



经济性 Q355 钢转炉冶炼实践

黄高见¹, 韦泽洪¹, 宋欢¹, 战东平², 耿彬², 杨永坤³

(1 宝武集团鄂城钢铁有限公司炼钢厂, 鄂州 436002; 2 东北大学冶金学院, 沈阳 110819;

3 西安建筑科技大学冶金工程学院, 西安 710055)

摘要:通过优化 Q355 钢造渣物料加入制度, 由原来的“三批次加料”模式改为“八批次加料”模式, 并在第一批次和第三批次各加入 100 kg 钢渣改质剂, 同时, 吹氧制度由传统的“恒流量、高-低-低枪位”控制优化为“变压强、高-低-高-低枪位”控制, 开发了适合于 Q355 钢实际生产的经济性转炉冶炼工艺。实践结果表明, 与原冶炼工艺相比, 改进工艺总供氧时间缩短 1 min, 冶炼终点磷命中率达到 100%, 终点脱磷率平均值提高 4.24%, $\lg L_p$ 平均值提高 0.35。与原工艺的造渣物料消耗相比, 改进工艺吨钢石灰消耗平均值为 34.01 kg, 减少 8.73 kg; 吨钢总造渣料消耗平均值为 43.95 kg, 减少 9.13 kg。此外, 改进工艺吨钢冶炼钢铁料消耗平均值为 1078.02 kg, 较原工艺减少 0.60 kg。实现了 Q355 钢转炉经济性冶炼, 减少了造渣物料和钢铁料的消耗, 有效降低了 Q355 钢冶炼生产成本。

关键词:转炉炼钢; 少渣冶炼; 脱磷; Q355 钢

DOI:10.20057/j.1003-8620.2023-00203 **中图分类号:**TF713.3

Practice of Economical Smelting of Q355 Steel in Converter

Huang Gaojian¹, Wei Zehong¹, Song Huan¹, Zhan Dongping², Geng Bin², Yang Yongkun³

(1 Steelmaking Plant of Baowu Group Echeng Iron and Steel Co., Ltd, Ezhou, 436002, China; 2 School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3 School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract: The slag-making material addition system of Q355 steel was optimized, from the traditional "three-batch feeding" mode to the "eight-batch feeding" mode, and 100 kg steel slag modifier was added in the first and third batches respectively. At the same time, the oxygen blowing system of Q355 was changed from the traditional "constant flow, high-low-low lance position" control to "variable pressure, high-low-high-low lance position" control. Base above, a converter economical smelting process suitable for the actual production of Q355 steel was developed. The practice results show that compared with the original smelting process, the total oxygen supply time of the improved process is shortened by 1 min, the hit rate of phosphorus at the end point of smelting is 100%, the average value of phosphorus removal rate at the end point is increased by 4.24%, and the average value of $\lg L_p$ is increased by 0.35. Compared with the consumption of slagging materials in the original process, the average consumption of steel lime per ton in the improved process is 34.01 kg, a decrease of 8.73 kg, and the average consumption of total slag material per ton of steel is 43.95 kg, a decrease of 9.13 kg. In addition, the average iron and steel material consumption of the improved process is 1078.02 kg/ton steel, which is 0.60 kg/ton steel less than that of the original process. The economic smelting of Q355 steel converter is realized, the consumption of slagging material and steel material is reduced, and the production cost of Q355 steel smelting is effectively reduced.

Key Words: Converter Steelmaking; Economic Smelting; Dephosphorization; Q355 Steel

目前, 国内钢铁产量逐年上涨, 转炉钢渣产量也逐年增多, 2020 年国内钢渣产量 1.6 亿吨, 但其综合利用率只有 30% 左右, 大量的钢渣经过简单磁选后直接堆砌, 造成严重的环境污染和资源浪费^[1-2]。因此, 在生产过程中减少物料消耗, 开发经济性冶炼工艺已成为国内外各钢厂转炉炼钢的一个重要发展方向^[3-4]。

鞍钢^[5]通过改变传统的成渣路线, 优化转炉造渣制度、供氧制度、温度制度及出钢温度, 实现了 260 t 转炉少渣冶炼, 吨钢石灰加入量由 36.8 kg 降

低至 31.2 kg, 吨钢熔剂消耗量由 85.1 kg 降低至 64.8 kg, 减少了转炉渣的排放。本钢^[6]采用“单渣+留渣”工艺在 120 t 转炉上进行少渣冶炼试验, 根据转炉终渣氧化性强弱决定留渣量, 头批料加入碱度按 1.5~1.7 控制, 在前期温度较低条件下用低枪位、高强度供氧实现脱磷, 终渣碱度按 3.0 左右控制, 少渣冶炼工艺的应用, 使得吨钢石灰消耗量降低至 34 kg, 脱磷率达到 92%。

在转炉渣系中加入 Na_2O 和 Al_2O_3 , 可以降低熔点, 促进化渣, 提高渣钢间磷分配比, 因此, 有较大

的潜力应用到实际生产中。Pak J J等^[7]研究了Na₂O对CaO基炼钢渣脱磷的影响,向CaO-SiO₂渣中加入Na₂O会提高炉渣磷分配比。在1600℃时,向CaO饱和的CaO-FeO-SiO₂渣中加入6%的Na₂O可使磷分配比增加5倍。刁江^[8]通过向CaO-FeO-SiO₂渣系中加入少量Na₂O和Al₂O₃来降低熔点,以促进脱磷反应进行。当脱磷渣中 $w(\text{Na}_2\text{O})$ 和 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 分别达到0.7%~3.1%和2.5%~7.9%时,脱磷率可达到81.4%~90.7%。此外,部分研究学者^[9-11]探究了Na₂CO₃对脱磷的影响,发现其具有较好的脱磷效果,可以作为脱磷固磷剂使用。Lu Jiang等^[12]采用Al₂O₃对脱磷渣进行改性,研究了磷的富集行为,发现富磷相中,磷的质量分数随着Al₂O₃加入量的增加而显著增加;当Al₂O₃添加量为8%时,富磷相中磷质量分数达到5.10%。Al₂O₃可与初析出的低磷nC₂S-C₃P固溶体反应生成高磷n'C₂S-C₃P固溶体和Ca₂Al₂SiO₇。Senlin Xie等^[13]系统研究了Al₂O₃对CaO-SiO₂-Fe₂O₃-P₂O₅渣系脱磷的影响。随着Al₂O₃的加入,Al₂O₃与CaO反应生成不同熔点的化合物,熔渣样品的熔化范围先减小后增大,有利于提高单固相中P₂O₅的质量分数。

Q355钢具有高强度、优异的可焊性和适应性,广泛应用于高层建筑、矿山设备、船舶结构、汽车零部件及工程机械等领域^[14-16]。与普通螺纹钢相比,Q355钢对转炉冶炼终点P要求更高,如何在保证成材质量的前提下,减少造渣物料消耗,降低生产成本,是需要探究的重要课题。对此,鄂钢积极探索适于Q355钢实际生产的经济性转炉冶炼工艺,将一种含氧化钠和氧化铝的钢渣改质剂用于生产中,并对造渣制度和吹炼制度等操作进行优化改进,实现了Q355钢经济性冶炼生产。

1 试验材料

鄂钢炼钢厂生产Q355钢的转炉为130 t顶底复吹转炉,吹炼采用5孔氧枪,马赫数2.02,喉口直径 $\phi 42$ mm,出口直径 $\phi 55$ mm,喷头夹角设计为13°,供氧流量为20 000~38 000 m³/h。采用单渣生产工艺,操作流程为:出钢结束→溅渣→倒渣→加废钢→兑铁水→吹炼→加造渣料→终点。造渣材料以石灰、镁球和轻烧白云石为主,原工艺首批加料过程一次性加入大量石灰等渣料,造成渣料熔化困难,难以成渣,前期脱磷效果差,终渣中T.Fe质量分数较高,增加了钢铁料消耗。

130 t转炉生产Q355钢时,铁水和废钢按终

点温度1620℃为目标安排,废钢加入比例为22%~26%,入炉铁水条件见表1。

表1 铁水成分及温度

铁水成分 /%						温度 /℃
C	Si	Mn	P	S		
3.56~4.09	0.15~0.53	0.20~0.46	0.094~0.127	0.015~0.082	1250~1320	

2 试验方案

2.1 造渣制度试验方案

试验工艺所使用的造渣剂为石灰、镁球和钢渣改质剂等,其中钢渣改质剂成分见表2。在转炉开吹火焰稳定后,开始加入造渣料,原工艺与改进工艺造渣料加入量以及加入时机见表3。改进工艺的造渣过程要求石灰8个批次加完,镁球2批次加完,全部渣料6分钟前加完。在铁水 $w[\text{Si}] \leq 0.2\%$ 的情况下,适当延长加石灰的时间,确保熔渣化透。无特殊情况,冶炼中后期不再加入石灰。与原工艺相比,多批次、少批量的加料模式可以确保加入的石灰等渣料在冶炼前期低温条件下快速熔化,发挥熔渣良好的脱磷热力学条件,实现低温快速脱磷。

表2 钢渣改质剂成分(质量分数)

Ingredient of steel slag modifier						%
Na ₂ O	Al ₂ O ₃	T.Fe	CaO	SiO ₂	MgO	杂质
20~25	25~30	15~20	10~15	5~10	5~10	余量

2.2 供氧制度试验方案

转炉吹炼前期氧枪枪位和流量的控制,是快速形成泡沫渣的关键,前期吹炼以快速升温熔化渣料及废钢冷料为主。转炉氧枪供氧制度如图1所示。从图1中可以看出,原工艺采用“恒流变枪”的供氧制度,供氧流量保持在32 000 m³/h,枪位按照“高-低-低”控制。改进工艺采用适当的“变压变枪”制度,总供氧时间缩短了1 min,其下枪吹炼枪位为2.0 m,流量为36 000 m³/h,缓慢降枪至1.3 m,氧气流量降低至32 000 m³/h,以快速搅拌熔池,熔化渣料和废钢。吹炼3 min后,枪位提高到1.5 m,并将氧气流量升高至36 000 m³/h。吹炼过程以炉渣活跃、平稳不喷溅为原则,以尽快形成碱度值为2.7~3.0,流动性良好的炉渣,达到较好的脱磷效果。到达吹炼终点时,压枪至1.1 m,压枪时间30 s以上,以降低渣中T.Fe质量分数。

表 3 渣料加入制度
Table 3 Slag materials addition system

批次	原工艺加入量 /kg			加入时机 /s	改进工艺加入量 /kg				加入时机 /s
	石灰	镁球	轻烧白云石		石灰	镁球	轻烧白云石	钢渣改质剂	
第一批	2 500	1 200	-	开吹 60 稳定	700	500	-	100	开吹 60 稳定
第二批	2 500	-	-	90	700	-	-	-	90
第三批	剩余	-	600	150	700	500	-	100	120
第四批	-	-	-	300	700	-	200	-	150
第五批	-	-	-	420	700	-	-	-	240
第六批	-	-	-	540	700	-	200	-	300
第七批	-	-	-	600	700	-	-	-	360
第八批	-	-	-	-	剩余	-	-	-	-

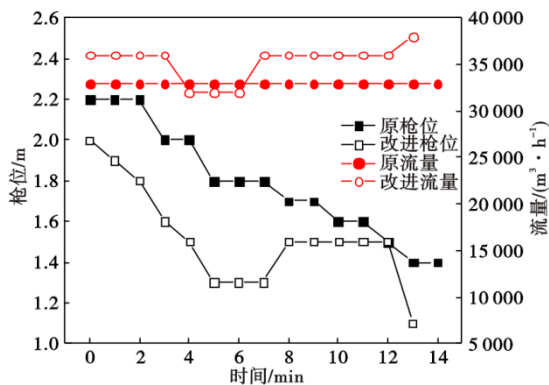


图 1 转炉氧枪枪位及流量变化图

Fig. 1 Converter oxygen lance position and flow change diagram

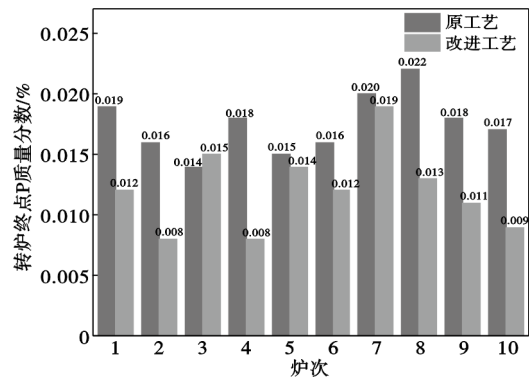


图 2 两种工艺终点磷质量分数对比

Fig. 2 Comparison of mass fractions of endpoint phosphorus between two processes

2.3 取样及检测方案

在冶炼终点时采用副枪取钢样和渣样进行检测分析。所取钢样用直读光谱仪进行成分检测。采用配有能谱分析仪的扫描电子显微镜检测分析渣样中 Ca、Fe、Si、P 等元素赋存状态。使用熔点熔速仪检测渣样熔点,并使用 FactSage 8.1 热力学软件计算熔渣黏度,用于渣系物理性质对脱磷效果影响的分析讨论。

3 试验结果

按造渣和吹氧改进工艺生产试验 10 批次,与原工艺结果对比。

3.1 脱磷效果对比

原工艺与改进工艺冶炼终点磷质量分数对比如图 2 所示。原工艺冶炼终点磷质量分数分布于 0.014%~0.022%,平均值为 0.017 8%,且存在 2 炉终点磷质量分数不能满足一倒出钢要求(一倒出钢 $w[P] < 0.020%$),终点 P 命中率为 80%;改进工艺冶炼终点 $w[P]$ 为 0.008%~0.019%,平均值为 0.012 1%,比原工艺降低了 0.005 7%,且全部满足终点一倒出钢的磷质量分数要求,终点 P 命中率得到显著提高。

原工艺与改进工艺脱磷率对比如图 3 所示。原工艺的终点脱磷率分布于 81.2%~87.72%,平均值为 84.62%;改进工艺的终点脱磷率分布于 80.00%~92.79%,平均值为 88.86%,工艺改进后平均脱磷率提高了 4.24%。

原工艺与改进工艺 lgL_p 对比如图 4 所示,其中渣

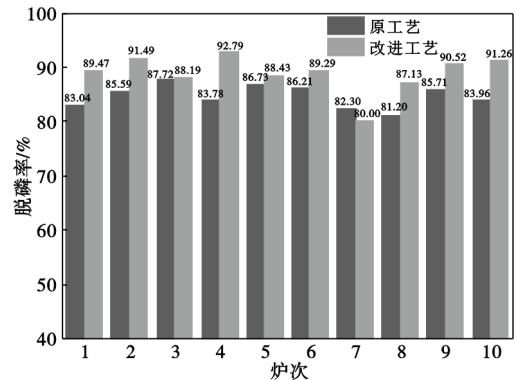


图 3 两种工艺脱磷率对比

Fig. 3 Comparison of dephosphorization rate between two processes

钢间磷分配比 L_p 计算如下: $L_p = \frac{w(P_2O_5)}{w([P])^2}$, $w(P_2O_5)$

为渣中 P_2O_5 质量分数, %; $w[P]$ 为钢液中 P 质量分数, %。从图 4 中可以看出, 原工艺 $\lg L_p$ 主要分布于 5.75~6.29, 平均值为 5.99; 改进工艺后, $\lg L_p$ 分布于 5.93~6.67, 平均值为 6.34, 较原工艺提高了 0.35。

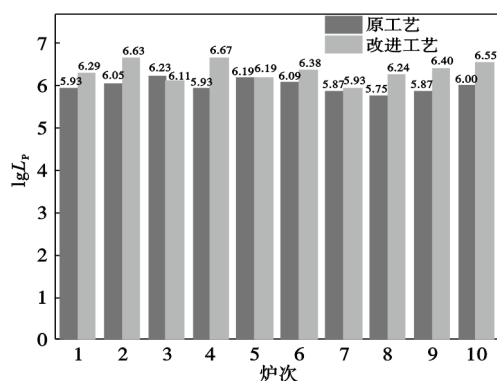


图 4 两种工艺 $\lg L_p$ 对比

Fig. 4 Comparison of $\lg L_p$ between two processes

3.2 物料消耗对比

原工艺与改进工艺的吨钢物料消耗对比见表 4。改进工艺后吨钢石灰消耗平均值为 34.01 kg, 相较于原工艺减少 8.73 kg; 吨钢镁球消耗平均减少 0.35 kg; 吨钢白云石消耗平均减少 1.44 kg; 吨钢增加钢渣改质剂消耗 1.39 kg。改进工艺吨钢总造渣材料消耗平均为 43.95 kg, 较原工艺平均减少 9.13 kg, 实现了少渣冶炼。另外, 改进工艺的吨钢转炉钢铁料消耗平均值为 1 078.02 kg, 相较于原工艺降低 0.6 kg。

3.3 终渣对比

原工艺终渣和改进工艺终渣的元素面分布扫描结果分别如图 5、图 6 所示。表 5 为不同位置的能谱半定量分析结果。从图 5 中各元素分布可以看出, Ca、Si、O 和 P 分布在 2 号灰色区域, 这几种元素以磷酸盐相的形式存在; 从图 6 可以看出, 脱磷渣中加入

表 4 两种工艺物料消耗对比

Table 4 Comparison of material consumption between two processes

工艺	石灰	镁球	白云石	钢渣改质剂	钢铁料消耗
原工艺	均值 42.74	6.12	4.22	-	1 078.62
改进工艺	均值 34.01	5.77	2.78	1.39	1 078.02

Na_2O 后, 含磷区域的磷元素质量分数显著增加, 并且 Na 元素主要存在于此区域, 与表 5 的能谱分析结果一致。 Na_2O 的加入可以提高 P_2O_5 的分布比, 形成 $Ca_2SiO_4 \cdot Ca_2Na_2(PO_4)_2$ 和 Na_3PO_4 等含磷矿相, 从而形成富磷固溶体, 有助于钢渣中磷元素的回收利用^[17-20]。

4 分析与讨论

4.1 改质剂对渣系熔点影响

原工艺与改进工艺转炉前期渣熔点对比如图 7 所示。可以看出, 加入改质剂后, 前期渣熔点为 1 262.9 °C, 相较于原工艺前期渣的熔点降低 18.7 °C。加入 Na_2O 和 Al_2O_3 可以与 CaO 和 SiO_2 结合, 在炉渣中反应生成低熔点化合物, 如 $Na_2Si_2O_5$ 、 $Na_2Ca_2Si_3O_9$ 和 $12CaO \cdot 7Al_2O_3$ 等, 有助于降低渣系熔点, 促进前期快速化渣^[21-23]。前期脱磷能力的提升, 减轻了后期的脱磷压力, 不需要依靠较高碱度炉渣继续脱磷, 有利于降低渣料消耗和缩短冶炼吹氧时间。

原工艺与改进工艺转炉终渣熔点对比如图 8 所示。对比 5 炉次不同工艺冶炼后的终渣熔点, 可以看出, 改进工艺终渣熔点平均值为 1 379.08 °C, 相较于原工艺终渣熔点降低 12.34 °C。终渣熔点降低后, 适当降低出钢温度可以保证渣钢分离效果, 并且较低的出钢温度也可以抑制钢水回磷^[24-25]。

4.2 钢渣改质剂对渣系黏度影响

Na_2O 对 CaO-FeO- SiO_2 - Na_2O 渣系黏度的影响如图 9 所示。可以看出, 随着炉渣中 Na_2O 的增加, 炉渣的黏度不断降低。主要原因是 Na_2O 比较容易解离成金属阳离子 ($2Na^+$) 和阴离子 (O^{2-}), 更加容易向

表 5 终渣能谱分析结果(质量分数)

Table 5 Energy spectrum analysis results of final slag

工艺	位置	Ca	Si	O	Mg	Fe	P	Mn	Ti	Na	Al
原工艺	1	11.30	1.21	28.23	8.83	38.05	0	10.91	0.33	0	1.13
	2	59.45	13.50	20.90	0.03	1.81	1.46	0.33	0.14	0	0.39
	3	36.23	22.53	23.90	5.54	2.65	0.60	3.17	2.88	0	2.50
改进工艺	1	10.98	0.37	29.29	6.02	42.48	0	10.23	0.13	0.05	0.45
	2	38.36	13.61	44.49	0.14	0.92	2.44	0.16	0.25	0.25	0.38
	3	35.98	12.43	47.08	0.26	2.59	0.15	0.58	0.39	0.01	0.53

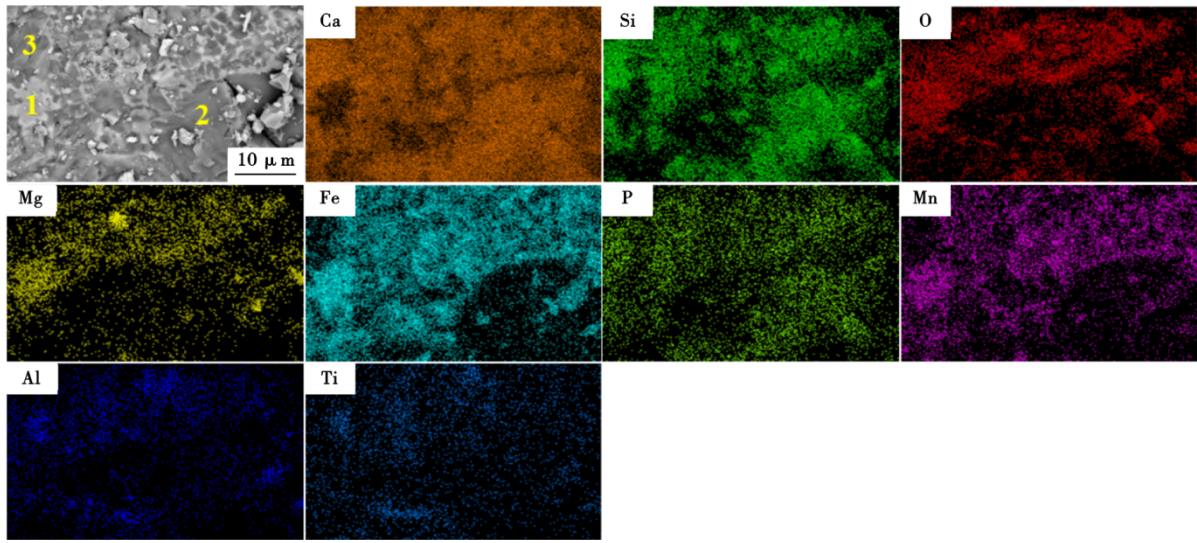


图5 原工艺终渣元素面分布分析
 Fig. 5 Final slag element mapping analysis result of original process

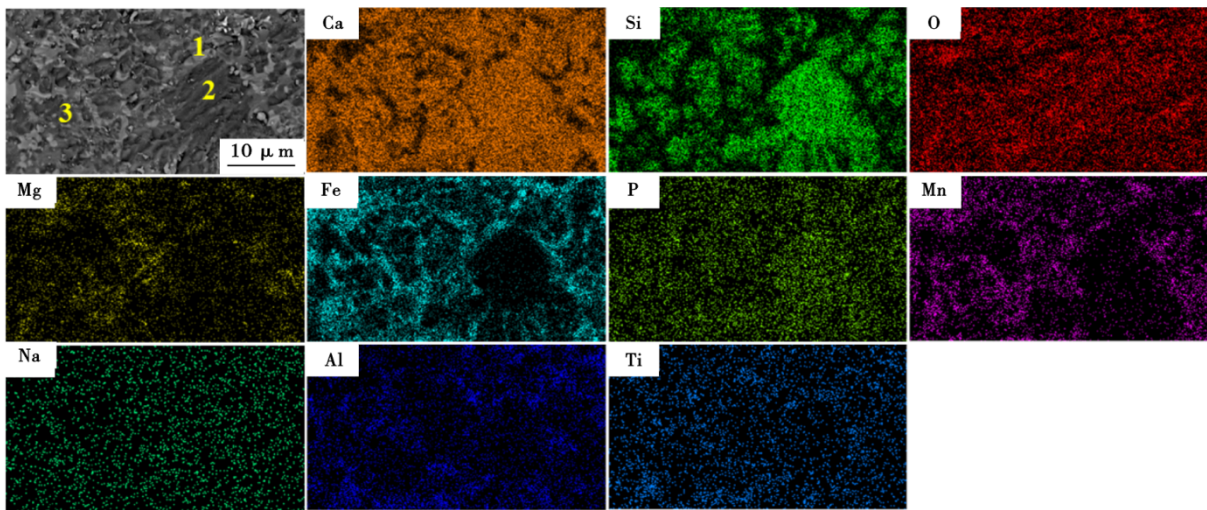


图6 改进工艺终渣元素面分布分析
 Fig. 6 Final slag element mapping analysis result of improved process

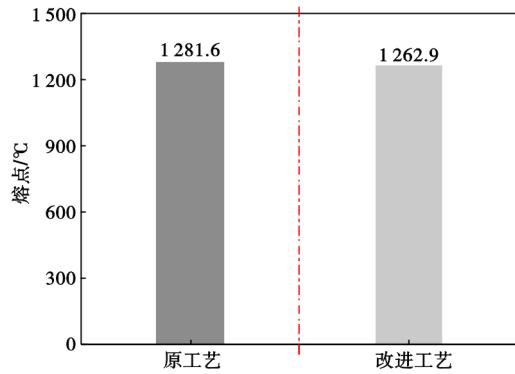


图7 两种工艺前期渣熔点对比

Fig. 7 Comparison of early slag melting point between two processes

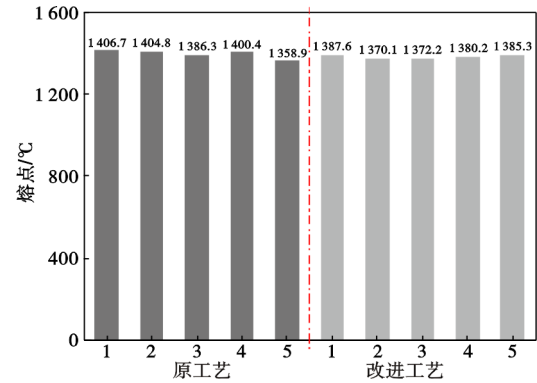


图8 原工艺及改进工艺终渣熔点对比

Fig. 8 Comparison of final slag melting point between two processes

炉渣中提供 O^{2-} 。与 O^{2-} 反应可以改变桥氧的结构,使聚合的硅氧四面体解聚,进而降低炉渣黏度^[26]。碱度为1.5时,炉渣中加入1% Na_2O 时,可以保证在1400~1500℃区间炉渣具有合适的黏度(0.3~0.6 Pa·s),保证其具有良好的流动性,渣钢间的传质能力增强,加快了脱磷反应的进行^[27]。

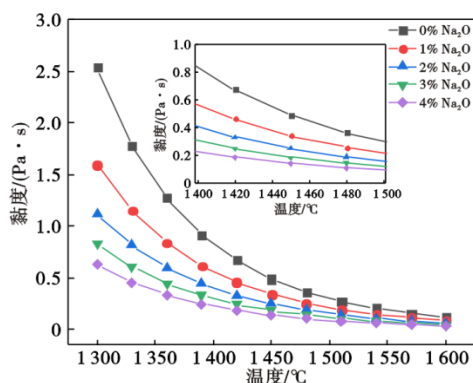


图9 Na_2O 对 $CaO-FeO-SiO_2-Na_2O$ 渣系黏度的影响($R=1.5$)
Fig. 9 Effect of Na_2O on viscosity of $CaO-FeO-SiO_2-Na_2O$ slag system ($R=1.5$)

Al_2O_3 对 $CaO-FeO-SiO_2-Al_2O_3$ 渣系黏度的影响如图10所示。可以看出, Al_2O_3 在0%~6%之间变化时,炉渣的黏度随 Al_2O_3 的增加而逐渐减小,并且在低温时降低较为明显。 $w(Al_2O_3)$ 在3%时对炉渣黏度影响程度较大,超过6%时,对炉渣黏度影响程度降低。当 $w(Al_2O_3) < 10%$ 时,炉渣黏度随 Al_2O_3 增加而降低,在炉渣中加入适量 Al_2O_3 可使炉渣具有良好的流动性^[28-30]。

参考文献

- [1] 胡日荣,于治民,查春和. 中国钢铁国际产能合作现状及国别分析[J]. 中国冶金, 2023, 33(3): 39-44.
- [2] 马进国,许勇伟,云茂帆. 八钢150 t转炉留渣冶炼工艺探究[J]. 新疆钢铁, 2018(4): 11-14.
- [3] Wu W, Meng H D, Liu L, et al. Slag melting characteristic of slag forming and slag splashing for BOF less slag smelting[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2012, 19(7): 20-32.
- [4] 姚娜,兴超. 150 t顶底复吹转炉少渣冶炼工艺实践[J]. 特殊钢, 2017, 38(4): 13-15.
- [5] 王富亮,徐国义,李超,等. 鞍钢260 t转炉少渣冶炼实践[J]. 鞍钢技术, 2013(4): 43-45+58.
- [6] 富强,郭晓春,王志强,等. 120 t转炉少渣冶炼工艺研究和实践[J]. 炼钢, 2017, 33(6): 5-8.
- [7] Pak J J, Fruehan R J. The effect of Na_2O on dephosphorization by CaO -based steelmaking slags[J]. Metallurgical Transactions B, 1991, 22(1): 39-46.
- [8] 刁江. Al_2O_3 和 Na_2O 对高磷铁水脱磷的影响[J]. 钢铁研究学

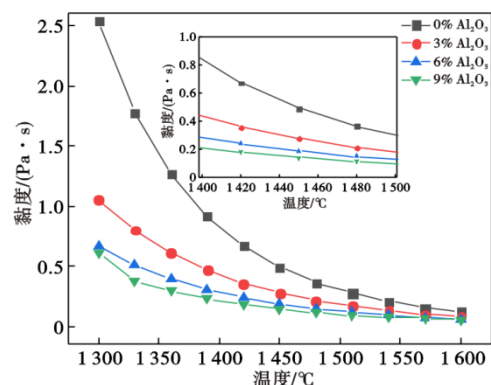


图10 Al_2O_3 对 $CaO-FeO-SiO_2-Al_2O_3$ 渣系黏度的影响($R=1.5$)
Fig. 10 Effect of Al_2O_3 on viscosity of $CaO-FeO-SiO_2-Al_2O_3$ slag system ($R=1.5$)

5 结论

(1)改进工艺的终点磷命中率达到100%,终点磷质量分数平均值为0.012 1%,脱磷率平均值为88.86%, lgL_p 平均值为6.34,与原冶炼工艺相比,终点磷质量分数降低0.005 7%,脱磷率提高4.24%, lgL_p 提高0.35。

(2)改进工艺的吨钢石灰平均消耗和总造渣物料平均消耗分别为34.01 kg和43.95 kg,与原工艺相比,分别降低8.73 kg和9.13 kg,同时钢铁料消耗降低0.6 kg/t(钢)。

(3)加入钢渣改质剂后,转炉前期渣和终渣熔点均有所降低,并且前期炉渣黏度也随着炉渣中 Na_2O 和 Al_2O_3 增大而降低,可促进渣铁间的传质过程,有利于渣铁间脱磷反应的进行。

报, 2013, 25(2): 9-13.

- [9] Moriya T, Fujii M. Dephosphorization and desulfurization of molten pig iron by Na_2CO_3 [J]. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1981, 21(10): 732-741.
- [10] Maddocks W R, Turkdogan E T. The effect of sodium oxide additions to steelmaking slags dephosphorization of steel by soda-slags[J]. Journal of the Iron and Steel Institute, 1949, 162(3): 249-264.
- [11] Oelsen W. The dephosphorization and desulfurization of high-carbon iron melts with the production of water-soluble high phosphorus slags[J]. Arch Eisenhüttenw, 1965, 36(12): 861-871.
- [12] Jiang L, Diao J A, Yan X M, et al. Effect of Al_2O_3 on enrichment of phosphorus in hot metal dephosphorization slag[J]. ISIJ International, 2015, 55(3): 564-569.
- [13] Xie S L, Wang W L, Pan Z H, et al. Effect of Al_2O_3 on the melting, viscosity, and phosphorus distribution of $CaO-SiO_2-Fe_2O_3-P_2O_5$ slag system[J]. Steel Research International, 2018, 89

- (7): 1700516.
- [14] 颜慧成, 范佳, 张凯, 等. Q355 系列及低合金高强度钢板坯凝固特征及其对中板探伤缺陷的影响与工艺改进[J]. 特殊钢, 2021, 42(6): 58-60.
- [15] 孙傲, 刘志伟, 张瑞琦, 等. 高耐候结构用 Q355GNH 钢的开发与性能研究[J]. 特殊钢, 2022, 43(1): 53-56.
- [16] 黄利, 董磊, 徐龙, 等. 耐候结构用热轧钢带 Q355NHC 研制与开发[J]. 特殊钢, 2022, 43(1): 66-68.
- [17] Su C, Lv N N, Yang J X, et al. Effect of high Na_2O addition on distribution of phosphorus in low-basicity converter slag[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2019, 26(1): 42-51.
- [18] 何赛, 刘亚琴, 林路, 等. Na_2O 对 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5$ 渣中磷的富集行为影响[J]. 钢铁钒钛, 2022, 43(2): 140-145.
- [19] Yu K, Zhang Y L, Li F S, et al. Effect of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ on enrichment of phosphorus in P-bearing steelmaking slag[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2019, 26(8): 796-805.
- [20] Du C M, Lv N N, Su C, et al. Distribution of P_2O_5 between solid solution and liquid phase in dephosphorization slag of $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO-P}_2\text{O}_5\text{-Na}_2\text{O}$ system[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2019, 26(11): 1162-1170.
- [21] Van Niekerk W H, Dippenaar R J. Thermodynamic aspects of Na_2O and CaF_2 containing lime-based slags used for the desulphurization of hot-metal[J]. ISIJ International, 1993, 33(1): 59-65.
- [22] Wang Z J, Sohn I. Effect of the $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ mass ratio on the crystallization behavior of $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$ slags using confocal laser scanning microscopy[J]. Ceramics International, 2018, 44(16): 19268-19277.
- [23] 徐冉, 宋波, 毛璟红. $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-TiO}_2$ 钢渣体系熔化性能[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(11): 1422-1427.
- [24] 王星, 胡显堂, 危尚好, 等. 转炉冶炼低磷洁净钢的工艺开发和实践[J]. 钢铁, 2022, 57(11): 53-63.
- [25] 孟华栋, 杨勇, 姚同路, 等. 复吹转炉“留渣-双渣”脱磷工艺试验[J]. 钢铁研究学报, 2022, 34(7): 622-628.
- [26] Zhang Z T, Wen G H, Tang P, et al. The influence of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ratio on the viscosity of mold fluxes[J]. ISIJ International, 2008, 48(6): 739-746.
- [27] Sukenaga S, Saito N, Kawakami K, et al. Viscosities of $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-(R2O or RO)}$ melts[J]. ISIJ International, 2006, 46(3): 352-358.
- [28] Park J H, Min D J, Song H S. Amphoteric behavior of alumina in viscous flow and structure of $\text{CaO-SiO}_2\text{(-MgO)-Al}_2\text{O}_3$ slags[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2004, 35(2): 269-275.
- [29] 耿彬. 基于少渣冶炼的转炉冶炼渣系开发[D]. 沈阳: 东北大学, 2023.
- [30] Geng B, Zhan D P, Jiang Z H, et al. Effect of $\text{CaO-MgO-FeO-SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ slag system on converter dephosphorization[J]. Metals, 2023, 13(5): 844.