

· 工艺技术 ·

80 t 转炉冶炼 SCM435 钢留渣操作技术研究

霍志斌 赵彦岭 王建林 王秋坤
(邢台钢铁有限责任公司炼钢厂, 邢台 054027)

摘要 试验研究了转炉冶炼 SCM435 钢时留渣操作(留渣分数 1/3 ~ 2/3 渣量)对石灰加入量、平衡碱度的留渣炉数和终渣碱度的影响,总结了留渣操作的注意事项。80 t 转炉实施留渣操作后,留渣率达到 68.9%,成品 P 含量 $\leq 0.015\%$ 的比例比从留渣前的 49.3% 提高到 62.2%,同时石灰消耗降低了 4.5 kg/t,每炉渣中铁损失减少 230 kg。

关键词 80 t 转炉 SCM435 钢 留渣 脱磷 喷溅 终点磷含量

A Study on Remaining Slag Operation of 80 t BOF Steelmaking Steel SCM435

Huo Zhibin, Zhao Yanling, Wang Jianlin and Wang Qiukun
(Steelmaking Works, Xingtai Iron and Steel Co Ltd, Xingtai 054027)

Abstract The effect of remaining slag operation (remaining slag fraction 1/3 ~ 2/3 slag amount) of BOF steelmaking steel SCM435 on lime adding amount, remaining slag heats of equilibrium basicity and end slag basicity is tested and studied, and the points for attention in slag remaining operation are summarized. As the 80t BOF remaining slag operation is put into practice, the remaining slag rate is up to 68.9%, the ratio of P content $\leq 0.015\%$ in product increases from original 49.3% to 62.2%, and the lime consumption decreases by 4.5 kg/t, and the iron loss in slag decreases by 230 kg.

Material Index 80 t BOF, Steel SCM435, Remaining Slag, Dephosphorization, Splashing, End Phosphorus Content

钢铁产品是生产各种机械零件和配件的重要原材料。螺栓的高强度化能够减小螺栓的尺寸,有利于提高工业产品的使用寿命,减轻汽车等交通工具的自重、降低能源消耗。SCM435 钢种属于高强度冷镦钢,其线材主要用于制作 10.9 ~ 12.9 级高强、超高强度级别六角头螺栓、螺柱、内六角螺钉和六角螺母等。高强度螺栓属于缺口零件,具有很高的缺口敏感性,容易在缺口集中部位如杆与头部的过渡处或螺纹根部产生延迟断裂。随着螺栓强度要求的提高,特别是当抗拉强度超过 1 200 MPa 时,延迟断裂就变得十分突出,这是低合金回火马氏体钢高强度化时遇到的一个最主要的问题^[1]。钢中的 P 会降低晶界结合强度,从而导致晶界脆化,。因此,减少晶界偏析是预防或减少延迟断裂风险的重要措施之一^[2]。所以,控制和降低 SCM435 钢中 P 含量对预防其成品螺栓延迟断裂有着重要意义。

在当前钢铁市场形势下,各钢铁企业都在探索改进工艺以降低成本。SCM435 钢种是较高端的冷镦钢,对其钢中 P 含量有较严格的要求。在铁水磷含量逐渐升高的现状下,保证甚至降低钢中 P 含量并且能够降低渣料成本成为亟待研究的课题。留渣操作可以使前期渣有高碱度和高氧化性而有利于在吹炼前期低温脱磷^[3-5]。但邢钢生产 SCM435 钢种

时,从废钢斗加入钼铁,留渣操作时因转炉渣面和炉衬粘钼铁,钼在渣和炉衬中累积富集,导致钢中钼成分有超出钢种国标的风险,邢钢炼钢厂通过理论计算结合现场跟踪摸索,实现了 SCM435 钢种留渣操作,达到了预期的效果。

1 留渣操作对前期脱磷率的影响

1.1 留渣与未留渣的前期转炉渣组分对比
转炉中发生脱磷反应如下:



根据化学反应平衡原理以及生产经验可知,转炉中炉渣高碱度、高 FeO、低温、大渣量以及良好流动性的炉渣有利于脱磷^[6]。取 50 t 转炉吹炼 200 s 时(碳氧反应刚开始)的渣样,并测定钢水温度,对是否执行留渣操作进行对比(如表 1)。

可以看出,留渣操作时初期的炉渣 TFe 高、碱度高、钢水温度较低,这些条件均有利于前期脱磷能力的增强。

采用留渣操作后,上一炉高碱度、高氧化铁的炉渣留在炉内可以促进石灰的溶解,加速前期成渣速度,同时因留到炉内的渣被溅干呈固态时温度较低(低于 1 320 °C^[7])、渣量增大,当铁水发热元素 C、Si

表1 BOF吹炼200 s时不同工艺的渣组分与钢水温度
Table 1 Ingredient of slag and liquid temperature of BOF blowing for 200 s with different process

炉号	温度/ ℃	是否 留渣	石灰/ kg	白云石/ kg	氧化铁皮球/ kg	TFe/ %	碱度 (R)
8211	1 383	是	1 340	1 803	0	19.36	1.97
8212	1 403	否	1 447	1 778	196	15.92	1.48
8313	1 341	是	1 217	1 403	351	15.99	1.70
8315	1 366	否	1 216	1 274	353	14.95	1.21

表2 BOF吹炼300 s时留渣和未留渣工艺的相关参数平均值
Table 2 Average value of relative parameters of BOF blowing for 300 s with remaining slag and without remaining slag operation

是否 留渣	铁水 Si/%	铁水 P/%	石灰/ kg	碱度 (R)	半钢 C/%	半钢 P/%	脱磷率/ %
是	0.425	0.116	3 227	2.01	3.8	0.053 5	53.9
否	0.542	0.115	3 721	2.05	3.2	0.079 6	30.8

含量波动不大时,将降低前期钢水的温度。

1.2 前期脱磷率对比

取80 t转炉生产GSCM435-C钢时吹炼300 s左右(碳氧反应刚开始)的半钢样化验成分,留渣、不留渣各取10炉,相关操作参数及脱磷率对比情况见表2。

由表2可知,在几乎相同的操作条件下,留渣炉次前期的脱磷率为53.9%,明显高于未留渣炉次。

2 留渣炉次石灰加入量及炉渣碱度变化探讨

2.1 留渣炉次石灰加入量探讨

为高效脱磷,炉渣碱度控制在3.0~3.5较为适宜^[8]。邢钢GSCM435-C钢种出钢温度较高(平均1 670℃),为保证命中较严格的磷要求,一般控制转炉终渣碱度3.5~4.5。转炉留渣操作一般留渣量在上一炉次的1/3~2/3,留渣操作使前期炉渣具有较为优越的脱磷条件,石灰加入量(或碱度)可以较非留渣炉次适当降低。

假定铁水中的硅处于正常范围,且炉次间波动很小,每炉留渣量不变,留渣炉次石灰加入量保持不变,则若持续留渣,最终炉渣碱度将接近一个定值,即留渣炉次石灰加入量与正常铁水硅相作用下的炉渣碱度。邢钢铁水成分波动情况见表3。

邢钢铁水中硅含量一般为0.30%~0.50%,铁水Si=0.50%时炉渣碱度控制在3.5,铁水装入按77 t计、造渣料组分见表4,则计算需要加入石灰3 800 kg、白云石1 500 kg(白云石加入量以炉渣MgO含量6%计算)。从而确定GSCM435-C钢种留渣炉次石灰加入量控制在3 800 kg为宜。而SCM435出钢温度较低(平均1 646℃),可控制终渣碱度约3.0,石灰加入量较GSCM435-C钢减少

表3 铁水的化学成分/%

Table 3 Chemical composition of hot metal/%

C	Si	Mn	P	S
3.8~ 5.0	0.25~ 0.70	0.20~ 0.40	0.100~ 0.140	0.005~ 0.035

表4 造渣料的主要组分/%

Table 4 Main ingredient of raw materials for slagging/%

渣料	CaO	SiO ₂
石灰	84.72	1.26
白云石	30.76	1.27

约500 kg。

2.2 留渣量对碱度变化的影响

根据《炼钢设计原理》^[9]中计算渣量的方法(考虑TFe=18%,渣中FeO与Fe₂O₃的质量比为2:1),结合铁水成分、造渣料成分、装入量、镁碳砖侵蚀等参数,铁水Si含量取0.40%、铁水装入按77 t计,是否留渣炉次的散装料加入见表5,计算出非留渣炉次的初始炉渣与留渣炉次的新成炉渣的渣量、成分与碱度如表6。

在转炉炉衬厚度、钢水氧化性、终渣流动性波动不大的前提下,每炉剩渣量相对固定,推导出式(3)。

$$\omega_n = (k \cdot m_0 \cdot \omega_{n-1} + \omega_r \cdot m_r) / (k \cdot m_0 + m_r) \quad (3)$$

式中: ω_n -留渣n次CaO含量(或SiO₂含量)/%; ω_{n-1} -留渣n-1次CaO含量(或SiO₂含量)/%; ω_r -新成渣的CaO含量(或SiO₂含量)/%; m_0 -初始渣量/kg; m_r -新成渣量/kg; k -留渣量分数(k 值取1/3;1/2;2/3)。

同理可得第n次留渣时渣中SiO₂的含量,这两个数值相除,即可得出第n次留渣转炉终渣的碱度。将表6中得到的渣量、CaO含量、SiO₂含量代入式

表5 留渣和未留渣炉次散装料结构

Table 5 Structure of bulk slag materials for remaining slag and non-remaining slag heats

渣料	石灰/ kg	萤石/ kg	白云灰/ kg	氧化铁皮/ kg	铁矾土/ kg
留渣炉次	3 800	280	1 500	1 000	450
未留渣炉次	4 200	280	1 500	1 200	450

表6 初始渣及新成渣的渣量、组分和碱度

Table 6 Slag Amount, ingredient and basicity of initial slag and new slag

渣别	渣量/kg	CaO/%	SiO ₂ /%	碱度(R)
初始炉渣	7 989.5	45.9	10.5	4.37
新成炉渣	7 554.0	44.4	11.0	4.04

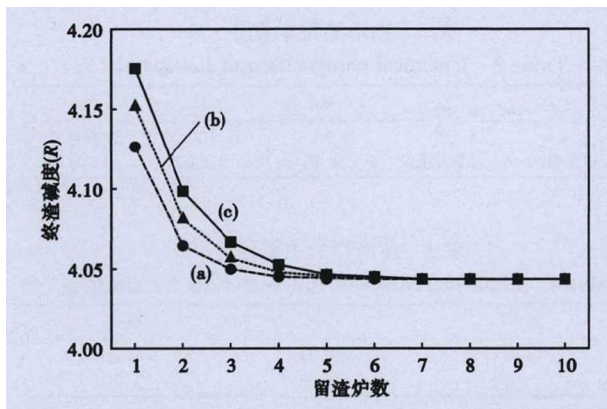


图 1 留渣分数(a)1/3,(b)1/2和(c)2/3对平衡碱度的炉数和终渣碱度的影响

Fig.1 Effect of remaining slag fraction (a) 1/3, (b) 1/2 (b) and (c) 2/3 on heats of equilibrium basicity and end slag basicity

(3),得出留渣炉数与终渣碱度的关系如图 1。

从图 1 可以看出,留渣量越多,在留渣周期内终渣的碱度也越高,接近新成渣碱度的速度也越慢,留渣分数分别为2/3、1/2、1/3时,相应达到平衡碱度的炉数分别为 7 炉、6 炉、5 炉。从 GSCM435-C 钢留渣第 1 炉开始连续取 7 炉留渣炉次的渣样,这 7 炉的渣料加入量:石灰 3 800 ~ 3 900 kg、白云石 1 350 ~ 1 550 kg,铁水 Si 含量除 8353 炉次为 0.542% 外,其它炉次波动在 0.44% ~ 0.46%,炉渣碱度变化见图 2。

从图 2 可以看出,在上述石灰、白云石加入量下,随留渣炉数增加,炉渣碱度逐渐减小,最终趋于 3.6 左右而不是计算值 3.8 (碱度按铁水硅 0.45% 计算),这应受石灰生烧/过烧的质量问题、石灰粉化被除尘设施抽走等方面影响。8353 炉次因铁水硅升高较多未上调石灰加入量导致碱度明显降低,所以留渣时若铁水硅突然大幅升高,石灰加入量必须及时增加。当留渣持续炉数偏多(≥5 炉)且转炉

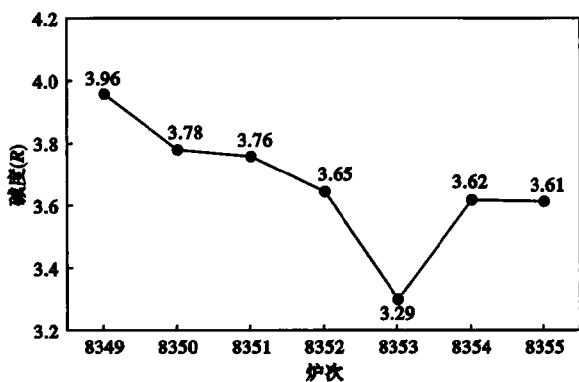


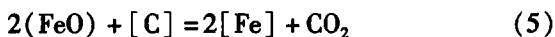
图 2 GSCM435-C 钢持续留渣炉次终渣碱度变化

Fig.2 Variation of basicity of end slag of steel GSCM435-C continuous remaining slag heats

终点磷偏高时,需要适当增加石灰加入量或倒渣后重新进行下一轮留渣操作。

3 留渣操作注意事项

由于炉渣中有较高含量的 TFe(18% ~ 22%),在留渣操作时,转炉中兑入铁水后会发生如下反应^[10]:



上述反应产生大量气体,易导致铁水携带一定量的炉渣喷出,发生爆发性喷溅。此外,留渣后渣层变厚,不利于氧枪点火。由于渣面易粘钼铁合金,从而致使钼在渣中累积富集,对于 SCM435 钢种,还需要采取相应的措施防止钢中钼成分超出国标要求。

通过文献中的经验与现场实际操作的跟踪摸索,制定出 SCM435 钢种留渣操作注意事项如下:

(1)先加废钢、铁块后兑铁水,使铁块中的 C 提前与炉渣中的 FeO 反应,废钢与炉渣接触快速冷却炉渣,降低留渣兑铁时的喷溅几率;

(2)当终点钢水碳含量过低或出钢温度过高时,其渣中 FeO 含量过高或炉渣难溅干,留渣操作中兑入铁水时易造成喷溅。因此,当终点钢水碳含量 < 0.04%,或出钢温度 > 1 720 °C 的炉次,不允许进行留渣操作;

(3)留渣时渣层较厚,可能导致氧枪点不着火,需要溅渣后炉渣呈固态并做好摇炉观察确认,同时将开吹氧压调大至 1.0 MPa,并延长维持时间至 60 s;

(4)留渣炉次为防止钢水吹不透,氧枪枪位由非留渣炉次的 900 ~ 1 500 mm 下调至 800 ~ 1 300 mm;

(5)钼铁加入废钢斗后方,加在废钢铁块的上面,减少钼铁与炉渣的接触机会以防止渣面粘钼铁,若炉终样钼低([Mo] < 0.15%)出钢过程补钼铁、下炉相应减少废钢斗钼铁加入量。

4 留渣操作经济效益

4.1 降低成品磷含量

目前 SCM435 系列留渣比例达到了 68.9%,其成品 P ≤ 0.015% 的比例达到了 62.2%,较留渣前的这一比例提高了 12.9% (见表 7)。

留渣炉次成品 P 含量较未实施留渣前整体降低,成品 P 的波动也更小,平均成品 P 含量实现了 0.015% 以下,见图 3。

4.2 降低渣料成本

留渣操作由于有吹炼前期良好的脱磷热力学及

表7 实施留渣前后成品 $P \leq 0.015\%$ 的比例
Table 7 Proportion of finished product with $P \leq 0.015\%$ before and after carrying out remaining slag operation

留渣前后	生产炉数	成品 $P \leq 0.015\%$ 炉数	成品 $P \leq 0.015\%$ 比例	留渣比例/%
实施留渣前	205	101	49.3%	0
实施留渣后	241	150	62.2%	68.9

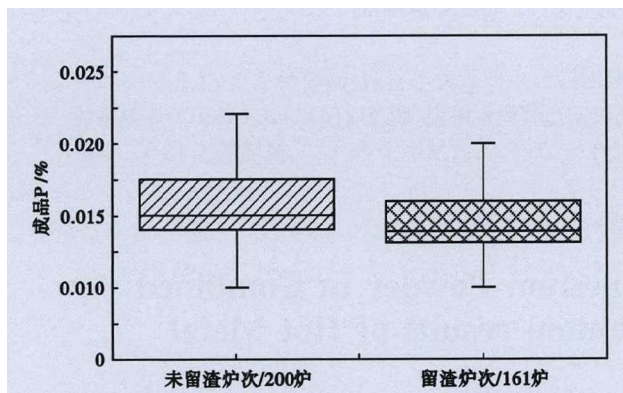


图3 未留渣炉次(200 炉)和留渣炉次(161 炉)成品磷含量对比

Fig. 3 Comparison phosphorus content in finished product between non-remaining slag heats (200 heat) and remaining slag heats (161 heat)

动力学条件,可以较不留渣炉次适当降低转炉终渣碱度,因而可以降低转炉石灰消耗。在改善转炉脱磷率的前提下,石灰消耗由未留渣炉次的 50.44 kg/t 降至留渣炉次的 45.91 kg/t,平均吨钢石灰消耗降低 4.5 kg。

4.3 减少渣中铁的流失

参考文献

- [1] 惠卫军,董瀚,翁宇庆. 延迟断裂高强度螺栓钢的研究开发[J]. 钢铁,2001,36(3):69-73.
- [2] Hasegawa T, Nakahara T and Yamada Y, et al. Delayed Failure of Steels for High-Strength Bolts[J]. Wire Journal International, 1992, 25(8):49-58.
- [3] 李尚兵. 50 t 转炉留渣操作工艺分析[J]. 现代冶金,2014,42(2):39-41.
- [4] 郑果,田新喜,武炜. 45 t 转炉留渣操作工艺实践[J]. 山西冶金,2015,38(3):87-88.
- [5] 郭传奇,李杰. 莱钢 90t 转炉留渣操作工艺降本增效的研究[J]. 山西冶金,2015,38(2):83-85.
- [6] 刁江. 中高磷铁水转炉双联脱磷的应用基础研究[D]. 重庆大学博士学位论文,2010.
- [7] 王绍文,梁富智,王纪曾. 固体废弃物资源化技术与应用[M]. 北京:冶金工业出版社,2003.
- [8] 吴明,王军,李应江,等. 120 转炉冶炼低磷钢深脱磷技术[J]. 炼钢,2015,31(1):17-21.
- [9] 冯聚合. 炼钢设计原理[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [10] 苏天森. 转炉溅渣护炉技术[M]. 北京:冶金工业出版社,1999.
- [11] 尹建妙. 转炉留渣操作工艺实践[J]. 天津冶金,2014,6(3):8-12.

留渣操作可以回收炉渣中 TFe,减少了钢铁料损失。每炉留渣量 2 700 ~ 5 300 kg,所留终渣中一般含有约 8% 的金属铁珠,考虑到留渣炉次终渣流动性得到改善,渣中金属铁珠量相应有所降低,渣中金属铁珠量按 6%^[11]、平均留渣量按 3 900 kg 计算,即每炉可直接回收金属铁 230 kg。

5 结论

(1)留渣操作可明显提高转炉前期脱磷率,通过实现 SCM435 系列钢种 68.9% 的留渣率,实现了平均成品 P 含量 0.015% 以下,其成品 $P \leq 0.015\%$ 的比例达到了 62.2%,较留渣前提高了 12.9%。

(2)通过计算将留渣炉次的石灰加入量进行了合理调整,留渣炉次石灰加入量固定或波动不大,则留渣量越多在留渣周期内终渣的碱度也越高,接近平衡碱度的速度也越慢。

(3)留渣时若铁水硅突然大幅升高,石灰加入量必须及时跟上,当留渣持续炉数偏多(≥ 5 炉)且转炉终点磷偏高时,需要适当增加石灰加入量或倒渣后重新进行下一轮留渣操作。

(4)采取了一系列留渣操作注意事项,避免了 SCM435 系列钢种 Mo 成分的大幅波动与留渣时兑铁喷溅的安全事故。

(5)SCM435 系列钢种实施留渣后石灰消耗降低了 4.5 kg/t_钢,同时每炉可平均减少约 230 kg 的铁流失。

霍志斌(1984-),男,硕士(2015 年北京科技大学),工程师,2007 年河北理工大学(本科)毕业,转炉炼钢工艺技术研究。
E-mail: wohozhibin@163.com

收稿日期:2018-04-03