

低 TFe 时转炉终点控制实践

邓建军, 朱坦华, 李太全*, 陈军利, 程迪, 孟凡雷, 唐笑宇

河钢集团邯钢公司, 邯郸 056000

Practice of End Point Control for Converter at low TFe

Jianjun Deng, Tanhua Zhu, Tianquan Li*, Junli Chen, Di Cheng, Fanlei Meng, Xiaoyu Tang
HBIS GROUP HANSTEEL COMPANY, Handan, 056000, China

1. 前言

转炉高效脱磷一直得到众多学者的不断研究与持续关注, 并取得了显著成效, 王新华等^[1]系统研究了氧气转炉“留渣+双渣”炼钢工艺技术, 为转炉工艺优化指明了方向, 王楠等^[2]研究了 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5$ 渣中磷的富集现象, 给转炉冶炼造渣工艺提供了很好的借鉴。实际工作中, 本文观察到了与传统“三高一低”转炉终点控制不同的冶金现象, 转炉在正常终点温度下, 渣中 TFe 为 12%左右时, 渣中磷含量 (P) 达到最大值; 作者以渣中磷 (P) 最优为目标, 优化操作工艺, 结果得到 10-13%的渣中 TFe, 仍具有优秀的脱磷能力, 渣中磷随渣中 TFe 升高而降低。本文尝试进一步探讨低 TFe 时转炉终点控制策略和方法, 为转炉高效生产提供技术借鉴。

2. 低 TFe 时少渣高效脱磷机理研究

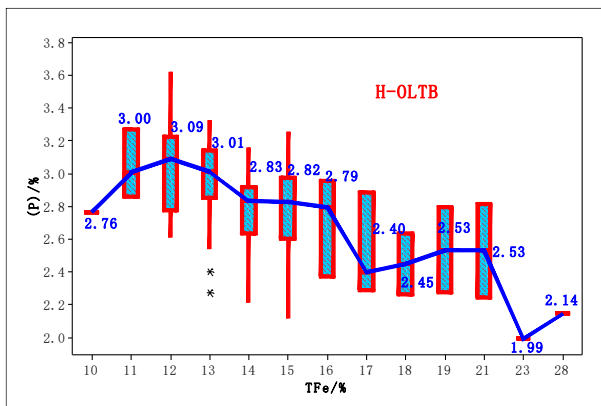


图 1 渣中 TFe 对渣中磷 (P) 的影响

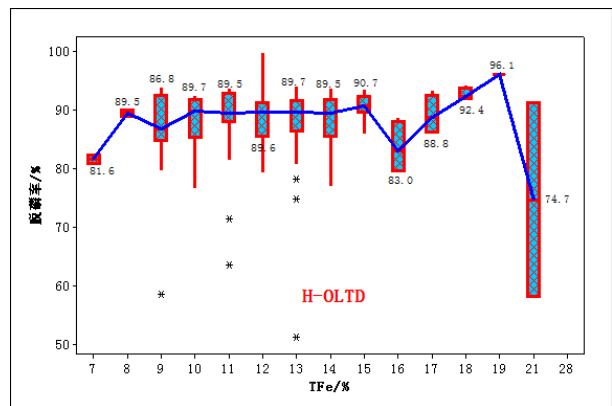


图 2 脱磷率随渣中 TFe 的变化

Fig. 1 The Effect of TFe in slag on phosphorus (P) in slag Fig. 2 The dephosphorization rate varies with TFe in the slag

传统转炉脱磷理论是“三高一低”, 其一就是高氧化性, TFe 要高, 本文在实际生产中得到了与之不同的结论, 渣中磷 (P) 随渣中 TFe 升高而降低 (如图 1 所示), 在磷分配比一定情况下, 转炉脱磷能力随 TFe 升高而降低, 保持较低的渣中 TFe, 能够得到较低的钢中磷。

最优渣系, 是以渣中磷含量最高为目标, 以增大钢中磷向渣中磷传质, 这一现象首先是在邯宝炼钢厂 H-OLTD 转炉 (底吹氧底喷粉转炉) 上发现的, 作者将其控制方法推广到常规转炉上, 也取得了同样的效果。

目前 H-OLTD 转炉 TFe 稳定控制在 11-13%; 常规转炉 TFe 稳定控制在 14%以下, 甚至更低。由图 2 可以看出, 渣中 TFe 在 10%-15%, 转炉仍具有优秀脱磷能力。

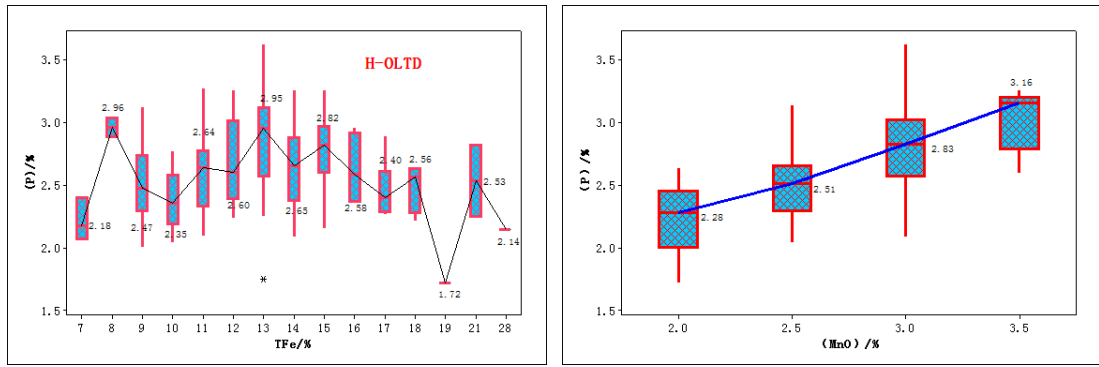


图3 渣中 TFe 和 MnO 对渣中 (P) 的影响

Fig. 3 The Effect of TFe and MnO in Slag on (P) in Slag

分析了炉渣不同组成的氧化性与渣中磷的相关性，如表 2 所示。

表 2 转炉渣不同组成时的氧化性与渣中磷的相关性

Table 2 Correlation between different compositions of converter slag oxidation and phosphorus in slag

转炉渣氧化性 A*FeO+B*MnO	1+0	1+1	1+1.3	1+1.4	1+1.41	1+1.5	1+2	1+2.5	0+1
转炉渣氧化性与 (P) 相关系数	0.037	0.112	0.134	0.141	0.141	0.148	0.182	0.215	0.635
P 值	0.609	0.121	0.064	0.051	0.05	0.040	0.011	0.003	0.00

表 2 看出，渣中 TFe 和 (P) 不相关，而 (MnO) 和 (P) 强相关，说明低 TFe 时，转炉脱磷可能更多受 (MnO) 控制，转炉渣氧化性宜用 $FeO+2*MnO$ 来表达。

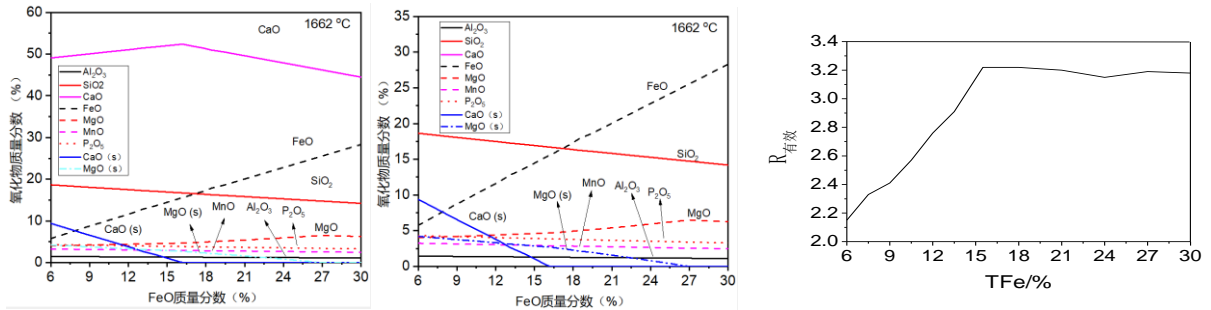


图 4 TFe 变化时转炉渣相图

Fig. 4 The Phase diagram of converter slag when TFe changes

用表 1 转炉渣成分，改变 (FeO) 含量，进行了渣相计算，如图 4 所示，可以得到结论有：1) (FeO) 升高，(P) 降低，脱磷能力降低；2) 因析出 $CaO(s)$ ，(CaO) 随 (FeO) 升高出现拐点，拐点时 (FeO) 大致为 15.5% 左右；温度越高，拐点时 (FeO) 越低；3) $(FeO) \leq 15.5\%$ (或小于拐点 FeO 值)，(CaO) 处于过饱和状态；脱磷控制环节为渣中氧传质；4) 定义 $R_{有效} = (CaO)_{有效} / (SiO_2) = [(CaO) - CaO(s)] / (SiO_2)$ ， $(FeO) \leq 15.5\%$ (或小于拐点 FeO 值)， $R_{有效}$ 随 FeO 增大而增大。TFe 越低， $CaO(s)$ 越易析出。

对所研究的渣相进行了计算，如图 5 所示，本文重点研究的区域为浅蓝色的区域，在此区域内，A 区和 B 区为理想高效脱磷区域，炼钢温度下，A 区渣相组成为 $MgO+C_2S-C_3P$ ，B 区为 $MgO+C_2S+C_2S-C_3P$ ；1) 碱度减小的方向，同样存在 C_2S-C_3P 相区，以及 $C_2S+C_2S-C_3P$ 相区，理论上讲具备高效脱磷能力，但碱度太低，MgO 不易达到饱和，对护炉衬不利。2) 可以清晰观察到，以 FeO 含量 15.5% 左右为分界，转炉脱磷机理迥然不同。

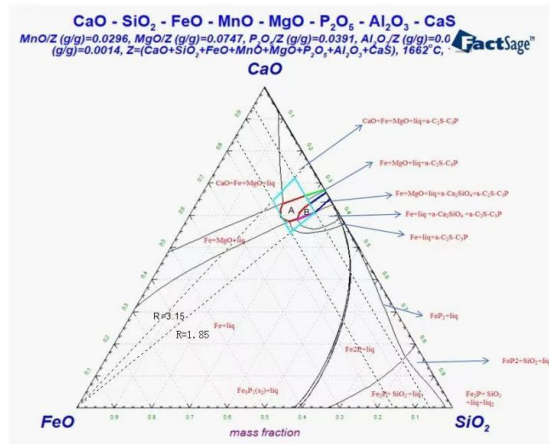


图 5 炼钢温度下转炉渣相结构

Fig.5 Structure of converter slag phase at steelmaking temperature

3. 低 TFe 时转炉渣碱度和温度对转炉终点控制影响机理研究

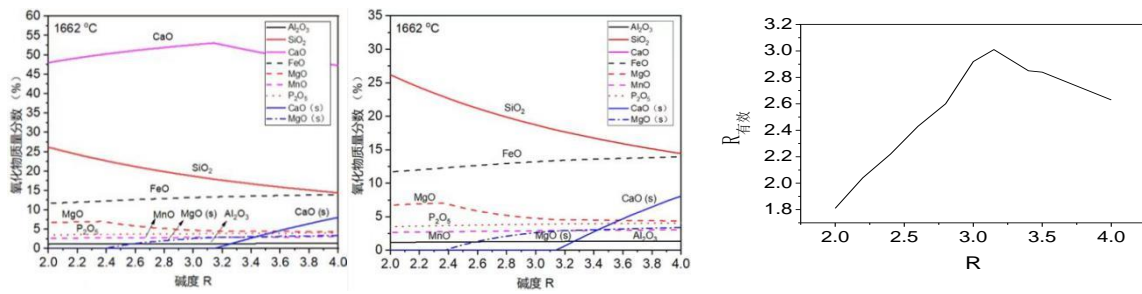


图 6 碱度 R 变化对渣中相组成的影响

Fig. 6 Effect of R Change on Phase Composition in Slag

从图 6 中可以看出：（1）实际 R 升高；（P）升高，脱磷能力越强；（2）因析出(CaO)_s，R_{有效}和(CaO)都随 R 升高出现拐点，此时 R 大致为 3.2 左右，此拐点随温度升高向 R 增大方向移动；（3）R≥3.2（或大于拐点 R 值），(CaO)处于过饱和状态；脱磷控制环节为渣中氧传质；R≤3.2（或小于拐点 R 值），R_{有效}随 R 增大而增大。

碱度对渣中磷的影响由图 7 所示，R 对渣中磷在 3.5 左右出现拐点，再增大 R，只会增加固溶析出(CaO)量，降低转炉渣熔点和流动性，影响转炉脱磷；根据前面分析，此拐点值还受温度和 TFe 制约。

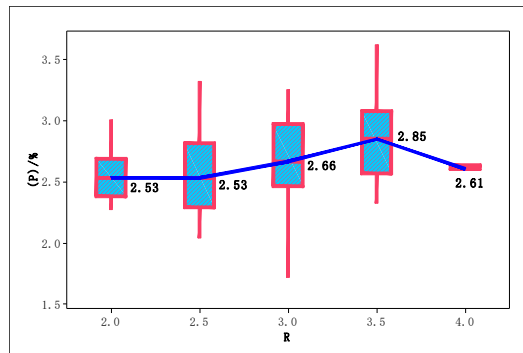


图 7 R 对渣中磷的影响

Fig.7 Effect of R on phosphorus in slag

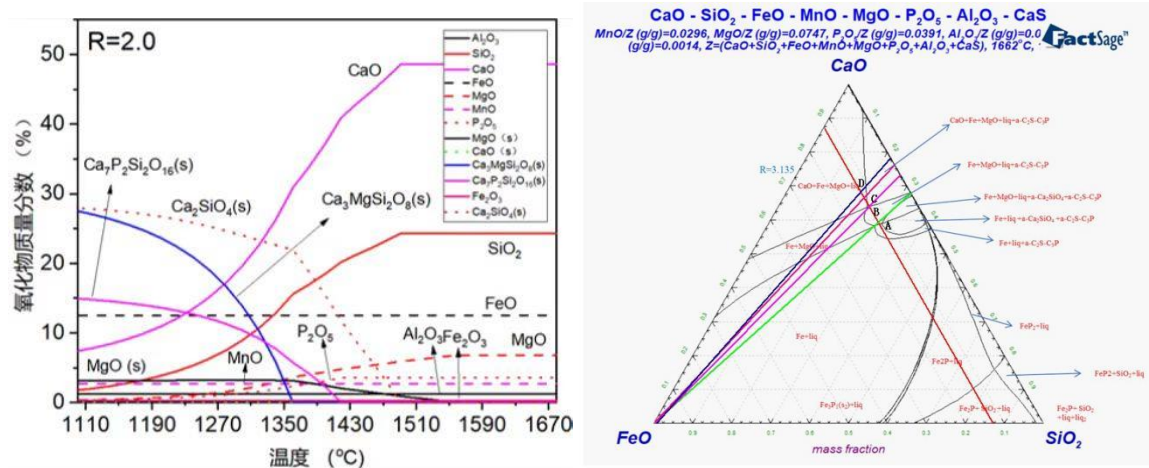


图 8 渣碱度 R 对转炉渣相组成的影响

Fig.8 Effect of slag alkalinity R on the phase composition of converter slag

ABCD 分别为碱度为 2.0、2.7、3.1 和 3.5 时情况，A 和 B 两点落在了易脱磷区，相组成为 $\text{MgO}+\text{C}_2\text{S}-\text{C}_3\text{P}$ ，C 和 D 落在了 CaO 过饱和区，炼钢温度下观察不到 C_2S 相。

4. 结论

结论和探讨：

1) 常规终点温度下，10-15%渣中 TFe，具有优越脱磷能力，这一结论在常规转炉上同样适用。

2) $\text{FeO} \leq 15.5\%$ （或小于拐点 FeO 值），(CaO)易达到饱和，脱磷限制性环节为渣中氧传质，而渣中氧传质可能更多受 (MnO) 制约，可能是 (MnO) 更易离解出氧，(MnO) 增大会提高转炉渣流动性，这需要从转炉渣粘度、表面张力、相组成和渣中氧传质等多角度进行评估； $\text{FeO} \geq 15.5\%$ （或大于拐点 FeO 值），处于传统转炉脱磷阶段，转炉脱磷氧传质更多受 (FeO) 控制。

3) $\text{FeO} \leq 15.5\%$ （或小于拐点 FeO 值），(CaO)易达到饱和，(FeO) 越低，所需 $R_{\text{有效}}$ 越低，低 TFe 时，转炉渣氧化性时可按 $\text{TFe}+2 \cdot (\text{MnO})$ 计算。

4) 实际 R 升高；(P) 升高，脱磷能力越强；因析出 $\text{CaO}_{(s)}$ ，(CaO)随 R 升高出现拐点，此时 R 大致为 3.2 左右，此拐点随温度升高向 R 增大方向移动。

5) $R \geq 3.2$ （或大于拐点 R 值），(CaO)处于过饱和状态；脱磷控制环节为渣中氧传质。

低 TFe 时，转炉高效脱磷，虽然得到实践检验，但仍需要深入研究不同温度下的渣相结构、转炉渣粘度、表面张力和流动性，以及 (MnO) 参与脱磷机理。通过本文章研究，对少渣冶炼下的高效脱磷的控制有了进一步认识，给出了可行控制方向与控制策略，有益于钢铁企业向低碳环保与可持续方向发展。

致谢

衷心感谢王新华先生对于本文研究的系统指导和帮助。

参考文献

- [1] 王新华等.氧气转炉“留渣+双渣”炼钢工艺技术研究.第十七届全国炼钢学术会议文集.2016:39-45.
- [2] 王楠等. $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{FeO}-\text{P}_2\text{O}_5$ 渣中磷的富集行为.东北大学学报: 2011, 6, 32(6): 815-817.
- [3] 梁连科.车荫昌等.冶金热力学与动力学[M], 沈阳:东北工学院出版社, 1990:209-210.
- [4] 魏寿昆.冶金过程热力学[M]上海:上海科学技术出版社, 1980:27.