压力之和。

$$P > \Delta P_{\text{罐}} + \Delta P_{\text{管}} + \Delta P_{\text{枪}} + \Delta P_{\text{钢渣}} \quad (8-10-10)$$

式中 P ——工作压力(表示压力);

$\Delta P_{\text{罐}}$ ——喷粉罐前管路中阻损和罐内阻损;

$\Delta P_{\text{管}}$ ——粉—气悬浮流在管道中流动的各种管路损失,包括与管壁的摩擦阻力、弯头阻力、进入喷枪时的截面变化以及粉粒间碰撞和气粉相对

速度差等；

$\Delta P_{\text{枪}}$ ——喷枪内流动和喷出口处的阻损,包括截面变化、转弯和摩擦等；

$\Delta P_{\text{钢渣}}$ ——喷枪出口处以上的钢液、渣液的静压力。

根据文献资料,上式中各项压力损失经验数据如下：

$$\Delta P_{\text{罐}} = 0.05 \sim 0.10 \text{ MPa} ;$$

$$\Delta P_{\text{管}} = 0.00026\dot{m} + 0.00049 \text{ MPa/n} (\text{管径为 } \phi 19 \text{ mm}), \dot{m} \text{——送粉量, kg/min.}$$

上式为瑞典 MEFOS 经验式。管长为 L ,则有：

$$\Delta P_{\text{管}} = (0.00026\dot{m} + 0.00049)L \quad \text{MPa} ;$$

$$\Delta P_{\text{枪}} = 0.08 \sim 0.106 \text{ MPa} (\text{喷枪出口 } \phi 12.5 \text{ mm}) ;$$

$$\Delta P_{\text{枪}} = 0.05 \sim 0.06 \text{ MPa} (\text{喷枪出口 } \phi 9 \text{ mm}) ;$$

$$\Delta P_{\text{钢渣}} = 0.07 \sim 0.011 \text{ MPa} (\text{插入钢液约 } 1.1 \text{ m})$$

当管路中有上升段时,应补加阻力损失,对管径为 $\phi 15 \sim 20 \text{ mm}$ 的管道：

$$\Delta P_{\text{升}} = sg\Delta h \quad (8-10-11)$$

式中 $\Delta P_{\text{升}}$ ——上升段补加阻力；

s ——悬浮速度, m/s；

g ——重力加速度, 9.8 m/s^2 ；

Δh ——上升段高度(如为几个上升段,则是各段高度之和), m。

如以喷吹 CaSi 粉的悬浮速度 $s > 10 \text{ m/s}$, $\Delta P_{\text{升}}$ 的近似计算可写作：

$$\Delta P_{\text{升}} = (0.001 \sim 0.002)\Delta h = 0.70015\Delta h \quad \text{MPa}$$

故此时之管道总阻损应为： $\Delta P_{\text{管}} = (0.00026\dot{m} + 0.00049)L + 0.0015\Delta h$

实际应用中我国各厂的喷吹系统工作压力波动于 $0.3 \sim 0.6 \text{ MPa}$ (约 $3 \sim 6 \text{ atm}$)。

(2) 载气流量与管径。为使粉料处于悬浮状态前进气流,必须具有一定的速度和流量,如气流太小,管内易堵塞或产生脉动,气流太大则钢包中的喷溅和管路中摩擦损失加大。通常是保证一定悬浮速度下,计算所需之最小气流量。喷吹 CaSi 粉时悬浮速度 $> 10 \text{ m/s}$,即 $U_{\text{ej}} > 10 \text{ m/s}$,则最小气流量应大于悬浮速度所需的气流量。悬浮速度与载气流量关系如下：

$$U_{\text{ej}} = \frac{U_{\text{t}}}{A_{\text{ez}}(1 + P_{\text{ej}})} \quad (8-10-12)$$

式中 U_{ej} ——粉料悬浮速度, m/s；

U_{t} ——载气流量, L/min；

A_{ez} ——管道截面积, mm^2 ；

P_{ej} ——管道内载气压力 ,atm($\times 101325\text{Pa}$)

改写上式 , A_{ez} 换为管道直径 d_{ej} ,得 :

$$U_t = \frac{U_{ej} d_{ej}^2 (1 + P_{ej})}{21.22} \quad (8-10-13)$$

设管道内工作压力 $P_{ej} = 4\text{atm}$ ($4 \times 101325\text{Pa}$) , $U_{ej} = 10\text{m/s}$, $d_{ej} = 20\text{mm}$,代入式(8-10-13)得 :

$$U_t = 942\text{NL/min}$$

输料管道直径 d_{ej} 可按下式计算 :

$$d_{ej} = \sqrt{\frac{4 U_g}{60\pi v_g}} = \sqrt{\frac{4 \dot{m}}{60\pi \mu \rho_g v_g}} \quad (8-10-14)$$

式中 U_t ——载气流量 ,L/min ;

v_g ——载气流速 ,m/s ;

$\dot{m}$ ——粉料流量 ,kg/min ;

μ ——粉—气比(混合比)kg/kg ;

ρ_g ——载气密度 ,kg/m³。

(3)喷枪口出口速度。喷枪口两相流的速度为 :

$$v_{p+g} = v_g \sqrt{\frac{m_g}{m_g + m_p} \left(\frac{v_g + v_p}{v_g} \right)} \quad (8-10-15)$$

式中 v_{p+g} ——两相流速度 ,m/s ;

v_g ——载气流速度 ,m/s ;

v_p ——粉料流速 ,m/s ;

m_g ——载气流质量流量 ,kg/s ;

m_p ——粉料流质量 ,kg/s。

在喷射冶金条件下 , $v_g \gg v_p$; $m_g \ll m_p$; 一般 $m_g = \left(\frac{1}{20} \sim \frac{1}{10} \right) m_p$,

$$\text{故 : } \frac{m_g}{m_g + m_p} = \frac{m_g}{m_p} \cdot \frac{v_g v_p}{v_g} = 1$$

$$\text{则式(8-10-15)可改作 : } v_{p+g} = v_g \sqrt{\frac{m_g}{m_p}} = (0.22 \sim 0.32) v_g \quad (8-10-16)$$

$$\text{出口速度与 } v_0 \text{ 与送粉量关系经验式 : } \lg v_0 \geq -0.89 \lg \dot{m} + 2.9 \quad (8-10-17)$$

式中 v_0 ——喷枪出口速度。m/s ,

$\dot{m}$ ——送粉量 ,kg/min。

(4) 喷枪口直径。根据经验式, 喷枪出口处单位面积单位时间内喷出粉料量 $\frac{\dot{m}}{A_0} = 0.22 \text{ kg/mm}^2 \cdot \text{min}$

式中 $\dot{m}$ ——送粉量, kg/min ;

A_0 ——喷枪口截面积, mm^2 。

喷枪出口直径: $d_0 = \sqrt{\frac{4A_0}{\pi}} \quad \text{mm} \quad (8-10-18)$

$$\therefore d_0 = \sqrt{\frac{4\dot{m}}{0.22\pi}} = 2.4 \sqrt{\dot{m}} \quad \text{mm}$$

三、喷粉站的布置

炼钢车间喷粉处理站应包括储粉仓、喷粉罐、输粉管道(包含钢管管道与输粉软管)及喷枪、喷枪支架。喷吹输粉管道愈短愈好, 尽量 $< 30\text{m}$ 为宜, 管道的垂直升高应 $< 5\text{m}$ 。喷粉站的位置一般应布置在出钢、浇注跨间, 出钢后就近进入(吊车吊运或地面轨道运送)处理工位, 喷粉处理完毕运到浇注场地, 模铸或连铸。务使运送距离最短。

如车间内有多种炉外精炼工具并存, 则可将喷粉处理站与其它精炼设备放在一条运送钢包的铁路线上。各种精炼方法可以有选择地按序进行。例如, 同一条线上可以有 LF 炉(或 LRF)、VD、喷粉、喂线等等。这一条线路的布置, 有的采用与车间厂房的纵向垂直, 路线跨过 2~3 个跨间, 有的则采用在一个跨间里沿厂房纵向布置的型式, 这需要根据车间的生产任务、设备配置等具体条件来确定方案。

按喷粉设备的竖向布置区分, 通常钢包放在车间地面上, 有支撑座架以固定位置, 便于钢包盖落下盖住钢包上口和喷枪下降入孔。而喷粉罐则有高架式和落地式布置之分。图 8-10-1 为 SL 喷粉设备。储粉仓、回收罐与喷粉罐均设在高架工作平台上, 若仅把储粉仓置于工作平台上, 而喷粉罐位于平台下地面上则为落地式(图 8-10-13)。显然, 高架式喷吹罐出料口与钢包顶盖高度大致齐平, 喷粉管道可以缩短且大大减小垂直向上输送的距离, 但是设备总高度很大, 要求厂房高度(吊车起吊高度)能满足向储粉仓中添料, 或调换储粉仓。对于在现有车间内增加喷粉设施的设计, 就必须考虑厂房高度的限制以决定布置方式是否可行。必要时亦可在原有主厂房之外, 贴近厂房另建独立的储粉、喷粉间, 而喷枪支架(立柱与喷枪升降机构等)布置在主厂房之内靠近厂房边跨柱列。

钢包喷粉处理过程引起钢水激烈涌动和冒出烟尘, 因此, 处理时必须加盖, 盖上设喷枪插入孔 1~2 个, 盖上还需开孔与引风管道连接, 烟气经除尘后排放到厂房外大气中去。所以喷粉处理工位如设在边跨临近厂房外墙, 则排气管道易于引出室外。

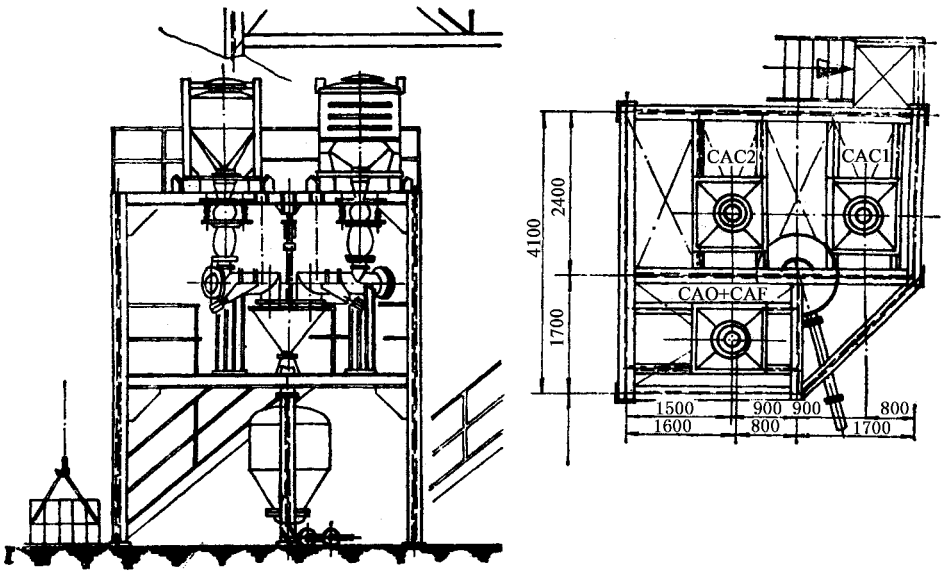


图 8-10-13 储粉仓与称量、混合均在平台上 喷粉罐落地式布置

图 8-10-14 是储料、喷吹罐体等紧凑地安置在工作平台之上,喷枪支架也应尽量靠近喷吹罐以缩短喷粉距离,待处理钢水用吊车吊运到喷枪架之下适宜位置,进行喷吹处理。图 8-10-13 8-10-14 只表明了储料仓和喷粉罐落地式布置,图 8-10-14 中喷吹罐是部分罐体在平台面之上,部分在工作平台之下。至于喷枪支架的设置可依据现场情况确定。

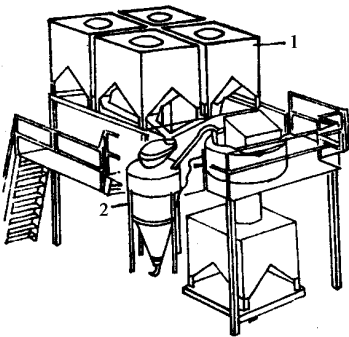


图 8-10-14 喷粉罐落地布置示意图

1—储粉仓 2—喷粉罐

图 8-10-15 是有计算机控制的,钢包车运送的大型喷粉站,当然在钢包运行线上还可以设有其它种精炼设备,例如真空循环脱气设备(RH)和喂线机,在一条流程线上经过不同精炼工艺(或者有选择的)达到更全面的精炼目的。

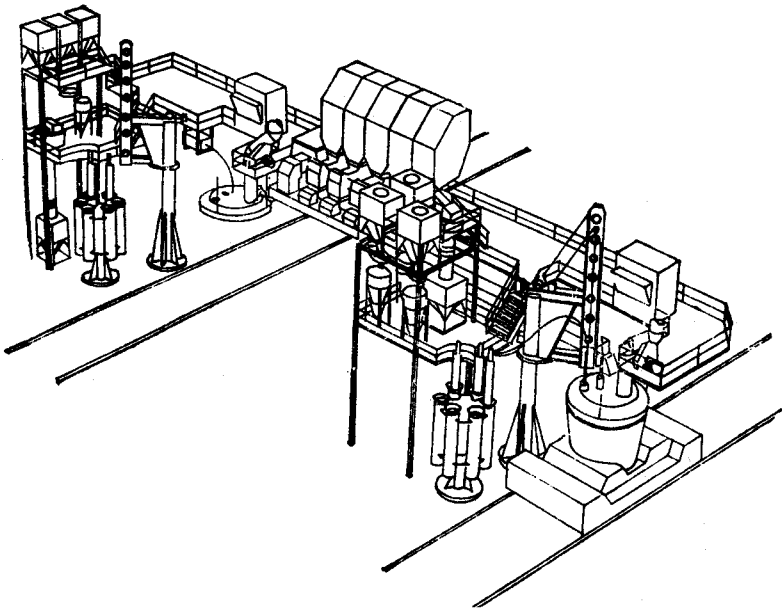


图 8-10-15 计算机控制的大型喷粉站

图 8-10-16 为 100t 钢水包的喷粉处理站, 钢水包车驶进工作平台下方, 这里是一台喷吹罐供多个处理工位操作的供粉系统, 喷粉站内装有专用的起重机吊装喷枪和向储粉仓装料。

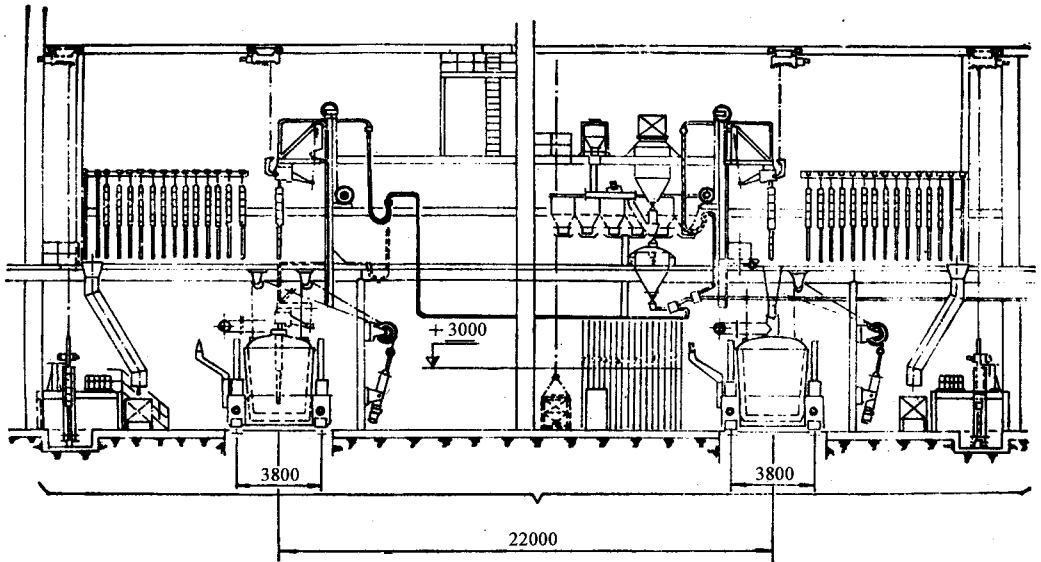


图 8-10-16 100t 钢水喷粉处理站

第二节 钢水喂线处理

一、钢水喂线处理的冶金功能

钢水喂线处理工艺用在炉外精练工序的最后环节,喂线的同时并伴有钢包底吹氩搅拌。

喂入线材有单一元素的(如喂铝线终脱氧),有含合金粉料的包芯线,如 CaSi 合金线(含 Ca ~ 30% ,Si ~ 60% ,Al ~ 2%),Fe—Ti ,Fe—B、……等合金线。Ca—Si 合金线用来脱氧和使夹杂物变性处理,其它合金线则主要是为了精确调整钢水成份。

Ca—Si 熔入钢水,使钢中高熔点 Al_2O_3 夹杂物变成低熔点的钙铝酸盐,可以防止连铸过程水口堵塞现象。Ca—Si 合金使夹杂物球化,氧化物、硫化物均呈球状,改善了钢的各向异性。生产实践证明,喂线法钙的回收率高于喷射法,喂 Ca—Si 线可改善钢的浇注性能,而且过程温降较小,有利连铸生产,喂线与喷粉比较钢水吸氮量减少;由于 Ca 的利用率较高,耗氩量少,所以喂线处理比喷粉处理成本降低。喂线法加入合金时,合金元素收得率高于块状(或棒状)合金料投入钢包的方法。实际生产检验结果表明:转炉钢水钢包中喂线(Ca—Si)处理后,其多项质量指标达到优质钢水平,所以喂线处理成为转炉钢提高等级的手段之一。铸铁生产喂线,使铸铁石墨球化,喂含 Mg 的芯线或稀土芯线使石墨球化并脱硫。

二、喂线工艺参数

根据选用线径的大小,对不同钢水量确定喂入的合金量,从而确定喂线速度与处理时间。下面例举不同容量的钢水包喂线工艺参数。

芯线种类:Si—Ca 合金线, Si—Ca—Ba 合金线, 线径 $\phi 11\text{mm}$

单位消耗:1.3kg/t

钢包容量 /t	喂线速度 /m/s	处理时间 /min
25 ~ 30	1.2 ~ 1.5	4 ~ 6
40	1.6 ~ 1.8	5 ~ 6

80	2.0 ~ 2.3	6 ~ 7
150	2.8 ~ 3.0	10
300	双线 2.8 ~ 3.0	10

60t 钢水浇注大方坯

连铸机中间包(5t)	0.25	50 ~ 60
--------------	------	---------

喂线 ,钢水深 800mm

芯线种类 :Si - Ca 合金线 ,线径 $\phi 5\text{mm}$

单位消耗 :1.3kg/t

钢包容量 ,t	喂线速度 ,m/s	处理时间 ,min
20	双线 1.0	7 ~ 9
2	0.25 ~ 0.35	6 ~ 8

30t 钢水连铸小方坯 ,

中间包(20t 喂线 ,钢水	0.3	75(Si - Ca kg/t)
-----------------	-----	--------------------

深 300mm

三、喂线机的选用

按同时供线根数有单线机和双线机两种。喂双线时可喂同种材料的线 ,也可以喂不同材料的线。个别情况也有喂六条线的 ,这样就需要有三台双线机同时工作。

喂线机敷设位置依工艺来确定 ,例如 ,当钢水真空精炼结束后喂线处理时 ,则设在真空处理工位(钢包真空处理坑)附近 ,当在 LF 炉中完成多项精炼操作时 ,其中也包括终脱氧与微量调整成份 ,喂线机即设在 LF 炉精炼工位近旁。所以这些精炼设备近处需留出足够的空地 ,除放置喂线机本体外 ,还应有适当的场地存放绕线盘。连铸生产时已向中间包喂线 ,中间包冶金比钢包处理更接近于浇注阶段 ,有其优越性 ,但如何使喂入中间包的合金料能均匀分配到各结晶器的钢中 ,使连铸各流钢坯成份完全一致 ,还有待于研究。

我国已在喂线机制造厂 ,生产成套设备可供选用。

表 8 - 10 - 7、8 - 10 - 8、8 - 10 - 9 列出 Hochreuter 提供的喂线机规格 ,我国河南巩县 ,哈尔滨黑龙江冶金研究所等地也已制造生产喂线机 ,可供选用。

表 8－10－7 单线机			
机 型	DES—1	DES—2	DES—3
线孔直径 ,mm	3—14	3—14	7—14
芯线直径 ,mm	3—8	5—14	10—20
驱动马达功率 ,kW	3.8	8	12
喂线速度 ,m·min ⁻¹	0—300	0—300	0—300
线的长度 ,m	0—9999.9	0—9999.9	0—9999.9
调节和指示精度 ,m	0.1	0.1	0.1

表 8－10－8 线盘规格			
线 盘	垂直	水平	倾斜
线圈内径 ,mm	500	500	600
线圈重 ,kg	1000	1000	1000

表 8－10－9 双线机	
线直径 ,mm	5 ~ 14
喂线速度 ,m·min ⁻¹	0 ~ 15 ρ ~ 100 ρ ~ 150