

集装箱钢高磷出钢技术研究与实践

李超*, 黄岩, 尚德义, 李广帮, 李文博, 冉茂铎

鞍钢股份鲅鱼圈钢铁分公司, 营口 115007

Research and Practice of High Phosphorus Tapping Steel Technology of Container Steel

Li Chao*, Huang Yan, Shang Deyi, Li Guangbang, Li Wenbo, Ran Maoduo

Bayuquan Iron&Steel Subsidiary of Angang Steel Co., Ltd., Yingkou, 115007, China

1. 前言

集装箱钢是耐候钢的一种, 钢中磷作为钢中常见元素, 在大多钢种中为有害的, 容易造成“冷脆”质量问题^[1], 但集装箱钢要求一定的磷含量来提高其耐腐蚀性能^[2], 所以生产集装箱钢转炉冶炼高磷技术成为生产此类钢的关键技术之一, 学者进行了一系列相关技术研究, 如: 马钢利用少渣等措施冶炼高磷类钢种, 取得较好效果^[3]; 梅钢采用提高供氧强度方式, 缩短了熔炼时间^[4]; 鞍钢采用熔剂替代实现集装箱磷含量 0.050%以上^[5]; 张思维, 通过碱度控制等工艺, 实现终点磷含量 0.042%以上^[6], 鲅鱼圈炼钢部针对集装箱高磷钢进行了系统攻关, 取得了一些技术进步^[7], 本文重点对集装箱高磷钢种的转炉高磷出钢技术理论进行分析, 通过试验取得合理技术参数, 探索磷含量一次合格, 同时将相关结论应用于未来生产实践。

2. 基本情况

钢种要求。由于需要较好的耐腐蚀性, 集装箱钢中需要一定的 Cu、P、Cr 成分含量^[15], 鲅鱼圈炼钢在设计此牌号钢种成分也考虑此因素, 另外根据钢种过热度、炉机对应、浇铸参数及精炼工况等情况设计转炉终点温度要求, 具体要求如表 1。

表 1 集装箱钢部分成分与温度要求表
Table 1 Partial composition and temperature requirements table of container Steel

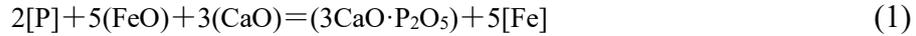
钢牌号	部分成分要求					转炉温度要求, °C
	C, %	P, %	Cu, %	Cr, %	S, %	
集装箱	0.055-0.14	0.070-0.90	0.020-0.040	0.025-0.045	<0.020	1675-1690

集装箱钢的高磷出钢工艺控制关键在转炉工序, 转炉常规冶炼中大多是以脱磷为目的, 脱磷技术成熟稳定, 但对于高磷出钢技术缺乏系统研究, 影响磷含量的因素多, 如何合理准确满足好各个元素成分、温度等终点标准要求, 控制难度较大, 与高磷出钢技术相关工况情况如表 2

3. 高磷出钢理论分析

转炉冶炼中的脱磷反应主要在渣-钢界面进行, 反应方程式如式 (1) 所示, 磷分配比如公式 (2), 其中 L_p 为磷分配系数, $X_{(P_2O_5)}$ 为熔渣的磷含量, $[\% P]$ 为钢液中磷含量, k 为平衡常数, $a_{(CaO)}$ 为 CaO 活度, $a_{(FeO)}$ 为 FeO 活度, 脱磷反应为放热反应, 根据热力学原理, 影响脱磷的主要因素为 FeO 含量、CaO 含量及温度, 高温控制、低 FeO 含量、低 CaO 含量有利于高磷出钢^[8-10], 根据反应式 (1), 渣中 P_2O_5 含

量高有利于反应向左侧进行，因此在冶炼中适当减少总造渣重量，提高 P_2O_5 百分比也能起到高磷出钢作用。



$$L_p = x (P_2O_5) / [\%P] = ka^3(CaO)a^5(FeO) \quad (2)$$

4. 试验与分析

根据上述理论分析的结论，集装箱高磷出钢工艺主要研究的试验生产参数包括：温度、FeO 含量、CaO 含量及渣量，试验方案围绕四个因素进行开展，试验中使用铁水条件：平均 Si 含量 0.4%，平均 P 含量 0.115%，平均 C 含量 4.5%，平均铁水温度 1300℃。

4.1. 温度影响

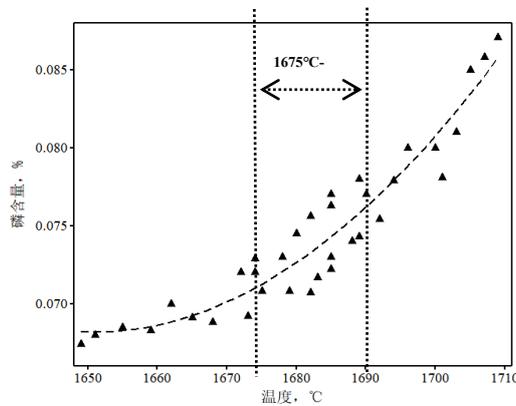


图 1 温度与钢中磷含量关系图

Fig.1 Relationship diagram between temperature and phosphorus content in steel

高温利于高磷出钢，但温度过高会产生侵蚀炉衬等问题，试验中，控制终渣碱度 1.5 ± 0.1 范围，总造渣重量 7 ± 0.2 吨范围，终点氧含量 400 ± 10 ppm 范围，终点温度选择控制在 1650°C - 1710°C 范围进行研究更有利于指导生产，进行 35 炉次试验，磷含量如图 1 所示：钢中磷随着温度升高逐渐增加， 1670°C 之前磷的增加较平缓，随着温度升高至 1710°C 之前，磷含量增加有加快趋势；结合表 1 中集装箱钢种的温度、磷含量要求及图 2 曲线，温度控制 1675°C 以上能够满足磷含量 0.070% - 0.090% 的要求范围，但考虑 1670°C 温度只能达到成分要求下限左右，生产中应适当将温度控制 1680°C 以上来保证成分合格。

4.2. 碱度影响

低碱度利于高磷出钢，但过低碱度会产生磷超标问题，试验 55 炉，终点温度 $1680 \pm 3^\circ\text{C}$ 范围，总造渣重量 7 ± 0.2 吨，终点氧含量 400 ± 10 ppm 范围，转炉终渣碱度 0.5-3.0，对终点磷含量化验分析，结果如图 2 所示：钢中磷含量随着碱度升高逐渐降低；根据数据统计并结合表 1 磷含量要求，在生产中控制碱度范围在 1.2-2.0 之内，磷含量高会造成质量事故，实际生产中必须保证碱度 > 1.2 。

4.3. 渣量影响

少渣利于高磷出钢，但过少渣量存在磷含量超标风险，试验 45 炉进行统计，终点温度控制为 $1680 \pm 3^\circ\text{C}$ 范围，控制转炉终渣碱度 1.5 ± 0.1 范围，终点氧含量按 400 ± 10 ppm 范围控制，对终点钢中磷含量进行化验分析，结果如图 4 所示：钢中磷含量随着渣量增大逐渐降低，符合理论分析结论；根据根据数据结果对应集装箱要求磷含量范围，渣量总重量控制在 6.3 吨-8.3 吨之间能实现磷成分合格，同时考虑磷含量高会造成质量事故，实际生产中渣量控制必须大于 6.3 吨。

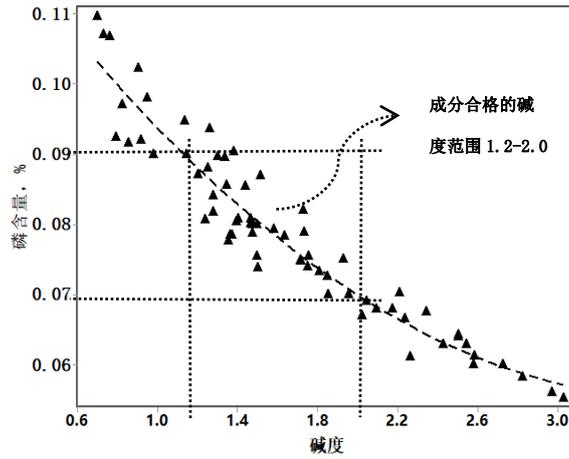


图2 碱度与钢中磷含量关系图

Fig.2 Relationship between alkalinity and phosphorus content in steel

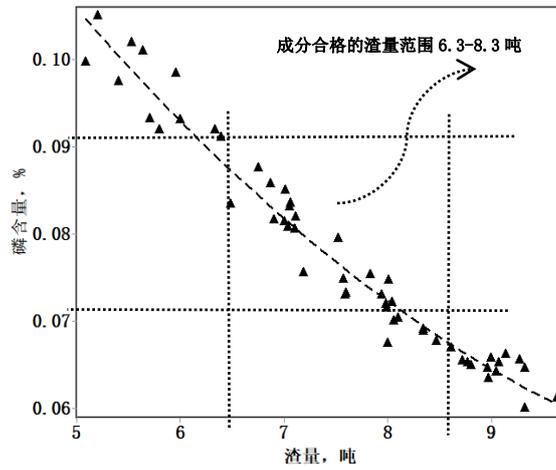


图3 渣量与钢中磷含量关系图

Fig.3 Relationship diagram between slag content and phosphorus content in steel

4.4. 氧含量影响

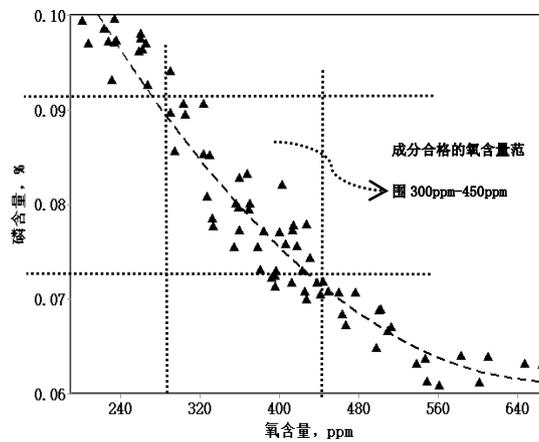


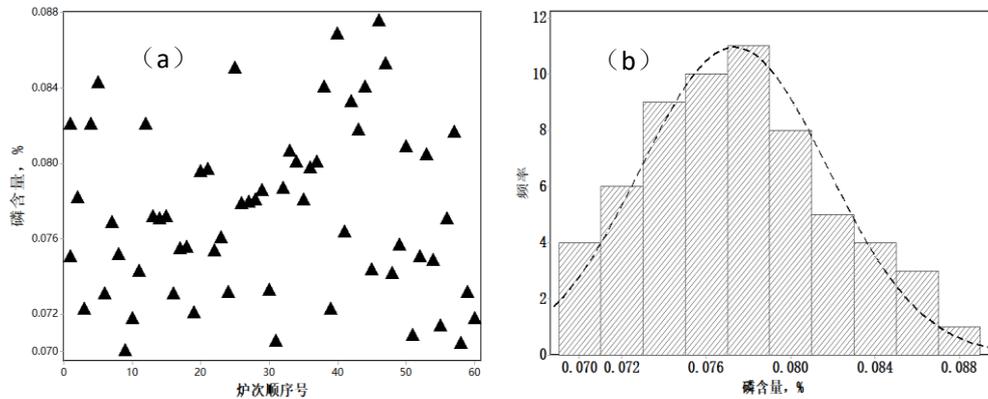
图4 氧含量与钢中磷含量关系图

Fig.4 Relationship diagram between oxygen content and phosphorus content in steel

低氧含量利于高磷出钢，但过低存在碳和磷含量超标准可能，试验 65 炉，终点温度 $1680\pm 3^{\circ}\text{C}$ ，总造渣重量 7 ± 0.2 吨，转炉终渣碱度 1.5 ± 0.1 ，终点氧含量 200ppm-680ppm，终点钢中磷含量化验分析，结果如图 4 所示：磷含量随着氧含量升高逐渐降低，达到 500ppm 后，磷含量降低趋势减缓；结合表 1 中磷与碳含量要求，合适氧范围在 300ppm-450ppm 之内，实际平均平均碳氧积 0.0020，根据换算碳含量为 0.044%-0.066%，合金增碳 0.01%-0.03%，碳含量也可一次合格，由于氧值过低可能造成磷超标问题，氧过高时需要加增碳剂进行补碳，所以实际生产中氧含量控制范围应该控制 300ppm-450ppm。

5. 应用情况

温度、碱度、渣量、氧化性等四方面影响的试验符合理论分析，试验得到参数范围合理值为：温度 1680°C ，造渣总重量 7.3 吨左右，氧含量 375ppm 左右，转炉终渣碱度 1.6 左右。选取成分等条件基本相同铁水应用，60 炉实际控制参数平均值为：终点温度 1681°C 左右，7.38 吨造渣重量，终点氧 382ppm，终渣碱度 1.68，磷含量结果如图 6 (a) 所示磷含量分布 0.070%-0.0875% 之间，磷成分合格率 100%，统计平均磷含量 0.0773%，根据图 6(b) 可知磷含量分布在均值以下范围频次较多，符合磷含量可低不可高控制要求。



(a) 磷含量分布； (b) 磷含量控制

图 5 实际应用后磷含量分布图

Fig.5 Control diagram after practical application

6. 结论

本文针对鲅鱼圈 260 吨转炉冶炼 集装箱钢的高磷出钢技术开展了实践研究，主要结论为：

(1) 理论上适当高温控制、低 FeO、低 CaO 利于高磷出钢、减少造渣量，能达到高磷出钢目的。固定温度、碱度、氧含量及渣量其中三个因素进行试验，可知随温度升高、碱度降低、氧含量降低、渣量减少终点磷含量增大，符合理论分析。针对实际生产情况，终点温度 1670°C - 1690°C 满足要求；碱度合理范围 1.2-2.0；氧合理范围 300ppm-450ppm；渣量合理重量 6.3 吨-8.3 吨。

(2) 试验结果应用四个参数平均值：终点温度 1681°C ，渣重量 7.38 吨，氧含量 382ppm，终渣碱度 1.68，磷含量控制分布 0.070%-0.0875% 之间，磷含量成分合格率 100%，平均磷含量 0.0773%

参考文献

- [1] 王雅贞, 李承祚. 转炉炼钢问答[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
- [2] L. A. Erasmus, L. N. Pussegoda. The Strain Aging Characteristics of Reinforcing Steel with a Range of Vanadium Contents[J], *Metallurgical Transaction A*, 1980, 11:231-237.
- [3] 吴明, 李应江, 王军, 等. 120t转炉少渣冶炼脱碳高磷出钢的冶金效果[J]. *炼钢*, 2014, 30(1): 10-12.
- [4] 吴康, 郑毅, 简明, 等. 提高供氧强度冶炼含磷耐候钢的生产实践[J]. *炼钢*, 2010, 26(2): 10-12.
- [5] 刘文飞, 李超, 马宁, 等. 经济性冶炼含磷耐候钢的工艺开发[J]. *鞍钢技术*, 2011(6): 23-25.
- [6] 张思维, 曹锬, 殷享兵, 等. 80t转炉冶炼高磷钢生产实践[J]. *炼钢*, 2015, 31(6): 53-56.
- [7] 赵雷, 李超, 金百刚, 等. 鞍钢鲑鱼圈炼钢技术的进步和展望[J]. *鞍钢技术*, 2014(2): 7-12.
- [8] 曹桐赫. 含铜钢氧化过程中铜的富集行为研究. 硕士学位论文[D], 辽宁科技大学, 2015: 12-15.
- [9] 黄希祜. 钢铁冶金原理[M], 北京, 冶金工业出版社, 1981.
- [10] 张润灏, 杨 健, 叶格凡, 等. 转炉脱磷工艺的最新进展[J]. *炼钢*, 2022, 38(1): 1-7.