

转 炉 溅 渣 护 炉 技 术 研 究

杨文远 郑丛杰 樊永忠 李茂富

Study on Slag Splashing of BOF

Yang W enyuan Zheng Congjie Fan Yongzhong Li M aofu

摘 要 在承德钢铁股份有限公司 20 t 转炉半钢炼钢、全连铸、出钢温度 1 710 ~ 1 730 ℃ 和终渣中 TFe 为 20 % ~ 33 % 条件下, 采用溅渣护炉技术(包括吹炼过程加白云石造渣、对终渣成分进行改质和降温、确定合理的氮气喷吹参数等)使炉龄提高 1.8 倍, 降低成本 10.3 元/吨钢。
关键词 转炉, 炉龄, 溅渣护炉

ABSTRACT Under the conditions of steelmaking using semi-steel as raw stuff heat size being 20 t, tapping at 1 710~ 1 730 ℃, the content of TFe in the slag at end point being 20 % ~ 30 % and continuous casting, slag splashing (including adding dolomite for building of slag during blowing, changing the composition of the slag at end point, lowering the temperature of the slag at end point and determining the optimal parameters of nitrogen blowing) was used in a BOF in Chengde Iron and Steel Co., which increased the average lining life by 180 % and decreased the cost of per ton steel by RMB 10.3 yuan.
KEY WORDS BOF, lining life, slag splashing

1991 年, 美国 LTV 钢公司开发了转炉溅渣护炉技术(Slag Splashing), 经过几年的逐步完善, 1994 年转炉炉龄达到 15 658 次, 转炉作业率 97 %, 喷补料消耗 0.37 kg/t 钢^[1]。1995 年初, 冶金部钢铁研究总院与承德钢铁股份有限公司(简称承钢)合作, 在承钢 20 t 转炉上进行了溅渣护炉技术的研究。解决了中小转炉在出钢温度高、炉渣中氧化铁含量高条件下的炉渣改质、降温及确定合理的氮气喷吹参数等技术难点。

1 试验条件

转炉公称容量为 20 t, 出钢温度 1 710~ 1 730 ℃, 冶炼品种为 20MnSi, 连铸比 100 %, 平均冶炼周

期 33.45 h, 终渣中 TFe 为 20 % ~ 33 %, 采用铁水提钒后的半钢炼钢, 半钢成分(质量分数, 下同)及温度见表 1。转炉炉衬砖的理化指标列于表 2。
供氮系统所需的压缩机、贮气罐均利用制氧厂原有设备, 炼钢厂内的管道、阀门和仪表为新增设备。氮气的工作压力高于 0.7 MPa。

表 1 半钢化学成分及温度
Table 1 Composition and temperature of semi-steel

成 分/%							温度
C	Si	V	Ti	Cr	S	P	
2.8~3.5	微量	< 0.07	微量	0.05~0.10	0.04~0.10	0.08~0.12	1 280~1 380

作者单位: 冶金部钢铁研究总院(Central Iron & Steel Research Institute, MM D)
承德钢铁股份有限公司(Chengde Iron & Steel Co. Ltd.)
联系人: 杨文远, 高级工程师(教授), 北京(100081), 钢铁研究总院工艺所

表 2 炉衬砖理化指标
Table 2 Quality indexes of lining brick

部 位	强度/MPa		显气孔率 %	密 度 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	残碳含量 %
	耐 压	抗 折			
渣线以下, 炉底上部	45.6	12.8	3	3.00	14.6
炉帽, 炉底下部	35.0	7.0	4	2.82	18.0

2 溅渣护炉工艺

2.1 吹炼过程中加轻烧白云石造渣

承钢用半钢炼钢的困难在于硅低、碳低所造成的热量不足和成渣困难。由于没有足够的 SiO_2 , 转炉化渣靠渣中的 FeO (终渣中 TFe 为 20%~33%)、出钢温度高达 1710~1730℃, 使转炉炉衬工作条

件非常恶劣。承钢转炉在未加轻烧白云石造渣时, 由于吹炼过程中从炉衬溶解大量的 MgO , 渣中氧化镁含量平均为 4.60% (见表 3)。在采用溅渣护炉技术前, 虽然炉衬采用优质镁碳砖, 但炉龄仅 543 炉。

吹炼过程中加入轻烧白云石可以减少炉渣对炉衬的侵蚀。提高终渣氧化镁可以减少调渣时调渣剂的加入量。吹炼过程中每炉加入轻烧白云石 400~

表 3 转炉渣的平均成分/%
Table 3 Average composition of slag/%

炉 渣	CaO	SiO_2	MgO	TFe	MnO	P_2O_5	Al_2O_3	TiO_2
终渣 1	41.28	5.10	4.60	29.66	0.51	0.68	1.20	1.20
终渣 2	41.27	6.61	8.98	27.66	0.67	0.95	2.18	0.91
改质渣	38.02	6.38	13.25	27.02	0.64	0.82	2.24	0.85

未加轻烧白云石造渣; 加轻烧白云石造渣, 表 4 同。

600 kg, 并相应减少 40% 白云石用量的石灰量。

1600℃ 时, MgO 在 $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{FeO}$ 三元系渣中的饱和溶解度曲线如图 1 所示^[2]。由图 1 可以计算出终渣的 MgO 饱和溶解度为 6%~8%。终渣 MgO 平均含量达到 8.98%, 由于出钢温度高, 渣仍有较高的流动性。

2.2 终渣成分的调整

承钢转炉终渣不能直接用于溅渣护炉, 需要往终渣内加入调渣剂以提高其耐火度和粘度。调渣剂有轻烧白云石、生白云石、镁砂和轻烧菱镁球等。

调渣剂的种类和数量应根据转炉终渣氧化铁、温度及终渣量而定。改质后的炉渣其氧化镁含量控制在 11%~14%, 平均值为 13.25%。这时炉渣中 MgO 已呈过饱和状态。改质后炉渣成分见表 3。

2.3 炉渣的岩相研究

(1) 终渣的物相组成

承钢转炉终渣的岩相照片见图 2(a)。大多数炉次终渣的物相组成属于这种类型。这种渣的氧化铁含量高, 在渣中形成大量铁酸钙, 其含量通常在 30

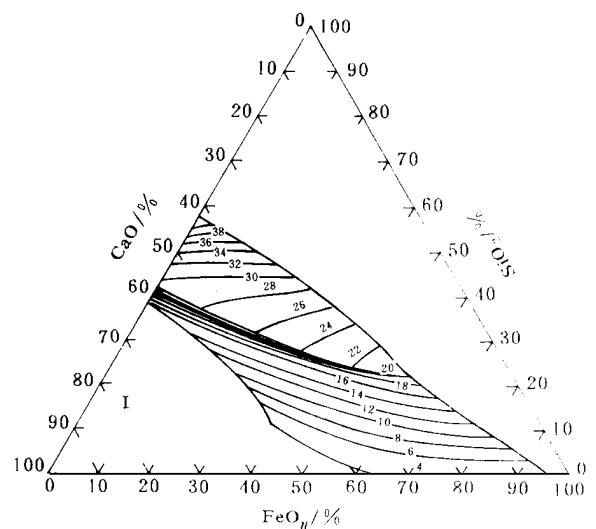


图 1 1600℃ 时 MgO 在 $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{FeO}$ 渣中的饱和溶解度曲线
图中数字为 MgO 质量分数

Fig 1 Curve of saturated solubility of MgO in $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{FeO}$ slag at 1600

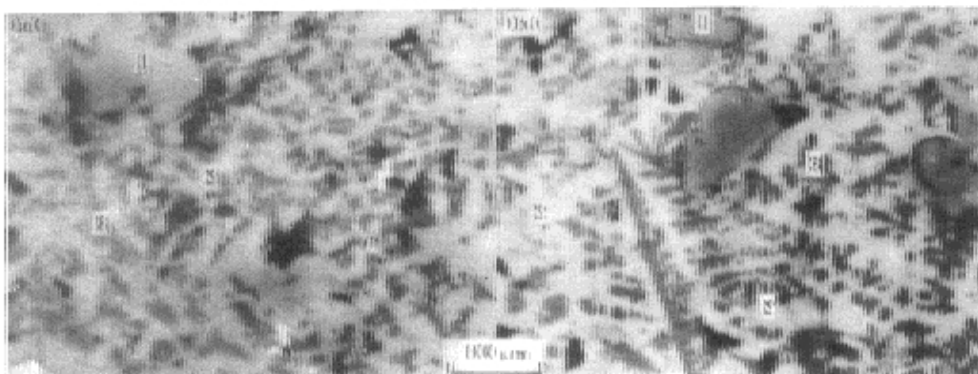


图2 终渣(a)和改质渣(b)的岩相照片(反光)

1—镁砂; 2—铁酸钙; 3—硅酸二钙; 4—金属

Fig 2 Lithofacies photographs of the slag at end point (a) and modified slag (b)

% 以上,有时超过 40 %。铁酸钙呈无定形或片状存在。渣中二氧化硅含量低(约占 15 %),并以菱形或粒状的硅酸二钙形式存在。晶粒尺寸为 0.001~0.050 mm。渣中有少量 MgO 结晶。

(2) 改质渣的物相组成

图 2(b) 是高铁酸钙的终渣经改质后的岩相照片。改质后渣中的物相种类与改质前相同。加入的调渣剂中的 MgO 颗粒被铁酸钙侵蚀。残存于改质渣中最大的 MgO 颗粒直径为 0.2~0.3 mm, 80 % 以上的 MgO 晶粒小于 0.06 mm, 并均匀地悬浮于渣中, 由于这些细小颗粒的存在, 提高了炉渣粘度和溅渣层的抗侵蚀能力。

(3) 残砖表面渣层的物相组成

残砖表面的岩相照片如图 3 所示。渣中的主要物相为镁铁尖晶石 ($MgO \cdot Fe_2O_3$) 及表面分布有尖晶石斑点的 MgO 结晶。两者的总量为 60 %~65 %, 充填在晶界中的铁酸钙约占 20 %, 还有 10 %~15 % 的硅酸二钙。

从上述可以看出, 终渣的氧化铁在高温下有加速调渣剂溶解的作用。但改质渣中必须有足够的 MgO, 使氧化铁与 MgO 生成高熔点的镁铁尖晶石或固溶体 ($MgO \cdot FeO$), 两者熔点都在 1700 以上^[3,4]。另外, 由于渣层中富集了大量的镁铁尖晶石和 MgO 晶体, 使铁酸钙含量明显减少, 硅酸盐含量也降低到 5 %~10 %。这种渣层的熔化性温度和粘度都比较高。

2.4 炉渣温度的控制

承钢转炉出钢温度高, 为使炉渣具有合适的粘度, 必须降温。在此主要是通过改质炉渣所加入的耐

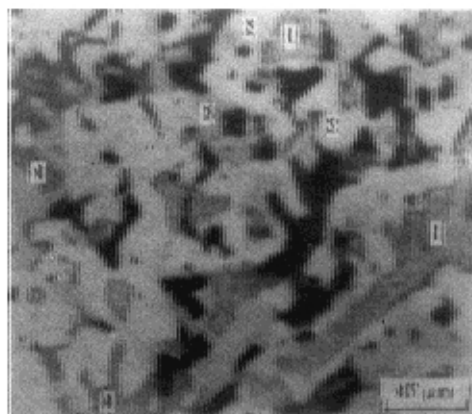


图3 残砖表面渣层岩相照片(反光)

1—MgO 晶体; 2—镁铁尖晶石;
3—铁酸钙; 4—硅酸二钙

Fig 3 Lithofacies photograph of a remanent brick surface

火材料和喷吹氮气所吸收的热量来降低钢水温度。

从承钢炉渣熔化性温度测定结果(见表 4)可以看出, 吹炼过程中加入轻烧白云石造渣后, 渣中氧化镁含量平均提高 3.93 %, 而炉渣熔化性温度只提高 7 °。这是由于氧化镁含量在饱和溶解度以下时, 氧化镁的增加对炉渣熔化性温度无明显影响。改质后炉渣的氧化镁含量较终渣氧化镁含量增加 4.27 %, 炉渣熔化性温度提高 16 °。终渣的过热度平均高达 385 °, 而改质渣的平均过热度降为 191 °, 这时渣的粘度已可进行正常的溅渣操作。

2.5 氮气喷吹参数的确定

(1) 过膨胀射流性质的测定

通常溅渣护炉喷吹氮气与炼钢使用同一氧枪。

表 4 炉渣熔化性温度测定结果

Table 4 Measured melting temperature of slag

炉渣种类	终渣 1	终渣 2	改质渣
熔化性温度 $\bar{\theta}$	1 321	1 328	1 344
熔池实测温度 $\bar{\theta}$	1 720	1 713	1 535
炉渣平均过热度 $\bar{\theta}$	399	385	191

为了正确地制定供氮制度, 测定了氧枪喷头射流流场。测试用喷头参数见表 5。

主喷孔射流中心速度 v 的衰减情况如图 4 所示。在测试距离 $H = 35d_e$ (d_e 为喷头出口直径) 处, 滞止压力 $p_o = 0.53 \text{ MPa}$ 的射流中心速度为 107.9 m/s , 相当于滞止压力为 0.75 MPa 时的 70 %。

表 5 喷头参数

Table 5 Parameters of nozzle

	出口尺寸 \bar{a}_{mm}	喉口尺寸 \bar{a}_{mm}	马赫数	角度 $\bar{\theta} (^{\circ})$	滞止压力 \bar{p}_{MPa}
主 孔	$<32 \times 3$	$<25 \times 3$	1.964	10	0.75

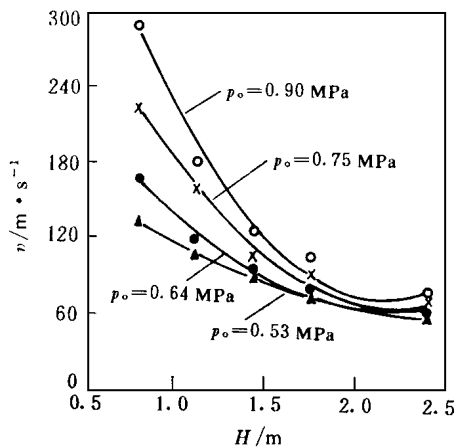


图 4 射流中心线上速度的衰减

Fig 4 Velocity attenuation along the jet axis

本试验中第一次实测了滞止压力偏离设计值较远 ($0.70 p_o$) 的过膨胀射流的性质。从所测得的数据来看, 过膨胀射流的各种性质都较设计滞止压力时差。氮气的能量至少有 20 % 在射流离开喷孔后以压缩激波的形式损失。提高溅渣过程中氮气喷吹压力 p_{N_2} , 可以充分利用氮气的能量, 加快溅渣速度。

(2) 射流与熔池的作用

溅渣前的炉渣宏观上具有液体的性质, 可以用 Flinn 公式^[5]计算射流对熔池的穿透深度, 再用炉渣与钢液的密度差加以修正。根据承钢转炉的喷吹参数, 氮气射流对熔池的穿透深度如表 6 所示。

正常溅渣时氮气喷吹压力不低于 0.6 MPa (滞止压力约为 0.55 MPa)。当枪位高度 (即测试距离)

为 1.2 m 时, 射流对熔渣的穿透深度为 0.930 m 。熔渣深度约为 0.3 m , 氮气流股在击穿熔渣层后还有 0.63 m 的穿透能力。这部分动能用于冲击炉渣形成飞溅的渣滴, 使熔池搅拌以及使反射气流具有一定速度。根据测试数据可知, 此时氮气流股到达渣面时, 其中心速度约为 110 m/s 。

根据溅渣护炉喷吹氮气参数, 采用文献[6]中的公式, 计算出氮气流股对熔池的冲击能量 E 结果如图 5 所示。

在氮气喷吹压力为 0.6 MPa 、枪位高度 1.2 m 时, 可以达到溅渣护炉的要求。此时, 氮气流股对熔池的冲击能量约为 $30\,000 \text{ W}\cdot\text{m}^3$ 。如果冲击能量低于此值, 溅渣量和溅渣高度将达不到要求。此时应调整氮气喷吹压力和枪位高度。

表 6 氮射流对熔渣的穿透深度 \bar{a}_{m} Table 6 Penetration depth of nitrogen jet into slag bath \bar{a}_{m}

枪位高度 m	滞止压力 \bar{p}_{MPa}					
	0.75	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
1.2	1.240	1.163	1.085	1.007	0.930	0.852
1.4	1.154	1.082	1.010	0.938	0.866	0.795
1.6	1.084	1.017	0.950	0.883	0.815	0.748

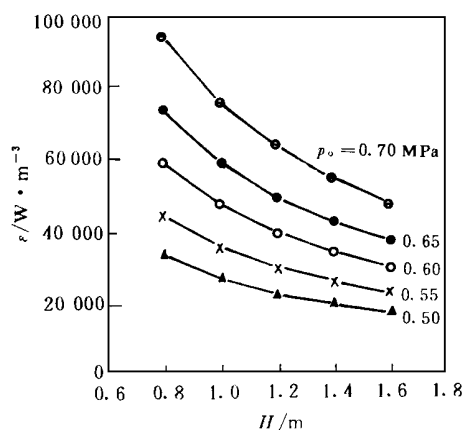


图5 氮气流股对熔池的冲击能量

Fig 5 Energy of nitrogen jet impacting bath

3 溅渣护炉的效果

采用溅渣护炉技术后炉龄达到1500次,比未采用溅渣护炉的平均炉龄543次提高1.8倍。

转炉耐火材料消耗降低7.24 kg/t钢。

缩短补炉时间58.3%。

取消了贴砖补炉,大大减轻了工人的繁重体

力劳动。

降低成本10.3元/t钢。

4 结 论

(1) 承钢溅渣护炉工艺参数控制范围: 终渣MgO 7%~10%, 改质渣MgO 11%~14%, 溅渣温度1500~1550, 氮气喷吹压力应高于0.7 MPa。

(2) 解决了中小转炉在出钢温度高、终渣氧化铁含量高的条件下, 采用溅渣护炉的技术难点。

(3) 炉龄提高1.8倍, 转炉耐火材料消耗量降低7.24 kg/t钢, 取消了贴砖补炉繁重劳动, 缩短补炉时间58.3%, 降低成本10.3元/t钢。

(1997年6月12日收到修改稿)

参 考 文 献

- 1 Goodson K M. I & SM, 1995, June: 31
- 2 德国钢铁工程师协会编 王 俭, 彭 强, 毛裕文译 渣图集 北京: 冶金工业出版社, 1989 115
- 3 Alper Allen M ed High Temperature Oxides New York: Academic Press, 1970
- 4 契斯捷尔 著 东北工学院冶金炉教研组译 炼钢用耐火材料 北京: 冶金工业出版社, 1958 70
- 5 Flinn A. Trans Metall Soc A M I, 1967, 239: 1776
- 6 甲斐干 铁と钢, 1983, (2): 42