

第五篇

氧气转炉炉衬与炉龄

第一章 氧气转炉用耐火材料

第一节 耐火材料概述

氧气顶吹转炉是高温冶金设备,经常处于近 2000℃ 的温度下作业,所以内衬必须用耐火材料砌筑。它不仅承受高温钢水与熔渣的化学侵蚀,还要承受钢水、熔渣、炉气的冲刷作用,以及加废钢的机械冲撞等。因而转炉内衬用耐火材料的性质与质量不但直接关系到炉衬使用寿命,还影响着钢的质量。在工业国家中,一般耐火材料总产量的 60% ~ 70% 是用于冶金工业,而其中用于钢铁工业约占 65% ~ 75%。冶金工业的发展不断对耐火材料提出新的要求,而耐火材料的新成就又为冶金工业技术进步创造了条件。炼钢工作者不能光懂炼钢,会炼钢,还应对转炉用耐火材料的种类、性质、影响炉衬寿命的因素,以及炉型是否合理,如何加强日常的维护等都应该清楚明白。

一、耐火材料的分类

凡是具有抵抗高温及在高温下能够抵抗所产生的物理化学作用的材料统称耐火材料。它们一般是无机非金属材料制品,也包括天然矿物和岩石等。

耐火材料的分类方法很多,若按其化学性质可分酸性耐火材料、碱性耐火材料和中性耐火材料。按耐火度的高低可划分为普通型耐火材料、高级耐火材料、特级耐火材料和超级耐火材料。普通级耐火材料的耐火度在 1580 ~ 1770℃,高级耐火材料的耐火度在 1770 ~ 2000℃,特级耐火材料的耐火度在 2000℃ 以上,耐火度在 3000℃ 以上的称为超级

耐火材料。按其化学矿物组成分类,可划分为硅酸铝质耐火材料、硅质耐火材料和镁质耐火材料和碳质耐火材料等。如果按其用途还可分为高炉用耐火材料、顶吹转炉用耐火材料和连续铸钢用耐火材料等。

(一)酸性耐火材料

酸性耐火材料通常是指 $w_{\text{SiO}_2} > 93\%$ 的氧化硅质耐火材料。它的主要特点是在高温下能抵抗酸性熔渣的侵蚀,易与碱性熔渣起反应。如石英玻璃制品、熔融石英制品、硅砖及硅质不定形耐火材料均属酸性耐火材料,粘土质耐火材料是属半酸性或弱酸性耐火材料,锆英石质和碳化硅质作为特殊酸性耐火材料也归在此类之中。

(二)碱性耐火材料

碱性耐火材料是指以 MgO 或 MgO 和 CaO 为主要成分的耐火材料。这类耐火材料的耐火度都很高,能够抵抗碱性熔渣的侵蚀,像镁砖、镁铝质、镁铬质、镁橄榄石质、白云石质材料等均属此类耐火材料,其中镁质、白云石质属强碱性耐火材料,而镁铝质、镁铬质、镁橄榄石质及尖晶石类材料均属弱碱性耐火材料。

(三)中性耐火材料

在高温下,与碱性或酸性熔渣都不易起明显反应的耐火材料为中性耐火材料,如碳质、铬质耐火材料均属此类。高铝质耐火材料则是具有酸性倾向的中性耐火材料,而铬质耐火材料则是具有碱性倾向的中性耐火材料。

(四)常用耐火材料的化学组成

常用耐火材料化学组成见表 5-1-1。

表 5-1-1 各种耐火材料的主要化学组成

类别	主要成分
硅质	$w_{\text{SiO}_2} > 93\%$
粘土质	$w_{\text{SiO}_2} = 50\% \sim 60\%$; $w_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 30\% \sim 40\%$
高铝质	$w_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 48\% \sim 75\%$
刚玉	白刚玉 $w_{\text{Al}_2\text{O}_3} > 98\%$ 棕刚玉 $w_{\text{Al}_2\text{O}_3} > 94.5\%$
镁质	$w_{\text{MgO}} > 85\%$
镁铝质	$w_{\text{MgO}} > 80\%$; $w_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 5\% \sim 12\%$
镁铬质	$w_{\text{MgO}} 48\% \sim 80\%$; $w_{\text{Cr}_2\text{O}_3} = 8 \sim 12\%$
白云石质	$w_{\text{MgO}} > 36\%$; $w_{\text{CaO}} > 40\%$
镁碳质	$w_{\text{MgO}} > 75\%$; $w_{\text{C}} > 14\%$

二、耐火材料的主要性质

(一) 耐火度

耐火度是指耐火材料在高温下不软化的性能。耐火材料是多种矿物的组合体,在受热过程中,熔点低的矿物首先软化进而熔化,随着温度的升高,高熔点矿物也逐渐软化进而熔化。因此,耐火材料没有固定的熔点,耐火材料受热软化到一定程度时的温度称为该材料的耐火度。

根据 YB 368-75 规定的测试条件,测出各种耐火材料的耐火度。将耐火原料或制品做成上底边长为 2mm,下底边长为 8mm,高为 30mm,截面为等边的三角形锥体,称试样耐火锥。将试样耐火锥与标准锥同时加热,试样受高温作用软化弯倒,以同时弯倒的标准锥的序号来表示试样的耐火度。我国是以标准锥的序号再乘以 10 作为试样的耐火度。例如标准锥的序号是(WZ)176,则试样耐火度为 1760℃。其耐火锥试样的测试如图 5-1-1 所示。耐火度不能代表耐火材料的实际使用温度,因为耐火材料在实际使用时都承受一定的载荷,所以耐火材料实际能够承受的温度比所测耐火度要低。

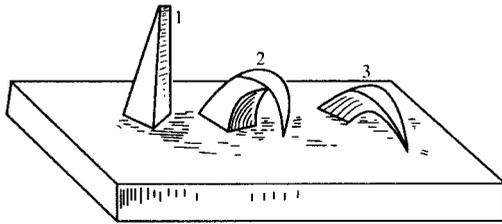


图 5-1-1 耐火锥体弯倒情况

1—软化前 2—在耐火度温度下弯倒情况;

3—超过耐火度时弯倒情况

(二) 荷重软化温度

荷重软化温度也称荷重软化点。耐火制品在常温下耐压强度很高,但在高温下承受载荷后就会发生变形,耐压强度就显著降低。所谓荷重软化温度就是耐火制品在高温条件下,承受恒定压负荷条件下发生一定变形的温度。荷重软化温度测定的方法是根据 YB-370 规定,将待测耐火材料制作成高 50mm,直径为 30mm 的圆柱体试样,加 0.2MPa 的静压,按 4.5~5.5℃/min 的速度升温,试样受压变形,测出耐火材料的荷重软化温度,当试样压缩 0.6% 时温度为荷重软化开始的温度;压缩变形至 20% 时的温度作为荷重软化终止温度。荷重软化温度也是衡量耐火制品高温结构强度的指标。

耐火材料的实际使用温度比荷重软化温度稍高些,其原因一方面是由于材料实际荷

重小于 0.2MPa ;另一方面是耐火材料在冶金炉内只是单面受热。表 5-1-2 是常用耐火材料高温结构强度。

表 5-1-2 常用耐火材料高温下的结构强度

耐火材料名称	荷重软化开始点 温度 $t_0/^\circ\text{C}$	荷重软化终止点 温度 $t_1/^\circ\text{C}$	耐火度 $t_2/^\circ\text{C}$	$t_2-t_0/^\circ\text{C}$
氧化硅质	1630	1670	1730	100
黏土质	1350	1600	1730	380
氧化镁质	1500	1550	2000	500

从表 5-1-2 可以看出,这三种耐火材料中,氧化硅质耐火材料的耐火度与荷重软化温度差值最小,说明其高温结构强度好,黏土质的高温结构强度就差些,氧化镁质耐火材料的耐火度虽然很高,可是其高温结构强度却较低,因此实际使用温度仍然不高。

(三) 耐压强度

耐火材料试样单位面积承受的极限载荷称为耐压强度,单位是 MPa。在室温下所测耐压强度为耐火材料的常温耐压强度;在高温下所测数值为高温耐压强度。

试验规定,在耐火制品的一个角切取试样,试样不得有裂纹、缺边、掉角等缺陷,试验时试样受力方向与成型时的加压方向一致。测定耐压强度每组应 3 个试样,试样耐压强度值为试验结果的平均值。耐压强度可用下式表示:

$$S = F/ab$$

- 式中 S ——耐压强度,MPa;
 F ——试验时最大载荷,N;
 a ——试样长度,mm;
 b ——试样宽度,mm。

(四) 抗热震性

耐火材料抵抗由于温度急剧变化而不开裂或不剥落的性能称为抗热震性,又称温度急变抵抗性,或耐急冷急热性。耐火材料经常处于温度急剧变化状态下作业,由于耐火材料的导热性较差,使得材料内部会产生应力,当应力超过材料的结构强度极限时就会产生裂纹或剥落。因此,抗热震性也是耐火材料的重要性质之一。

耐火材料的抗热震性是根据 YB—376 规定来测定的。将耐火材料制成试样,加热至 1100℃后,马上置于冷水中,并反复进行,当其剥落部分的质量达到试样最初质量的 20% 时为止,在此期间经过急冷急热的次数作为该材料的抗热震性的量度。

(五) 热膨胀性

耐火材料及其制品受热膨胀遇冷收缩,这种热胀冷缩是可逆的变化过程,其热胀冷缩的程度取决于材料的矿物组成和温度。耐火材料的热膨胀性可用线胀率或体积胀率来表示,以每升高 1°C 制品的长度或体积的相对增长率作为热胀性的量度。即用线膨胀百分率或体积膨胀百分率表示。

$$\rho = [(l_2 - l_1) / l_1] \times 100\% \quad (5-1-1)$$

式中 ρ ——线膨胀率, % ;

l_1 ——受热前材料的长度, mm ;

l_2 ——受热后材料的长度, mm。

不同耐火材料的线膨胀率也不一样。在砌筑炉衬时必须要考虑材料的线膨胀率。图 5-1-2 是各种耐火材料的线膨胀曲线,从图可以看出,镁质耐火材料线胀率最大。

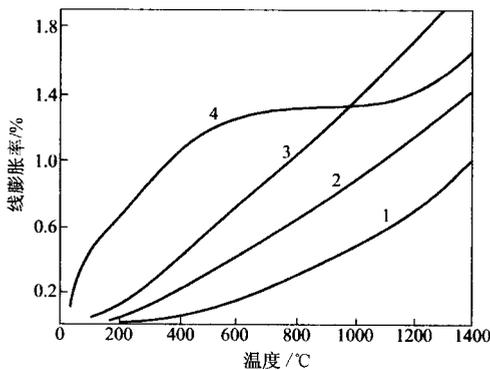


图 5-1-2 各种耐火材料线膨胀曲线

1—黏土质 2—刚玉质 3—镁质 4—氧化硅质

(六) 导热性

耐火材料及制品的导热能力用导热系数表示,即单位时间内,单位温度梯度,单位面积耐火材料试样所通过的热量称为导热系数,也称热导率,单位是 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

(七) 重烧线变化

耐火材料及其制品在高温下长期使用体积发生不可逆变化,也就是继续完成在焙烧过程中未完成的物理化学变化;有些材料产生膨胀,称其为重烧膨胀,也称残存膨胀;有些材料是发生收缩,称其为重烧收缩,也称残存收缩。用膨胀或收缩的数值占原尺寸的百分数来表示高温下耐火材料或制品的体积稳定性。

黏土砖在使用过程中常发生重烧收缩,而硅砖则常发生重烧膨胀现象,只有碳质耐

火材料高温体积稳定性良好。倘若耐火材料的高温体积稳定性较差时,往往会引起炉衬砖裂缝或坍塌。各种耐火材料的重烧膨胀或重烧收缩允许值应在 0.5% ~ 1.0% 范围内。

(八) 抗渣性

耐火材料在高温下,抵抗熔渣侵蚀的能力称为抗渣性,耐火材料的抗渣性与熔渣的化学性质、工作温度和耐火材料的致密程度有关。

对耐火材料的侵蚀包括化学侵蚀、物理溶解和机械冲刷三个方面。化学侵蚀是指熔渣与耐火材料发生化学反应,其所形成的产物进入熔渣,从而改变了熔渣的化学成分,同时耐火材料遭受蚀损。物理溶解是指由于化学侵蚀和耐火材料颗粒结合不牢固,使得固体颗粒溶解于熔渣之中。机械冲刷是指由于熔渣流动对耐火材料中结合力差的固体颗粒带走或溶于熔渣中。

根据我国国家标准 GB 8931—88 规定,采用回转渣蚀法测定抗渣性,可用熔渣侵蚀量 mm(或%)表示。将试验砖砌筑在炉衬上,在高温氧化气氛中进行试验,结束后首先将试验砖表面粘结的炉渣清除,再测定试验砖的厚度,以免产生误差。

(九) 气孔率

气孔率是耐火材料制品中气体的体积占制品体积的百分比,表示耐火材料或制品致密程度的指标。耐火材料内气孔与大气相通的叫开口气孔,其中贯穿的气孔称为连通气孔,不与大气相通的气孔称为闭口气孔,如图 5-1-3 所示。

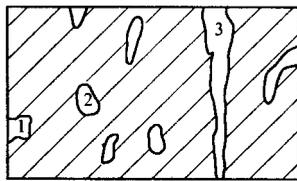


图 5-1-3 耐火材料中气孔类型

1—开口气孔 2—闭口气孔 3—连通气孔

耐火材料中全部气孔体积占耐火材料总体积的百分比称真气孔率,亦称全气孔率。

$$\text{真气孔率} = [(V_1 + V_2 + V_3) / V] \times 100\%$$

式中 V ——耐火材料总体积;

V_1 ——开口气孔体积;

V_2 ——闭口气孔体积;

V_3 ——贯通气孔体积。

开口气孔与贯通气孔的体积占耐火材料总体积的百分比称为显气孔率,亦称假气孔率。

$$\text{显气孔率} = (V_1 + V_2) / V \times 100\% \quad (5-1-2)$$

显而易见,显气孔率高时,说明耐火材料与大气相通的气孔多,在使用过程中耐火材料易受侵蚀和水化作用。所以,对各种耐火材料的显气孔率的要求,在国家标准中都有规定。

(十) 体积密度

单位体积(包括气孔体积在内)的耐火材料的质量称为体积密度,其单位是 g/cm^3 或 t/m^3 ,表达式为:

$$\text{密度} = G / V \quad (5-1-3)$$

式中 G ——耐火材料在 110°C 干燥后的质量;

V ——耐火材料的体积。

第二节 氧气顶吹转炉用耐火材料

自氧气顶吹转炉问世以来,其炉衬的工作层都是用碱性耐火材料砌筑。曾经用过白云石质耐火材料,制成焦油结合砖,在高温条件下砖内的焦油受热分解,残留在砖体内的碳石墨化,形成碳素骨架。它可以支撑和固定白云石材料的颗粒,增强砖体的强度,同时还能填充耐火材料颗粒间的空隙,提高了砖体的抗渣性能。为了进一步提高炉衬砖的耐化学侵蚀性和高温强度,也曾使用过高镁白云石砖和轻烧油浸砖,炉衬寿命均有提高,炉龄一般在几百炉。直到 20 世纪 70 年代兴起了以死烧或电熔镁砂和碳素材料为原料,用各种碳质结合剂,制成镁碳砖。镁碳砖兼备了镁质和碳质耐火材料的优点,克服了传统碱性耐火材料的缺点,其优点如图 5-1-4 所示。镁碳砖的抗渣性强,导热性能好,避免了镁砂颗粒产生热裂,同时由于有结合剂固化后形成的碳网络,将氧化镁颗粒紧密牢固地连接在一起。用镁碳砖砌筑转炉内衬,大幅度提高了炉衬使用寿命,再配合适当维护方式,炉衬寿命可达到万炉以上。

一、镁碳砖用材料

(一) 原料

1. 镁砂

镁砂是生产镁碳砖的主要原料,因此镁砂的质量直接关系到镁碳砖的性能。要求镁

砂 $w_{MgO} > 95\%$,杂质要低 ;方镁石晶粒直径要大 ,这样 ,晶界数目少 ,晶界面积小 ,熔渣沿晶粒表面难于渗入。同时镁砂的体积密度要高 ,应大于 $3.34mg/cm^3$;气孔率要低 ,应小于 3% 。镁砂中 $m(CaO)/m(SiO_2) > 2$,这可形成高熔点相 $C_2S(2CaO \cdot SiO_2)$,液相数量少 ,不会降低砖和制品的高温性能和高温强度。 $m(CaO)/m(SiO_2)$ 高 ,有利于提高镁砂在高温下与石墨共存的稳定性 ,电熔镁砂是最为理想的材料。日本没有镁砂资源 ,多使用海水合成镁砂 , $w_{MgO} > 98\%$,一般 $m(CaO)/m(SiO_2) > 3$ 。表 5-1-3 是镁砂的理化指标。

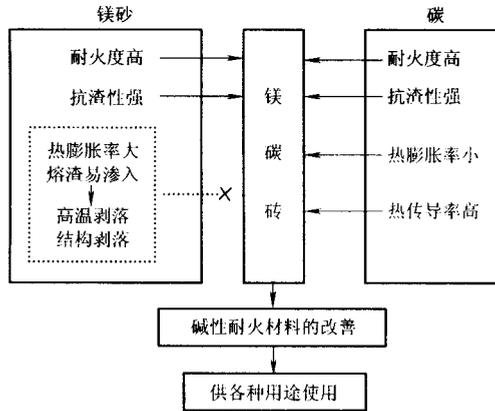


图 5-1-4 镁碳砖性能

表 5-1-3 各种镁砂的理化指标

性能 \ 试样	电熔镁砂 A	电熔镁砂 B	烧结镁砂 C	烧结镁砂 D
$w_{MgO}/\%$	98.24	95.60	95.94	91.39
体积密度/ $g \cdot cm^{-3}$	3.44	3.39	3.16	3.13
气孔率/ $\%$	3.93	4.67	7.50	9.21
灼减/ $\%$	0.24	0.26	0.30	0.29

2. 碳素原料

碳素原料性能同样对砖和制品的耐蚀性、耐剥落性、高温强度和抗氧化性等均有直接的关系 ,所以用于制作镁碳砖的碳素原料必须要符合制砖的技术要求 ,高纯度石墨是制作镁碳砖的最佳碳素原料。石墨的固定碳含量应大于 95% ;灰分要低 ,灰分的主要组成 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 ,其三者之和约占灰分质量的 $82\% \sim 88\%$,而 SiO_2 含量则占一半

左右。如果配入的石墨原料纯度低,势必带入较多的 SiO_2 , 这样就会改变原料中 $m(\text{CaO})/m(\text{SiO}_2)$ 比值,使高纯度镁砂的高耐火相 C_2S 降低, C_2S 有可能转变成低熔点相 $\text{CMS}(\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2)$ 和 $\text{C}_2\text{MS}_2(2\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2)$,从而降低了制品的高温性能 and 高温强度。此外,石墨为片状结构,其鳞片的大小和厚薄对砖体和制品的性能也有影响,鳞片大小应大于 0.105mm 最好大于 0.20mm ,薄鳞片石墨的厚度应小于 0.2mm ,最好小于 0.010mm 。表 5-1-4 薄鳞片石墨为原料制成镁碳砖的情况。

表 5-1-4 用薄鳞片石墨原料的效果

试 样		改进砖				普通砖	
		M1	M2	M3 ^②	M4	M5	M6
配料名称及项目分析							
石墨 A ^① 的质量分数 $w/\%$		20	10	20	5		
石墨 B 的质量分数 $w/\%$			10		15	20	20
烧结镁砂粒度 /mm	5~1						45
	1~0.074	52	52	52	52	52	17
	<0.074	25	25	25	25	25	15
Al 粉(粒度小于 0.074mm)		3	3	3	3	3	3
热硬性树脂		+4	+4	+4	+4	+4	+4
高温抗折强度/MPa		21.8	20.6	29.8	19.4	18.8	10.8
耐剥落性 $R^{\text{③}}$		0.65	0.61	0.60	0.55	0.53	0.59
耐侵蚀性		93	96	80	98	105	100
使用 效果	300t 盛钢桶渣线/次		58				40
	150t LD 炉蚀损指数			68			100

①石墨 A: $w_c = 94.8\%$ 鳞片大小大于 0.21mm , 88% 在 $0.21 \sim 0.105\text{mm}$, 12% 。石墨 B: $w_c = 95.7\%$ 鳞片大小小于 0.21mm , 100% ;

②M3 是 1370°C 在焦炭中烧成后浸渍沥青砖,其余 $200^\circ\text{C} \times 24\text{h}$ 处理;

③ 1600°C 水冷 5 次前后弹性率的变化, R 值越大,则耐剥落性越好。

(二) 结合剂

结合剂在碳复合耐火材料中占有重要地位。它的质量好坏对坯料的混炼,成型性能及砖和制品的显微结构都有很大影响,在很大程度上影响砖和制品的生产和质量。可以

作为镁碳砖结合剂的种类很多,如煤焦油、煤沥青、石油沥青及酚醛树脂等。由于酚醛树脂的残碳率高,与镁砂和石墨有良好的润湿性,能够均匀地分布于镁砂和石墨的表面,碳化后可形成连续的碳网络,有利于提高砖和制品的强度和抗蚀性。因此,酚醛树脂被认为是制作镁碳砖最好的结合剂。表 5-1-5 列出树脂的基本性能。树脂加入的数量对砖和制品的常温耐压强度、显气孔率、体积密度等性能也有影响,在生产石墨镁碳砖时,酚醛树脂的一般添加量为 5% 左右。表 5-1-6 是树脂加入量不同时砖性能的对比。

表 5-1-5 酚醛树脂基本性能

项目分析		试样	日本树脂	树脂 A	树脂 B	树脂 C	树脂 D
外观			淡黄棕色液体,透明	淡黄色液体,透明	深棕红色液体	淡黄色液体	棕色液体
类型			甲阶型	甲阶型	甲阶型	清漆型	清漆型
固含量 $w/\%$ (200~250℃残重)			83.10	82.37	83.00	75.00	-70.00
固定碳含量 % (900℃)	对树脂		43.93	44.28		40.70	37.00
	对固含量		52.86	53.18	48.20	55.00	51.00
游离酚 / %			9.57	8.70	9.00		≤5.00
密度(20℃) $\gamma/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$			1.226	1.236			1.100
黏度/Pa·s			17	10.2	黏度太大不易测定	E40 = 42~45	3~8
溶剂种类			乙二醇	乙二醇		工业酒精	工业酒精
气 味			微	微		气味较大	较大
200~205℃ 硬化处理的体积变化			收缩	收缩		膨胀	膨胀

表 5-1-6 结合剂加入量不同时镁碳砖理化性能

树脂编号	树脂加入量为 4%			树脂加入量为 6%		
	气孔率 / %	体积密度 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	常温耐压强度 / MPa	气孔率 / %	体积密度 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	常温耐压强度 / MPa
A	4.2	2.90	30.5	4.7	2.85	37.2
C	5.9	2.86	29.0	5.5	2.82	33.6
D	4.9	2.83	28.0	6.0	2.81	29.6

(三) 添加剂

由于石墨碳的存在,使镁碳砖具有优良的抗渣性和抗热震性能,但在冶炼过程中,砖体中的碳容易被氧化,使砖的结构松散恶化,熔渣沿缝隙浸入砖体,蚀损镁砂颗粒,降了镁碳砖的使用寿命。因此,抑制镁碳砖中碳的氧化是提高镁碳砖质量的关键之一。可以向原料中添加 Ca、Si、Al、Mg、Zr、SiC、B₄C 和 BN 等金属元素或化合物,这些材料称抗氧化添加剂。它们的作用有二,一方面是在工作温度之下,添加物或添加物和碳的反应产物与氧的亲合力比碳与氧的亲合力大,先于碳被氧化,从而起到保护碳的作用;另一方面添加剂与 O₂、CO 或者碳反应生成的化合物可以改变碳复合耐火材料的显微结构,堵塞气孔增加致密度,同时阻碍氧及反应产物的渗入扩散等。

二、镁碳砖生产工艺要点

镁碳砖的生产工艺流程如图 5-1-5 所示。现将生产要点简述如下。

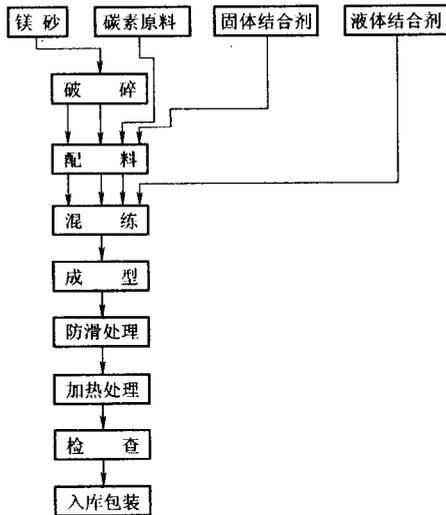


图 5-1-5 镁碳砖生产工艺流程图

(一) 原料的制备

镁碳砖中镁砂颗粒配比如表 5-1-7 所列。镁砂中的大颗粒是镁碳砖的骨料颗粒。许多学者的研究认为,镁砂骨料颗粒微细化可以降低开口气孔率,能够提高镁碳砖的抗氧化性能,但骨料颗粒直径变小,会增加闭口气孔率,降低体积密度;另外 MgO 也容易与石墨反应,所以在高压成型设备条件下,镁砂骨料颗粒粒径在 1mm 为宜。许多厂家的成型设备压力较低,因而镁砂骨料颗粒的临界粒径在 5mm 以上较好。

表 5-1-7 镁碳砖中镁砂颗粒配比

5~1(或3~1)mm 镁砂配比/%	<1(或0.5)mm 镁砂配比/%	<0.074mm 镁砂 + 石墨 + 添加剂配比/%	树脂(外加) 配比/%	固化剂量
50~60	10	30~40	5~6	适量

石墨的加入量对镁碳砖的性能也有影响,若石墨加入量增加,可以提高砖的抗渣性和抗热震性能,但抗氧化性能和强度有所降低;加入量过多,制砖成型时也较困难;倘若镁碳砖中碳的含量小于10%,制品中很难形成连续的碳网络,这样就不能发挥碳在制品中的优势。因此镁碳砖中石墨的加入量应在10%~20%范围内。

为了使石墨能均匀地分布在镁砂颗粒周围,因此加料的顺序为镁砂颗粒→结合剂→石墨→镁砂细粉+添加剂的混合细粉。

由于配料中石墨含量较多,密度小,添加剂加入量又非常少,必须有足够的混料时间使其混合均匀。最好是使用带加热装置的混料设备,这样树脂的流动性较好,能达到混合均匀的目的。

(二)成型

成型是提高砖体的填充密度,使砖和制品组织结构致密化的重要环节。由于镁砂的临界颗粒小,石墨加入量多,成型较为困难,所以在制砖成型时应严格按照先轻后重,多次加压的操作规程进行压制,避免产生成型裂纹。最好是采用真空脱气压砖机制砖,即抽真空排气加压设备。

真空脱气压砖机,是将装有配好原料的砖模置于真空状态下,脱气后加压成型。由于加压前原料中的空气几乎被全部吸出,所以基本上不产生成型裂纹,特别适合于压制配加石墨数量多的材料。镁碳砖中石墨含量多,镁砂颗粒临界粒径又趋于微细化,再加上是高压成型,所以砖和制品的外形表面非常光滑,这给搬运和砌筑带来一定的难度,因此成型后的砖和制品需进行防滑处理,即将砖坯浸渍在热硬性树脂中,或在砖的表面涂一层厚度为0.1~2mm特制的热硬性树脂。资料表明,经过这样处理的镁碳砖表面形成了一层树脂膜,不易滑动,无论是搬运还是砌筑都不会滑动移位,便于操作,砌筑后更不会发生滑塌现象。

(三)硬化处理

镁碳砖的硬化处理温度对砖和制品的性能有影响。试验表明,镁碳砖在200~250℃的温度下处理,可以得到性能良好的制品。其升温过程为:

在50~60℃阶段,因树脂软化,应保温;

在100~110℃阶段,溶剂大量排出,应保温;

在 200 或 250℃时,为使反应完全,应保温。

不同档次镁碳砖理化指标列于表 5-1-8。

表 5-1-8 不同档次镁碳砖的性能

类别	$w_{MgO}/\%$	$w_C/\%$	气孔率/ $\%$	体积密度 $/g \cdot cm^{-3}$	常温耐压强度 $/MPa$
高档	76.18	16.83	3	2.76	38.3
	74.46	16.66	3	2.78	34.7
	75.19	14.79	3	2.78	37.8
中档	80.52	15.50	5	2.73	19.1
	80.32	13.27	6	2.76	21.1
	78.54	14.12	4	2.72	22.6
低档			5	2.66	17.6
			7	2.62	16.1
			6	2.61	18.6

三、转炉内衬用砖

顶吹转炉的内衬是由绝热层、永久层和工作层组成。绝热层一般用石棉板或耐火纤维砌筑;永久层是用焦油白云石砖或者低档镁碳砖砌筑;工作层都是用镁碳砖砌筑。转炉的工作层与高温钢水和熔渣直接接触,受高温熔渣的化学侵蚀,受钢水、熔渣和炉气的冲刷,还受到加废钢时的机械冲撞等,工作环境十分恶劣。在冶炼过程中由于各个部位工作条件不同,因而工作层各部位的蚀损情况也不一样,针对这一情况,视其损坏程度砌筑不同的耐火砖,容易损坏的部位砌筑高档镁碳砖,损坏较轻的地方可以砌筑中档或低档镁碳砖,这样整个炉衬的蚀损情况较为均匀,这就是所谓的综合砌炉。转炉内衬砌砖情况如下:

(1) 炉口部位。这个部位温度变化剧烈,熔渣和高温废气的冲刷比较厉害,在加料和清理残钢、残渣时,炉口受到撞击,因此用于炉口的耐火砖必须具有较高的抗热震性和抗渣性,耐熔渣和高温废气的冲刷,且不易粘钢,即便粘钢也易于清理的镁碳砖。

(2) 炉帽部位。这个部位是受熔渣侵蚀最严重的部位,同时还受温度急变的影响和含尘废气的冲刷,故使用抗渣性强和抗热震性好的镁碳砖。此外,若炉帽部位不便砌筑绝热层时,可在永久层与炉壳钢板之间填筑镁砂树脂打结层。

(3) 炉衬的装料侧。这个部位除受吹炼过程熔渣和钢水喷溅的冲刷、化学侵蚀外,还

要受到装入废钢和兑入铁水时的直接撞击与冲蚀,给炉衬带来严重的机械性损伤,因此应砌筑具有高抗渣性、高强度、高抗热震性的镁碳砖。

(4)炉衬出钢侧。此部位基本上不受装料时的机械冲撞损伤,热震影响也小,主要是受出钢时钢水的热冲击和冲刷作用,损坏速度低于装料侧。若与装料侧砌筑同样材质的镁碳砖时,其砌筑厚度可稍薄些。

(5)渣线部位。这个部位是在吹炼过程中,炉衬与熔渣长期接触受到严重侵蚀而形成的。在出钢侧,渣线的位置随出钢时间的长短而变化,大多情况下并不明显,但在排渣侧就不同了,受到熔渣的强烈侵蚀,再加上吹炼过程其他作用的共同影响,衬砖损毁较为严重,需要砌筑抗渣性能良好的镁碳砖。

(6)两侧耳轴部位。这部位炉衬除受吹炼过程的蚀损外,其表面又无保护渣层覆盖,砖体中的碳素极易被氧化,并难于修补,因而损坏严重。所以,此部位应砌筑抗渣性能好、抗氧化性能强的高级镁碳砖。

(7)熔池和炉底部位。这部位炉衬在吹炼过程中受钢水强烈的冲蚀,但与其他部位相比损坏较轻。可以砌筑含碳量较低的镁碳砖,或者砌筑焦油白云石砖。若是采用顶底复合吹炼工艺时,炉底中心部位容易损毁,可以与装料侧砌筑相同材质的镁碳砖。

综合砌炉可以达到炉衬蚀损均衡,提高转炉内衬整体的使用寿命,有利于改善转炉的技术经济指标。图 5-1-6 和图 5-1-7 是日本两个厂家转炉综合砌筑炉衬的实例。

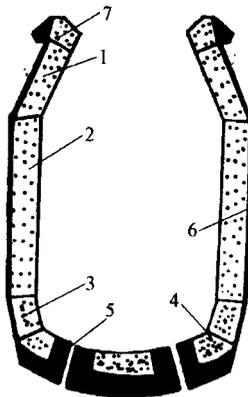


图 5-1-6 日本大分厂顶底复合吹炼转炉综合砌砖

- 1—不烧镁碳砖 ($w_C = 20\%$, 高纯度石墨, 烧结镁砂) 2—不烧镁碳砖 ($w_C = 18\%$, 高纯石墨, 烧结镁砂) 3—A—不烧镁碳砖 ($w_C = 15\%$, 普通石墨, 烧结镁砂) 5—烧成镁碳砖 ($w_C = 20\%$, 高纯石墨, 电熔镁砂) 6—永久层为烧成镁砖 7—烧成 $Al_2O_3 - SiC - C$ 砖

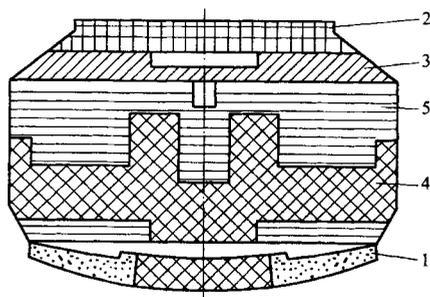


图 5-1-7 日新钢铁公司氧气转炉砌砖图

(图中的 1 2 3 4 5 分别与表 5-1-9 的材质编号相对应)

图 5-1-7 是 185t 复吹转炉的综合砌炉图。

表 5-1-9 各种材质的性能

材质编号		1	2	3	4 ^①	5	供气砖 ^①
化学成分 w/%	MgO	65.8	70.8	75.5	72.5	74.5	
	CaO	13.3	0.9	1.0	0.2	1.5	
	固定碳	19.2	14.2	20.2	20.2	20.5	25
	主要添加物			金属粉	金属粉	金属粉	金属粉 BN
体积密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$		2.82	2.86	2.84	2.87	2.85	2.88
显气孔率/%		4.7	3.7	3.7	3.0	3.0	1.0
抗折强度(1400℃)/MPa		4.8	4.4	12.9	15.2	14.6	17.7
回转抗渣试验蚀损指数 (1700℃)		100	117	98	59	79	81

①使用了部分电熔镁砂为原料。

图 5-1-7 所示转炉的操作温度在 1650~1710℃,除了冶炼普通钢外,还冶炼低碳钢和一些特殊钢,每日出钢 35~45 炉次,装入 95% 的铁水,钢水全部连铸,炉龄为 5113 炉次/炉役。

四、转炉出钢口用砖

转炉的出钢口除了受高温钢水的冲刷外,还受温度急变的影响,蚀损严重,其使用寿命与炉衬砖不能同步,经常需要热修理或更换,影响冶炼时间。改用等静压成型的整体镁碳砖出钢口,由于是整体结构,更换方便多了,材质改用镁碳砖,寿命得到大幅度提高,

但仍不能与炉衬寿命同步,只是更换次数少了而已。表 5-1-10 是出钢口用镁碳砖性能。

表 5-1-10 出钢口用镁碳砖性能

成分及性能 试样	化学成分 w/%		显气 孔率 /%	体积 密度 /g· cm ⁻³	常温 耐压 强度/ MPa	常温 抗折 强度/ MPa	抗折 强度/ MPa (1400℃)	加热 1000℃后		加热 1500℃后	
	(MgO)	固定碳含 量						显气孔 率/%	体积密 度/g· cm ⁻³	显气孔 率/%	体积密 度/g· cm ⁻³
日本品川公司 改进的镁碳砖	73.20	19.20	3.20	2.92	39.2	17.7	21.6	7.9	2.89	9.9	2.80
武汉钢铁学院 整体出钢口砖	76.83	12.90	5.03	2.93							

五、复吹转炉底部供气用砖

底部供气砖用于从转炉底部供入 Ar 或 N₂、或 CO₂、或三者与氧气的混合物,复吹时产生高温和强烈的搅拌作用,因此底部供气砖必须具有耐高温、耐侵蚀、耐冲刷、耐磨损和抗剥落性强的性能;从吹炼角度讲,要求气体通过供气砖产生的气泡要细小均匀;供气砖使用安全可靠,寿命尽可能与炉衬寿命同步。为此,镁碳质砖仍然为最佳材料。表 5-1-11 是几种镁碳质供气砖性能。

表 5-1-11 几种镁碳质供气砖的性能

成分及性能 试样		日 本			鞍钢镁碳砖
		镁碳质砖	镁碳质砖	改进后镁碳砖	
化学成分 w/%	MgO	85	80	78	79.37
	C	15	20	19	13.79
气孔率/%		4.0	4.9	1.7	2~4
体积密度/g·cm ⁻³		3.00	2.85	2.96	2.80~2.85
常温耐压强度/MPa		43.0	33.5	50.5	20.0~26.0
抗折强度(1400℃)/MPa		16.5	12.0	17.0	

第二章 炉龄影响因素及提高措施

第一节 影响炉龄的因素

一、炉衬损坏的原因

炉衬与高温钢水和熔渣直接接触,工作条件十分恶劣,损坏的原因不外乎以下几方面。

- (1)加废钢和兑铁水时对炉衬的机械冲撞和冲刷;
- (2)熔渣、钢水、炉气对炉衬的冲刷作用;
- (3)熔渣对炉衬的化学侵蚀;
- (4)温度骤变引起的剥落;
- (5)由于炉衬砖本身的矿物组成的分解引起的层裂等。

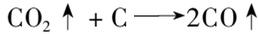
这些因素单独或综合作用导致炉衬砖的损坏。

二、炉衬砖的蚀损机理

镁碳砖中含有相当数量的碳成分,与熔渣的润湿性较差,阻碍着熔渣向砖体内的渗入,据观察,镁碳砖残砖工作表面比较光滑,只附着一层 $0 \sim 5\text{mm}$ 的薄渣层。用肉眼很难看到熔渣的渗透层和明显的脱碳层,只有在显微镜下才观察到脱碳层的存在。

镁碳砖在使用过程中,工作表面的碳受到氧化性熔渣中 FeO 等氧化物及供入的 O_2 、

炉气中 CO_2 等氧化性气氛的氧化作用,以及高温条件下 MgO 的还原作用使得镁碳砖表面形成脱碳层。其反应如下:



在反光显微镜下观察残砖时,发现脱碳层中有金属铁粒存在,这是由于碳被氧化,铁被还原所致。砖体的工作表面由于碳的氧化脱除,砖体组织结构松动脆化,在炉液的冲刷下流失而被蚀损;同时由于碳脱除所形成的孔隙和镁砂颗粒的松动,熔渣从孔隙和缝隙中渗入,基于上述情况的共同作用使砖体熔损。

当镁碳砖与碱度低、 TFe 含量低的熔渣接触时,熔渣中的 Ca 、 Si 有选择地侵入到镁砂颗粒的边缘,并生成低熔点 $\text{CMS}(\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2)$ 和 $\text{C}_3\text{MS}_2(3\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2)$ 矿物等。起初这种液相矿物比较粘稠,暂时留在方镁石晶粒的表面,或砖体的毛细管入口处,起到临时阻止熔渣渗入的作用。随着反应的继续进行,低熔点化合物不断增多,液态胶结相粘度逐渐下降,直至不能粘结方镁石晶粒和晶粒聚合体时,引起方镁石的消蚀和镁砂颗粒的解体,因而方镁石晶粒分离浮游而进入熔渣,砖体熔损也就变大。

镁碳砖与碱度高、 TFe 含量高的熔渣接触时,铁以 FeO 的形式侵入砖体,与方镁石晶粒形成固溶体,也称镁浮氏体。当 FeO 固溶量超过一定限度后,就会形成镁铁型矿物,镁浮氏体与镁铁矿物共存。由于 TFe 成分的侵入,伴随着温度和炉气气氛的变化,镁浮氏体与镁铁矿物相互的转化,其体积亦相应发生变化,从而产生微细裂纹,此时熔渣中 Si 、 Ca 等成分侵入方镁石晶粒,使方镁石晶体脱离砖体而流入熔渣。

实践和研究表明,电熔镁砂的方镁石晶粒大,几乎没有颗粒边缘液相引起的熔损,主要是由于颗粒出现了微细裂纹,熔渣浸入后引起的损毁。

镁碳砖就是通过氧化—脱碳—冲蚀,最终镁砂颗粒在熔渣中飘移和流失,砖体这样周而复始被蚕食损坏的。图 5-2-1 镁碳砖蚀损示意图。提高镁碳砖的使用寿命,关键是提高砖制品的抗氧化性能。

研究认为,镁碳砖出钢口是由于气相氧化—组织结构恶化—磨损侵蚀被蚀损的。

转炉底部镁碳质供气砖的损毁机理除了上述的脱碳—再反应—渣蚀的损毁外,还受到高速钢水的冲刷、熔渣侵蚀、频繁急冷急热的作用以及同时吹入气体的磨损作用等。

三、影响炉衬寿命的因素

(一) 炉衬砖的材质

1. 镁砂

镁碳砖质量的好坏直接关系着炉衬使用寿命,而原材料的纯度是砖质量的基础。镁砂中 MgO 含量越高,杂质越少,可以降低方镁石晶体被杂质分割的程度,能够阻止熔渣对镁砂的渗透熔损。如果镁砂中杂质含量多,尤其是 B_2O_3 ,会形成 $2MgO \cdot B_2O_3$ 等化合物,其熔点很低,只有 $1350^\circ C$ 。由于低熔点相存在于方镁石晶粒中,会将方镁石分割成单个小晶体,从而促使方镁石向熔渣中流失,这样就大幅度地降低镁砂颗粒的耐火度和高温性能。为此,用于制作镁碳砖的镁砂,一定要严格控制 $w_{B_2O_3}$ 在 0.7% 以下。我国的天然镁砂基本上不含 B_2O_3 ,因此在制作镁碳砖方面具有先天的优越性。

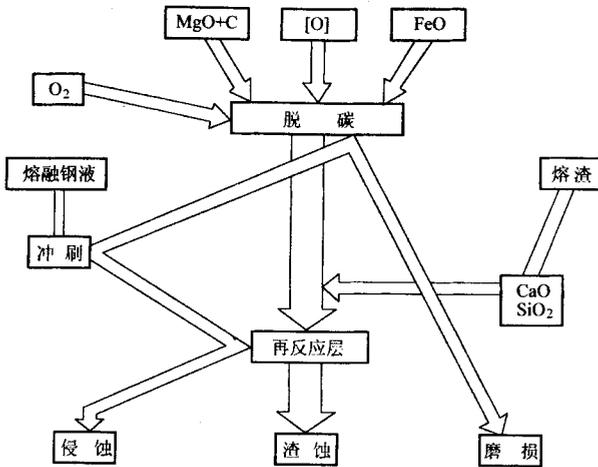


图 5-2-1 镁碳砖蚀损示意图

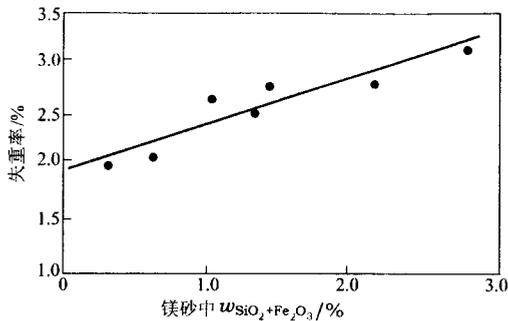


图 5-2-2 镁碳砖失重率与镁砂杂质含量的关系

此外,从图 5-2-2 可以看出,随镁砂中的 $w_{SiO_2+Fe_2O_3}$ 含量的增加,镁碳砖的失重率也增大。研究认为,在 $1500 \sim 1800^\circ C$ 温度下,镁砂中 SiO_2 先于 MgO 与 C 起反应,留下的孔隙使镁碳砖的抗渣性变差。试验指出,在 $1500^\circ C$ 以下,镁砂与石墨中的杂质向 MgO 和

C 的界面聚集,随温度的升高所生成的低熔点矿物层增厚,在 1600℃ 以上时,聚集于界面的杂质开始挥发,使砖体的组织结构松动恶化,从而降低砖的使用寿命。

前面讲过,镁砂中 $m(\text{CaO})/m(\text{SiO}_2)$ 过低,就会出现低熔点的含镁硅酸盐 CMS 、 C_3MS_2 等,并进入液相,从而增加了液相量,影响镁碳砖使用寿命。所以保持 $m(\text{CaO})/m(\text{SiO}_2) > 2$ 是非常必要的。

镁砂的体积密度和方镁石晶粒的大小,对镁碳砖的耐侵蚀性也有着十分重要的影响。将方镁石晶粒大小不同的镁砂制成镁碳砖,置于高温还原气氛中测定砖体的失重情况,试验表明方镁石的晶粒直径越大,砖体的失重率越小,在冶金炉内的熔损速度也缓慢。如图 5-2-3 所示。

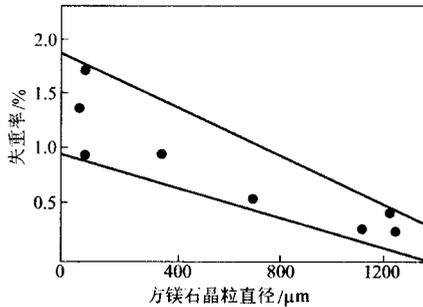


图 5-2-3 方镁石晶粒大小与砖体失重率的关系

实践表明,砖体性能与镁砂有直接的关系。只有使用体积密度高、气孔率低、方镁石晶粒大、晶粒发育良好、高纯度的优质电熔镁砂,才能生产出高质量的镁碳砖。

2. 石墨

在制砖的原料中已经讲过,石墨中杂质含量同样关系着镁碳砖的性能。研究表明,当石墨中 $w_{\text{SiO}_2} > 3\%$ 时,砖体的蚀损指数急剧增长。图 5-2-4 中所示石墨的 w_{SiO_2} 含量与镁碳砖蚀损指数的关系。

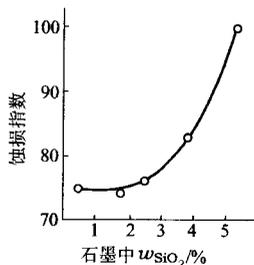


图 5-2-4 石墨中 SiO_2 与砖体蚀损指数的关系

3. 其他材料

树脂及其加入量对镁碳砖也有影响。学者们用 80% 烧结镁砂和 20% 的鳞片石墨为原料,以表 5-1-5 中树脂 C 为结合剂制成了试样进行实验。结果表明,随树脂加入量的增加,砖体的显气孔率降低;当树脂加入量为 5%~6% 时,显气孔率急剧降低;而体积密度则随树脂量的增加而逐渐降低。其规律如图 5-2-5 所示。

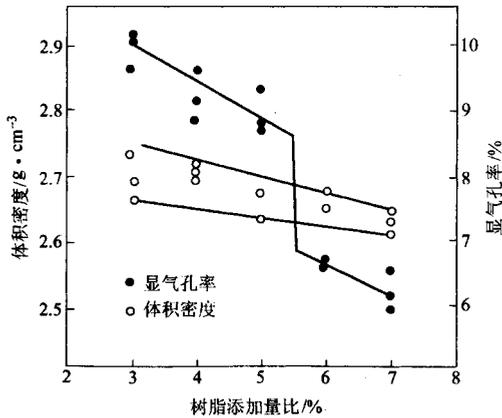


图 5-2-5 树脂与砖体显气孔率及体积密度的关系

加入金属添加剂是抑制镁碳砖氧化的手段。添加物种类及加入量对镁碳砖的影响也不相同。可以根据镁碳砖砌筑部位的需要,加入不同金属添加剂。图 5-2-6 为添加金属元素 Ca 对砖体性能的影响,图 5-2-7 为加入 Al、Si 对镁碳砖氧化指数的影响。

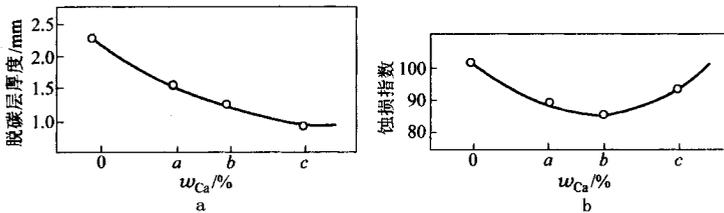


图 5-2-6 钙含量对镁碳砖性能的影响

a—脱碳层厚度与 Ca 含量的关系(1400℃×3h) b—侵蚀指数与 Ca 含量关系

从图 5-2-6 可以看出,随钙含量的增加,砖体的抗氧化性、耐侵蚀性等都有提高;当钙含量超过一定范围时,耐蚀性有所下降。

抗渣实验表明,加钙的镁碳砖工作表面粘附着一层薄而均匀致密的覆盖渣层。在这个覆盖渣层下面的原砖表面产生 $MgO + Ca \rightarrow CaO + Mg(\text{气})$ 的反应,从而增强了覆盖

渣层的性能,减少了镁蒸汽的外逸,同时在渣层与原砖之间形成了1~1.5mm厚致密的二次方镁石结晶层。因而大幅度地提高砖体在低温、高温区域的抗氧化性能和在氧化气氛中的耐蚀性。添加钙的镁碳砖残余膨胀低,因此也增强了镁碳砖的体积稳定性。所以,这种镁碳砖特别适合砌筑于转炉相当氧枪喷嘴部位和钢水精炼钢包渣线部位。

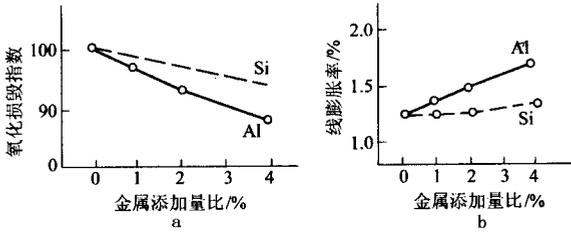


图 5-2-7 加入金属添加剂 Si、Al 与镁碳砖氧化指数的关系

a—Si 与 Al 添加剂与镁碳砖氧化指数的关系 b—Si 与 Al 添加剂与镁碳砖线胀系数的关系

加入 Si、Al 金属添加剂后,可以控制镁碳砖中石墨的氧化,特别添加金属铝的效果尤为明显,但加铝后砖体的线膨胀率变化较大,砌筑时要留有足够膨胀缝。研究认为,向时加入 Si、Al 时,在温度低于 1300℃ 时,随 w_{Si}/w_{Al} 比值的降低,即 w_{Al} 的含量增加,砖体的抗氧化性增强;若温度高于 1300℃ 到 1500℃,随 w_{Si}/w_{Al} 比值升高,即 w_{Si} 含量增多,抗氧化性也增强。所以,在 1500℃ 时,其 $w_{Si}/w_{Al} = 1$, 添加效果最佳。

添加金属镁有利于形成二次方镁石结晶的致密层,同样有利于提高镁碳砖的耐蚀性能。

(二)吹炼操作

铁水成分、工艺制度等对炉衬寿命均有影响。如铁水 $w_{[Si]}$ 高时,渣中 $w_{(SiO_2)}$ 相应也高,渣量大,对炉衬的侵蚀、冲刷也会加剧。但铁水中 $w_{[Mn]}$ 高对吹炼有益,能够改善炉渣流动性,减少萤石用量,有利于提高炉衬寿命。

吹炼初期炉温低,熔渣碱度值为 1~2, $w_{(FeO)}$ 为 10%~40%,这种初期酸性氧化渣对炉衬蚀损势必十分严重。通过熔渣中 MgO 的溶解度,可以看出炉衬被蚀损情况。

熔渣中 MgO 饱和溶解度,随碱度的升高而降低,因此在吹炼初期,要早化渣,化好渣,尽快提高熔渣碱度,以减轻酸性渣对炉衬的蚀损。随温度升高, MgO 饱和溶解度增加,温度每升高约 50℃, MgO 的饱和溶解就增加 1.0%~1.3%。当碱度值为 3 左右,温度由 1600℃ 升高到 1700℃ 时, MgO 的饱和溶解度由 6.0% 约增加到 8.5%。所以要控制出钢温度不宜过高,否则也会加剧炉衬的损坏。图 5-2-8 是熔渣碱度和 FeO 与 MgO

饱和溶解度的关系。在高碱度炉渣中 FeO 对 MgO 的饱和溶解度影响不明显。现将吹炼工艺因素对炉衬寿命的影响列表 5-2-1。

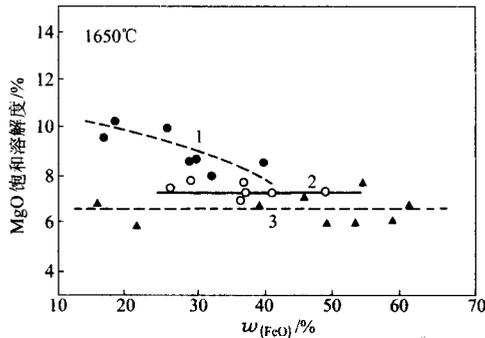


图 5-2-8 熔渣碱度和 FeO 与 MgO 饱和溶解度的关系

1—碱度值为 1.2~1.5, $w_{(\text{MnO})} = 22\% \sim 29\%$;

2—碱度值为 2.5~3.0, $w_{(\text{MnO})} = 20\% \sim 26\%$;

3—碱度值为 2.5~3.4, $w_{(\text{MnO})} = 3\% \sim 7\%$

表 5-2-1 工艺因素对炉龄的影响及提高炉龄的措施

项目	对炉龄的影响	目标	工艺措施
铁水条件	铁水 Si 含量高,渣量大,初期渣对炉衬侵蚀;S 含量高,P 含量高造成多次倒炉后吹,易使熔渣氧化性强,终点温度高,终渣对炉衬侵蚀加剧。	稳定吹炼操作,提高终点命中率	铁水 100% 采用预处理工艺,铁水 $w_{[\text{Si}]}$ 应 $\leq 0.04\%$, $w_{[\text{S}]} \leq 0.04\%$
冶炼操作	前期化渣不良,炉渣碱度偏低,中期反干喷溅严重;后期氧化性强,炉衬受到强烈辐射,冲刷与化学侵蚀,炉衬蚀损严重	避免中期返干,控制终渣 TFe 含量不要过高	采用计算机静态控制,标准化吹炼,提高铁水装入温度,使用活性石灰,前期快速成渣;采用复吹工艺控制喷溅和终渣 TFe 含量
终点控制	高温出钢,当出钢温度 $\geq 1620^\circ\text{C}$ 后,每提高 10°C 基础炉龄降低约 15 炉;渣中 w_{TFe} 每提高 5%,炉衬侵蚀速度增加 $0.2 \sim 0.3\text{mm/炉}$;每增加一次倒炉平均降低炉龄 30%;平均每增加一次后吹,炉衬侵蚀速度提高 0.8 倍	尽量减少倒炉次数,控制终点温度波动小于 $\pm 10^\circ\text{C}$ 降低出钢温度	采用计算机动态控制技术,避免多次倒炉或采用不倒炉直接出钢技术,炉外精炼、加强钢包的周转和烘烤,降低出钢温度。

第五篇 氧气转炉炉衬与炉龄

项目	对炉龄的影响	目标	工艺措施
护炉工艺	采用各种护炉工艺可提高炉龄3倍以上;监测掌握炉衬侵蚀情况	进一步提高炉龄	采用激光监测炉衬蚀损情况,可综合砌筑炉衬,配合溅渣护炉技术和喷补技术
其他	减少停炉次数和时间,避免炉衬激冷,防止炉衬局部严重损坏,维护合理的炉型	提高转炉生产作业率	加强炼钢-精炼-连铸三位一体生产调度与管理

我国与国外相比,炼钢工艺水平有一定差距,列表5-2-2对比。

表5-2-2 我国与国外转炉炼钢工艺水平比较

项目		美LTV公司	我国情况	我国的主要差距
工艺及装备水平	转炉吨位/t	250	30~300	吨位小,多数公称吨位为30t以下转炉生产负荷过大
	吹炼制度	二吹一	三吹二(或三吹三)	
	铁水处理能力	100%铁水预脱硫	铁水预脱硫量很少	绝大多数转炉不具备铁水脱硫条件
	钢水升温和精炼能力	有	较少	多数转炉车间不具备升温和精炼能力
	连铸比/%	100	80	许多转炉厂采用100%连铸工艺
	直接出钢能力	100%采用副枪动态控制	少数采用	绝大多数转炉需2~3次倒炉才能出钢
铁水条件	铁水成分 $w/\%$			Si含量较高,转炉渣量一般超过100kg/t
	Si	0.4	0.4~1.2	
	S	<0.015	0.04~0.08	S含量较高且波动较大
	P	普通铁水 ≤ 0.12	中磷铁水 0.18~0.40	对中磷铁水,P含量波动在0.20%~0.45%
	提V半钢	无	有	提V后 $w_{[Si]}$ 含量为痕迹, $w_{[C]}$ 约为3.50%
冶炼控制	炉渣碱度	3.5	3.5~4.0	
	渣量/kg·t ⁻¹	60~80	80~150	
	渣中 $w_{TFe}/\%$	18~30	10~25	
	渣中 $w_{(MgO)}/\%$	11~12	4~8	

项目		美 LTV 公司	我国情况	我国的主要差距
终点控制	终点温度/°C	1620 ~ 1660	1640 ~ 1740	配小方坯出钢温度在 1710 ~ 1740°C , 配板坯 1650 ~ 1680°C ,配模铸 1640 ~ 1680°C
	倒炉次数/次		2 ~ 3	
	后吹次数/次		1 ~ 2	
	终点 $w[C]$ $\leq 0.05\%$	占 70% 以上	占 70% 以上	

第二节 提高炉龄的措施

一、炉龄提高的几个发展阶段

转炉炉衬由工作层、填充层和永久层耐火材料组成。工作层直接与高温钢水、氧化性炉渣和炉气接触,持续承受物理和化学因素造成的损蚀和侵蚀。因此,炉衬的质量是转炉炉龄的基础,炉衬砖质量和材质是直接影响转炉炉衬寿命的主要原因。以日本和我国重点钢铁企业为例,不同年份转炉炉衬使用材质和炉衬寿命提高的关系如表 5-2-3、5-2-4 所示。

表 5-2-3 日本不同年代转炉炉龄与炉衬材质关系^①

年 份	炉衬材质	平均炉龄/炉次
1973 ~ 1978	合成镁质白云石油浸砖(配入电熔镁砂)	500 ~ 1000
1979 ~ 1989	部分厂家开始使用镁碳砖	1000 ~ 2120
1990 ~ 1996	全部厂家使用镁碳砖	4000 ~ 6000

①系指全日本钢铁企业。

表 5-2-4 中国不同年代转炉炉龄与炉衬材质关系^①

年份	炉衬材质	平均炉龄/炉次
1974 ~ 1983	焦油白云石及油浸砖 镁质白云石及油浸砖	170 ~ 540
1984 ~ 1989	部分厂家开始使用镁碳砖	570 ~ 800
1990 ~ 1996	全部厂家使用镁碳砖	924 ~ 3500

①系指中国重点钢铁企业。

在 20 世纪 70 年代,焦油白云石砖是氧气顶吹转炉炉衬的主要用砖。焦油白云石砖中结合剂焦油在砖中所起的作用如下。

(1) 砖在使用过程中,焦油受热分解,残留的碳在高温(1400℃左右)下部分石墨化,在砖的结构中形成石墨骨架,支撑和固定氧化镁颗粒,使砖的高温强度增加。

(2) 砖内残留的碳填充耐火材料颗粒间的气孔,降低了砖的气孔率,同时又有不被炉渣润湿的性质,即有抗渣性能。

(3) 在炼钢温度下,砖内残留的碳能还原进入砖内的氧化物,特别是将 Fe_2O_3 还原,阻止向砖内渗透并能形成低熔点化合物被溶解排出,增强炉衬抗渣性能。

(4) 砖内残留的碳可提高砖的导热系数,避免或减轻局部炉衬因激冷激热产生热应力所造成的剥落现象。

因此,增加砖中残碳量是提高砖在高温下性能的重要途径。焦油结合剂在砖中残碳量,一般在 3%~5%。仅此碳含量还不能填充砖内所有气孔,特别是开口气孔。于是,采取焦油结合砖轻烧真空下油浸(沥青 180℃左右),或者烧成具有一定陶瓷结构砖在真空下油浸等工艺,进一步提高砖的残留碳含量,降低气孔率,增大体积密度,提高砖在高温下的强度和抗渣性能。热处理油浸砖在转炉炉衬上使用的结果表明:炉衬寿命比焦油结合白云石砖的寿命提高了 40% 以上。

向白云石中加入 MgO ,人工合成含较高 MgO 的镁质白云石砖(MgO/CaO 比值约为 2.3),具有耐化学侵蚀的能力。日本钢厂多采用合成镁质白云石砖,转炉炉衬寿命提高幅度比较大。

1977 年,日本川崎钢铁公司千叶厂引进的 Q-BOP 转炉炉底及底部供气元件选用了树脂结合不烧成镁碳砖系耐火材料,取得巨大成功,开创了含碳复合耐火材料在转炉上应用的先例。其后,西欧也将以沥青结合的镁碳砖应用于转炉炉衬。镁碳砖成分及性能如表 5-2-5 所示。

表 5-2-5 镁碳砖成分和性能

镁碳砖		1	2	3	4	5
成分 ^① (质量分数)%	MgO	78	75	79	73	75
	C	13	16	16	18	18
高温(1400℃)抗折强度/MPa		14.0	13.2	13.4	13.5	16.4
常温耐压强度/MPa		40	41	45	41	42

镁碳砖	1	2	3	4	5
显气孔率/%	4.5	4.0	3.6	2.5	3.3
体积密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	2.82	2.74	2.81	2.90	2.83

①还含有少量防氧化剂以及杂质。

镁碳砖中的镁砂选择 MgO 纯度高的电熔镁砂, $\text{CaO}/\text{SiO}_2 \geq 2$ 为好。石墨为具有一定粒度的鳞片状石墨,且纯度要求含 $\text{C} \geq 90\%$,并选用具有良好特性的结合剂。1988 年日本全国转炉的平均炉龄已超过 2000 炉次,其中超过 3000 炉次的占 60%,超过 5000 炉次的占 10%。1990 年 3 月川崎钢铁公司水岛厂 1 号复吹转炉创造出 8119 炉次的世界最高的炉龄纪录。与此同时吨钢耐火材料消耗也大幅度下降,如在 1976 年日本全国转炉耐火材料消耗 $2.78\text{kg}/\text{t}$,至 1987 年下降到 $1.34\text{kg}/\text{t}$ 。同期,欧美等国家部分钢厂转炉炉龄也大幅度提高,如表 5-2-6 所示。

表 5-2-6 转炉炉龄

年份	厂 家	公称吨位 /t	平均炉龄 /炉次
1984	美国内陆钢公司东芝加哥州二炼钢厂	232	1621
1986	法国洛林连轧公司敦刻尔克厂	230	1858
	英国钢铁公司	260	1500
1988	美国内陆钢公司东芝加哥州二炼钢厂	206	3187
	美国 LTV 钢公司印第安纳港(Indiana Harbor)厂	280	4060
1990	美国内陆钢公司东芝加哥州二炼钢厂	200	4090

我国蕴藏着丰富的菱镁矿。目前,我国能生产普通型和高强度型镁碳砖并已制定了行业标准,按砖的碳含量不同将砖分为三类,每类按理化指标又分为三个牌号:MT10A, MT10B, MT10C; MT14A, MT14B, MT14C; MT18A, MT18B, MT18C。20 世纪 80 年代初期生产的镁碳砖不含防氧化剂,称为第一代产品。90 年代初期,第二代镁碳砖产品含有防氧化剂。

20 世纪 90 年代初期,随着镁碳砖质量提高,我国一些大中型转炉炉龄大幅度提高,其中复吹转炉炉龄达到 3000~4000 炉次。

镁碳砖发展的基础,一是将石墨用于镁碳砖中成为主要成分。二是把 14%~18% 的高碳含量与电熔镁砂结合起来,即以合成树脂作为镁碳砖的结合剂。镁碳砖兼备镁质和碳质材料的优点,克服了传统碱性耐火材料的缺点。镁碳砖具有的主要优点如下:

(1) 抗渣性能强。纯度为 97%~99% 的电熔镁砂抗渣性能好,砖中石墨或结合剂固

化碳具有对炉渣不润湿,能还原进入砖内气孔的 Fe_2O_3 、 SiO_2 等氧化物的特性。

(2) 导热性能好。砖中的碳导热系数大,避免砖中 MgO 颗粒产生热裂。

(3) 结合剂固化后形成碳网络,将 MgO 颗粒紧密地连接固定在一起,尤其是 MgO 和石墨的体膨胀系数之差有利于阻止裂纹产生或扩展。

为了抑制或减缓砖中碳的氧化,采用金属添加剂(或称抗氧化剂),如 Ca 、 Mg 、 Al 、 Si 、 SiC 等物,其作用如下:

(1) 金属添加剂对氧亲和力大于碳对氧亲和力,抑制砖中碳的氧化。

(2) 氧化后形成的新物相产生体积膨胀,封闭气孔,使砖的致密度提高,阻止炉渣的渗透。

(3) 新生物相在石墨与 MgO 之间形成牢固的结合。

加入金属添加剂,使镁碳砖的性能进一步提高,转炉炉龄也随之提高。

20 世纪 90 年代中期,美国 LTV 钢公司首先开发并采用溅渣护炉技术,转炉炉龄大幅度提高,由 1990 年的 6200 炉次上升到 1991 年创世界纪录的 15658 炉次。至 1996 年底,美国与加拿大 11 家钢铁企业约 20 座转炉钢厂采用该项技术,平均炉龄达到 7700 炉次左右。

溅渣技术是在 20 世纪 70 年代广泛应用过的向炉渣中加入含 MgO 的造渣剂造粘渣挂渣补炉技术的基础上,采用氧枪喷吹高压氮气,在 2 ~ 4min 内将出钢后留在炉内的残余炉渣喷溅涂敷在转炉内衬整个表面上,生成炉渣保护层的护炉技术。我国在 20 世纪 70 年代中期就已经掌握造粘渣挂渣补炉技术。我国的一些钢厂刚开始应用溅渣护炉技术的头一、二个炉役就显示出了明显效果。自 1995 年在承德钢铁公司(以下简称承钢)、韶关钢铁厂(以下简称韶钢)、太原钢铁公司(以下简称太钢)开始采用溅渣护炉技术,至 1998 年 6 月,约占全国转炉总数 1/3 的大、中、小型不同吨位的转炉都已采用溅渣技术,炉龄由原来的 1000 ~ 3000 炉次上升到 4000 ~ 14000 炉次。结合我国转炉炼钢的特点,开发利用溅渣护炉技术时要注重实践应用与基础理论研究相结合,使该项技术向着更深入、更高水平的方向发展。

二、提高炉龄的其他工艺措施

(一) 造粘渣护炉

在 20 世纪 70 年代初期,就开始向初期渣和终点渣中加入白云石、白云石质石灰或菱镁矿等,使炉渣中 MgO 含量过饱和,并通过摇炉将 MgO 含量过饱和的炉渣粘结在炉衬的表面延长炉衬寿命。这种造渣方法具有的作用如下。

(1) MgO 能加速石灰溶解,促进前期化渣和减少萤石用量,同时能减轻前期炉渣中 SiO_2 对炉衬的侵蚀作用。

(2) 白云石砖或镁碳砖炉衬,主要成分是 CaO 、 MgO 。不加含 MgO 的材料造渣,则炉渣要从炉衬中溶解 MgO ,而造成炉衬的侵蚀。加入含 MgO 的材料造渣,使渣中 MgO 含量达到饱和状态,可以减少炉渣对炉衬的侵蚀。

(3) 炉衬被侵蚀的决定因素是渣中 FeO 含量,更确切地说是渣中 FeO 的活度。提高渣中 MgO 浓度,可减轻 FeO 对炉衬的侵蚀。

造粘渣摇炉挂渣技术不可能在整个炉膛内形成均匀涂层,尤其是在炉膛两侧特别容易被侵蚀的耳轴部位无法挂上粘渣。

(二) 炉衬喷补

炉衬喷补是通过喷补设备把喷补料喷射向炉衬蚀损严重的部位形成新的耐火材料烧结层的护炉技术。其原理是将喷补材料喷吹附着在炉衬表面,进而烧结成一体。喷补方法分为湿法、半干法及火焰喷补法等。

1. 湿法喷补

湿法喷补是将细颗粒料(最大粒度为 $1mm$)和含有大量小于 $0.1mm$ 的粉料放入罐内,添水混合后再喷射到指定位置的喷射补炉方法。该法灵活,可以喷补到转炉任何部位。喷补层厚度可达 $20 \sim 30mm$,使用寿命可达 3 炉次。

2. 半干法喷补

半干法喷补是把喷补料放入压力罐并压送到喷嘴,在其端部和水混合后,被喷射到炉内指定位置的喷射方法。喷补层具有耐熔损的优点,厚度可达 $20 \sim 30mm$ 。这种补炉方法各钢厂采用得比较多。喷补料的成分详见表 5-2-7。

表 5-2-7 喷补料成分

喷补法	喷补料成分/%			粒度分布/%		水分/%
	MgO	CaO	SiO_2	$> 1.0mm$	$< 1.0mm$	
湿法	91	1	3	10	90	15 ~ 17
半干法	90	5	2.5	25	75	10 ~ 17

注:半干法喷补还要加入一定数量结合剂,如磷酸盐、硅酸钠等。

3. 火焰喷补法

火焰喷补是用氧气、喷补料和燃料通过水冷喷枪内管混合燃烧,使喷出的补炉料立即形成熔融态并喷射到蚀损部位的补炉方法。火焰喷补层耐蚀能力强。其喷补料用镁砂、镁白云石砂等,粒度小于 $0.1mm$,其中粒度为 $0.09mm$ 的物料应占 60% 以上;燃料可

选用煤粉、铝粉等,增塑烧结剂有软质粘土、膨润土和硅灰等。最近有在喷补料中掺加石灰等造渣剂的方法,使火焰喷补层成为耐火渣层,保护原衬砖层。火焰喷补法一般用于喷补转炉渣线和炉帽部位。

采用喷补技术,炉龄可提高 20% ~ 50%。

(三)系统优化炼钢工艺,提高炉龄

至 20 世纪 80 年代初,炼钢工艺系统优化技术得到发展,开始采用铁水预处理 - 转炉冶炼 - 炉外精炼 - 连铸的现代炼钢模式生产钢坯。铁水预处理的任务是将传统在转炉内进行的脱磷、脱硫任务移到铁水罐内进行。炉外精炼技术的应用也可以承担传统转炉炼钢的部分任务。转炉冶炼采用少渣操作工艺后只进行降碳升温,不仅缩短冶炼时间,更重要的是减轻高氧化性炉渣对炉衬的侵蚀。如日本的五大钢铁公司,1991 年铁水预处理比达 85% ~ 90%,至 1996 年转炉炉外精炼比达到 90%。所以,日本转炉炉衬寿命在世界范围内提高幅度比较大。在转炉炼钢过程应用自动控制技术,提高终点命中率和控制精度也可以减轻炉衬侵蚀。应用复吹转炉技术和活性石灰不仅加速化渣,缩短冶炼时间,还降低渣中 FeO 含量,使炉衬侵蚀减轻。

第三章 转炉溅渣护炉技术

第一节 溅渣护炉技术发展应用概况

一、国外溅渣护炉技术的发展

对于氧气转炉炼钢过程,用溅渣护炉技术可以大幅度提高炉龄,可减少转炉的非作业时间,达到提高钢产量,降低吨钢成本的目的。

20世纪60~80年代,日本开发出转炉炼钢加白云石造渣的工艺。提高渣中 MgO ,使炉衬能抵御高温下高氧化铁炉渣侵蚀。加白云石造渣配合转炉炉衬喷补技术,日本新日铁公司君津厂转炉炉龄突破1万炉次,创造了当时世界最高纪录。

与此同时,在加 MgO 造稠渣保护炉衬的基础上出现了摇炉挂渣操作,使转炉装料侧与出钢侧炉衬尽可能多地粘挂上富 MgO 的粘稠炉渣。

1991年,美国LTV钢铁公司印第安纳港厂开始采用溅渣技术,见图5-3-1,达到提高炉龄、提高转炉利用系数,并降低炼钢成本等效果。

印第安纳港厂有2座252t顶底复吹转炉、2座LF钢包炉、1套RH真空脱气装置以及两台板坯连铸机,平均日产38炉钢,因此,有充裕的时间进行炉衬维护(溅渣与炉衬激光测厚)与辅助设备维护。

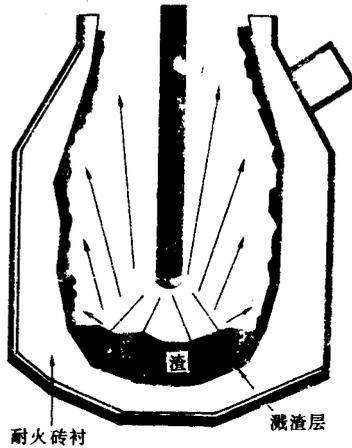


图 5-3-1 转炉溅渣示意图

采用溅渣技术以前,针对转炉炉衬使用及维护有两种路线:第一种是不用喷补护炉,采用快速更换炉衬的办法,减少非生产时间,这往往导致炉衬寿命降低;第二种是强化喷补护炉,能获得较高的炉衬寿命,但使得耐火材料消耗成本不容易进一步降低。而溅渣护炉工艺可在实现高炉龄的基础上降低吨钢喷补料消耗水平。表 5-3-1 示出美国 LTV 钢公司印第安纳港厂自 1991 年采用溅渣技术以后连续实现的 3 个高炉龄炉役期间的喷补料消耗数据。图 5-3-2 为该厂 1986~1994 年的炉龄变化情况。

表 5-3-1 印第安纳港厂连续三个炉役喷补料消耗

炉龄/炉次	吨钢喷补料消耗/kg
8125	1.72
10300	0.63
15658	0.37

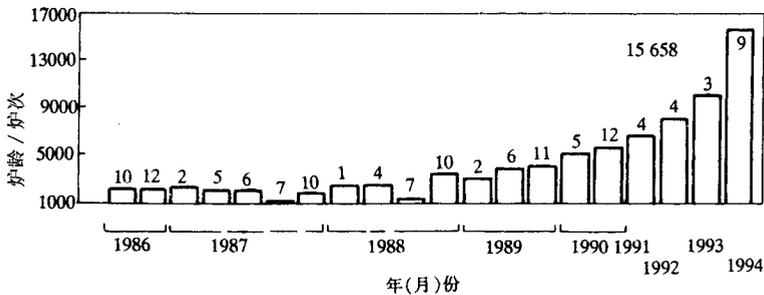


图 5-3-2 印第安纳港厂 1986~1994 年炉龄变化情况

在 1994 年该厂创造了炉龄 15658 炉次,连续运行 1 年零 5 个月的世界炉龄纪录。转炉因换衬造成的年非作业天数由 1984 年的 $81d(9d \times 9)$ 缩短为 $11d(13d \times 0.83)$,作业率从 78% 提高到 97%。转炉喷补费用降低了 66%,吨钢喷补材料消耗降为 0.37kg。溅渣技术能使炉衬在炉役期中相当长的时间内保持均衡,实现永久性炉衬(ever lasting)。

自 1993 年以来国外已有 19 个氧气转炉炼钢厂使用溅渣护炉技术,其中 14 个厂在美国,2 个厂在加拿大,此外韩国、巴西与英国各 1 个厂。加拿大阿尔戈马(Algoma)钢公司有 2 座 250t 转炉,在 1995 年采用溅渣技术,在 1996 年底,两座转炉炉龄分别达到 6200 炉次与 7117 炉次,吨钢喷补耐材消耗分别降至 0.195kg 与 0.277kg 最新水平。转炉吨钢耐火材料消耗相应降低 25% ~ 50%。

据普莱克斯(Praxair)气体公司估计,建设一套溅渣用的氮气系统,因为各厂所需的氮气管路、氮压机、高压贮气罐、控制阀门等设备的设计与安装会有所不同,需要投资 10 万到 140 万美元,但是,投资回报是明显的。大型钢厂每月可节约 30 万美元。据统计,一般只需半年,至多一年即可回收全部投资。

二、国外氧气转炉溅渣工艺简介

北美是氧气转炉溅渣工艺的发源地,其各厂溅渣操作大致相同,工艺步骤简介如下。

(1) 通常,转炉出钢时钢水应全部出净,钢水留在炉内对溅渣不利。

(2) 出钢时,炉前操作人员用肉眼观察炉渣状况并决定是否加入稠渣剂,以及加入数量。

(3) 出钢后可立即前后摇炉,以使兑铁侧与出钢侧炉衬涂渣,也可以直接将转炉直立,下枪吹氮喷溅。

(4) 吹氮使用的喷枪大多采用原炼钢吹氧枪,对大型转炉也可以设计专用吹氮枪,也有少数钢厂使用同样的两支喷枪:一支用于吹氧炼钢,一支用于吹氮溅渣。

(5) 吹氮所用压力和流量与冶炼过程吹氧炼钢时所用压力与流量近似或稍低,一般吹氮压力可以比吹氧压力低 15% ~ 20%,氮气流量与氧气相比可低 10% ~ 15%。

(6) 吹氮操作参数参考值为:喷枪高度 0.8 ~ 2.0m(距理论钢水液面),吹氮时间 3 ~ 4min,吨钢供氮强度(标态) $1.2 \sim 2.0\text{m}^3/\text{min}$ 。

(7) 吹氮溅渣操作完成后,停止吹氮并提枪,将炉内所有的残渣倒入渣罐,并观察溅渣效果,检查是否存在薄弱部位需要特别注意或喷补。

(8) 渣中 MgO 含量控制在 8% ~ 14%,若终渣 FeO 含量高,则 MgO 含量控制高一些,如 12% ~ 14%。

(9)有的钢厂已经实现用计算机控制溅渣工艺操作,如加拿大阿尔戈马钢公司,溅渣前可在计算机屏幕上,从4个不同的操作方案中任选其一,然后按下开始溅渣按钮,即可开始溅渣操作,溅渣时喷枪高度与氮气流量都是由计算机自动控制的。

三、溅渣工艺的理论研究

(一)理想的留渣操作方式

世界上许多氧气转炉炼钢厂都对转炉渣加以回收利用,其中有的厂是将转炉倾倒出的液体炉渣经冷却后再重新加入转炉以节约石灰,并促使尽早造成流动性良好的初期渣。

当然,一炉钢炼好之后,如能将部分液态渣直接留在转炉内,则从能量利用角度看,经济效益会更加理想。

但是转炉终渣往往是高氧化性的,如处理方法不当则会在向炉内兑入铁水时产生爆炸性喷溅,造成设备甚至人身事故,因此大多数转炉炼钢厂不采用预留渣操作。

溅渣操作是一种理想的留渣方案,它把液态炉渣留在炉内,用惰性气体把炉渣溅到炉衬上再凝固,这样既保留了炉内留渣的优点,又避免了保留液态炉渣导致兑铁水操作时产生爆炸性喷溅的危险。

(二)合适的炉渣成分

国外氧气转炉炼钢所用铁水一般都经过脱硫预处理,铁水中Si、P、S元素含量较低,对冶炼有利。一般适合于溅渣的炉渣成分如下:

CaO 38% ~ 45% ,SiO₂ 11% ~ 15% ,MgO 8% ~ 12% ,TFe 14% ~ 22% ,余下成分则为少量的MnO、Al₂O₃、P₂O₅、S等。

溅渣操作的核心问题是把溅起的炉渣冷却到其熔点以下,使其在炉衬表面固化。吹入炉内的氮气以及向炉内加入生白云石可以起到这个作用。

溅渣操作的一个有利作用是当转炉兑入温度约1350℃的铁水时,炉衬表面固化的粘渣会有部分熔化,这样在吹炼开始之前炉内就会有一些液态炉渣。这种炉渣有利于防止或减少吹炼初期由于铁水中Si大量氧化,形成酸性氧化物SiO₂以及硅酸铁2FeO·SiO₂对炉衬的侵蚀,特别对于摇炉挂渣所无法达到的炉衬耳轴区的保护有突出好处。除此之外,低熔点的铁酸二钙也有利于前期加入炉内的石灰与白云石的早期熔化,使炉内尽早形成具有一定碱度的、流动性良好的炉渣。

为了避免或减少炉渣对镁质耐火材料的化学侵蚀,一般转炉厂将终渣MgO含量控制在饱和或稍过饱和的水平,多数为8% ~ 14%之间。出钢以后考虑终点钢水的氧化性

与温度,再决定是否需要在吹入氮气溅渣之前再加稠渣剂。

(三) 炉渣氧化性与溅渣关系

炉渣的氧化性与钢水中的氧含量有密切关系。据加拿大阿尔戈马钢公司的研究,终点钢水中所含溶解氧含量如在 0.04% 以下,则炉渣会因 FeO 含量太低,过于粘稠而不利于溅渣;钢水中溶解氧含量在 0.04% ~ 0.09% 之间,此时的炉渣很适合于溅渣;溶解氧含量超过 0.09% 时,炉渣氧化性过强,炉渣太稀,也会影响溅渣效果。此时应该加入白云石或其他镁质耐火材料,以保证良好的溅渣效果。

(四) 氧气转炉溅渣的物理模拟研究

国外对转炉溅渣的实验室研究少有文章发表,只有美国密苏里—罗拉大学(UMR)的皮斯利(K. D. Peaslee)做过水模型试验研究并由此讨论了溅渣护炉机理。物理模拟涉及的变量见表 5-3-2。

表 5-3-2 溅渣变量

变 量	单 位	符 号
熔池深度	m	H
熔池直径	m	D
喷嘴出口直径	m	d_0
喷孔数		N
轴向喷枪高度	m	h_a
喷孔角度	(°)	α
喷孔处射流速度	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	u_0
气体和液渣的密度	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	ρ_g, ρ_l
气体和液渣的粘度	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	η_g, η_l
液渣表面张力	$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	σ_l
动量流速	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	$m_0 = \pi \rho_g u_0^2 d_0^2$

皮斯利认为,对于几何上的相似性,考虑下面 4 个关系:

$$\text{分配比} = \frac{Nd_0^2}{D^2} \quad (5-3-1)$$

$$\text{渣池形状比} = \frac{H}{D} \quad (5-3-2)$$

$$\text{无量纲喷枪高度} = \frac{h_a}{d_0} \quad (5-3-3)$$

$$\text{喷枪孔夹角} = \alpha \quad (5-3-4)$$

分配比是多孔喷嘴面积与渣池面积之比,它决定射流在渣池上的分配情况。渣池形态比与无量纲喷枪距离是关于渣池及喷枪位置的几何比。喷枪角度是决定溅渣角度及多孔喷嘴的射流聚合的重要因素。

设计水力学模型试验方案,以动态相似为准则,考虑以下 4 个无因次特征数:

$$\text{修正的弗劳德数 } Fr' = \frac{\rho_g u_0^2}{\rho_l g h_a} \quad (5-3-5)$$

$$\text{雷诺数 } Re = \frac{\rho_g u_0 d_0}{\eta_g} \quad (5-3-6)$$

$$\text{韦伯数 } We = \frac{\rho_g u_0^2}{(\rho_l g \sigma_1)^{1/2}} \quad (5-3-7)$$

$$\text{摩尔顿数 } Mo = \frac{g \eta_l}{\sigma_1^3 \rho_l} \quad (5-3-8)$$

弗劳德数是作用在液渣表面上的惯性力与重力之比,该数已被修正,包括气体密度与液渣密度之比以及喷枪与液面之间的轴向距离的关系式。该关系式对决定喷孔面积和溅渣量具有重要意义。雷诺数是关于气体在喷孔轴线上流动速度的一个重要参数。韦伯数表示动量强度与液渣的主要特性数据之比,因液渣特性数据对溅渣具有重要影响,故韦伯数被作为一个相似性判据。摩尔顿数是所选液渣的函数。

皮斯利认为转炉炉衬挂渣是一个复杂的化学和物理过程。假设溅渣过程如图 5-3-3 所示,可以推断出炉内挂渣是由两个主要机制即熔渣浪涌溅渣与喷射溅渣相结合实现的。物理模拟研究表明,若其他喷射条件不变,增大喷枪角度和高度可以提高溅渣量。另外,若液渣粘度增大,炉衬溅渣机制将由喷射溅渣为主向浪涌溅渣转变。

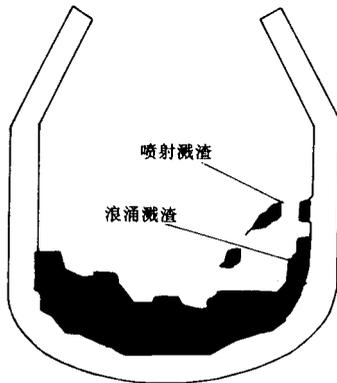


图 5-3-3 转炉溅渣机理

四、溅渣工艺操作问题

采用溅渣操作应注意的一些问题如下。

(一) 炉型控制

采用溅渣护炉操作,由于渣中 MgO 含量控制在其饱和点附近,终渣会析出方镁石及高熔点的硅酸二钙或硅酸三钙。加入稠渣剂也会使炉渣变得粘稠,所以炉渣碱度或 MgO 含量控制过高,容易发生炉膛变形以及炉底上涨的情况。这不仅会给正常吹炼造成影响,严重时还可影响转炉顶底复吹工艺的正常实施。美国内陆钢公司、LTV 钢公司都曾出现这种情况。内陆钢公司采用加硅铁吹氧的办法熔化上涨的炉底。

(二) 喷枪粘结问题

采用溅渣护炉由于出现高 MgO 含量粘渣操作,粘枪问题变得突出。特别是炉内余渣包裹少量钢水时会使喷枪粘渣更为严重。解决的方法是控制合理的炉渣成分与吹氮工艺参数,另外要求炉内不留残钢。

有的转炉厂从改善枪位和冷却条件解决粘枪问题。如有的厂使用两支喷枪,一支用于吹氧炼钢,另一支专门用来吹氮溅渣。

(三) 顶底复吹问题

带有底吹惰性气体搅拌的顶底复吹转炉采用溅渣操作时,会发生粘渣将炉底喷嘴堵塞,影响底吹搅拌功能的情形,严重时底吹喷嘴堵死。解决办法是溅渣操作时吹氮压力与流量必须足够高(底喷嘴与顶枪都是如此),以减少炉渣覆盖住炉底喷嘴的情况。

(四) 相关设备问题

采用溅渣护炉工艺以后,随着炉衬寿命的延长,对一些转炉冶炼相关设备的寿命要求也更严格,如转炉烟罩、炉下钢包车及其轨道的寿命与运转情况也成为影响转炉能否长时期运转的制约因素。如果转炉相关设备不能支持一个完整炉役的炼钢生产,则会被迫在炉衬完好的情况下提前检修。

(五) 人员培训与部门协调

因为溅渣工艺是一项综合性较强的技术,人员培训工作不可忽视。任何一项新技术都可能因操作不利导致失败,溅渣操作技术也是如此。车间领导与炉前操作工人必须对溅渣频率及每次溅渣所用时间很好地协调,炉衬的工作情况,炉衬侵蚀数据要及时记录与显示,各部门的统一协作是保证溅渣效果的前提条件。

五、我国溅渣护炉技术的发展应用

(一)我国溅渣护炉技术的开发目标

1. 工艺对炉龄的影响

炉龄是转炉炼钢生产的一项重要指标。炉龄的高低不仅反映出一个钢厂的铁水条件、技术装备水平,也反映出该钢厂的工艺操作水平和生产管理水平。表 5-3-3 列出了工艺对炉龄的影响因素和提高炉龄的主要技术措施。

表 5-3-3 工艺对炉龄的影响及提高炉龄的技术措施

项目	对炉龄的影响	目标	工艺措施
铁水条件	铁水 Si 高,渣量大,初渣对炉衬侵蚀严重。硫高、磷高造成多次倒炉后吹,易使炉渣过氧化,终点温度高,使终渣侵蚀加剧	稳定吹炼操作,提高终点命中率	采用 100% 铁水处理工艺,控制铁水[S]≤0.04%;控制铁水[Si]≤0.40%
冶炼操作	前期化渣不良,炉渣碱度低,中期返干,喷溅严重;后期过氧化,炉衬受到强烈的辐射、冲刷与化学侵蚀,侵蚀严重	避免中期返干,控制终渣 FeO 不过高	采用计算机静态控制,标准化吹炼,提高铁水装入温度,采用活性石灰,前期快速成渣;采用复吹工艺,控制喷溅和终渣的 FeO 含量
终点控制	高温出钢,当出钢温度大于等于 1620℃ 以后,每提高 10℃,基础炉龄降低约 15 炉。渣中 FeO 含量每提高 5%,增加炉衬侵蚀速度 0.2 ~ 0.3mm/炉	尽量减少倒炉次数,控制终点温度波动(不大于 ±10℃)降低出钢温度	采用计算机终点动态控制技术,避免多次倒炉,或采用不倒炉直接出钢技术。采用炉外精炼,加强钢包周转和烘烤钢包等措施,降低出钢温度
护炉工艺	采用各种补炉工艺,可提高炉龄 3 倍以上;监测、掌握炉衬侵蚀情况	进一步提高炉龄	采用激光监测炉衬侵蚀情况,采用溅渣护炉技术和喷补技术,综合砌炉
其他	减少停炉次数和时间避免炉衬激冷,避免局部严重侵蚀,维护合理炉形	提高转炉生产作业率	加强炼钢-精炼-连铸三位一体的生产调度与管理

据不完全统计,目前我国共有大小转炉 218 座,其中大于 100t 级的转炉 21 座,溅渣护炉前平均护龄为 2000 炉次,炉衬砖消耗 2.014kg/t。50 ~ 90t 级的转炉 28 座,溅渣护炉前平均炉龄 2308 炉次,炉衬砖消耗 1.23kg/t。小于 30t 级的转炉 169 座,平均炉龄 887 炉次,炉衬砖消耗 6.95kg/t。这说明我国的转炉,特别是中、小型转炉,和国外先进水平相比,在技术装备、工艺、操作和生产管理方面均有较大的差距。

2. 我国转炉炼钢的技术特点

表 5-3-4 列出了我国转炉炼钢工艺与国外先进水平的比较。我国转炉炼钢技术的主要特点如下：

(1) 大多数转炉容量偏小；

(2) 铁水条件差，硅含量偏高，硫含量波动较大，有些地区采用中磷铁水或提钒后的半钢炼钢；

(3) 装备水平低，一般未配备铁水脱硫工艺、钢包精炼工艺，绝大多数转炉未采用计算机控制技术，终点倒炉次数较多；

(4) 生产节奏快，生产负荷大，生产率较高；

(5) 80t 级以上转炉多数采用复合吹炼技术，取得了较好的经济效益。

表 5-3-4 我国与国外转炉炼钢工艺水平的比较

项目		美国 LTV 钢公司	国内	主要差距
工艺及装备水平	转炉容量/t 吹炼制度	250t 二吹一	3~300t 三吹二(或三吹三)	炉容量小,多数为 30t 级以下转炉,生产负荷过大
	铁水预处理能力	100% 铁水脱硫	脱 S 量很小	绝大多数转炉不具备铁水脱硫条件。绝大多
	钢水升温精炼能力	有	较小	多数转炉车间不具备升温精炼能力
	连铸比/%	100	68.8(1998 年)	许多转炉厂未采用 100% 连铸工艺
	直接出钢能力	100% 采用副枪动态控制	少数采用	绝大多数转炉需 2~3 次倒炉才能出钢
铁水条件	铁水 Si 含量/% S/% P/%	0.4 ≤0.015 普通铁水 P ≤0.12%	0.4~1.2 0.04~0.08 中磷铁水 P=0.18%~0.45%	Si 含量较高,转炉渣量一般超过 100kg/t。S 含量高而且波动较大
	提钒半钢	无	有	对中磷铁水,磷含量波动较大 提钒后,半钢中 Si 含痕迹量,C 约为 3.5%
冶炼控制	炉渣碱度	3.5	3.0~4.0	
	渣量/kg·t ⁻¹	60~80	80~150	
	渣中(TFe)/%	18~30	10~25	
	渣中(MgO)/%	11~12	4~8	

项目		美国 LTV 钢公司	国内	主要差距
终点控制	终点温度/℃	1620 ~ 1660	1640 ~ 1740	配小方坯 1710 ~ 1740 ; 配板坯 1650 ~ 1680 ;配模铸 1640 ~ 1680
	倒炉次数/次		2 ~ 3	
	后吹次数/次	直接出钢	1 ~ 2	
	终点 [C] ≤ 0.05%	占 70% 以上	占 70% 以上	

3. 我国溅渣护炉工艺的开发目标

应考虑到冶炼工艺对转炉炉龄的影响,分析工艺技术装备水平对溅渣护炉冶金效果的影响,结合国外的先进经验和本国转炉冶炼的技术特点,制定出适宜中国特点的转炉溅渣技术开发的总体目标。制定目标的原则如下。

(1)我国开发溅渣护炉技术应大、中、小并举,不仅适用于大型 300t 级转炉,也要适用于小于等于 30t 级的小型转炉。采用溅渣护炉技术后,平均炉龄应翻一番。30t 级以下转炉,炉龄大于等于 3000 炉次;50 ~ 90t 级转炉,炉龄大于等于 5000 炉次;100 ~ 300t 级转炉,炉龄大于等于 6500 炉次。

(2)我国开发的溅渣护炉技术应适用于各种铁水条件:不仅适用于普通低磷铁水,也适用于中磷铁水和半钢冶炼的转炉工厂,溅渣技术多元化发展。

(3)维护和延长炉底喷嘴寿命,使复吹比大于等于 70%。

(4)开发快速溅渣技术,要求溅渣时间小于等于 3min,保证原有转炉的生产负荷。

(5)开展有关溅渣护炉技术的基础理论研究,进一步优化溅渣工艺。

(二) 溅渣护炉技术在国内的应用与发展

1. 溅渣护炉技术在国内的推广概况

1991 年 LTV 钢公司印第安纳港厂开始采用溅渣护炉技术,1994 年原冶金工业部立项支持承钢与冶金工业部钢铁研究总院(以下简称钢研总院)合作开发溅渣护炉技术;1996 年 11 月,国家经济贸易委员会(以下简称国家经贸委)确定溅渣护炉技术为国家重点科技开发项目,首批资助国内 19 个转炉厂开展溅渣护炉工作。1997 年 5 月,太钢炉龄达到 8580 炉次,创国内最高纪录;同年 10 月,国家经贸委再次资助国内 20 家炼钢厂推广溅渣护炉技术。

通过两年半的实践,溅渣护炉技术在国内迅速推广,炉龄迅速提高,取得明显的经济效益。如表 5-3-5 所示,国内 218 座转炉中采用溅渣护炉技术的转炉已达到 68 座。其中,50t 级以上大中型转炉中有 37 座转炉采用了溅渣护炉技术,推广速度非常快。其中部分技术经济指标已接近或达到国际先进水平。

表 5-3-5 溅渣护炉技术在我国转炉厂的使用情况

公称吨位/t	转炉座数	溅渣转炉座数	最高炉龄 /炉次		吨钢炉衬消耗 /kg		吨钢补炉料 消耗/kg	
			溅前	溅后	溅前	溅后	溅前	溅后
大于等于 100	21	15	5038	14001	0.74	0.266	0.405	0.145
50 ~ 90	28	22	4000	8580	1.52	0.4	1.02	0.91
小于等于 30	169	31	—	7047	降低 0.19		降低 0.52	
美 LTV 钢公司	6	6	—	20000	—	0.27	—	0.37

2. 大型转炉溅渣护炉技术

宝山钢铁公司(以下简称宝钢)炼钢厂的 3 座 300t 转炉配两台双流板坯连铸机生产低碳钢板材。在 1997 年采用溅渣护炉技术以后,平均炉龄比 1996 年提高 2359 炉次,在 1998 年最高炉龄为 14001 炉次。1997 年采用溅渣技术后,宝钢耐火材料方面单项成本降低到 2.54 元/t,低于 LTV 钢公司。转炉生产作业率提高了 3.53%,吨钢经济效益为 5.12 元/t。

宝钢溅渣护炉的主要经验如下。

(1) 保证溅渣所需要的供氮压力,优化溅渣参数。供氧强度(标态)为 $2.7 \sim 2.9 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{min})$, 溅渣枪位(距炉底)为 $2.0 \sim 2.8 \text{ m}$ 。

(2) 提高终渣 MgO 含量,从 6% 到 10%。

(3) 溅渣与喷补相结合,严格控制炉衬厚度为 $200 \sim 400 \text{ mm}$ 。炉龄 6000 炉次以内只溅渣不喷补,超过 6000 炉次以后,当局部炉衬厚度小于 400 mm 时,必须喷补。

鞍山钢铁公司(以下简称鞍钢)第三炼钢厂 180t 转炉,采用溅渣技术后最高炉龄达到 8384 炉次,在复吹条件下喷嘴寿命超过 3000 炉次。

3. 中、小型转炉溅渣护炉技术

为了在国内推广溅渣护炉技术,必须开发适宜中、小型转炉采用的溅渣护炉技术。中、小型转炉的技术特点如下:

(1) 出钢温度高,一般出钢温度大于等于 1700°C 。

(2) 生产节奏快,一般冶炼周期小于等于 30min。

(3) 终点需要多次倒炉,以保证成分和温度。

太钢二炼钢厂是国内较早采用溅渣工艺的转炉厂,有 3 座公称吨位 50t 转炉,实际出钢量为每炉 $65 \sim 70 \text{ t}$ 。自 1996 年采用溅渣技术后,炉龄大幅度提高:1997 年的平均炉龄

为 4469 炉次,比溅渣前(1995 年)提高 3.15 倍,最高炉龄达到 8580 炉次。炉衬砖消耗量为 0.4kg/t,补炉料消耗量为 2.7kg/t,降低吨钢耐火材料成本 46.34%,提高转炉作业率 4.89%,吨钢经济效益 2.25 元/t。

三明钢铁厂的 3 座 15t 转炉配合小方坯连铸机生产碳素钢。采用溅渣护炉技术后平均炉龄达到 6424 炉次,是溅渣前炉龄的 3.3 倍,最高炉龄已达到 7047 炉次。全年降低生产成本 290.4 万元,增产钢坯 3 万 t。

国内的生产实践证明,溅渣护炉技术不仅适用于大型转炉,也适用于中小型转炉,它们都可以获得明显的经济效益。针对中小转炉的技术特点,采用溅渣技术一定要特别注重以下几点。

(1) 确立合理的溅渣工艺和喷吹参数。炉子小, H/D 大,一般要求较高的供氮强度和较低的溅渣枪位。

(2) 注重对终渣的调整。由于小转炉出钢温度高,一般要求渣中 MgO 含量要超过饱和值,最好形成 MgO 固体析出。同时,要注意调整炉渣粘度和过热度,使之适于炉壁喷溅挂渣。

4. 采用特殊铁水转炉的溅渣护炉技术

承钢炼钢厂采用提钒后的半钢冶炼。针对半钢冶炼的特点,采用溅渣工艺如下:

(1) 冶炼过程加轻烧白云石造渣,控制渣中 MgO 的含量为 8%。

(2) 吹炼终点加调渣剂,控制渣中 MgO 含量达到 13% ~ 14%。

(3) 调整炉渣过热度,使改质后炉渣的过热度降为 191℃。

承钢采用上述溅渣护炉技术后,炉龄提高了 3.3 倍,耐火材料消耗降低了 7.24kg/t,吨钢生产成本降低 10.3 元。

我国采用中磷铁水冶炼的转炉厂,如包头钢铁公司(以下简称包钢)、重庆钢铁公司(以下简称重钢)、马鞍山钢铁公司(以下简称马钢)等采用溅渣护炉技术后,也取得明显的经济效益。

第二节 溅渣护炉基本操作工艺

一、冶炼过程炉渣的调整

采用溅渣护炉技术后,冶炼过程中对炉渣调整的目的是为了减少炉渣对炉衬的化学

侵蚀,在不影响脱磷、脱硫反应进行的条件下,合理控制终渣 MgO 含量,使终渣适合于溅渣护炉的要求。

(一) 终渣 MgO 含量的控制

根据宝钢在吹炼过程中用副枪取样、测温所得到的试验结果,吹炼前期(约全程的 35%~40%)熔池温度低于溅渣层的流动温度。在此期间溅渣层的蚀损以化学侵蚀为主。

图 5-3-4 是毕晓普(Bishop)等绘制的 $CaO-SiO_2-FeO-MgO$ 四元系中 MgO 的溶解度曲线。从图 5-3-4 中可以看出炉渣碱度对于 MgO 的溶解度有重要影响。在酸性渣中 MgO 可以有很高的溶解度,随着碱度的提高 MgO 的溶解度下降。当碱度一定时渣中氧化铁升高使 MgO 溶解度下降,表明氧化铁在四元系中对 MgO 的溶解能力低于 SiO_2 。其它关于 $CaO-SiO_2-FeO-MgO$ 系中 MgO 饱和溶解度的研究结论与毕晓普相似,但表达方式有所不同。表 5-3-6 是宝钢转炉采用溅渣护炉操作时在吹炼过程中所取渣样成分的分析结果。此炉的调渣剂在吹炼开始时全部加入炉内,其中有轻烧菱镁球 0.81t,菱镁矿 1.5t,轻烧白云石 5.8t,加入 MgO 总量为 3.301t。

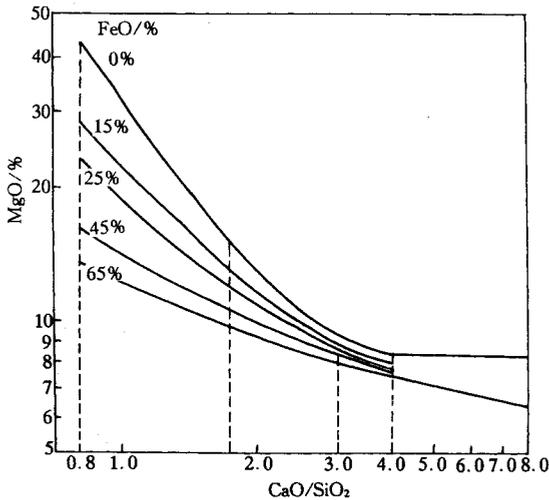


图 5-3-4 $CaO-SiO_2-FeO-MgO$ 渣系中 MgO 的溶解度(1600°C)

表 5-3-6 宝钢吹炼过程中渣样的成分

吹炼时间 /min	温度 /°C	TFe /%	SiO_2 /%	P_2O_5 /%	Al_2O_3 /%	CaO /%	MnO /%	MgO /%	S/%
3.42		15.15	26.87	2.11	0.79	24.70	13.07	10.4	0.033
6.67	1420	16.21	22.43	2.21	1.02	32.11	9.20	9.58	0.037

吹炼时间 /min	温度 /°C	TFe /%	SiO ₂ /%	P ₂ O ₅ /%	Al ₂ O ₃ /%	CaO /%	MnO /%	MgO /%	S/%
9.67	1464	14.99	20.32	2.28	1.23	36.40	7.44	10	0.048
12.4	1515	12.78	21.28	2.25	1.74	38.41	7.40	9.84	0.046
17.35	1657	21.06	13.38	1.47	1.23	40.47	4.84	9.22	0.052

吹氧 3.42min 时,炉渣碱度 0.92, TFe 含量为 15.15%, MgO 含量为 10.4%。对照图 5-3-4 可见此时渣中 MgO 尚未达到饱和。吹炼初期硅的氧化速度很快,生成大量 SiO₂,石灰的溶解速度较缓慢,炉渣碱度的提高需要较长的过程。在低碱度阶段炉渣对炉衬的侵蚀严重。采用活性石灰可提高成渣速度,使渣中 MgO 饱和溶解度下降,可以减轻炉衬的化学侵蚀。吹炼初期把调渣剂及轻烧白云石渣料全部加入,使渣中有一定未溶的含 MgO 材料也可减轻炉衬的化学侵蚀。初期炉渣是不平衡体系, MgO, CaO 都未饱和,渣中还有未熔化的石灰块和含 MgO 固体料。

吹氧 6.67min 时,炉渣碱度升高到 1.43(CaO/SiO₂ 摩尔浓度比 1.53),渣中 MgO 含量为 9.58%,已达到饱和溶解度,炉渣对炉衬的化学侵蚀速度减弱。炉渣碱度达到 1.43 所形成的钙镁橄榄石(CaO·MgO·SiO₂)熔点为 1490°C,而吹炼初期形成的钙铁橄榄石的熔点仅为 1208°C。炉渣熔点的提高,也降低了对炉衬的侵蚀能力。吹炼 9.67min 时,炉渣碱度达到 1.79(CaO/SiO₂ 摩尔浓度比 1.92),渣中 MgO 含量为 10%,已超过炉渣的饱和溶解度(约为 8%),呈过饱和状态。炉渣的主要相组成为镁硅钙石(1598°C)和硅酸二钙(2130°C)各占 35%,低熔点相为橄榄石与 RO 相,各占 15%。这时炉渣对炉衬的化学侵蚀已经很微弱。但熔池温度升高到 1460°C,超过炉渣的流动性温度(1345°C),炉衬表面开始出现液膜。所以吹炼中期以后,炉衬侵蚀将以熔化损失为主。吹炼后期炉渣碱度超过 3.0,渣中 MgO 的饱和溶解度约为 7%,渣中 MgO 含量 9.22%, MgO 呈过饱和状态。图 5-3-5 是根据吹炼过程渣量与渣中 MgO 含量变化计算出来的渣中 MgO 重量变化曲线。渣量的变化,可以采用磷平衡计算得到。由图 5-3-5 可知,吹炼初期炉渣 MgO 溶解度高,渣量较小,渣中 MgO 重量增加很快。吹炼中期,炉渣 MgO 溶解度下降,渣量增加缓慢,渣中 MgO 重量的增加速度开始下降。吹炼后期炉温升高,石灰熔化速度加快,渣量增加较 MgO 溶解度下降的速度更快,渣中 MgO 重量增加的速度又加大。到吹炼终点时渣中 MgO 重量达到 3.024t,为装料中 MgO 重量的 92%,另外的 8%为未溶部分(包括计算误差在内)。

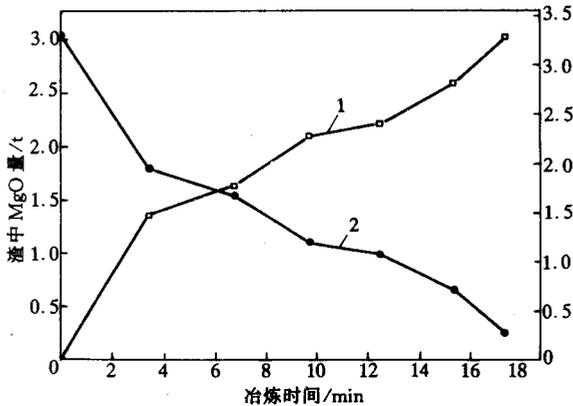


图 5-3-5 吹炼过程炉渣中 MgO 重量变化(300t 转炉)

1—渣中 MgO 溶解量 2—渣中 MgO 未溶解量

吹炼过程中 MgO 的溶解受渣中 MgO 溶解度和渣量两个变量的影响,是一种动态不平衡过程。采用吹炼初期加入全部或大部分含 MgO 渣料,使冶炼过程炉渣中 MgO 始终保持过剩状态,不仅有利于 MgO 的溶解也可以减缓炉渣对炉衬的化学侵蚀。

炼钢的原料及冶炼钢种不同时,吹炼过程的炉渣成分与渣量的具体情况有所不同,但控制原理是基本相同的。

(二) 炉渣过热度的影响

采用溅渣护炉后,炉渣 MgO 含量有所提高。研究 MgO 对炉渣流动性影响应便于了解溅渣护炉对转炉造渣、渣钢间冶金反应的影响。

结合转炉炼钢操作的特点,研究炉渣流动性简便的方法是测量炉渣的过热度。在吹炼过程中每隔一定时间用副枪取渣样和测温,对所取得的渣样测量其熔化性温度,熔池实测温度与渣样的熔化性温度之差即为炉渣的过热度。

炉渣的熔化性温度受炉渣成分的影响。吹炼前期低碱度、高氧化铁渣,其熔化性温度低。这时炉内有大量未熔废钢和加入的渣料,熔池温度也较低,炉渣过热度一般为 50~120℃。大型转炉的炉渣过热度高于中、小型转炉。冶炼中期炉渣碱度升高,氧化铁稍有降低,炉渣的熔化性温度升高,但熔池的升温速度高于炉渣熔化性温度提高的速度。吹炼中期炉渣的过热度为 90~150℃。未溅渣炉次吹炼过程炉渣过热度平均为 129℃,溅渣炉次平均为 123℃,两者仅相差 6℃。采用溅渣护炉虽然吹炼过程中炉渣 MgO 含量有所增加,但炉渣的流动性并未变差,所以对转炉的造渣操作和冶金反应不会带来不利影响。

吹炼后期炉渣碱度和氧化铁都增加,两者对于炉渣的熔化性温度影响相反。使吹炼

后期炉渣熔化性温度变化不大。随终渣碱度、TFe 含量不同,与吹炼中期相比炉渣熔化性温度有的升高,或相近,也有的降低。但炉渣过热度在吹炼后期都有大幅度升高。其原因是吹炼后期废钢已完全熔化,冷料加入很少或不加,熔池温度迅速升高。

根据对大型转炉钢厂 40 炉终渣进行的统计结果,采用溅渣护炉后终渣熔化性温度平均为 1389.3℃,比未溅渣时平均升高 26℃。吹炼终点时炉渣过热度平均为 250.4℃,在溅渣前后出钢温度相近的情况下,采用溅渣护炉之后炉渣的过热度平均降低了 26℃。炉渣过热度的降低可以减少对炉衬的侵蚀,且过热度降低 10%,对渣-钢间化学反应并不会带来有害影响。目前我国转炉炉渣的过热度偏高,冶金反应并无此需要,而对炉衬有害。一些中、小型转炉的终渣过热度达到 280~300℃。目前在降低出钢温度方面已经取得效果。

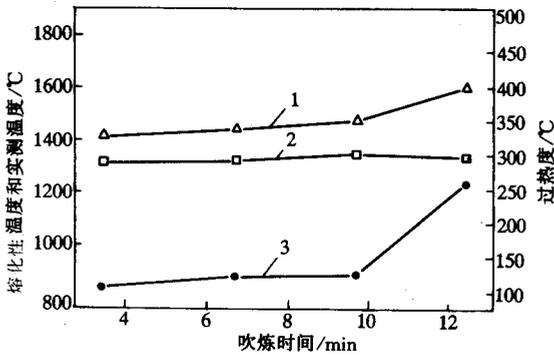


图 5-3-6 吹炼过程中渣过热度的变化
1—实测温度 2—熔化性温度 3—过热度

二、终点渣成分控制

终点渣成分决定了炉渣的耐火度和粘度。我国转炉炼钢厂所用的原料,由于生产产品和工艺制度差别很大,造成终点渣成分很不相同。几个转炉钢厂的终点渣成分及熔化性温度如表 5-3-7。

表 5-3-7 转炉终点渣成分及熔化性温度

厂名	CaO / %	SiO ₂ / %	MgO / %	TFe / %	MnO / %	P ₂ O ₅ / %	Al ₂ O ₃ / %	溶化性温度 / °C
鞍钢三炼钢厂	45~55	13~20	4.5~12	8.0~18	1.25~3.0	0.6~1.3	1.1~2.0	1450~1600
太钢二炼钢厂	48~54	15~17	1.5~8.58	12~15	1.2~2.0	0.8~1.2	1.2~2	1400

厂名	CaO /%	SiO ₂ /%	MgO /%	TFe /%	MnO /%	P ₂ O ₅ /%	Al ₂ O ₃ /%	溶化性 温度/℃
首钢一炼钢厂	27 ~ 55	15 ~ 17	8.5 ~ 13.5	8.8 ~ 27.5	1.5	1.0	1.2	1477 ~ 1550
承钢二炼钢厂	38 ~ 46	4 ~ 6	8.98	24 ~ 32	0.3 ~ 0.6	0.5 ~ 0.85	0.9 ~ 1.4	1314 ~ 1342
宝钢	47.1	13.07	6.8	18.2	4.68	1.67	1.46	1342 ~ 1415

影响终点渣耐火度的主要因素是 MgO、TFe 和碱度 (CaO/SiO₂)。碱度和氧化铁含量是由原料和钢种决定的,其中氧化铁变化范围较大,波动在 10% ~ 30% 范围内。为使溅渣层有足够的耐火度,主要措施是调整渣中 MgO 含量。

炉渣的岩相研究表明,转炉终渣 C₂S + C₃S 之和可以达到 70% ~ 75%,这两种化合物都是高熔点物质 (C₂S 2130℃, C₃S 2070℃)。氧化铁与氧化钙所形成的化合物为低熔点物质 (CaO·Fe₂O₃ :1216℃, 2CaO·Fe₂O₃ :1440℃)。氧化铁与氧化锰等组成的 RO 相熔点也较低。当低熔点相达到 40% 时,炉渣开始流动。为了提高溅渣层的耐火度,必须减少低熔点物质。提高渣中 MgO 含量是减少由于氧化铁所形成低熔点相的有效措施,图 5-3-7 与图 5-3-8 是 MgO 与氧化铁的二元系相图。

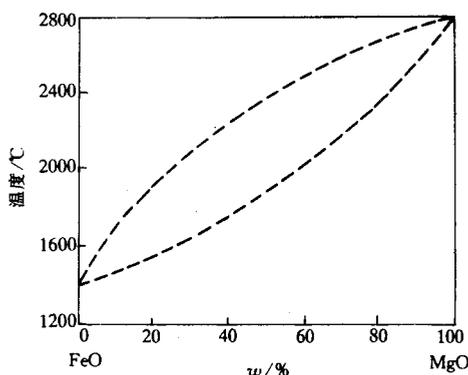


图 5-3-7 MgO 与 FeO 二元系相图

由图 5-3-7 可知, MgO 与 FeO 可以形成连续的固溶体。当 FeO 达到 50% 时,此固溶体的熔点仍高于 1800℃。由图 5-3-8 可知, MgO 与 Fe₂O₃ 能化合成镁铁矿 (MgO·Fe₂O₃)。此化合物又能与 MgO 生成固溶体。两种物质都是高温耐火材料。在 Fe₂O₃ 含量达到 70% 时,其熔点在 1800℃ 以上。MgO 与 FeO、Fe₂O₃ 二元系相图(图 5-3-7、5-3-8)清楚地表明了 MgO 可以吸收比其本身重量还多的氧化铁。为了使溅渣层有高的

耐火度,必须使改质渣中 MgO 达到一定含量。如果 MgO 含量低,氧化铁就会与氧化钙起作用生成低熔点铁酸钙。根据理论分析和国内外溅渣护炉实践,在正常的转炉终渣成分范围内,为使溅渣层有足够的耐火度,终渣 MgO 应控制在表 5-3-8 的范围内。

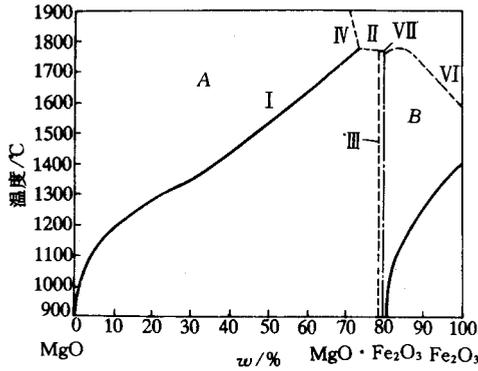


图 5-3-8 MgO 与 Fe_2O_3 二元系相图

表 5-3-8 终渣 MgO 含量(推荐值)

	%		
终渣 TFe	8 ~ 14	15 ~ 22	23 ~ 30
终渣 MgO	7 ~ 8	9 ~ 10	11 ~ 13

溅渣护炉对于终渣氧化铁含量并无特殊要求,只要把溅渣前的 MgO 含量调整在合适范围。转炉终渣氧化铁高低都可以取得较好的溅渣护炉效果,如美国 LTV 钢公司,内陆钢公司,宝钢炼钢厂等转炉终渣氧化铁都在 18% ~ 27% 范围内。如终渣氧化铁较低,渣中 C_2F 少,RO 相的熔化性温度高,在保证足够的耐火度的情况下,渣中 MgO 含量也可降低,使加入的调渣剂数量减少。终渣氧化铁低的转炉,溅渣护炉的成本低,也较容易获得高炉龄。

终渣调整方式有下列几种。

1. 终渣成分不进行调整

转炉终渣 MgO 含量可以满足溅渣层耐火度的要求,炉渣的过热度不高时,出钢后可以直接喷吹氮气进行溅渣操作。宝钢、太钢、LTV 和内陆钢公司等厂家都采用这种工艺。当终渣 MgO 含量要求在 10% 以下,采用这种方法并无困难。

2. 出钢后加入调渣剂提高渣中 MgO 含量

出钢后渣中 MgO 含量达不到溅渣层所要求的数值,需要加入调渣剂提高渣中 MgO 含量。渣中 MgO 含量低于溅渣层所要求的原因有以下两种情况。

原料中 P、S 含量高、倒渣、取样、测温、补吹次数多,使吹炼前期加入的 MgO 大量流失,补吹时加入渣料,使渣中 MgO 进一步降低。例如,采用“高拉补吹”操作的转炉,拉碳前渣量约 120kg/t 钢,渣中 MgO 含量 8% 。第一次拉碳,约倒掉 $1/4$ 炉渣。补吹时加入渣料 6kg/t ,渣中氧化铁上升 4% ,渣中 MgO 下降到 7.2% 。补吹后再倒炉、取样测温,则终渣的渣量约为 86kg/t 钢,渣中 MgO 下降到 6.6% 。假定溅渣操作要求渣中 MgO 含量为 9% ,则需补加轻烧菱镁球 2.95kg/t 钢,总渣量达到 89kg/t 钢。

出钢后需要调查的另一种情况是终渣为铁酸钙渣系。为了使溅渣层有足够的耐火度,渣中的 MgO 含量需要达到 12% 以上。炼钢过程中 MgO 含量达不到要求含量,必须在出钢后加入一部分调渣剂,以提高渣中 MgO 含量。

出钢后调查的困难是渣量和渣的成分不容易准确估计。加入的渣料不容易完全熔化。

三、调渣剂的选择

调渣剂是指在溅渣护炉工艺中为达到溅渣所要求的炉渣 MgO 含量,在造渣过程中和出钢后进行炉渣调整时所加入的 MgO 质造渣材料。炼钢中常用的调渣剂主要有:轻烧白云石、生白云石、轻烧菱镁球、冶金镁砂、菱镁矿渣和含 MgO 较高的石灰。表 5-3-9 给出工常用调渣剂的成分。

表 5-3-9 常用调渣剂的成分

调渣剂名称 \ 调渣剂成分	CaO/%	SiO ₂ /%	MgO/%	烧减	MgO 的质量分数 /%
生白云石	30.3	1.95	21.7	44.48	28.4
轻烧白云石	51.0	5.5	37.9	5.6	55.5
菱镁矿渣粒	0.8	1.2	45.9	50.7	44.4
轻烧菱镁球	1.5	5.8	67.4	22.5	56.7
冶金镁砂	8	5	83	0.8	75.8
含 MgO 石灰	81	3.2	15	0.8	49.7

调渣剂的作用主要是提高渣中 MgO 含量,因此,调渣剂中 MgO 含量的高低应是选择调渣剂的重要物性参数。考虑到调渣剂中 CaO 含量可以取代石灰中的 CaO,保证炼钢终渣碱度,减少石灰加入量。而调渣剂中 SiO₂ 含量,需要增加石灰的消耗量。综合考虑

提出 MgO 质量分数的概念,用以比较调渣剂中 MgO 含量的高低。 MgO 质量分数的定义如下:

$$MgO \text{ 质量分数}(\%) = MgO\% / (1 - CaO\% + RSiO_2\%) \quad (5-3-9)$$

式中 $MgO\%$ 、 $CaO\%$ 、 $SiO_2\%$ 分别为调渣剂中 MgO 、 CaO 、 SiO_2 实际含量, R 为炉渣碱度,取 $R = 3.5$ 。

不同调渣剂的 MgO 质量分数列于表 5-3-9。从表中可以看出,不同调渣剂 MgO 当量按从大到小排列的顺序为:冶金镁砂、轻烧菱镁球、轻烧白云石、含 MgO 石灰、菱镁矿渣粒和生白云石。根据 MgO 含量选择调渣剂,应以冶金镁砂、轻烧菱镁球、轻烧白云石和含镁石灰为宜(MgO 质量分数大于等于 50%)。

价格是选择调渣剂的重要因素,因为调渣剂价格的高低直接影响到溅渣护炉的经济效益。图 5-3-9 给出太钢采用溅渣技术后,轻烧镁球的价格对溅渣经济效益的影响。当轻烧镁球的价格为 661 元/t 时,溅渣增加的成本与该厂 1995 年耐材消耗相比节约的成本持平,溅渣效益为零。当轻烧镁球的价格达到 714 元/t 时,则与该厂 1994 年耐材消耗相比所节约的成本基本持平。

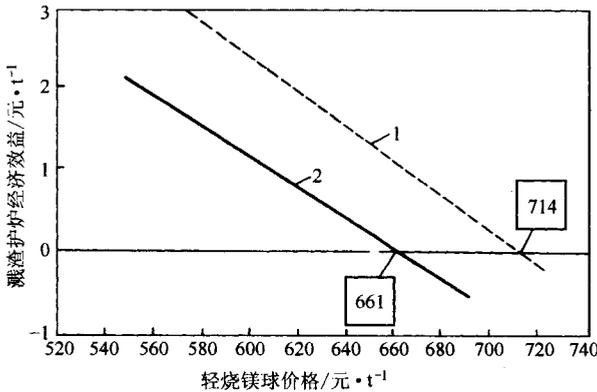


图 5-3-9 轻烧镁球价格对总效益的影响
1—与 1994 年相比 2—与 1995 年相比

显然,从成本考虑,溅渣应尽量选择便宜的调渣剂。表 5-3-10 给出不同调渣剂的价格比较。从表中可以看出,采用生白云石调渣剂成本最低。轻烧白云石和菱镁矿渣粒的价格比较适中,而高 MgO 石灰、轻烧镁球和冶金镁砂的价格偏高。

在选择调渣剂时,还应充分注意 MgO 造渣料的加入对炼钢过程热平衡的影响。表 5-3-11 给出不同调渣剂的热焓及其对炼钢的影响。

表 5-3-10 不同调渣剂的价格比较

调渣剂名称 价格	生白云石	轻烧白云石	菱镁矿渣粒	轻烧菱镁球	冶金镁砂	高镁石灰
销售价格/元·t ⁻¹	63.07	325.9	209	530	500	430
纯 MgO 价格/元·t ⁻¹	290.65	859.89	455.34	786.35	602.41	2866.67
MgO 折合价格/元·t ⁻¹	222.08	587.21	470.72	934.74	659.63	865.19

表 5-3-11 不同调渣剂的焓($H_{1773K} - H_{298K}^0$)及其对炼钢热平衡的影响

调渣剂种类 项目	生白云石	轻烧白云石	菱镁矿	菱镁球	镁砂	氮气	废钢
热焓/MJ·kg ⁻¹	3.407	1.762	3.026	2.06	1.91	2.236	1.38
与废钢的热当量置换比	2.47	1.28	2.19	1.49	1.38	1.62	1.0
与废钢的热量置换比	11.38	3.36	4.77	2.21	1.66		

$$\text{调渣剂与废钢的热当量置换比} = \frac{\Delta H_i}{(\text{MgO})_i \cdot \Delta H_s} \times 100\% \quad (5-3-10)$$

式中 ΔH_i ——i 种调渣剂的焓, MJ/kg;

ΔH_s ——废钢的焓, MJ/kg;

$(\text{MgO})_i$ ——i 种调渣剂中 MgO 的百分含量。

用生白云石调渣, 热耗量很大, 约相当熔化 11kg 废钢所消耗的热量。而轻烧白云石和冶金镁砂的热耗量较小, 适用于废钢比较高、炼钢热源较紧张的钢铁厂采用。

综上所述, 正确选择调渣剂的原则如下。

(1) 因地制宜。要结合本厂炼钢的实际情况和当地资源条件, 尽可能选择含 MgO 量高, 价格便宜和热消耗量少的调渣剂。

(2) 综合考虑各种调渣剂的价格、成分和热耗量, 推荐轻烧白云石作为首选的调渣剂。

(3) 根据各厂生产条件, 最好选配几种调渣剂搭配使用, 以达到最佳效果和较高的经济效益。

调渣剂的粒度应根据调渣剂的种类、转炉终点温度、终渣成分和加入方式确定。通常, 生白云石的粒度应为 5~15mm, 轻烧镁球和轻烧白云石粒度可以大一些, 但不应大于

25mm。从炉顶料仓加入的调渣剂最小粒度不应小于 5mm。

调渣剂种类的选择会受到炉顶料仓个数的限制。为保证溅渣的效果,建议至少采用 2 个炉顶料仓存放调渣剂。其一可作为炉内调渣,存放轻烧白云石等主要调渣剂;另一个则用于炉后调渣,存放速熔菱镁球,含碳菱镁球等调渣剂。

四、合适的留渣量

合适的留渣量应保证在炉衬内表面形成足够厚度的溅渣层,并可在溅渣后对装料侧和出钢侧进行摇炉挂渣,剩余的炉渣倒入渣罐。形成溅渣层的渣量可以根据炉衬内表面积、溅渣层厚度及炉渣密度计算。溅渣护炉所需的总渣量可按溅渣层理论重量的 1.1 ~ 1.3 倍来估算,炉渣密度可取 $3.5t/m^3$ 。在上述计算中,大型转炉的溅渣层厚度可取 25 ~ 30mm,中、小型转炉可取 15 ~ 20mm(大于 200t 以上转炉为大型,100t 以下为中小型转炉)留渣量的计算公式如下:

$$W = K \cdot A \cdot B \cdot C \quad (5-3-11)$$

式中 W ——留渣量, t ;
 K ——渣层厚度, mm ;
 A ——炉衬内表面积, m^2 ;
 B ——炉渣密度, t/m^3 ;
 C ——系数,取 1.1 ~ 1.3。

表 5-3-12 为不同容量转炉溅渣层重量参考值。

表 5-3-12 不同转炉的溅渣层重量

转炉公称吨位/ t	溅渣层厚度/ mm				
	10	15	20	25	30
40	1.8	2.7	3.6	—	—
80	—	4.41	5.98	—	—
140	—	8.08	10.78	13.48	—
250	—	—	13.11	16.39	19.7
300	—	—	17.12	21.40	25.7

上述计算值可作为溅渣护炉开始时的参考。经过一段试验之后,应根据本厂的实际

情况,确定合适的留渣量。

留渣量过大将增加调渣剂的消耗,提高溅渣护炉的成本;留渣量过小不能形成足够厚度的溅渣层和不能有效地进行摇炉挂渣。根据经验,转炉的吨钢留渣量应在 90 ~ 100kg/t。我国多数转炉钢厂吨钢炉渣的总量为 90 ~ 140kg/t。有些钢厂在吹炼后期多次倒渣,使出钢前的渣量低于 80kg/t,造成正常溅渣护炉的困难。应规范炼钢操作,减少倒渣次数和减少倒炉时的倒渣量。

五、调渣工艺

调渣工艺是指在炼钢结束后,通过炉口观察炉渣状况,判定炉渣是否适宜溅渣。如果炉渣过于粘稠,应加入少量化渣剂稀释炉渣,增强炉渣的流动性;如果炉渣过热度高,炉渣稀流动性良好,应加入少量调渣剂(又称稠渣剂)提高炉渣粘度,使之更适宜溅渣的操作工艺。

由于炉子吨位不同及各钢厂原料条件、冶炼钢种、精炼及浇铸方式等方面各异,造成终渣成分和炉渣过热度有很大差别。因此,溅渣护炉的调渣工艺也不完全相同。主要有以下两种不同的工艺:

1)直接溅渣工艺。即以炼钢过程中调整炉渣为主,出钢后基本不再调渣,直接进行溅渣操作。

2)出钢后调渣工艺。即在炼钢结束后,根据炉渣状况适当加入少量调渣剂用以降低炉渣过热度,提高炉渣粘度,然后进行溅渣。

(一)直接溅渣工艺

直接溅渣工艺适用于大型转炉,要求铁水及原燃料条件比较稳定,吹炼平稳,终点控制准确,出钢温度低。

直接溅渣工艺的操作程序如下。

(1)吹炼开始加入第一批熔剂时,将所需调渣剂的大部分加入炉中,控制初期渣 $MgO\% \leq 8\%$,利用 MgO 降低炉渣熔点,促进化渣。

(2)炉渣“返干期”过后,根据化渣情况,分批加入剩余的调渣剂,保证终渣 MgO 含量能达到溅渣操作要求的目标值。

(3)出钢时通过炉口观察炉内渣况,决定是否需补加少量调渣剂。在终点碳、温度控制比较准确的条件下,一般不需要再加入调渣剂稠化炉渣。

(4)进行溅渣,并由操作工确定是否需要对接衬上的特殊部位进行喷补,以保证溅渣护炉的效果和控制良好炉型。

美国 LTV 钢公司和内陆钢公司主要生产低碳钢,渣中 TFe 波动在 18% ~ 30%。终渣 MgO 含量为 12% ~ 15%,出钢温度较低,为 1620 ~ 1640℃,出钢后炉渣较粘,适宜溅渣。通常,这种炉渣可直接喷吹氮气进行溅渣护炉。

我国宝钢的生产条件和冶炼钢种与 LTV 钢公司相近。由于采用了复合吹炼工艺和大流量供氧技术,熔池搅拌强烈,终渣 TFe 略低于 LTV,控制在 18%。为适应溅渣,终渣 MgO 从 6.8% 提高到 10.3%,出钢温度在 1640 ~ 1650℃,终渣一般不需要调整,可直接溅渣。

太钢二炼钢厂,采用连铸和模铸生产中低碳钢。出钢温度低,硅钢控制在 1610 ~ 1640℃,模铸钢 1640 ~ 1680℃,连铸钢为 1660 ~ 1700℃。该厂采用高拉碳技术控制终渣 FeO 波动在 10% ~ 20% 范围内。采用溅渣工艺后,控制终渣 MgO 含量为 8% 左右,完全可以满足溅渣的要求。调渣剂主要在炼钢过程中加入,平均加入量为 2.35kg/t 钢。

(二) 出钢后调渣工艺

炉后调渣工艺适用于中小型转炉。由于中小型转炉出钢温度偏高,造成炉渣过热度升高,同时,由于原料条件不稳定,往往造成后吹。多次倒炉致使终渣 FeO 升高,渣稀且渣中 MgO 达不到饱和值,不适宜直接溅渣。往往需要在出钢后向炉内再加入少量调渣剂,改善炉渣状态,使之适合于溅渣操作。

出钢后调渣工艺在冶炼过程中的操作与直接溅渣工艺相同。出钢后调渣工艺的操作程序如下:

(1) 吹炼终点,控制炉渣中的 MgO 含量达到 8% ~ 10% ;

(2) 出钢时,根据出钢温度和观察到的炉渣状况,决定加入调渣剂的数量,进行炉后调渣。

(3) 调渣后进行溅渣操作。

出钢后调渣的目的主要是使炉渣 MgO 达到饱和值,提高炉渣的熔点,同时加入的调渣剂溶解吸热可降低炉渣温度,调整炉渣过热度 and 炉渣粘度,使其适宜溅渣。

出钢后调渣工艺还可分为以下两种操作。

1) 单纯调整炉渣 MgO 的操作工艺。通过炉后添加调渣剂使炉渣 MgO 过饱和,达到降低炉渣过热度 and 稠化炉渣的目的。

2) 同时调整炉渣中氧化铁和 MgO 的操作工艺。通过后添加含碳的镁质耐火材料,利用 C - O 反应降低炉渣 FeO 含量和 MgO 的饱和溶解度,使炉渣 MgO 更易于达到或超过饱和值。

承钢采用半钢冶炼,依靠炉渣 FeO 溶解 CaO,形成高碱度铁酸钙炉渣。出钢温度为

1720℃,终渣 TFe 达 20% ~ 30%,炉渣平均过热度为 399℃。为了溅好渣,采用后调整炉渣 MgO 的操作工艺,炉后加入镁砂和轻烧镁球调渣剂对炉渣进行改质处理。改质后的炉渣 MgO 含量从 8% ~ 9% 提高到 13% ~ 14%,使炉渣的熔化性温度从 1321℃ 提高到 1344℃。实测炉渣温度降低到 1535℃,炉渣平均过热度仅为 191℃,适合于溅渣操作。

三明钢铁厂 15t 转炉生产普碳钢和低合金钢。出钢温度波动在 1690 ~ 1750℃ 之间,其中出钢温度高于 1720℃ 的炉数占 40%,炉渣碱度为 3.0,终渣 FeO 为 17.8%,MgO 为 6.51%。采用含 C20%、MgO45% 的速熔调渣剂进行炉后调渣。经出钢后调渣的改质渣平均温度为 1711℃,渣中 FeO 降低到 15.67%,MgO 升高到 8.56%,炉渣的熔化性温度升高到 1430℃。改质后的炉渣得到良好的溅渣效果。

对于出钢温度偏高的中小型转炉,采用出钢后调渣工艺操作非常重要。出钢后调渣的目的是为了降低炉渣过热度,稠化炉渣,使渣中 MgO 含量超过饱和值。因此,对出钢后调渣剂的要求也更严格,其要求条件如下:

- 1) 出钢后调渣剂应易熔、速熔,即具有良好的熔化性能和高的反应活性。能与高温液态炉渣迅速发生反应;
- 2) 出钢后调渣剂应有较高的 MgO 含量,熔化后能明显提高炉渣 MgO 含量;
- 3) 出钢后调渣剂应具有较大的热焓,熔化后能明显降低炉渣温度。

六、合理确定溅渣工艺参数

合理的溅渣工艺参数,主要是根据具体的转炉炉形尺寸,确定能在尽可能短的时间内将炉渣均匀喷溅涂敷在整个炉衬表面,并对渣线、耳轴两侧等易于熔损的部位能形成厚而致密的溅渣层所要求的喷吹工艺参数。它主要包括以下几项:

- (1) 合理确定喷吹 N₂ 气的工作压力或流量。
- (2) 确定最佳的溅渣枪位。
- (3) 设计适宜的喷枪结构和尺寸参数(如喷孔数目、喷孔夹角和喉口直径)。

水力学模型试验结果已经证明,炉内溅渣的效果可以用以下两个基本参量来评价。

(1) 溅渣总量 W_s 。即通过溅渣粘结在炉壁上的渣量总量 W_s 。在溅渣过程中,溅渣总量 W_s 反映了 N₂ 气的有效利用率。 W_s 越大说明高速 N₂ 气射流冲击渣池喷溅渣滴到炉衬表面的有效功越大,溅渣效果越好。

(2) 溅渣量在炉内不同高度上的分布函数。实际溅渣过程中,希望在炉内不同高度上能得到相对均匀的溅渣量分布,特别是对转炉上部炉帽部分,也能得到较好的溅渣效果,以利于均匀炉形,延长炉帽寿命。

水力学模型溅渣的试验证明,喷吹枪位对溅渣总量 W_s 有明显的影响:对于同一喷吹压力,有一最佳喷吹枪位。当实际枪位高于或低于最佳枪位时, W_s 都将降低。炉渣粘度对 W_s 有较明显的影响,随着炉渣粘度的升高,溅渣量 W_s 减小。炉渣表面张力变化对溅渣量 W_s 基本没有影响。水力学模型试验还证明,在炉内不同高度上溅渣量的分布是非常不均匀的。转炉耳轴以下部位,溅渣量较多,而耳轴以上部位随高度的增加,溅渣量明显减少。不同的炉渣状态(即粘度、密度和表面张力的变化)对炉内不同高度上溅渣量的分布规律没有影响。

转炉溅渣的生产实践基本证实了上述水力学模型试验的结果。通常,在确定转炉溅渣工艺参数时,往往依据实际转炉的水力学模型试验结果,初步确定溅渣工艺参数,并通过在溅渣过程中不断地观察,总结和比较,确定最佳的溅渣枪位,喷吹 N_2 气流量和压力。根据溅渣中出现的问题,修改喷枪设计,逐步达到最佳的溅渣效果。表 5-3-13 给出各厂转炉溅渣护炉的工艺参数。

表 5-3-13 各厂转炉溅渣护炉工艺参数

厂名	转炉参数				喷枪参数			
	公称容量 /t	炉内直径 /mm	炉内高 /mm	H/D	喷孔数目 /个	喷孔喉口 直径/mm	喷孔夹角 ($^{\circ}$)	马赫数 Ma
宝钢	300	6472	10900	1.68	6	41	12	2.1
鞍钢三炼钢厂	180	5400	8000	1.48	4	37.9	14	1.98
首钢二炼钢厂	210	6000	10075	1.68	5	43	16	2.0
LTV 钢公司	250	5791	8900	1.54	4	52.3	12	—
本钢炼钢厂	120	4900	8260	1.69	4	38.2		
攀枝花钢铁公司	120			1.78	4	35	13	1.86
太钢二炼钢厂	50	3500	6000	1.71	3	31	10	2.0
马钢三炼钢厂	50	3430	6500	1.90	3	28.285	10	1.97
首钢三炼钢厂	80	3920	6465	1.65	4	38.5	12	1.97
首钢一炼钢厂	30	2850	6000	2.105	4	27	12	1.97
承钢炼钢厂	20	2400	5050	2.104	3	25	10	1.92
莱芜钢铁公司	25	2440	5523	2.26	3	25	11	1.964
天津铁厂	25	2636	5520	2.09	3	26.4		1.96
三明钢铁厂	15	2305	4460	1.93	3	22.2	10	1.97
上钢一厂	25	2580	5750	2.23	单三式	72.6		

厂名	造渣工艺			溅渣工艺					
	终渣碱度	终渣 TFe /%	MgO /%	渣量 /kg·t ⁻¹	氮压力 /MPa	氮流量 /m ³ ·h ⁻¹	溅渣时间 /min	溅渣枪位 /mm	供氮强度 /m ³ ·(t·min) ⁻¹
宝钢	3.2	19.6		108	0.7~0.85	50000	3	2200	2.78
鞍钢三炼钢厂		8~18	12	110~130	1.8~0.9	24000	2~4	1900	2.45
首钢二炼钢厂	3.4	13	11~13	100	1.1	40000	3~5	2700	3.17
LTV 钢公司		18~30	12~14			37400	3	2530	2.49
本钢炼钢厂						21000	3	2000	2.92
攀枝花钢铁公司	4.3	24.08	11.09		0.95~1.1	2000~2000	1800		
太钢二炼钢厂	~	12~15	8.58		0.7~0.8	11700	2.5~3	1300	2079
马钢三炼钢厂	3.5	16~19			1.0~1.1	11000	3	1400	2096
首钢三炼钢厂	4.2~3.4	12~16	11.3		1.4	15000	3	2200	3.125
首钢一炼钢厂	3	12~17	9~11		0.8~0.95	10020	3	1600	4.175
承钢炼钢厂		24~32	8.98			7500	3	1500	3.96
莱芜钢铁公司			9~10		0.8~1.0	8000	3	1500	4.83
天津铁厂						7920	3	1579	4.4
三明钢铁厂	2.89	17.87	6.51		0.7~1.0	5100	3	1100	4.25
上钢一厂					0	5900	3	1200	3.93

在实际溅渣过程中确定合理的溅渣工艺参数,主要应考虑以下两点:

- 1) 炉形尺寸,主要是转炉的(H, D)参数;
- 2) 喷吹参数,包括气体流量、工作压力、喷枪高度和溅渣时间。

炉形尺寸通过转炉(Hd/D)参数表示。转炉(Hd/D)参数的大小,决定为了满足溅渣要求所需的输入氮气能量强度,并能间接反映出溅渣的难易程度。

溅渣参数由喷吹参数(Qh/d)^{0.33}和溅渣时间 t 的乘积确定。溅渣参数反映出对于确定的转炉(Hd/D)参数,溅渣所需的输入氮气能量。

图 5-3-10 汇总了国内外 15 座不同容量转炉的溅渣护炉工艺数据。分析这 15 座转炉的生产数据,可得出转炉参数与溅渣参数间的经验关系式如下:

$$\frac{Hd}{D} = 13.77 + 0.73 \left(\frac{Qh}{d_1} \right)^{0.33} t \quad (5-3-12)$$

式中 H ——转炉内衬高度,mm;

d_1 ——喷枪喉口直径(对单三式喷枪可取 $d = \frac{1}{2} d_{喉}$),mm;

D ——转炉内衬直径,mm;

Q —— N_2 气喷吹流量(标态),m³/min;

h ——喷枪高度(溅渣枪位),mm ;

t ——溅渣时间 ,min。

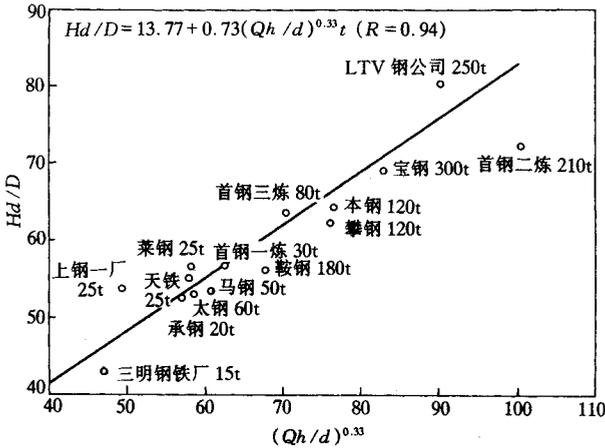


图 5-3-10 转炉参数 (Hd/D) 与溅渣参数 $(Qh/d)^{0.33} t$ 间的关系

分析图 5-3-10 得出结论如下：

(1)对于不同容量和尺寸结构的转炉 ,转炉参数与溅渣参数有较好的相关关系。随转炉参数的增大 ,溅渣参数按线性关系增大。

(2)对于几何尺寸已经确定的转炉 ,可根据确定的喷枪参数 ,利用式 5-3-12 确定最佳的溅渣工艺参数(溅渣枪位和 N_2 流量),保证在较短时间内溅好渣。

(3)图 5-3-10 中统计曲线右下方的点说明实际溅渣输入的能量略高于转炉参数所要求的能量 ,相反 ,统计曲线左上方的点说明实际溅渣输入的能量略低于转炉参数所要求的能量。统计曲线是根据各钢厂实际的溅渣数据回归得出的经验公式。由于国内各厂的溅渣工艺尚未完全优化 ,加上数据选取也可能有些误差 ,造成式 5-3-12 会有一些的偏差。从图 5-3-10 中可以看出 ,对容量为 100t 以下的中小型转炉 ,式 5-3-12 吻合较好 ;而国内大型转炉 ,都处于曲线的右下方 ,说明溅渣投入的能量偏高。以首钢二炼钢厂为例 ,如果将溅渣枪位从目前的 2.7m 下降至 2m 左右 ,同时适量减少溅渣氮气流量 ,将使数据点向左偏移 ,接近式 5-3-12 的计算值。

七、溅渣操作程序

普通转炉厂的溅渣护炉工艺操作程序如下：

1)转炉出钢时 ,炼钢工应密切注意炉内钢水状况及渣况 ,保证出净钢水 ,严禁炉内留有残钢 (否则易引起溅渣粘枪及金属喷溅)；

2) 转炉出钢过程中及结束后, 炼钢工应观察炉渣的颜色及流动性, 判断炉渣的温度、粘度等状况, 决定是否加入调渣剂;

3) 同时, 炼钢工应观察炉衬的熔损状况(有条件的厂家可参考激光测距仪的扫描结果), 决定是否对炉衬某些的部位进行重点溅渣或喷补;

4) 操作工将转炉摇至零位, 如需调整渣况, 则加入调渣剂;

5) 操作工将氧枪降到预定的枪位, 调节氮气流量(或压力) 符合规程的要求;

6) 操作工在溅渣的过程中, 可适当改变枪位, 以求得溅渣量的最大效果或固定某一枪位喷溅一个特定位置;

7) 操作工观察溅渣炉况, 如果在正常时间内炉口喷出小渣块, 证明溅渣状况良好, 可在规程规定的时间内结束溅渣。

8) 溅渣即将结束前, 适当降低枪位, 进一步提高溅渣量, 结束溅渣, 提枪、切断氮气;

9) 在结束溅渣提枪的同时, 观察氧枪是否粘枪;

10) 在摇炉挂渣结束后, 将剩余的炉渣倒入渣罐;

11) 炼钢工观察炉衬, 判断溅渣效果;

12) 如果氧枪粘枪严重, 则采取措施处理氧枪;

13) 进行下一炉冶炼。

如果在复吹转炉上溅渣, 则应注意的问题如下:

1) 注意在溅渣过程中的底吹气体流量的变化情况;

2) 为保证底部供气元件的畅通, 可在溅渣过程中适当提高底部供气强度;

3) 在溅渣后, 如果发现底部供气元件有堵塞现象, 应立即采取复通措施。

八、溅渣时间与溅渣频率

(一) 溅渣时间

溅渣时间是溅渣操作中的一个重要工艺参数, 各个厂家应根据自己车间的生产节奏灵活掌握。溅渣时间过短, 不能起到溅渣的效果, 过长将会浪费氮气、致使炉衬降温过多, 影响下炉冶炼等很多危害。

如表 5-3-13 所示, 目前各厂家的溅渣时间定为 2.5 ~ 4min。溅渣时间过短, 炉渣没有得到充分的冷却和混匀, 炉渣条件比较差, 即使溅到炉壁上, 也不能很好地挂上, 起不到护炉的作用。在渣况正常的条件下, 溅渣时间越长, 炉衬挂渣越多, 但也易造成炉底上涨和粘枪。在留渣量较小时, 也会造成炉底磨损增大, 炉底寿命下降。尤其是在炉渣温度过低的或流动性较差的时候, 炉渣溅不起来, 如果一味地延长溅渣时间, 由于渣况不

良, 溅渣时间再长, 也起不到溅渣的效果。反而, 由于溅渣时间的延长, 炉衬温度降的过低, 即浪费了氩气也影响了后续的炼钢操作, 同时也降低了生产效率。

(二) 溅渣频率

1. 开始溅渣护炉的时机

在一个炉役中, 什么时间开始溅渣护炉, 要根据各厂的具体情况确定。原则上由操作工根据对炉衬侵蚀情况的观察结果决定, 若炉衬有明显的损耗, 则应开始溅渣护炉。一般从炉役的中期开始溅渣护炉, 即在起始补炉时就应开始溅渣护炉。

2. 溅渣的频率

溅渣频率, 即为合理溅渣的间隔炉数, 是溅渣护炉的重要操作工艺参数之一。在炉役的中期过于频繁溅渣, 对炉型产生较大的影响(如炉型变小), 并将影响炼钢作业时间, 反而不利。一般应在炉役的前期就开始溅渣, 可以两炉一溅, 在炉衬厚度为 400mm 左右时应保持炉炉溅渣, 力争炉衬厚度保持在 300~400mm 之间, 形成动态平衡, 有利于形成永久炉衬。

关于溅渣频率, 可以概括为“前期不溅、中期两炉一溅、中后期炉炉溅”。掌握好溅渣频率的关键是在中后期炉炉溅渣。只有在炉役中后期坚持炉炉溅渣护炉, 才能使炉衬损耗最小并达到动态平衡, 是实现炉衬长寿的理想操作。

九、溅渣效果与炉况监测

在溅渣操作的初期, 为了不断改进溅渣操作工艺, 应该不断对溅渣效果进行观察。为了有效地观察炉衬溅渣的效果, 在炼钢过程的一倒、二倒及出钢的过程中应不断地观察炉衬表面, 保证对前一炉溅渣层的工作效果及砖缝暴露情况, 做到详细了解。溅渣之后, 也可以立即倒炉观察炉况。良好的溅渣效果, 应是炉衬的内表面由上至下均匀地溅涂上了一层炉渣, 如果在上一炉砖缝已暴露, 在溅渣后由于溅渣层的敷盖, 砖缝应消失。同时在下一炉冶炼中应利用各种机会, 密切注意炉衬的熔损状况, 为掌握以后的溅渣效果打下基础。应对本厂转炉在各种不同的冶炼工艺条件下, 每溅渣一次后可冶炼的炉数, 做到心中有数。

在有条件的企业, 则可采用激光测距仪来定期测量炉衬的蚀损速度。采用激光测距仪, 一般应每天测量一次炉衬厚度, 以便准确地监视炉衬各部位厚度的变化情况。根据激光测距仪提供的数据, 合理地控制溅渣层厚度, 评估溅渣的质量。对炉衬的薄弱部位, 应合理地控制喷补, 提高喷补料的利用率, 并应控制溅渣层厚度及溅渣频率, 均衡炉衬厚度。还应根据激光测距仪提供的数据对炉座的停开提供依据。

十、氧枪(溅渣)的设计与维护

溅渣护炉要求氧枪应能保证在 3min 左右的溅渣时间内,在炉衬各部位形成所要求的溅渣层厚度,还要有较长的枪龄和低的氮气消耗量。

溅渣护炉依靠氮气射流作为动力冲击炉渣使其飞溅到炉衬内表面形成溅渣层。如果炼钢与溅渣采用同一氧枪,则喷头参数应主要按满足炼钢工艺要求进行设计。我国中、小型转炉大多数都采用同一氧枪进行炼钢与溅渣操作,如果有必要采用专用喷枪溅渣,则应根据溅渣护炉的工艺特点,选取溅渣专用枪设计参数。

把喷孔出口马赫数 Ma 提高到 2.0 ~ 2.3,这样可以提高射流的出口速度,使单位体积的氮气具有更高的能量。采用高马赫数枪喷吹氮气,可使溅渣护炉氮气消耗量下降 20%。

表 5-3-14 不同马赫数氮气的出口速度及动量

马赫数 Ma	滞止压力/MPa	氮气出口速度 /m·s ⁻¹	氮气出口动量 (kg·m)·m ⁻³
1.8	0.583	485.6	606.4
2.0	0.793	515.7	644.7
2.2	1.084	542.5	678.1
2.4	1.488	564.3	705.4

由表 5-3-14 可知,当 Ma 值由 1.8 提高到 2.4,每 1m³ 氮气的出口射流动量增加 16.3%。高动量射流的速度衰减慢,效率高。

采用高马赫数射流,需要提高滞止压力。目前宝钢溅渣护炉用喷枪 $Ma = 2.1$ 。当氮气气源压力提高后 Ma 还可进一步提高。

下面分项讨论几个问题。

(1)喷头的喷孔数。随着炉子容量增加,应适当增加喷头的喷孔数,这样可以使溅渣层厚度更均匀。喷孔数目增加会使每孔的氮气流量下降,因此要与提高喷孔出口马赫数结合起来进行考虑。溅渣用喷枪的喷孔数可参考表 5-3-15 中的数字。

表 5-3-15 溅渣喷头的喷孔个数

转炉公称吨位/t	喷孔数
> 200	5 ~ 7
100 ~ 200	4 ~ 5
< 100	3 ~ 4

(2) 喷孔倾角。专用溅渣氧枪喷孔的倾角可取 $12^{\circ} \sim 14^{\circ}$ 。LTV 钢公司 250t 转炉使用 12° 喷孔倾角效果最好。宝钢 300t 转炉使用过 14° 的喷孔倾角也有较好的效果。国内多数转炉厂的氧枪喷头在 $9^{\circ} \sim 14^{\circ}$ 范围。喷孔的倾角与炉子高宽比 (H/D) 有关, 高宽比小的炉子, 倾角可大些。例如鞍钢转炉的高宽比为 1.17, 其喷孔倾角为 14° ; 宝钢转炉高宽比为 1.59, 其喷孔倾角为 12° ; 有些钢厂采用 11° 倾角喷孔, 其效果也较好。我国一些转炉经过扩容后其 H/D 值下降, 对于同一座转炉新砌炉衬与中后期炉衬的 H/D 可相差 $15\% \sim 20\%$ 。在实际操作中可以通过调整喷吹压力与枪位对溅渣情况加以调节, 喷孔倾角并非只在 12° 为最好, 可以在一定范围内选取。

(3) 氧枪冷却。溅渣护炉过程中氧枪的热负荷低于炼钢过程(大约相当于炼钢热负荷的 $25\% \sim 30\%$), 但氧枪喷头及枪体下部粘渣严重, 需要加强局部冷却。目前对这方面的研究工作还很少。

(4) 增设氧枪刮渣器。在未采用溅渣护炉时, 有些转炉即已应用刮渣器来清除氧枪结渣。尤其是在利用中磷铁水炼钢的转炉, 渣量大、易粘枪, 采用刮渣器清理氧枪收到了良好效果。采用溅渣护炉技术之后粘枪现象加重, 应提倡采用刮渣器清理氧枪。为得到足够的刮渣能力, 需要加固或改造氧枪提升系统。

(5) 氧枪的维护。采用溅渣护炉后, 氧枪粘渣严重, 给氧枪正常使用增加困难。根据现有经验, 有以下几种方法可以解决此问题。

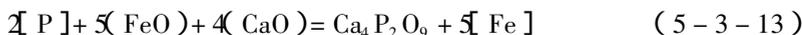
- 1) 采用专用溅渣喷枪, 避免烧枪;
- 2) 出钢时出净钢水, 防止氧枪粘结冷钢;
- 3) 安装刮渣器经常清理氧枪;
- 4) 对氧枪端部结渣部位喷水, 使其快冷, 脱落;
- 5) 在枪体喷涂耐火涂料, 减少粘钢和粘结物, 使其易于清理。

第三节 采用溅渣护炉对冶炼操作和钢质量的影响

采用溅渣护炉工艺后, 炉渣 MgO 含量都有不同程度的提高, 溅渣层在下一炉炼钢过程中大部分要熔入炉渣。这样是否会增加转炉终点钢水的有害元素含量, 是开发溅渣护炉技术中应研究的重要问题。

一、脱磷

研究炼钢过程的脱磷反应到目前为止仍然是以奇普曼(Chipman)和温克勒(Winkler)的著作为基础。后来虽然有些学者对炼钢过程的脱磷平衡做过一些研究,但无实质性进展。炼钢脱磷反应包括磷氧化成 P_2O_5 , 生成磷酸铁, 然后与石灰作用生成更稳定的磷酸钙。其冶金反应通常写成下式:



$$\Delta G^0 = -204450 + 83.55 T \quad (5-3-14)$$

$$\text{平衡常数} \quad K = \frac{\alpha_{Ca_4P_2O_9}}{[P]^2 \cdot \alpha_{CaO}^4 \cdot \alpha_{Fe}^5} \quad (5-3-15)$$

$$\lg K = \frac{44700}{T} - 18.26 \quad (5-3-16)$$

上面的热力学理论公式应用于平衡状态,其结果是正确的。转炉炼钢的脱磷反应是处于非平衡状态,为了根据炉渣成分估算炼钢当中磷在钢-渣之间的分配,很多冶金工作者进行了大量研究。

黑利(G. W. Healy)以奇普曼的工作为基础,应用炉渣的离子理论,并结合沃德(Ward)、特克多根(Turkdogan)等人的研究成果,提出了估算磷在渣-钢之间的分配公式。

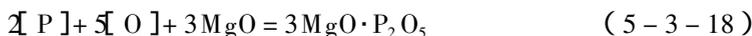
$$\lg \left(\frac{\%P}{\%P} \right) = \frac{22350}{T} - 16.0 + 0.08(CaO\%) + 2.5 \lg(TFe\%) \quad (5-3-17)$$

黑利公式应用简便,对于转炉吹炼普通铁水和高磷铁水都能较好的符合,因此被广泛地应用于估算磷在渣-钢间的分配。

法国钢铁研究院盖依(H. Gaye)、格侯让(J. Grosjean)等人根据炉渣相图理论,开发了有关炉渣的计算程序,称为BELAF程序。该程序可以计算给定温度下炉渣中的液相和固相的成分和数量,并在此基础上应用奇普曼的脱磷反应热力学公式计算出平衡状态下钢中磷含量及硫、锰、氧在渣-钢之间的平衡值。

上述的研究指出,影响磷在渣-钢之间分配比的主要因素是炉渣碱度,氧化铁含量和温度。 MgO 含量对脱磷反应没有直接影响。

关于 MgO 在复杂碱性炉渣中对脱P平衡的影响,申克与巴拉耶瓦在他们的研究中认为, MgO 仅仅是一种惰性稀释剂,其脱P能力无法同 CaO 相比。布克依研究了纯 MgO 的脱P平衡,得出下式:



$$\Delta G^0 = -1101563 + 596.4 T \text{ J/mol}$$

$$\lg K = 62210/T - 31.14 \quad (5-3-19)$$

$$1600^\circ\text{C时} \quad \lg K = 2.07$$

以上计算说明,在炼钢温度下液态铁与 $4\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5 - \text{CaO}$ 系平衡时的 $[\text{P}]$ 含量比与 $3\text{MgO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5 - \text{MgO}$ 系平衡时的 $[\text{P}]$ 含量低 3~4 个数量级。因此可以认为,从热力学角度考虑, MgO 的脱 P 作用与 CaO 相比可以忽略。水渣对 MgO 饱和的 $\text{CaO} - \text{MgO} - \text{SiO}_2 - \text{FeO}_x$ 渣系同铁液的脱 P 平衡研究也表明,如用 MgO 代替 CaO ,会降低 P 的分配比,也说明 MgO 的脱 P 能力远低于 CaO 。

通过以上分析可以认为,从炉渣成分考虑,不论渣中 MgO 含量多少,影响脱 P 效果的主要因素仍然是 CaO/SiO_2 和 $\text{FeO}\%$;从热力学方面考虑,溅渣护炉条件下的渣中 MgO 含量对脱 P 没有多大影响。从炼钢生产实践的经验来看, MgO 主要是通过其对炉渣流动性的作用来影响炉渣的脱磷。当 MgO 在炉渣中未达到饱和和溶解度时, MgO 的存在有加快成渣的作用。 MgO 在渣中达到或超过饱和和溶解度不高时(溅渣操作的允许范围),只要保持一定的炉渣过热度,炉渣也会有正常的流动性,不影响脱磷反应的动力学条件,对脱磷反应亦无影响。表 5-3-16 是利用 BELAF 程序计算宝钢生产数据所得到的统计结果。

表 5-3-16 吹炼终点钢中磷含量及偏离平衡值

%

操作类别	溅渣护炉			未溅渣护炉		
	$[\text{P}]$	$[\text{P}]_b$	$[\text{P}]_d$	$[\text{P}]$	$[\text{P}]_b$	$[\text{P}]_d$
平均值 m	0.0128	0.0046	0.0082	0.0123	0.0047	0.0075
标准偏差 σ	0.0036	0.0018	0.0033	0.0048	0.0038	0.0047
统计炉数 n	71	71	71	74	74	74

注 $[\text{P}]$ 为钢中实际含磷量(%) $[\text{P}]_b$ 为平衡含磷量(%) $[\text{P}]_d$ 为偏离平衡值(%)

由表 5-3-16 可知,溅渣的炉次吹炼终点磷含量比不溅渣时仅高 0.0005%,但在不溅渣的炉次包括了复合吹炼操作的因素在内。如果扣除复吹的影响,可以认为两者的磷含量水平是相当的。表中磷在钢中的平衡含量 $[\text{P}]_b$ 在溅渣时比不溅渣时稍低(0.0001%),故至少可以认为溅渣护炉时终渣的脱磷平衡值与不溅渣时相同。

表 5-3-16 中各统计项目的标准差,溅渣的炉次平均低于不溅渣的炉次,这表明溅渣护炉时脱磷反应进行的更为稳定,其结果分散度小。

二、脱硫

钢水脱硫包括硫在钢中扩散和在渣中形成稳定的硫化物,其化学反应式为:



达肯(Darken)和拉森(Larsen)认为计算炉渣和金属之间硫的分配可以用下式:

$$\frac{(\%S)}{[\%S]} = N_s \left\{ 2.6 + 1.6 \frac{(\text{CaO})}{(\text{FeO})} (B' - 2) + 11.0 [\%Mn] \right\} \quad (5-3-23)$$

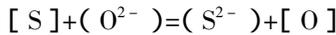
式中 N_s ——每 100g 熔渣中某组分的量;

$$B' = \frac{(\text{CaO})}{(\text{SiO}_2)};$$

$$(\text{CaO}) = (\text{CaO}) - 4(\text{P}_2\text{O}_5)$$

这个方法计算简便,计算结果与实际符合的较好。

炉渣离子理论的脱硫反应式如下:



沃德根据离子理论得出的平衡值,提出了脱硫能力 K^* 的表达式如下:

$$\lg K^* = -1.4 N_{\text{Ca}} - 1.9 N_{\text{Fe}} - 2.0 N_{\text{Mn}} - 3.5 N_{\text{Mg}} \quad (5-3-24)$$

并由式 5-3-24 比较了各种碱性氧化物的相对脱 S 能力,如表 5-3-17 所示。

表 5-3-17 炉渣中碱性氧化物的相对脱 S 能力

阳离子	Ca^{2+}	Fe^{2+}	Mn^{2+}	Mg^{2+}
$\lg K^*$	-1.4	-1.9	-2.0	-3.5
K^*	0.04	0.013	0.01	0.003
相对脱 S 能力	1.0	0.325	0.25	0.0075

由表 5-3-17 可知, MgO 的脱 S 能力最小,仅为 CaO 的 1/133,说明 MgO 几乎没有脱 S 能力。

用 BELAF 程序计算宝钢转炉终点钢水脱硫情况,其结果如表 5-3-18 所示。

表 5-3-18 吹炼终点时脱硫反应情况

操作	项目	$[\text{S}]$	$[\text{S}]$	$[\text{S}]$
溅渣	平均值 m	0.0116	0.0048	0.0068
	标准偏差 σ	0.0037	0.0021	0.0017
	统计炉数 n	72	72	72

操作	项目	[S]	[S]	[S]
未溅渣	平均值 m	0.0111	0.0060	0.0051
	标准偏差 σ	0.0047	0.0029	0.0017
	统计炉数 n	74	74	74

注 表中下标 r, e, Δ 的意义同表 5-3-16。

由表 5-3-18 可知, 溅渣时终点钢水中硫含量较不溅渣平均高 0.0005%。而吹炼终点 S 在渣钢之间的平衡含量, 溅渣时较不溅渣时低 0.0012%, 这表明溅渣护炉时炉渣的理论脱硫能力高于不溅渣。但溅渣时转炉没有复合吹炼, 钢中硫含量偏离平衡值为 0.0068%, 未溅渣时有复合吹炼, 钢中硫偏离平衡值为 0.0051%。两者相差 0.0017%。溅渣时终点钢中 [S] 高 0.0005%, 主要是由于没有复合吹炼的原因。如果两者都在复吹条件下比较, 其终点钢水硫含量不会有差别。

表 5-3-16 5-3-18 中有关脱磷、脱硫的数据, 是在生产中随机取样所得到的结果。

如果前一炉所炼钢种的磷含量低, 后一炉所炼钢种含磷高, 前一炉的终渣成分对应的钢中含磷量较低, 这种终渣对下一炉有脱磷作用。相反, 如果前一炉所炼钢种含磷高, 炉渣所对应的钢中平衡含磷量也高, 这种炉渣对下一炉钢水有增磷作用。在生产中当遇到这种情况时应不溅渣。

综上所述渣中 MgO 对于脱硫、脱磷的热力学条件并无明显改变作用。渣中氧化镁含量低于饱和溶解度时有加快化渣作用, 不会降低脱磷、脱硫效果。在溅渣护炉操作中控制合理的 MgO 在渣中的过饱和度, 使其既能起到保护炉衬的作用又不使炉渣过粘, 不会恶化脱磷、脱硫反应的动力学条件。在采用溅渣护炉操作时, 渣中 MgO 含量过高使炉渣过分粘稠对冶金反应的进行是不利的。

三、钢中氮、氧含量

溅渣操作时只要氧、氮的切换装置不漏气, 保证氮气不进入氧气管道系统, 钢中氮含量就不会增加。表 5-3-19 是几个钢厂吹炼终点钢中氮含量的数据。

根据表 5-3-19 的数据可以认为溅渣操作与未溅渣两者的吹炼终点时钢中氮含量是相同的。吹炼终点时钢中氧含量如表 5-3-20 所示。

表 5-3-19 溅渣和未溅渣的钢中 N 含量对比

厂名	终点 C] / %	溅渣后平均 [N] / 10 ⁻⁴ %	未溅渣时平均 [N] / 10 ⁻⁴ %
首钢—炼钢厂	≤ 0.06	25.8	26.0
	0.08 ~ 0.25	19.3	19.0
	> 0.3	17.2	18.4
太钢		21.5	21.0
宝钢	0.04 ~ 0.09	21.3	22.0
承钢	0.04 ~ 0.10	40.0	39.0

表 5-3-20 溅渣与不溅渣终点氧含量

操作类别	[O]	[O]	[O]
溅渣	0.0849	0.0760	0.0089
不溅渣	0.0925	0.0758	0.0167

注：表中下标 r、e、Δ 的意义同表 5-3-16。

表 5-3-20 中的氧含量是在吹炼相同钢种时所测得的吹炼终点的数 据，溅渣操作的氧含量稍低于不溅渣，至少可以认为两者是相近的。

综上所述采用溅渣护炉技术，只要渣中 MgO 控制合适，吹炼终点时钢中磷、硫、氮、氧含量都不会增加。因此，对于钢的质量也不会产生影响。

美国 LTV 钢公司、内陆钢公司、伯利恒、美钢联等大型钢铁公司都以生产优质汽车板为主要产品，这些钢厂几年来一直采用溅渣护炉技术，并未发现对钢的产品有不良影响。我国的太钢、鞍钢、首钢以及生产优质产品板材为主的宝钢，都未发现溅渣护炉对钢的质量有不良影响。

溅渣护炉解决了转炉耳轴及两侧炉壁不能挂渣的问题。从炉体维护的角度来看，溅渣护炉只是比摇炉挂渣更为完善，效果更好。溅渣护炉与摇炉挂渣对下一炉吹炼过程中冶金反应的作用并无差别。摇炉挂渣在世界上早已普遍应用多年，并未提出其对钢的质量有不良影响。溅渣护炉只要正确控制渣中 MgO 含量，对钢的质量也不会有不良影响。

第四节 溅渣护炉设备

一、溅渣护炉用氮气气源的品质要求

转炉溅渣护炉所用的氮气源，要求流量大，压力稳定，水分含量低，而且严格禁止含

油。同时由于炼钢车间各种用途的氮气源,一般由总管道统一供应,所以氮气的品质,除能满足溅渣护炉的要求外,也应能满足炼钢如复吹等其他用途。氮气气源的品质,应符合表 5-3-21 的要求。

表 5-3-21 溅渣用氮气的品质要求

性质	干燥无油	纯度/%	> 99.95
温度	常温	露点/℃	常压下低于 -40

二、溅渣护炉供气系统的设备配置

转炉溅渣护炉要求要有足够的氮气供应,保证所用的氮气具有足够的流量和压力。过去,钢铁厂制氧车间通常将分离出来的大部分氮气放空,仅留少量的低压氮气供炼钢厂使用。因此,为解决溅渣护炉所需的大量高压氮气,必须在制氧车间增建或扩建氮气加压及储存、输送系统。一个完整的溅渣护炉用氮气气源系统,一般应包括的主要设备如下:

- 1) 氮气增压机;
- 2) 储气罐;
- 3) 输送管线;
- 4) 压力、流量及温度等参数的检测仪表;
- 5) 具有严密、无泄露的调节、控制阀门及电气控制系统;
- 6) 相应的防泄漏系统。

氮气气源系统的合理设计,是溅渣护炉技术能够顺利通过安装、调试及成功投产的保证。

三、溅渣护炉供气系统的主要设备选型

(一) 主要设备选型的前提条件

设计氮气供气系统和进行主要设备选型及管道设计,应包括前提条件如下:

- 1) 以保证供应溅渣护炉的平均氮气用量为原则,选择增压机供气能力;
- 2) 储气罐必须能够储存在一个使用周期内,超过平均供气量的峰值用气量。

(二) 溅渣护炉平均用氮量的计算方法

1. 溅渣护炉平均用氮量的计算

炼钢车间转炉溅渣护炉平均用氮量 $Q_{平}$,可采用式 5-3-25 计算:

$$Q_{\text{平}} = \frac{WPTGF}{24} \quad (5-3-25)$$

式中 $Q_{\text{平}}$ ——平均用氮量(标态), m^3/h ;
 W ——转炉装入量, t ;
 P ——转炉溅渣供氮强度(可与炼钢供氧强度相似取 3~4, 大炉子取下限, 小炉子取上限), $\text{m}^3/\text{t} \cdot \text{min}$;
 T ——每次溅渣供氮时间, min ;
 G ——全车间每昼夜平均炼钢炉数 ;
 F ——系数, 考虑管道的泄漏等因素, 将理论计算的氮气体积适当加大, 一般取 1.2~1.4。

2. 溅渣护炉的平均用气量计算实例

以 30t、80t 和 150t 转炉的 3 吹 3 的车间为例, 计算溅渣护炉的平均用气量(计算所需参数见表 5-3-22)。

表 5-3-22 30t、80t 和 150t 转炉溅渣平均用氮气体积计算参数表

转炉公称容量/t	30	80	150
平均装入量/t	40	80	150
吹炼方式	3 吹 3	3 吹 3	3 吹 3
溅渣吹氮强度(标态) $\text{m}^3/(\text{t} \cdot \text{min})^{-1}$	3.5	3	3
溅渣时间/min	3	3	3
冶炼周期/min	30	40	40
每昼夜炼钢炉数	144	108	108
溅渣间隔炉数	每炉溅 1 次	每炉溅 1 次	每炉溅 1 次

将表 5-3-22 中的有关数据代入式 5-3-25 中, 其中系数 F 选取 1.2, 可计算出 30t、80t 及 150t 转炉 3 吹 3 炼钢车间溅渣护炉的平均用氮气体积(标态)分别为 $3024\text{m}^3/\text{h}$, $3888\text{m}^3/\text{h}$, $7290\text{m}^3/\text{h}$ 。

(三) 氮气增压机容量的选择

氮气增压机容量的选型, 应以保证溅渣护炉的日常平均用气量为原则。根据上面对平均用氮量的计算, 可分别选 $3000\text{m}^3/\text{h}$, $4000\text{m}^3/\text{h}$ 和 $7500\text{m}^3/\text{h}$ 增压机各一套(两台一用一备)。增压机主要技术指标, 见表 5-3-23。

表 5-3-23 溅渣护炉用氮气增压机主要技术指标

项目	30t 转炉炼钢车间	80t 转炉炼钢车间	150t 转炉炼钢车间
数量	1 套	1 套	1 套
形式	活塞式 无油润滑	活塞式 无油润滑	透平式 无油润滑
容量(标态) /m ³ ·h ⁻¹	3000	4000	7500
入口压力/MPa	≥0.002	≥0.002	≥0.002
出口压力/MPa	>2.5	>2.5	>2.5
入口气体温度	常温	常温	常温

对于大吨位转炉炼钢厂,如资金条件具备,应选用透平式氮气压缩机,其运转平稳、能耗低及作业率高。

(四) 储气罐容积的选择

溅渣护炉的氮气使用,为典型的间歇式用气方式。所以必须采用合适的高压储气罐,用来调峰。调峰用储气罐的功能是,可以在系统不用气或用气量较少时,用来储存氮气,而在用气高峰时,则向系统供气。

调峰用储气罐的选择依据是应保证在一个使用周期内,可以储存并向系统供应超过平均供气量的峰值氮气体量。储罐水容积容量可由式 5-3-26 来计算,计算储气量所用的压力,以储气罐允许的最大压降作为计算值。

$$V_R = \frac{Q_{\text{储}}(T+t)P}{\Delta PT} \quad (5-3-26)$$

式中 V_R ——储罐容量(水容积),m³;

$Q_{\text{储}}$ ——系统调峰用所需的球罐储气量(标态),m³;

ΔP ——储罐允许压力降,MPa;

T ——绝对温度,K;

t ——气体温度,℃(一般取 40℃);

P ——大气压,MPa。

参考图 5-3-11 可知, $Q_{\text{储}}$ 可以采用式 5-3-27 计算:

$$Q_{\text{储}} = \frac{(Q_{\text{max}} - Q_{\text{供}})T}{60} \quad (5-3-27)$$

式中 $Q_{\text{储}}$ ——系统调峰用所需的球罐储气量(标态),m³;

Q_{\max} ——几炉同时溅渣时,车间的高峰用氮流量(标态), m^3/h ;

$Q_{\text{供}}$ ——氮压机供气能力(标态), m^3/h ;

T ——几炉同时溅渣时间, min 。

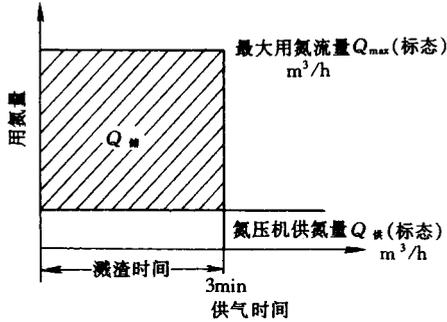


图 5-3-11 转炉溅渣峰值用氮量示意图

Q_{\max} 为一个 3 吹 3 的炼钢车间 3 座或 2 座炉子同时都在溅渣的情况下,所需的最大氮气流量。 Q_{\max} 可根据表 5-3-22 所给出的各项条件,采用式 5-3-28 计算:

$$Q_{\max} = 60FWPM \quad (5-3-28)$$

式中 Q_{\max} ——车间溅渣用最大氮气流量(标态), m^3/h ;

W ——转炉装入量, t ;

P ——转炉溅渣供氮强度(标态), $\text{m}^3/\text{t} \cdot \text{min}$;

M ——同时溅渣炉数;

F ——系数,取 1.2。

一个 3 吹 3 的炼钢车间,有可能出现 3 座炉子同时溅渣的情况(几率极小),也有可能出现 2 座炉子同时溅渣的情况。现对这两种情况分别做计算,企业在进行工程设计时,可根据自身的具体情况进行处理。

如果车间的 3 座炉子同时溅渣,则 M 取 3,并将表 5-3-22 所示其它各项条件分别代入式 5-3-28 得 30t、80t 和 150t 转炉炼钢车间的溅渣用氮气的最大峰值流量(标态) Q_{\max} 分别为 30240、51840、97200 m^3 。

将上述计算值 Q_{\max} 代入 5-3-27 式,可分别计算出 30t、80t 和 150t 转炉炼钢厂所需的调峰罐储气量(标态) $Q_{\text{储}}$ 分别为 1362、2392、4485 m^3 。

设储气罐压力为 2.5MPa,氮气使用压力为 1.3MPa,输送管道阻力损失 0.2MPa,则罐压允许下降值为 1.0MPa。

将上述各值代入式 5-3-26,可分别计算出 30t,80t,150t 转炉炼钢厂的储罐水容积 V_R 为 157.7,277,519.4 m^3 。可分别选用 V_b 150,300,520 m^3 (水容积)储气罐。实际工厂的储气罐的容量 V_b ,由于种种原因往往比理论计算值更大一些。

如果设车间 2 座炉子同时溅渣,采用与上述类似的计算过程,可得对于 30t,80t,150t 转炉炼钢厂可分别选用 100,200,350 m^3 (水容积)储气罐。从上述对比计算中可以看出,如果只考虑有 2 座炉子同时溅渣的情况下,基建投资会节省一些。

本节的各计算结果汇总于表 5-3-24。

表 5-3-24 30t,80t,150t 转炉 3 吹 3 炼钢厂
溅渣护炉设备选型各计算结果

计算项目	30t 转炉	80t 转炉	150t 转炉	同时 溅渣炉数
溅渣平均用氮量 $Q_{平}/m^3 \cdot h^{-1}$	3024	3888	7290	
氮压机容量 $Q_{供}/m^3 \cdot h^{-1}$	3000	4000	7500	
溅渣最大用氮流量 $Q_{max}/m^3 \cdot h^{-1}$	30240	51840	97200	3
	20160	34560	64800	2
调峰所需储气量(标态) $Q_{储}/m^3$	1362	2392	4485	3
	858	1528	2865	2
计算调峰罐容量(水容积) V_R/m^3	157.7	277	519.4	3
	99.3	177	331.7	2
实际选用调峰罐容量(水容积) V_b/m^3	150	300	520	3
	100	200	350	2

四、输送管道管径选择

在氮气输送管道的设计中,关键是管径的选择。管径过大,将增加资金投入;管径太小,流速增加,阻力损失则增大。从制氧厂至炼钢厂炉前,氮气输送管路的计算可分为几段来进行。即氮压机出口至储罐段 A_1 、储罐出口至炼钢厂区的总管段 A_2 、厂区总管至各炉前段 A_3 、炉前至氧枪支管段 A_4 。

一般气体输送管路的截面积,可通过式 5-3-29 来计算:

$$S = \frac{Q_m P_0 (T_0 + t)}{3600 (P + P_0) T_0 V} \quad (5-3-29)$$

式中 S ——输送管道截面积, m^2 ;

Q_m ——管道输送气体的最大流量(标态), m^3/h ;

P_0 ——大气压力, MPa ;

P ——气体表压力, MPa ;

T_0 ——绝对温度, K ;

t ——气体温度, $^{\circ}\text{C}$;

V ——氮气流速, m/s 。

下面以 3 吹 3 的 30t 车间(1 个周期内内 3 座炉子同时溅渣)的氮气输送管道为例, 来进行计算。

1. 氮气增压机出口至储罐段 A_1 的截面积及管径计算

根据有关设计标准, 氮气的允许流速可取 $5\text{m}/\text{s}$, 将 30t 转炉的炼钢车间的有关下列参数, 代入式 5-3-28。

则 $Q_m = Q_{\text{供}} = 3000\text{m}^3/\text{h}$, $p_0 = 0.101\text{MPa}$, $p + p_0 = 2.6\text{MPa}$, $V = 5\text{m}/\text{s}$, $T_0 = 273\text{K}$, $t = 40^{\circ}\text{C}$;

则可计算出 A_1 段输送管道的截面积 S_1 为 0.00742m^2 ;

管道内径 $D_1 = \sqrt{4 \frac{S_1}{\pi}} = 0.0972\text{m} = 97.2\text{mm}$

查阅有关手册可选配标准管径, 并根据使用压力核算壁厚。

80t 和 150t 转炉炼钢车间的计算方法相同, 不再重复。

2. 储气罐出口至炼钢厂区的总管段 A_2 的截面积 S_2 及管径计算

氮气的允许流速取 $5\text{m}/\text{s}$, 取 3 座炉同时溅渣的高峰期氮气流量(标态)为 Q_m , 则 $Q_m = Q_{\text{max}} = 30240\text{m}^3/\text{h}$, $p_0 = 0.101\text{MPa}$, $p + p_0 = 2.6\text{MPa}$, $V = 5\text{m}/\text{s}$, $T_0 = 273\text{K}$, $t = 40^{\circ}\text{C}$ 等参数, 代入式 5-3-28。

则可计算出储气罐出口至炼钢厂区的总管段 A_2 的截面积 S_2 为 0.0748m^2 ;

管道内径 $D_2 = \sqrt{4 \frac{S_2}{\pi}} = 0.308\text{m} = 308\text{mm}$;

同样需查阅有关手册可选配标准管径及根据使用压力核算壁厚。

80t 和 150t 转炉炼钢车间的计算方法相同, 不再重复。

3. 厂区总管至各炉前的输送管道 A_3 段的截面积 S_3 及管径计算

同上氮气的允许流速取 5m/s ,3 座炉子 ,每座炉子的最大用氮流量为总用氮最大流量 Q_{\max} 的 $1/3$ 。则 $Q_m = Q_{\max}/3 = 10080\text{m}^3/\text{h}$, $p_0 = 0.101\text{MPa}$, $p + p_0 = 1.4\text{MPa}$ (经减压后的使用压力) , $T_0 = 273\text{K}$, $t = 40^\circ\text{C}$ 等代入式 5-3-28。

则可计算出输送管道输管截面积 S_3 为 0.0463m^2 ;

$$\text{管道内径} \quad D_3 = \sqrt{4 \frac{S_3}{\pi}} = 0.243\text{m} = 243\text{mm} ;$$

查阅有关手册可选配标准管径及根据使用压力核算壁厚。

80t 和 150t 转炉炼钢车间的计算方法相同 ,不再重复。

4. 炉前至氧枪支管段 A_4 的截面积 S_4 及管径计算

段 A_4 与 A_3 的流量相同 ,故管路的截面积 S 与内径 D 均也相同 ,不再重复。

需要说明的是 ,在一个炼钢厂中 ,除溅渣护炉以外 ,还有如复吹、氮封、仪表、吹扫等多处用氮 ,在设计一个炼钢厂的供氮系统时 ,上述各种用氮均应考虑进去 ,从而保证车间的全部用氮 ,本书不再赘述。

五、溅渣氮气管道的工艺布置

(一) 采用三通装置防止氮氧混掺

在溅渣护炉的管道工艺布置中 ,为了防止氮氧混掺 ,必须采用三通装置 ,其工作原理如下。

三通装置的原理图如图 5-3-12 所示 ,在溅渣护炉吹氮时 ,阀 1 开 ,阀 2 关 ,氮气通过逆止阀进入氧枪溅渣。在吹氧炼钢时 ,阀 1 关 ,阀 2 开 ,无论是通过阀 1 泄漏的氮气 ,还是通过逆止阀泄漏过来的氧气都将通过阀 2 放散出去。从而杜绝了氮氧混掺现象发生。

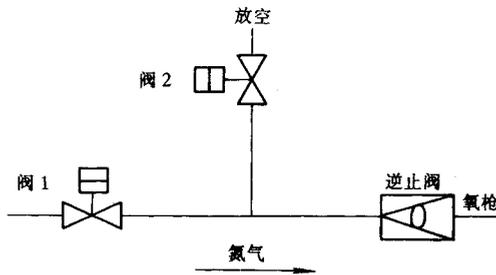


图 5-3-12 防泄漏三通装置示意图

(二) 溅渣护炉氮气管道的工艺布置

来自氮气压缩机出口的高压氮气($p > 2.5\text{MPa}$)以高压输送至储气罐 ,经检测温度、

流量、压力后,再以高压输送至炼钢厂区。然后,输送至炉前高位平台,进入每个炉子的氮气输送支管,再经减压后,进入氧枪支管输送管道。

目前,各厂根据自己的原有设备及资金状况,对于每个炉子的氮气输送支管到氧枪支管的这一段输送管道,采用了不同形式的布置,归纳后一般可概括为3种形式如下。

1. 利用氧气管道控制、计量系统的简易型

在这种形式的布置中,氮气系统没有自己专用的计量、控制系统。每个枪的氮气支管经过减压、截止阀、防泄漏三通后,即在氧气计量、调节之前就进入氧气管路系统。从而使溅渣护炉的氮气可以利用氧气的计量和调节装置进行计量和调节。系统的原理如图5-3-13所示。这种形式的氮气供应系统的特点是投资少、工程结构简单、安装工期短,但不利于单独控制和计量氧气氮气流量。

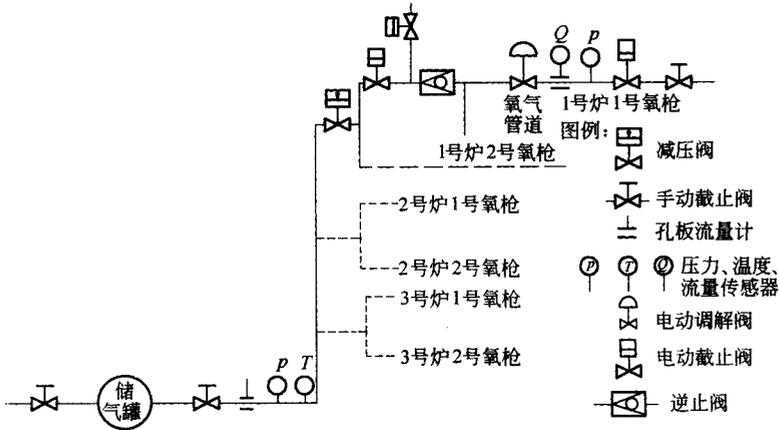


图 5-3-13 3吹3炼钢车间溅渣护炉氮气系统示意图(简易型)

2. 每座炉子用一套控制、调节系统的标准型

每座炉子用一套氮气控制、调节系统的标准型,即为每座炉座的两只氧枪,只安装有一套氮气调节、计量系统,如图5-3-14所示。每个氧枪的氮气输送支管在经减压、计量、调节、防泄漏三通后,再分别在氧气的计量、调节系统后进入氧气管道。从而做到每个炉子的两支氧枪只用一套氮气的计量、调节系统。该布置方案的特点是安全可靠、投资较省,中、小型炼钢车间可以广泛采用。

3. 每支氧枪有一套氮气控制、调节系统的优化型

每支氧枪有一套氮气控制、调节系统的优化型的工艺布置如图5-3-15所示。在每氧枪支管氮气输送管道上装有流量调节阀、逆止阀、流量和压力传感器对氮气进行调节和计量。同时装有防泄露装置,以防氮氧混掺现象发生。

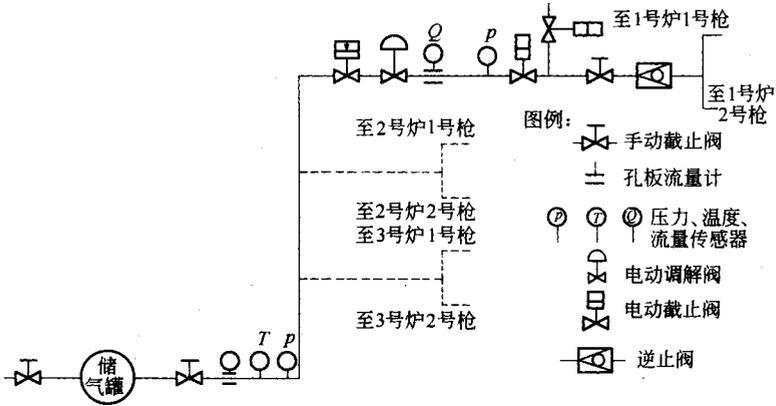


图 5-3-14 3吹3炼钢车间溅渣护炉氮气供应系统示意图(标准型)

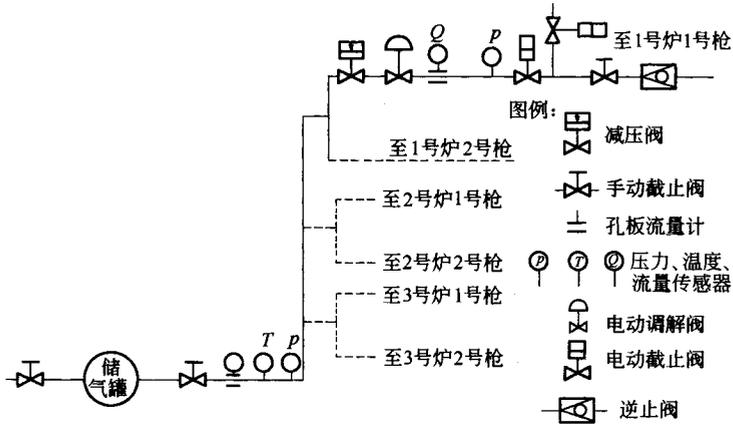


图 5-3-15 3吹3炼钢车间溅渣护炉氮气供应系统示意图(优化型)

其管道布置应具有下列特点：

- 1) 为保障设备运行可靠,每支枪均采用单独的控制、检测系统；
 - 2) 采用气密性良好的切换及三通管装置,防止氮氧混掺；
 - 3) 采用智能仪表进行气体的温度、压力、流量检测,利于在控制室进行集中控制。
- 这种优化型的布置形式应是大型转炉钢厂的首选方式。

六、溅渣用氮气系统主要设备

根据以上各节的计算及供氮管道的工艺布置,炼钢厂溅渣护炉供氮管道的主要设备见表 5-3-25。

表 5-3-25 3 吹 3 的炼钢车间溅渣护炉供氮系统的主要设备表

设备名称	数 量			供参考的 生产厂家	备 注
	简易型	标准型	优化型		
氮气增压机	2	2	2	杭州制氧机厂 开封制氧机厂	两台(一用一备)
储气罐	1	1	1	北京金属结构厂	
气体流量调解阀	0	3	6	鞍山热工仪表厂 无锡工装厂	
电动截止阀	6	6	6	鞍山热工仪表厂 北京阀门厂	
减压阀	3	3	3	北京阀门厂	
手动截止阀	4	7	10	北京阀门厂	
逆止阀	0	3	6		
孔板流量计	1	4	7		含二次仪表
压力传感器	1	4	7		含二次仪表
温度传感器	1	1	1		含二次仪表

第五节 复吹转炉溅渣护炉技术

一、高温低碳钢种溅渣技术

当出钢碳低(如 $[C] < 0.05\%$) ,出钢温度高于 1700°C 时 ,炉渣氧化性较强 ,渣中 TFe 含量高 ,炉渣熔点低 ,流动性强。此种炉渣若不采取改质措施 ,就会造成溅渣时间大大延长 ,氮气用量大 ,溅到炉壁上的炉渣耐侵蚀性能差 ,降低了溅渣护炉效果 ,并将对下炉操作产生不良影响 ,增加了炼钢操作的难度。

不同的钢厂低碳钢比例不同 ,以武钢二炼钢厂为例 ,超低碳钢目前已达 70%。因此必须采取工艺措施提高高温低碳钢种的溅渣效果 ,主要经验是 :

(1)降低渣中 TFe 含量。此种炉渣的一个明显特点是 TFe 含量高 ,溅渣时应加入改

质剂,以降低 TFe 含量,增加渣中 MgO 含量,降低炉渣温度,使炉渣黏度提高。加入改质剂量应灵活掌握,不能加入量太大使渣变“干”,也不能加入量太少,合理的加入量应视出完钢后渣量大小,氧化性程度而定,改质剂的加入方法采用分批加入,溅渣前加一批,溅渣时视渣况加入 1~2 批。基本原则是保证加入改质剂后溅渣时间在 2~3min。

(2)合理控制枪位,范围 0~2m,过程枪位要保证炉口可见起渣状况良好。

(3)高温低碳钢种溅渣效果应保证炉渣黏稠,无明显稀渣,无大量未熔渣料,炉衬有明显溅渣附着层。

二、溅渣护炉大面维护技术

采用溅渣护炉后,可以使炉衬寿命大大延长,转炉炉衬前大面补炉次数减少。但对于未采用副枪的中小型转炉,由于终点要多次倒炉测温取样,高温钢水和前大面炉衬接触时间长,使得前大面溅渣层侵蚀相对于其他部位炉衬侵蚀的速度要快,因此怎样维护好溅渣条件下的炉衬前大面,使其同其他部位寿命同步也是采用溅渣护炉以后面临的课题。

目前武钢二炼钢厂大面的维护主要采取留渣护炉技术,即出完钢后利用每炉之间的间隙时间将溅完渣后的残余炉渣平铺在前大面,炉渣自然冷却时必然有一部分炉渣粘附在大面炉衬上,从而起到保护大面炉衬延长其寿命的作用,有时也采用镁质料修补转炉前大面。

三、溅渣前渣量控制技术

合适的留渣量应保证在炉衬内表面形成足够厚度的溅渣层,并可在溅渣后对装料侧和出钢侧进行摇炉挂渣,剩余的炉渣倒入渣罐。形成溅渣层的渣量可以根据炉衬内表面积、溅渣层厚度及炉渣密度计算。溅渣护炉所需的总渣量可按溅渣层理论重量的 1.1~1.3 倍来估算,炉渣密度可取 $3.5\text{t}/\text{m}^3$ 。在上述计算中,大型转炉的溅渣层厚可取 25~30mm,中、小型转炉可取 15~20mm(大于 200t 以上转炉为大型转炉,100t 以下为小型转炉)。留渣量的计算公式如下:

$$W = K \cdot A \cdot B \cdot C$$

式中 W ——留渣量, t;

K ——渣层厚度, m;

A ——炉衬内表面积, m^2 ;

B ——炉渣密度, t/m^3 ;

C ——系数,取 1.1~1.3。

留渣量大将增加调渣剂的消耗,提高溅渣护炉的成本;留渣量过小不能形成足够厚度的溅渣层和不能有效地进行摇炉挂渣。对于中、小型转炉由于未采用副枪,出钢前多次倒炉,部分炉渣倒出,使溅渣前的渣量偏少,不能满足溅渣护炉的需要,因此对于中小型转炉要采取措施尽量留住炉渣,一是控制终渣泡沫化程度,这样倒炉时倒的渣量少,二是控制转炉倾动的角度,在满足测温取样的情况下,尽量减少倾动的角度,三是提高一次拉碳水平减少倒炉次数,四是合理确定铁水、废钢配比,确保终点温度,严防钢水过氧化。

四、延长转炉氧枪枪龄技术

武钢二炼钢厂在采用溅渣护炉技术初期,由于没有配套的氧枪刮渣技术,氧枪枪龄急剧下降,一度氧枪枪龄只有 50 次左右,造成枪龄低的原因一是氧枪结瘤严重,提不出氮封,与氧枪重砣平衡而导致割枪,二是氧枪外套管烧损、漏水,被迫换枪。

采用刮渣技术后粘枪状况得到根本性好转,但烧枪事故频繁,造成不安全隐患和生产中断。针对这种现象,经过调查分析,发现烧枪的主要部位集中在氧枪焊缝以上 150mm 以内。烧枪的主要原因是氧枪粘钢,吹氧时发生回火造成。一般来说,当氧枪喷头部位干净时,不会导致烧枪,只有当喷头和喷头以上部位粘钢,溅完渣后被炉渣包住,下枪吹炼时若喷头部位还处于红热状态或枪位偏低就容易引发回氧点火,粘附在喷头附近的钢皮与氧发生剧烈的化学反应,放出大量热量,导致氧枪外套管烧穿漏水。为了杜绝烧枪,二炼钢采取了如下措施:

(1) 优化过程冶炼控制,减少炉渣返干粘枪,减低金属喷溅。

(2) 转炉钢水必须出尽。

(3) 对氧枪铜头焊缝进行打磨处理。

(4) 溅完渣后及时刮渣,保证氧枪干净,包括喷头及附近部位。若氧枪粘钢严重,溅完渣后粘钢刮不动,下炉下枪时开吹枪位应相对调整,防止回火烧枪。若终点刮渣,粘钢仍然刮不动时,应组织换枪。

(5) 对刮渣器进行改进,改善刮渣效果。

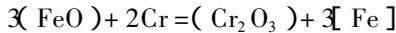
五、溅渣复吹转炉底部供气元件的“蘑菇头”的形成技术

顶底复吹转炉采用溅渣护炉技术以后炉龄大幅度提高,从溅渣前的平均 3300 炉上升到 20000 炉以上。分析转炉顶底复吹同步的成功经验,我们认为底部底吹供气元件端部形成透气性能良好的“蘑菇头”是实现顶吹和底吹同步的关键,它不仅减轻了底吹供气

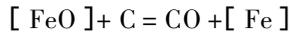
元件受到的严重化学侵蚀,而且起到了减轻底吹供气元件急冷急热,避免了金属液体和炉渣直接冲刷的作用。因此要实现顶吹和底吹的同步,必须在炉役初期快速形成透气性能良好的“蘑菇头”,在炉役过程中防止炉底大幅度地下降和上涨,确保底吹的冶金效果。

(一) 炉役前期底吹供气元件“蘑菇头”的形成和维护

根据转炉炉龄增长情况和炉衬侵蚀速率的特点,一般在炉役前期(1500炉以前)不溅渣,而这期间是“蘑菇头”的形成和发展的关键时期,一旦控制不好,将造成底吹供气元件端面长期裸露,导致底吹供气元件快速侵蚀。会在不锈钢细管喷嘴处发生反应,使不锈钢细管喷嘴处形成变质带。



同时,在镁炭套砖上发生反应,形成脱碳层,降低镁炭砖的强度和耐蚀性能。



经过上述化学反应,破坏了底部供气元件原有性能,形成强度低的变质层,一旦被钢水熔蚀,造成底部供气元件的熔蚀而形成喇叭口状,容易被炉渣灌满而造成底部供气元件堵塞。

炉役前期底吹供气元件“蘑菇头”的形成和维护措施:

(1) 合理控制炉渣成分, MgO 控制在 $8\% \sim 12\%$, 尽量避免钢水过氧化。

(2) 出钢前充分利用底吹的后搅功能,降低渣中 TFe 含量,提高炉渣熔点,使炉渣进一步黏稠。

(3) 出完钢后将炉体处于竖直位置,利用底部上升气体贯穿炉渣,冷却炉渣, MgO 结晶析出, C_2S 、 C_3S 晶体长大形成弥散多孔保护渣层,即“蘑菇头”。

(4) 合理控制“蘑菇头”的大小。通过目视和测“零位”操作判断,当炉底上涨严重时应及时吹氧涮炉底,确保“蘑菇头”高度控制在 $50 \sim 150\text{mm}$ 范围。

(二) 炉役溅渣期间底吹供气元件“蘑菇头”的形成和维护

(1) 当炉底见砖缝,底吹供气元件完全裸露或“蘑菇头”端头面积小于两倍底吹供气元件截面积时,溅渣时间要合理控制,保证溅完渣有一定的流动性,并将炉子竖至零位位置放置一段时间,以便形成透气性能良好的“蘑菇头”。

(2) “蘑菇头”形成后要密切注视炉底上涨情况,当炉底上涨严重时要采用吹氧涮炉底操作。

(3) 根据炉底上涨情况,合理安排品种钢结构,把此作为控制炉底升降的一种重要手段,如当炉底上涨超过 300mm 时,可适当增加高温低碳钢比例。

六、溅渣复吹转炉底吹供气模式

在顶底复合吹炼中,氧枪枪位的调整要与底部供气模式相配合,配合不当,造渣过程仍会失控。同时,为了满足复合吹炼在冶金效果上的优势,必须尽可能发挥底吹工艺的功能。由于转炉炼钢工艺不断发展,底吹供气模式也不断地发生变化,不同的转炉工艺和装备水平也需要相应的供气模式相配合,如此才能使顶底复合吹炼技术发挥其应有的功能。

(一)底吹气体种类的选择

通常各转炉钢厂以惰性气体氮气、氩气作为底吹气体,如目前武钢、太钢、首钢等转炉钢厂均采用上述气体作为底吹气体。但也有部分钢厂采用二氧化碳气体作为底吹气体,如鞍钢、宝钢的某些转炉钢厂。如何选择底吹气体种类,应该综合考虑对钢水质量、生产成本、耐材寿命的影响以及气体来源等因素。各种气体均具有各自的优缺点,见表 5-3-26。

表 5-3-26 选用气体的比较

气体种类	优 点	缺 点
氩气	对钢水质量和耐材寿命无不良影响,在钢水精炼工艺上被普遍采用	成本较高
氮气	成本低廉,来源广泛,对耐材寿命无不良影响	易造成钢水增氮,对钢水质量影响较大
CO ₂	可通过转炉废气回收获得,来源充分且利于环保,成本也较低,对钢水质量影响不大	对采用镁碳质供气元件侵蚀较严重,同时回收和提纯 CO ₂ 的设备需要一定投资

武钢第二炼钢厂实验表明,以 $0.04\text{m}^3/(\text{min}\cdot\text{t})$ 强度底吹供氮至吹炼终点,钢中[N]含量在 $(25\sim 60)\times 10^{-4}\%$ 水平,较同等条件下供氩时间中[N]在 $(13\sim 27)\times 10^{-4}\%$ 水平明显偏高。

鉴于各种底吹气体具备的不同优缺点,一些刚开始采用复吹工艺的转炉钢厂在设备条件较简易的情况下,通常采用氩气作为底吹气体,该方式对于未掌握复吹技术规律的钢厂来讲,对钢水质量不会产生不良影响,但其成本相对较高。因此,随着工艺的不断成熟和设备条件的不断完善, N₂-Ar 切换底吹供气模式逐步取代了全程供氩供气模式。而对于 N₂-Ar 切换时机则必须进行合理而准确的把握。图 5-3-16、图 5-3-17 分别表示吹炼过程 N 和脱碳速度的变化规律。

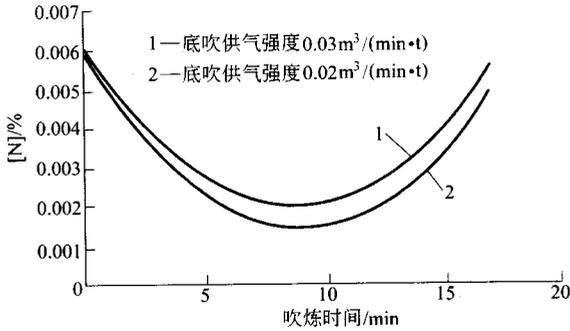


图 5-3-16 吹炼过程 [N] 含量的变化

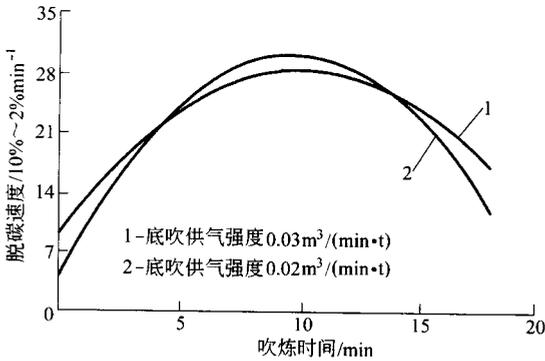


图 5-3-17 吹炼过程脱碳速度的变化

底吹 N_2 搅拌, 熔池吸氮和排氮两个过程是同时进行的。底吹供氮促进了脱碳反应, 使铁水中的氮随 $C-O$ 反应生成 CO 气泡上浮而逸出, 提高了熔池的排氮速度, 同时又加速了底吹氮的溶解, 使熔池吸氮增加, 提高了吸氮速度。因此吹炼过程某一时刻的实际 $[N]$ 含量主要取决于此时的排氮和吸氮速度, 结合图 5-3-16、图 5-3-17 可见, 随脱碳反应进行的同时, 熔池 $[N]$ 的浓度开始不断下降, 当脱碳速度不断增加, 以至达到最大值时 $[N]$ 含量出现极低值, 随吹炼时间增加, 脱碳速度减弱, 钢水温度不断上升, 气体溶解度增加, 则使钢中 $[N]$ 含量上升, 并且脱碳速度越低 $[N]$ 含量上升的幅度越大。在脱碳速度最大时, 排氮和吸氮速度相等, 最大脱碳速度之前排氮大于吸氮, 最大脱碳速度之后吸氮速度大于排氮。因此我们结合武钢二炼钢 N_2-Ar 切换底吹供气模式的实际使用效果可以得出以下结论:

(1) 在不同底吹供气强度条件下吹炼过程的脱碳速度与 $[N]$ 含量的变化规律是一致的;

(2) 相同吹炼时间, 底吹供气强度较低的熔池 $[N]$ 含量比底吹供气强度高的熔池 $[N]$

含量稍低；

(3)吹炼 10min 左右,二者脱碳速度均接近最大 [N]含量均接近最低,此时应是 N_2 - Ar 切换的最佳时机；

(4)在吹炼后期底吹供氩强度的大小对排氮速度影响较大。因此,较高强度的底吹供氩有可能使终点钢中 [N]含量比较低强度底吹供氩时稍低。

综上所述,以氮气和氩气作为底吹气体,通过合理的切换综合使用是目前较理想的方式。该方式不会对钢水质量产生影响,同时成本相对来讲也比较合理。

(二)底吹供气强度的确定

当 20 世纪 80 年代初期我国刚刚开发顶底复合吹炼技术时,由于底吹设备较简易,且对复吹工艺的规律未能完全掌握。因此,该时期复吹工艺采用的多为恒定小流量供氩的供气强度模式。该方式底吹供气强度一般控制在 $0.02 \sim 0.03 \text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{t})$ 。对于刚开始采用复合吹炼工艺的转炉钢厂来讲,不会对原转炉操作造成较大影响,容易把握和适应,也有利于逐步摸索和掌握顶底复合吹炼技术的规律,为将来的发展积累宝贵的实践经验。其致命缺陷主要在于未能充分发挥复吹工艺能显著提高炼钢冶金效果的功能优势。

随着复吹装备水平的提高,底吹气源的解决和采用多孔定向式供气元件,为进一步提高复吹的冶金效果,特别是提高冶炼低碳和超低碳钢种的冶金效果,20 世纪 80 年代末和 90 年代初武钢第二炼钢厂在原有基础上开发出新的复吹供气模式,即采用改变供气强度和后搅拌的供气模式,对于冶炼低碳钢和超低碳钢发挥了良好的作用。

武钢此次开发的复吹供气模式,依据冶炼不同时期采取相应的底吹供气强度,较好地结合了顶吹转炉炼钢过程中冶金反应变化的原理,并结合底吹供气模式合理调整氧枪控制工艺,极大地发挥了复吹炼钢的特有功能,冶金效果得到显著提高。以武钢二炼钢厂为例对底吹供气强度在不同时期如何进行确定逐一进行介绍。

(1)冶炼初期底吹供气强度的确定。从图 5-3-18 可见,吹炼初期底吹供气强度对熔池升温速度、渣中 $\sum \text{FeO}$ 的含量影响较为明显,它们均随底吹供气强度的增加而降低。特别是对于熔池升温速度的影响最为显著,主要反映在吹炼初期熔池升温速度随底吹供气强度的增加而降低,其值为每增加底吹供气强度 $0.01 \text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{t})$,熔池升温速度则降低 $2.3 \sim 6.5^\circ\text{C}/\text{min}$,通过试验发现,这部分热损耗是由于底吹供气强度的增加使金属熔池上下部位热交换加速,加快了位于炉底部的废钢的熔化所致。

同时,底吹供气强度对泡沫渣层的厚度控制和促进石灰溶解均起到了有效的调节作用。如吹炼中当底吹供气强度小于 $0.03 \text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{t})$ 时,常发生泡沫渣溢渣现象,而底吹

供气强度不小于 $0.045 \text{ m}^3 / (\text{min} \cdot \text{t})$ 时,初期渣中含有一定量的石灰气体抑制泡沫渣。因此将前期底吹供气强度确定为 $0.06 \text{ m}^3 / (\text{min} \cdot \text{t})$ 。

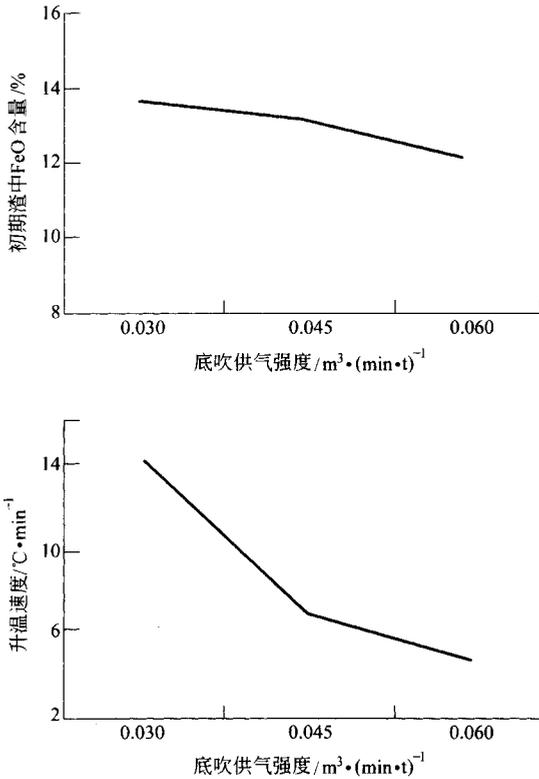


图 5-3-18 吹炼初期底吹供气强度与渣中 ΣFeO 和升温速度的关系

(2)吹炼中期底吹供气强度的确定。吹炼中期,由于碳氧反应激烈,渣中 ΣFeO 含量迅速下降。这一时期的底吹供气强度如果控制不当,极易使炉渣返干造成钢—渣界面反应困难。因此,该时期如何控制好底吹供气强度,使吹炼平稳进行至关重要。

从图 5-3-19、图 5-3-20 可以看出,随着底吹供气强度增大,渣中 ΣFeO 明显降低,对冶炼去磷不利,故在这一时期亦采用较小的底吹供气强度。武钢第二炼钢厂在冶炼中期的底吹供气强度约为 $0.03 \sim 0.04 \text{ m}^3 / (\text{min} \cdot \text{t})$,同时配合较高的氧枪枪位和适量的加入铁皮或铁矿石等进行操作,吹炼过程基本保持较为平稳。

(3)吹炼末期底吹供气强度的确定。顶底复合吹炼工艺的末期造渣关键在于控制终渣氧化性,提高冶金效果,进一步去除磷、硫,达到钢种所要求的范围。

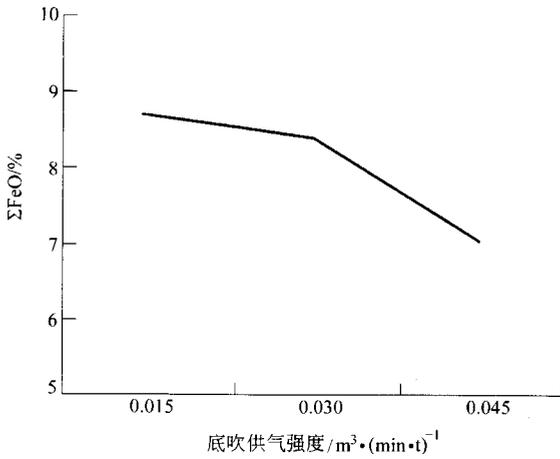


图 5-3-19 底吹供气强度与渣中 ΣFeO 的关系

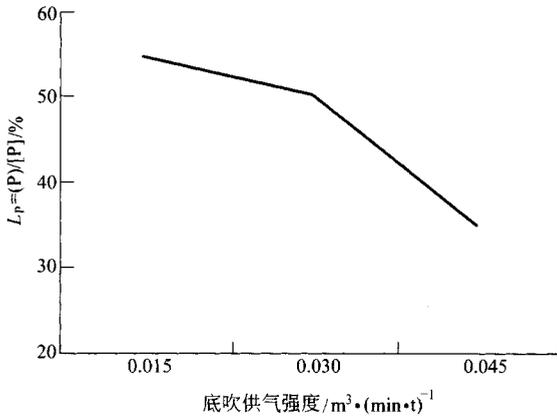


图 5-3-20 底吹供气强度与 L_p 的关系

吹炼末期由于渣中 ΣFeO 迅速升高,为进一步提高转炉吹炼的冶金效果,在此期间宜采用较大的底吹供气强度。武钢第二炼钢厂在吹炼末期的底吹供气强度约为 $0.08\text{m}^3 / (\text{min} \cdot \text{t})$ 通过对比试验得出,在吹炼过程中,底吹供气采取后段提高供气强度的方法,可以保证终渣熔化均匀,对于去磷、硫和降碳都有明显的效果,并使钢渣界面反应更趋平衡,熔池钢液成分相对更加稳定,有利于提高钢种炼成率。

根据吹炼不同时期的原理对复吹工艺模式可进行合理制定。武钢第二炼钢厂确定底吹控制模式示于图 5-3-21,日本川崎制铁所底吹供模气示于图 5-3-22。

(三) 底吹供气元件的选择

底吹供气元件发展至今,主要有镁质缝隙式供气元件、镁碳质缝隙式供气元件、多孔定向式镁碳质供气元件等,其性能指标见表 5-3-27。

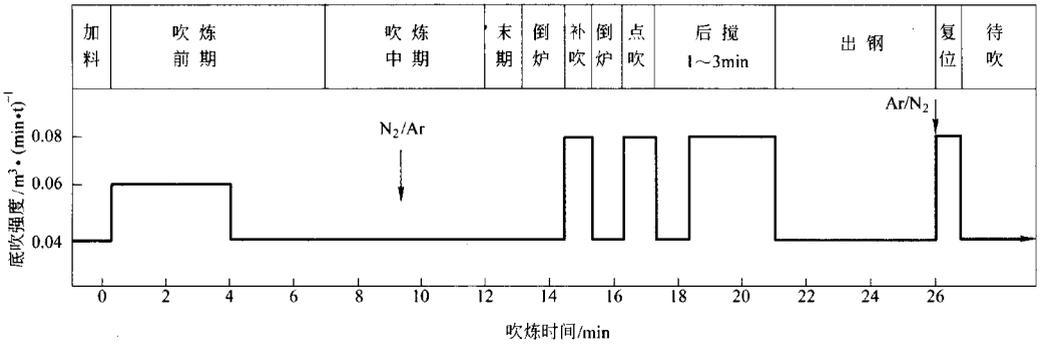


图 5-3-21 武钢二炼钢底吹供气模式

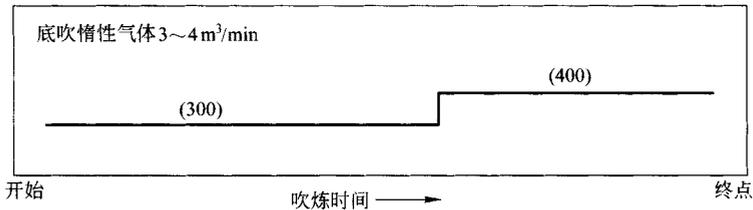


图 5-3-22 日本川崎制铁所底吹供气模式

表 5-3-27 各种供气元件的性能指标

供气元件类型	供气元件材质	MgO /%	C /%	耐压强度 /MPa	气孔率 /%	荷重软化温度/°C	热态抗折强度(1400°C)/MPa	体积密度/ $g \cdot cm^{-3}$
缝隙式	镁质	84.70	5.39	> 98.0	≤ 1	> 1610	9.11 ~ 13.72 ^①	≥ 3.10
	镁碳质	78.50	9.98	> 67.2	≤ 1	> 1620	3.82 ~ 5.49 ^①	≥ 3.00
多孔定向式	镁质	75.08	43.32	43.32	2 ~ 3	—	17.84 ~ 21.07 ^②	2.86 ~ 2.93

①氧化性气氛测定。②还原性气氛测定。

根据底吹供气元件的发展和使用效果来看,多孔定向式镁碳质供气元件具有供气强度调节范围大,良好的抗侵蚀性能、抗热震性能、简便砌筑等特点,避免了缝隙式供气元件组装困难和供气元件易断裂上浮等问题的出现,有利于提高复吹冶金效果和延长复吹元件使用寿命。因此,目前普遍采用多孔定向式供气元件。

总的来说,顶底复合吹炼技术,从20世纪80年代发展至今,底吹供气模式从简易逐渐走向成熟,为各复吹转炉钢厂的复吹操作提供合理的指导,也为钢厂创造了巨大的效益,可以说复吹供气模式的发展对复吹技术的发展起到了重要作用。

七、溅渣护炉复吹转炉炉型控制

(一) 炉型控制的目的

炉型控制的目的是使炉衬各部位尽可能有合理的平衡厚度,并均匀侵蚀,最大限度挖掘炉衬的潜力,提高炉龄,降低耐材消耗,满足转炉炼钢工艺要求,充分发挥复吹作用,防止由于炉况变化所导致的炉底上涨、炉容比降低、喷溅增加、底部底吹供气元件堵塞、炉衬上段蚀损加剧等现象发生,是实现长寿命炉龄运行中的重要条件。

(二) 影响炉型变化的因素及应对措施

(1) 溅渣起始炉龄的选择和溅渣频率的控制。一般说来溅渣效果与炉渣成分、炉衬剩余厚度有直接关系,过早地进行溅渣操作,对提高炉龄并没有积极效果,反而给炉型控制带来不利影响。因此选择合适的起始溅渣炉龄,并在一段时间内对溅渣频率进行控制,辅以相应的其他维护措施是炉型控制的重要一环。

炉役前期充分利用良好的复吹效果,抓住“冶炼过程中体现护炉意识”,在保证安全的前提下,充分利用前大面砖层厚度,使钢液面和渣线部位降低,给渣线部位均匀蚀损创造条件。根据转炉冶炼实践来看,溅渣起始炉龄应选择在渣线部位厚度 250~300mm 左右较合适。根据阶段内侵蚀情况,决定溅渣频率,并对前大面采取间断性补炉与操作性维护措施,保证炉型正常。

(2) 终渣调整控制的影响。炉役前期,复吹底吹供气元件在冶炼过程中直接呈现在钢液中,由于气体搅拌作用及钢水氧化性影响,使底吹供气元件及周围炉底砖蚀损严重,形成凹坑。如控制不当,易导致底吹供气元件发生漏钢。因此在开始溅渣前,控制好终渣 MgO 含量,保证一定黏皮,有利于底吹供气元件“蘑菇头”形成,为底吹供气元件和炉龄同步打下良好基础。

溅渣护炉对提高炉龄的作用已不可置疑。同时它带来的负面影响也客观存在,主要表现为溅渣开始后炉底上涨。控制炉底上涨是保证炉型正常的主要任务。虽然各厂冶炼钢种、出钢温度、终渣氧化性和原材料存在一定差别,但控制终渣均可遵守以下原则:

1) 使终渣具有足够的耐火度,主要措施是调整渣中 MgO 含量,终渣 MgO 应控制在表 5-3-28 的范围内。

表 5-3-28 终渣 MgO 含量(推荐值)

	%		
终渣 TFe	8~14	15~22	23~30
终渣 MgO	7~8	9~10	11~13

2) 随出钢温度提高,渣中(MgO)相应提高。

3) 在上述基础上,最直观的是保证终渣有合适黏度,以适应溅渣要求。因此在终渣控制中,应把黏度放在首位。

4) 溅渣前炉渣调整采用‘少量多批’原则。

由于冶炼钢种、冷却剂配加、冶炼操作失误等因素,致使终渣氧化性增强的情况,各厂均有发生。在高炉龄运行时,类似条件下的溅渣操作,对控制炉底上涨十分重要,对这类渣的调整,可加入高温条件下易分解且含 CaO 、 MgO 的原料,如生白云石、轻烧白云石,对降低渣温有良好作用,同时增加渣中 CaO 、 MgO 含量,促进炉渣改质,也防止了调渣剂在炉底堆积导致的炉底上涨。类似情况下的终渣调整要注意以下方面:调渣后,渣量大可先倒掉部分再溅渣,并在溅渣时分批调渣,调整过程枪位上下波动,有利于均匀炉渣,降低渣温,促使早起渣。

(三) 炉型控制的基本思路

炉型控制主要体现在炉体的两大部位即前大面(加金属料面)和炉底。其主要参数标准是转炉零位即熔池生产实际液面与理论熔池液面的距离(应结合炉况、炉型综合判断)。炉型控制思路应在溅渣和补炉开始后重点保证熔池液面在一定的冶炼时间段内上下波动,有利于渣线等薄弱部位均匀侵蚀,并根据炉型变化趋势及时调整终渣状况,增加或减少“低碳高温”钢的冶炼,适当调整溅渣频率等。

(四) 洗刷炉底的基本操作

当炉底上涨影响到正常冶炼操作时,除了从冶炼操作、终渣控制上采取措施外,如发现喷溅夹带较多的金属,炉口结渣不易处理,氧枪粘钢频繁发生等,必须进行及时的炉底洗刷。

(1) 出钢后倒尽炉渣,加入一定量铁水,枪位因喷枪参数,转炉吨位不同,可在实践中摸索,洗刷时间视炉底上涨程度而定,一般每次不超过3min,完毕后倒部分渣(注意:需作降温处理),调料溅渣。

(2) 直接留渣洗刷(一般不占用生产时间)。前一炉保留适量氧化性终渣或留置部分钢水,出完钢后直接下枪洗刷,需要指出的是在洗刷炉底前,必须对炉况,尤其是熔池渣线部位进行确认,防止意外发生。因此在实际生产中根据炉型变化趋势,选择好洗刷时机十分重要。

(五) 武钢二炼钢厂炉底零位的控制

武钢二炼钢厂转炉溅渣一般规定在炉役运行1500炉后开始溅渣,1500炉前靠粘渣护炉维护正常运转。从开炉至1500炉时炉底零位波动不大,一般炉底工作层侵蚀

100mm 左右。溅渣后,由于炉渣的改质、发粘,容易造成炉底上涨。

控制炉底上涨有以下方法:

(1) 溅渣时前期采用压枪操作;

(2) 造渣过程中炉渣含 MgO 的量尽量控制在标准下限,出钢前的炉渣氧化铁应在 15% 左右,炉渣不能过黏;

(3) 溅完渣后一定迅速将渣子倒干净,必要时采取用氧气吹扫的方法处理炉底上涨。

在生产中,我们通过控制溅渣后炉底熔池部位的残渣留护时间,来保持合理的转炉护炉底零位,见表 5-3-29。

表 5-3-29 转炉“±”零位表

转炉“+”零位(炉底下降)	留渣不立即倒渣
转炉“-”零位(炉底上涨)	溅渣后立即倒渣

(六) 转炉大面修补技术

以武钢第二炼钢厂为例,在该厂炉役运行过程中,转炉炉衬侵蚀较严重部位主要集中在熔池、前大面、渣线、耳轴和炉帽等部位,根据炉衬不同部位的侵蚀情况采取不同的维护方法。对于上述部位尤其是耳轴部位,日常采用在溅渣时一方面控制好炉渣的碱度、 TFe 和 MgO 含量,以保持炉渣有合适的黏度,减缓吹炼过程炉衬的侵蚀及防止溅渣过程炉渣集中分布在炉衬下部;另一方面控制好供氮强度和溅渣枪位,保持溅起的炉渣尽可能在炉衬表面均匀分布。通过控制良好的溅渣效果保持炉衬各部位达到零侵蚀,前大面有时侵蚀速度会加剧,往往造成前大面凹得比较深,这期间改变装入方法,其目的是防止大面的进一步侵蚀,方法是兑铁时炉子的角度要控制好,或者在前大面加一定的原料,使其不被直接冲刷到大面凹处,炉役中期对大面进行必要的修补。方法有用补炉料修补和留渣修补侵蚀较严重的部位,以保持炉衬各部位的厚度均匀分布,形成良好的炉形。

(1) 补炉料修补方法是出完钢溅完渣后,将炉渣由炉后倒干净,将准备好的补炉料从槽子翻到炉内,如果是焦白料,用煤气烘烤 60min 后兑铁,液态料烘烤 45min 即可烧结。

(2) 留渣护炉技术,将溅完的渣留在大面上,有条件可每 8h 留一次,20min 左右更佳。炉渣 MgO 配到 10% 以上,有一定流动性,留渣铺匀即可。

后大面修补技术,溅完渣后将渣子涂在后大面或从后大面倒掉炉渣,出钢过程中炉渣改质直接修补后大面。一般后大面不采用补炉料修补。