

降本增效：大型顶底复吹转炉 工艺优化

Cost Reduction and Efficiency Improvement: Process Optimization of Large Top-bottom Double-blown Converter

供稿|王鹏飞 / WANG Pengfei

内
容
导
读

针对 210 t 大型转炉，通过建立水力学模型与三维数值模拟，系统研究了高强度顶底复吹冶炼工艺。在固定供氧量的条件下，重点探究了氧枪高度、底吹孔布置方式及底吹气体流量对熔池搅拌效果的影响。研究发现，当氧枪距熔池 1800 mm、底吹孔采用 6 孔（2，3，4，5，6，7）布置、底吹气体流量为 530 m³/h 时，熔池混合最为均匀，冶炼时间最短仅为 12 min。该优化工艺在实际应用中表现出显著效果：钢水碳氧积降低，终点磷含量下降，吨钢石灰消耗减少，脱氧合金用量大幅降低，每吨钢节省脱氧成本约 10.04 元。同时，钢水中氧化铝夹杂物明显减少，钢水纯净度得到提升。

转炉冶炼可分为顶吹、底吹、顶底复吹。其中，顶底复吹结合了顶吹和底吹的优点，已成为大中型转炉的主要冶炼方式。顶吹与底吹的配合效果主要取决于顶吹流量、氧枪枪位、底吹布置、底吹强度等参数^[1]。

国内外研究者对顶底复吹转炉进行了水力学模型实验研究。梁福斌等^[2]通过 50 t 顶底复吹转炉水力学模型实验，发现当模型枪位在 120~210 mm（实际枪位为 1000~1560 mm）、模型底吹流量 0.38 m³/h（实际底吹流量控制在 146~190 m³/h）时，熔池混匀时间短，吹炼时喷溅量少，实际纯吹氧时间为 12~14 min。邹虎等^[3]通过 100 t 顶底复吹转炉水力学模型研究发现，在顶底复吹条件下，顶吹流量对熔池混匀效果影响最大；对于熔池冲击直径和冲击

深度，顶吹流量和枪位起主要作用，底吹流量影响较小。

随着转炉大型化、智能化技术的不断发展，实现大型转炉的低成本、高洁净炼钢已成为重要目标。基于此，本文以山东钢铁集团日照有限公司 210 t 顶底复吹转炉为原型，建立了 210 t 大型顶底复吹转炉水力学模型并进行三维数值模拟，研究高强度顶底复吹冶炼工艺。

工艺技术参数

铁水条件

山东钢铁集团日照有限公司拥有 2 座 5100 m³ 特大型高炉，高炉利用系数为 2.23 t/(m³·d)。通过改

作者单位：山东钢铁集团日照有限公司，山东 日照 276800

变传统鱼雷罐车运输方式,采用汽车运输“一罐到底”工艺,减少了倒罐等工序,缩短了工艺流程,降低了铁水温降及损耗。高炉采用专家系统,实现了智能化控制,可对热指数、热负荷、炉料利用、成分、产量等进行全方面系统分析诊断,5100 m³高炉铁水温度及化学成分详见表1。采用低硅冶炼方法,降低了燃料消耗,提升了炉温稳定率,具体指标见表2。

表1 5100 m³高炉铁水温度及化学成分

温度/℃	化学成分(质量分数)/%				
	C	Si	Mn	P	S
1320~1450	4.01~4.83	0.11~0.65	0.23~0.43	0.089~0.126	0.002~0.075

表2 5100 m³高炉指标

利用系数/ [t/(m ³ ·d)]	焦比/ (kg/t)	煤比/ (kg/t)	风量/ (m ³ /min)	富氧 量/%	燃料比/ (kg/t)
2.23	341	485	7312	3.9	483

转炉主要技术参数

炼钢厂配套建设4座210 t顶底复吹转炉,有效容积203 m³,钢水液面高度1598 mm,底吹系统采用8孔透气砖布置,并采用自动出钢滑板挡渣工艺及干法除尘配套环保系统。同时,采用固定式炉衬测厚仪实时监控炉衬侵蚀情况,在实现环保A级炼钢企业标准的同时,将炉衬有效寿命提升至12000炉。转炉主要技术参数见表3。

表3 转炉主要技术参数

熔池直径/mm	熔池深度/mm	单位容量熔池 表面积/(m ² /t)	公称容量/t	有效容积/m ³	炉容比	炉口直径/mm	转炉有效 内高/mm	转炉出钢 量/t
6100	1750	0.224	210	203	0.97	3400	9500	230

注:炉容比=有效容积÷公称容量。

氧枪喷头技术参数

氧枪喷头采用“5+1”孔拉瓦尔结构,布置方式为中心1孔、周边5孔等距分布。每座转炉配置2支

氧枪,分别为冶炼枪和溅渣枪,根据工艺要求交替使用。氧气流量为48000~52000 m³/h,供氧强度为3.5~4.0 m³/(t·min)。“5+1”孔氧枪喷头的技术参数见表4。

表4 新型“5+1”孔氧枪喷头技术参数

氧枪喷头	马赫数	喉口直径/mm	出口直径/mm	喉口段长度/mm	扩张段长度/mm	喷孔扩张角/(°)	与中心夹角/(°)
中心孔	2.05	44.9	59.6	30	80	6	—
圆周孔	2.06	46.2	61.6	25	106	6	15

转炉水力学模型实验

底吹动能是影响转炉熔池化学反应的重要因素,其大小由底吹流量和底吹开孔布置方式决定。底吹流量和底吹开孔布置方式利用率高,则底吹动能强;反之则弱。本研究通过210 t顶底复吹转炉水力学模型,对氧枪和底吹参数进行工艺优化。

水力学实验在强供氧、恒定流量条件下,研究吹炼氧枪枪位、底吹透气孔布置、底吹强度对熔池强搅拌状态的影响。通过对比恒氧枪流量下不同底吹强度的钢液流场,确定底吹透气砖的最佳流量、布置方式和氧枪高度,分析强供氧模式对系统的影响,从而确定最佳的高强度顶底复吹工艺。

实验原理及方案

实验以210 t转炉为基础,建立几何比为10:1的物理模型。因钢液与水的质量不同,需确保决定性相似准数相等,故使模型的修正弗劳德(Froude)准数(F'_{rw})与原型的修正Froude准数(F'_{rs})^[4]相等:

$$F'_{rw} = F'_{rs} \quad (1)$$

即:

$$\frac{\mu_w^2}{gd_w} \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w - \rho_a} = \frac{\mu_s^2}{gd_s} \cdot \frac{\rho_g}{\rho_s - \rho_g} \quad (2)$$

可得:

$$Q_w = M^{\frac{5}{2}} \left[\left(\frac{\rho_g}{\rho_a} \cdot \frac{\rho_w - \rho_a}{\rho_s - \rho_g} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \cdot Q_s \quad (3)$$

式中: Q_w 、 Q_s 分别为模型与原型的气体流量, m^3/h ; M 为模型几何比, $1:10$; μ_w 、 μ_s 分别为模型与原型的气体流速, m/s ; d_w 、 d_s 分别为模型与原型喷枪的出口直径, mm ; ρ_w 为实验室所用液体水的密度, 取 $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; ρ_s 为原型的液体密度 (1600°C 钢液), 取 $7.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; ρ_a 为实验室所用空气的密度, 取 1.20 kg/m^3 ; ρ_g 为原型的气体密度, 原型气体为氧气时, 取 1.43 kg/m^3 , 原型气体为氮气时, 取 1.17 kg/m^3 。

计算模拟时顶吹供氧流量时, ρ_g 取 1.43 kg/m^3 , 将上述数据带入式 (3), 得到实际氧枪气体流量与模拟氧枪气体流量关系如式 (4) 所示:

$$Q_w = \left(\frac{1}{10} \right)^{\frac{5}{2}} \times \left(\frac{1.43}{1.20} \times \frac{1.0 \times 10^3 - 1.20}{7.0 \times 10^3 - 1.43} \right)^{\frac{1}{2}} Q_s = 1.3041 \times 10^{-3} Q_s \quad (4)$$

取实际氧枪气体流量 Q_s 为 $4.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$, 则计算得出模型氧枪气体流量 Q_w 为 $62.60 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

210 t 顶底复吹转炉底吹气体为氮气, 此时 ρ_g 取 1.17 kg/m^3 , 水模拟实验采用空气做底吹气体。将相关数据带入式 (3), 得实际底吹气体流量与对应模型设置底吹气体流量关系如式 (5) 所示:

$$Q_w = \left(\frac{1}{10} \right)^{\frac{5}{2}} \times \left(\frac{1.17}{1.20} \times \frac{1.0 \times 10^3 - 1.20}{7.0 \times 10^3 - 1.17} \right)^{\frac{1}{2}} Q_s = 1.1796 \times 10^{-3} Q_s \quad (5)$$

取实际底吹气体流量分别为 150、240、320、480、530 m^3/h , 则计算得出对应模型底吹气体流量为 0.18、0.28、0.38、0.57、0.63 m^3/h 。

210 t 顶底复吹转炉水力学模型因素及参数见表 5, 氧枪流量原型和模型保持 4.8×10^4 和 $62.60 \text{ m}^3/\text{h}$ 不变, 8 孔底吹孔分布图见图 1。

实验工艺及结果

通过水力学模型, 对氧枪枪位、底吹布置、底吹流量进行模型模拟实验。采用正交实验法, 对比

表 5 210 t 转炉顶底复吹水力学模型实验因素水平参数

水平	氧枪枪位/mm		底吹布置	底吹流量/(m^3/h)	
	原型	模型		原型	模型
1	1600	160	4孔(1, 3, 6, 8)	150	0.18
2	1800	180	4孔(2, 3, 6, 7)	240	0.28
3	2000	200	6孔(1, 2, 3, 6, 7, 8)	320	0.38
4	2200	220	6孔(2, 3, 4, 5, 6, 7)	480	0.57
5	2400	240	8孔(1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)	530	0.63

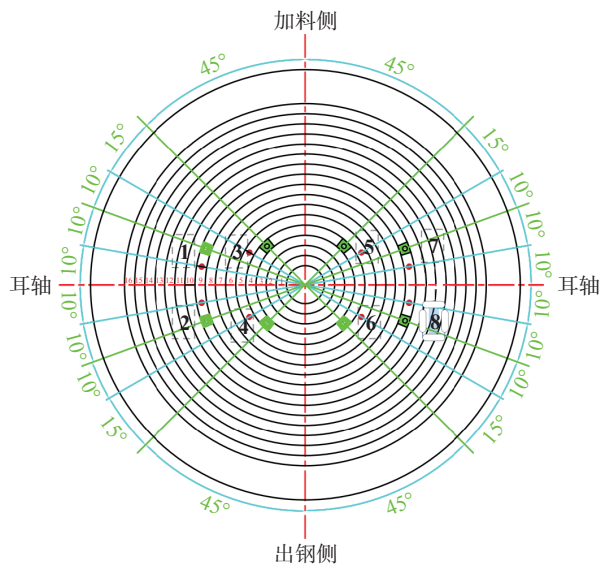


图 1 底吹孔分布图

复吹转炉熔池流场最佳的混匀效果, 相应正交实验表见表 6。

表 6 正交实验表

组合	氧枪枪位/mm	底吹布置	底吹流量/(m^3/h)	均混时间/s
1	160	4孔(1, 3, 6, 8)	0.18	51.1
2	160	4孔(2, 3, 6, 7)	0.28	44.6
3	160	6孔(1, 2, 3, 6, 7, 8)	0.38	41.3
4	160	6孔(2, 3, 4, 5, 6, 7)	0.57	26.8
5	160	8孔(1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)	0.63	39.4
6	180	4孔(1, 3, 6, 8)	0.28	52.3
7	180	4孔(2, 3, 6, 7)	0.38	47.1
8	180	6孔(1, 2, 3, 6, 7, 8)	0.57	35.6
9	180	6孔(2, 3, 4, 5, 6, 7)	0.63	23.2
10	180	8孔(1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)	0.18	40.3
11	200	4孔(1, 3, 6, 8)	0.38	53.1
12	200	4孔(2, 3, 6, 7)	0.57	48.7
13	200	6孔(1, 2, 3, 6, 7, 8)	0.63	31.4
14	200	6孔(2, 3, 4, 5, 6, 7)	0.18	38.6
15	200	8孔(1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)	0.28	36.3
16	220	4孔(1, 3, 6, 8)	0.57	49.2
17	220	4孔(2, 3, 6, 7)	0.63	46.1
18	220	6孔(1, 2, 3, 6, 7, 8)	0.18	48.2
19	220	6孔(2, 3, 4, 5, 6, 7)	0.28	34.3
20	220	8孔(1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)	0.38	38.2
21	240	4孔(1, 3, 6, 8)	0.63	47.2
22	240	4孔(2, 3, 6, 7)	0.18	46.3
23	240	6孔(1, 2, 3, 6, 7, 8)	0.28	44.2
24	240	6孔(2, 3, 4, 5, 6, 7)	0.38	33.2
25	240	8孔(1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)	0.57	36.1

正交实验各因素极差分析见表 7。表中, K 值为每个因素在各个水平下的指标总和, R 值为极差, 反映了该因素对结果的影响幅度。如表 7 所示, 在恒气体流量 $62.60 \text{ m}^3/\text{h}$ 条件下, 根据正交实验结果和极差分析, 底吹布置>底吹流量>氧枪枪位, 最优方案为氧枪距熔池高度(氧枪枪位) h 为 180 mm 、底吹布置 6 孔 (2, 3, 4, 5, 6, 7)、底吹气体流量 $0.63 \text{ m}^3/\text{h}$ 。该方案下平均混匀时间为 23.2 s , 为实验条件下的最短均混时间。

三维数值模拟

氧枪枪位采用三维数值模拟分析, 揭示钢液湍

表 7 正交实验各因素极差分析

指标	氧枪枪位/mm	底吹布置	底吹流量/(m^3/h)
K_1	203.2	252.9	224.5
K_2	198.5	232.8	211.7
K_3	208.1	200.7	212.9
K_4	216	156.1	196.4
K_5	207	190.3	187.3
R	17.5	96.8	37.2

流过程中的流动情况, 对熔池内钢液速度分布、液面扰动特征进行模拟预测。对在底吹 6 孔 (2, 3, 4, 5, 6, 7) 条件下氧枪距熔池高度 2200 、 1800 、 1600 mm 时熔池流场的状态进行模拟, 模拟情况如图 2 所示。

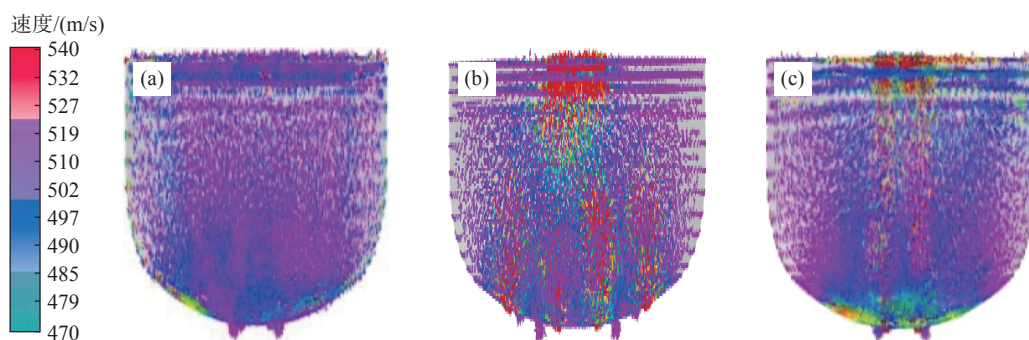


图 2 不同氧枪枪位顶底复吹转炉流场分布图: (a) 2200 mm ; (b) 1800 mm ; (c) 1600 mm

随着氧枪枪位降低, 射流冲击面积逐渐减小。氧枪距熔池高度 2200 mm 时, 冲击中心半径为 623 mm 、冲击深度为 944 mm ; 氧枪距熔池高度 1800 mm 时, 冲击中心半径为 568 mm 、冲击深度为 1039 mm ; 氧枪距熔池高度 1600 mm 时, 冲击中心半径为 496 mm 、冲击深度为 1100 mm 。从图中可以看出, 2200 mm 枪位时转炉底部存在未反应区, 1800 mm 枪位时气流对流搅拌充分, 1600 mm 枪位较低导致对流紊乱不均。氧枪距熔池高度 1800 mm 时的氧气射流与 6 孔 (2, 3, 4, 5, 6, 7) 底吹射流的搅拌效果最佳。

冶金效果分析

210 t 转炉复吹工艺验证

通过现场实测, 对比分析了多种底吹布置方式 (如 4 孔 (1, 3, 6, 8)、4 孔 (2, 3, 6, 7)、6 孔 (1, 2, 3, 6, 7, 8)、6 孔 (2, 3, 4, 5, 6, 7)、8 孔 (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)) 以

及不同的氧枪流量、底吹流量。结果表明, 在氧枪恒氧气气体流量 $4.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 、氧枪距熔池高度 1800 mm 、底吹开孔位置 6 孔 (2, 3, 4, 5, 6, 7)、底吹气体流量 $530 \text{ m}^3/\text{h}$ 的条件下, 实际均混时间最短, 为 12 min , 其他参数组合的均混时间在 $13 \sim 17 \text{ min}$ 。

水力模型正交实验、三维数值模拟结果与现场实测数据一致, 表明 210 t 转炉在实际取氧枪恒氧气气体流量 $4.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 、氧枪距熔池高度 1800 mm 、底吹开孔位置 6 孔 (2, 3, 4, 5, 6, 7)、底吹气体流量 $530 \text{ m}^3/\text{h}$ 的方案, 可实现高强度顶底复吹条件下的最短均混时间。

转炉碳氧积及钢液夹杂物分析

原工艺氧枪恒氧气气体流量 $4.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 、氧枪距熔池高度 2200 mm 、底吹开孔位置 8 孔 (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)、底吹气体流量 $320 \text{ m}^3/\text{h}$ 。图 3 为原工艺与高强度顶底复吹工艺碳氧积对比情况。原工艺冶炼的碳氧积范围为 $0.0023 \sim 0.0032$, 优化后工艺的碳氧积

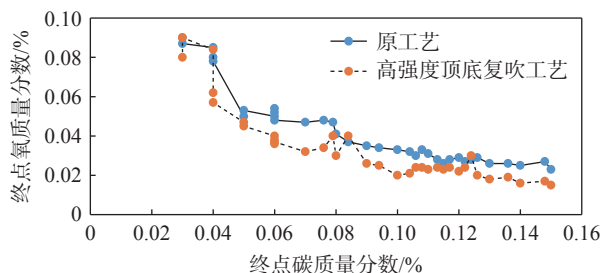
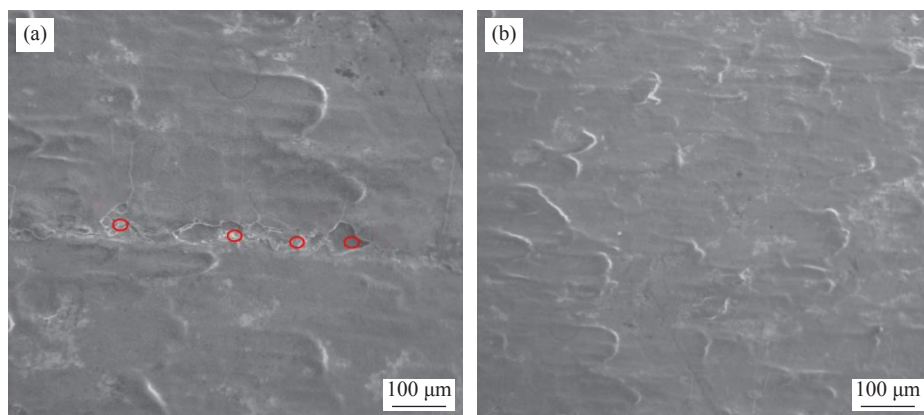


图3 原工艺与高强度顶底复吹工艺碳氧积对比

范围降至0.0018~0.0024。对实验数据进行统计学分析，原工艺冶炼碳氧积的方差为 3.8×10^{-4} ，优化后的方差为 3.6×10^{-4} ，稳定性更高。优化后的高强度顶底复吹工艺使熔池搅拌能力增强，钢渣传质效果改

善，动力学条件充足，脱碳速度加快，终点过氧化情况得到控制，脱氧合金用量减少。转炉纯冶炼时间约为12 min，平均冶炼时间每炉缩短4 min，原工艺铝锰铁平均吨钢消耗为2.63 kg，优化后铝锰铁平均吨钢消耗为1.73 kg，吨钢节约脱氧成本约10.04元。

图4为原工艺与高强度顶底复吹工艺夹杂物改善情况。采用原工艺冶炼时，钢液中 $[\text{Al}_2\text{O}_3]$ 夹杂物（如4(a)图中圆圈标注）含量较高，易造成铸坯裂纹；采用优化后的高强度顶底复吹工艺后，钢水纯净度提高，钢液中 $[\text{Al}_2\text{O}_3]$ 夹杂物减少，裂纹缺陷明显减少。

图4 不同试样中 $[\text{Al}_2\text{O}_3]$ 夹杂物情况：(a) 原工艺；(b) 高强度顶底复吹工艺

钢水磷含量、熔剂消耗量分析

图5(a)为转炉吹炼终点磷含量分布图。原工艺熔池搅拌不充分，脱磷反应不充分，转炉终点磷质量分数偏高，为0.018%~0.030%；采用高强度顶底复吹工艺后，在顶底强吹配合下，熔池化学反应充分，钢液脱磷效果改善，终点磷质量分数降

至0.008%~0.020%。该工艺脱磷效果可达到双渣冶炼效果，同时减少熔剂消耗，避免双渣导致的生产节奏缓慢。图5(b)为两种工艺石灰用量对比，采用高强度顶底复吹工艺后，吨钢石灰用量由原工艺32 kg降至27 kg，取得了低成本高洁净炼钢的良好效果。

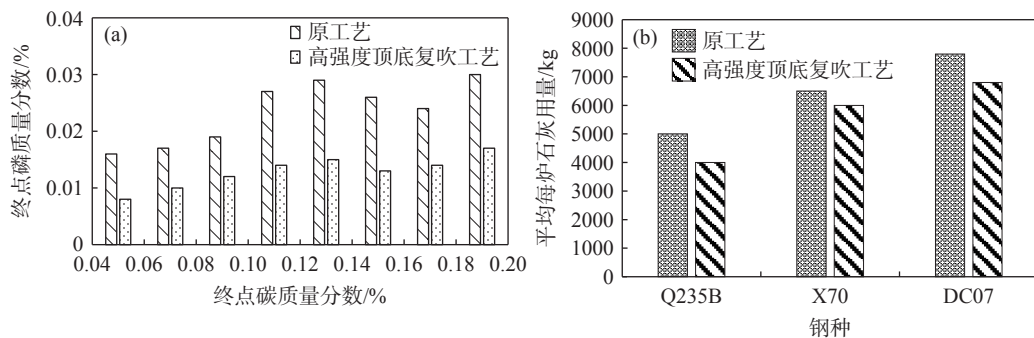


图5 (a) 转炉吹炼终点磷含量分布；(b) 各钢种石灰消耗量分布

结束语

通过对 210 t 转炉水力学模型和三维数值流场模拟, 在恒氧气流量 $4.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 条件下, 确定最优工艺参数为: 氧枪距熔池高度 1800 mm、底吹孔位置 6 孔 (2, 3, 4, 5, 6, 7)、底吹气体流量 $530 \text{ m}^3/\text{h}$ 。该组合下获得 210 t 转炉高强度顶底复吹的最短均混时间, 实际纯吹氧时间为 12 min。通过 210 t 转炉实际冶炼, 碳氧积有效降至 0.0018~0.0024, 终点过氧化改善, 脱氧合金消耗减少, 脱氧合金平均吨钢消耗由 2.63 kg 降至 1.73 kg, 节约脱氧成本约 10.04 元, 较 100 t 转炉增产增效效果更优, 相应钢液中 $[\text{Al}_2\text{O}_3]$ 夹杂物含量降低, 钢水纯净度得到提高。转炉终点磷质量分数降至 0.008%~0.020%, 脱磷效果可达到双渣效果, 同时减少熔剂消耗, 避免生产节奏缓慢。吨钢石灰用量由原工艺 32 kg 降至

27 kg, 实现低成本高洁净炼钢。

参考文献

- [1] 王鹏飞. 210 t 转炉“5+1”孔氧枪喷头创新设计与应用. 金属世界, 2024(6): 56
- [2] 梁福斌, 果晶晶, 陈健, 等. 50t 顶底复吹转炉的水力学模型实验研究. 铸造技术, 2008, 30(7): 877
- [3] 邹虎, 刘润藻, 李文双, 等. 100 t 顶底复吹转炉水力学模型研究. 河南冶金, 2013, 21(2): 9
- [4] Singh V, Kumar J, Bhanu C, et al. Optimisation of the bottom tuyeres configuration for the BOF vessel using physical and mathematical modelling. *ISIJ Int*, 2007, 47(11): 1605

作者简介: 王鹏飞 (1993—), 男, 内蒙古乌兰察布人, 冶金工程师, 2017 年毕业于内蒙古科技大学冶金工程专业, 主要研究方向: 钢铁冶金。通信地址: 山东省日照市东港区临钢路 1 号山钢日照有限公司办公楼; E-mail: 2261842140@qq.com。