

应用 COMI 炼钢工艺控制炼钢烟尘内循环的研究

朱 荣¹ 易 操¹ 陈伯瑜² 汪灿荣² 柯建祥²

(1. 北京科技大学冶金与生态工程学院, 2. 福建三钢(集团)闽光股份有限公司)

摘 要 基于炼钢烟尘内循环现状, 结合炼钢烟尘产生机理及 COMI 炼钢工艺原理提出烟尘内循环工艺技术。根据 COMI 炼钢工艺控制炼钢烟尘内循环工业试验研究发现, COMI 炼钢工艺控制转炉烟尘内循环效果较好, 与常规工艺相比, 烟尘量平均减少约 12.50%, 烟尘中 TFe 量平均减少约 12.75%, 为炼钢烟尘实现内循环创造条件。

关键词 炼钢烟尘 COMI 炼钢工艺 内循环

Inner circulation research of steelmaking dust by COMI steelmaking process

Zhu Rong¹ Yi Cao¹ Chen Boyu² Wang Canrong² Ke Jianxiang²

(1. University of Science and Technology Beijing,

2. Fujian Sanming Iron and Steel (Group) Co., Ltd.)

Abstract Based on the current situation of inner circulation for the steelmaking dust, the inner circulation research process technology combining mechanism of steelmaking dust production and COMI steelmaking theory was propose. It gives better effect based on the inner circulation research of steelmaking dust by COMI steelmaking process control. The average amount of dust is reduced by 12.50 percent in this experiment compared with the conventional one, while T-Fe in dust is reduced by 12.75 percent. The research will provide advantage to realize the inner circulation research of steelmaking dust.

Keywords steelmaking dust COMI steelmaking process inner circulation

近年来, 随着原生金属矿产资源成本日益增长, 炼钢烟尘由于其金属元素所占比重较大, 已成为重要的回收资源。炼钢过程每冶炼一吨钢将产生 10~20kg 烟尘(大部分为 FeO 和 Fe₂O₃)^[1]。转炉流程采用铁水预处理工艺及转炉少渣冶炼工艺^[2]后, 渣中带走铁的比例下降, 已低于烟尘造成的铁损, 烟尘造成的铁损将成为炼钢过程最大的损耗源。按国内年产 5 亿 t 钢计算, 不计其它元素损失量, 每年仅烟尘排放造成的金属铁损达 250 万 t 以上。烟尘量的产生既降低钢水金属

收得率又增加钢厂除尘负荷, 同时也造成能耗及处理成本的增加。

烟尘治理技术涵括炉外处理(外循环)及炉内治理(内循环), 目前有关炼钢烟尘综合治理的技术均集中在烟尘产生后的回收利用领域^[3-6]。结合当今温室气体的严峻挑战^[7-8], 文章主要阐述应用 COMI 炼钢工艺如何降低炼钢烟尘产生量, 从而实现炼钢烟尘内循环。

1 烟尘内循环现状

课题研究者定义炼钢烟尘内循环指炼钢过程中利用新设备、新系统减少烟尘的排放; 采用新工艺减少或不产生炼钢过程中的烟尘。

收稿日期: 2009-07-21

朱 荣(1962-), 教授; 100083 北京市海淀区。

日本 JRCM^[9] 从 1998 年度开始进行“不产生粉尘电炉系统”的开发研究。在 1t 的小型中间设备上成功进行了试验，铁和锌的分离回收率达 99%，建立了其余 1% 循环再利用系统。

2001 年 3 月在爱知制钢公司知多厂内设置小型中试设备，对“制造不产生粉尘的电炉系统”进行研究。该系统将高温电炉排气通过炭材过滤器和重金属冷凝器。在此过程中直接回收铁和锌是关键技术。在炭材过滤器内，利用还原作用进行铁和锌氧化物的还原及铁的吸附分离。在后步工序的金属冷凝器内，蒸汽中的锌成分吸附在落下的氧化铝球上进行金属锌回收。在炭材过滤器内铁分离回收率、在金属冷凝器中锌分离回收率的目标为 80% 以上，最终目标是铁和锌分离回收效率达 99%。

课题研究者近年一直在探索一种既不影响正常冶炼节奏，又能降低炼钢过程中烟尘产生量的新工艺。实验室研究发现：随着二氧化碳在混合喷吹气体中所占比例的增加，烟尘的产生量逐步减少，当二氧化碳达到某一定值时，烟尘基本不产生，仅剩高温烟气排放。

2 烟尘形成机理

目前关于炼钢烟尘形成机理研究的文献较少，主要存在两种观点^[10]：一种观点认为炼钢烟尘形成主要来源于钢液熔池中局部高温区域金

属铁的蒸发。铁沸点为 2750℃，铁元素在炼钢温度（1650℃）下蒸气压为 13.33Pa，随着温度的升高，铁元素蒸气压急剧上升。铁蒸气主要扩散进入炉气，从而形成烟尘。对于转炉、电炉等炼钢熔池均存在局部高温区域，如转炉火点区、电炉电极加热区等。转炉火点高温区域温度约为 2200~2500℃，因此熔池中铁元素将较快地蒸发（简称蒸发理论）。另一种观点认为氧气在熔池内部与碳反应产生大量 CO 气泡，熔池中金属铁被氧化后，进入气泡并随气泡上浮，进入炉气中形成烟尘（简称气泡理论）。

结合实际转炉烟尘中 TFe 含量随冶炼时间的变化规律，基于烟尘铁元素蒸发理论对炼钢烟尘内循环进行研究，为炼钢工艺节能降耗提供思路。

3 COMI 炼钢工艺原理

课题组自 2005 年以来致力于研发一种将二氧化碳应用于炼钢烟尘内循环的新工艺即二氧化碳-氧气混合喷吹炼钢工艺，简称 COMI (CO₂ and O₂ Mixed Injection) 炼钢工艺。

3.1 冶金热力学分析

二氧化碳气体属弱氧化性气体，但根据热力学初步分析，在炼钢温度下，二氧化碳气体与 C、Fe、Si 及 Mn 反应生成氧化物是完全可行的，如直接氧化反应（表 1）^[11-12]。

表 1 相关化学反应热力学数据表

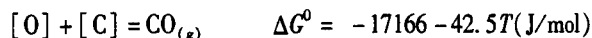
物质	化学反应	ΔG^0 (J/mol)	1773 K	
			ΔG^0 (J/mol)	ΔH^0 (kJ/kg)
CO ₂	CO _{2(g)} + [C] = 2CO _(g)	34580 - 30.95T	-20294.35	11602.67
	CO _{2(g)} + Fe _(l) = (FeO) + CO _(g)	11880 - 9.92T	-5708.16	720.91
	2CO _{2(g)} + [Si] = (SiO ₂) + 2CO _(g)	-3577967 + 357.27T	-2944527.29	-9299.21
	CO _{2(g)} + [Mn] = (MnO) + CO _(g)	-261507.82 + 72.905T	-132247.26	-1512.40
O ₂	1/2O _{2(g)} + [C] = CO _(g)	-22219.35 - 91.84T	-185051.67	-11639
	O _{2(g)} + [C] = CO _{2(g)}	-166666.534 - 40.807T	-239004.93	-34834
	O _{2(g)} + Fe _(l) = (FeO)	-459400 + 87.45T	-304351.15	-4250
	O _{2(g)} + [Si] = (SiO ₂)	-866510 + 152.307T	-596482.10	-29202
	1/2O _{2(g)} + [Mn] = (MnO)	-803750 + 171.57T	-499556.39	-6594

二氧化碳与铁、碳元素的反应虽是氧化反应但却是吸热反应，与硅、锰元素的反应虽是放热反应，但相对于氧气与硅、锰元素的反应放热仅有 30% 左右。因此将少量二氧化碳掺入氧气中

进行混合喷吹，可降低火点区温度，从而限制金属铁的挥发，减少烟尘的产生。

而间接氧化反应仍以 (FeO) 形式参与进行，与纯氧喷吹的传氧机理是一致的。

日本学者野村宏之等^[11-12]认为将二氧化碳含量较高的混合气体喷入铁液中,铁液的脱碳反应受以下反应的综合控制。



当 $\text{CO}_2 - \text{O}_2$ 混合气体喷入铁液时,熔体中碳浓度随喷吹混合气体中 P_{CO_2} 的升高迅速下降。

3.2 理论热量计算

以转炉 100kg 全铁水为例,对不同二氧化碳喷吹比例条件下物料及能量平衡进行计算,假设能量平衡计算富余热量传热全部集中在火点反应区(火点反应区传热占熔池的 40%),得到 CO_2 喷吹比例为 0~30% 时的火点反应区的理论计算温度。从图 1 可以看出:火点区温度理论计算值随着二氧化碳比例增加而降低,因此如果向转炉内喷吹适量 CO_2 气体可限制金属铁的挥发,减少转炉炼钢烟尘的产生,从而实现转炉炼钢烟尘内循环。

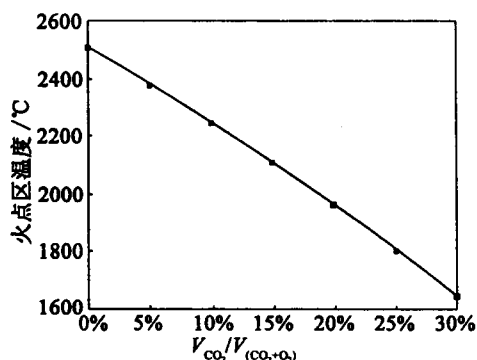


图 1 火点区计算温度随 CO_2 喷吹比例变化

4 烟尘内循环研究

4.1 烟尘内循环实验研究

采用 20kg 感应炉,往炉内加入生铁、废钢各 10kg,通电熔清后加入造渣原料,升温至适当温度(1550℃)进行吹炼,吹炼时间为 60min,控制 $\text{CO}_2 - \text{O}_2$ 混合喷吹总流量为 500L/h。

在纯氧与 2%、4%、6%、8%、10% CO_2 的条件下收集的烟尘,应用电子天平称重,并对其 Fe 含量进行化学分析。由图 2 可知,随着 $V_{\text{CO}_2}/V_{(\text{CO}_2+\text{O}_2)}$ 喷吹比例的增加,烟尘及铁损量持续降低。

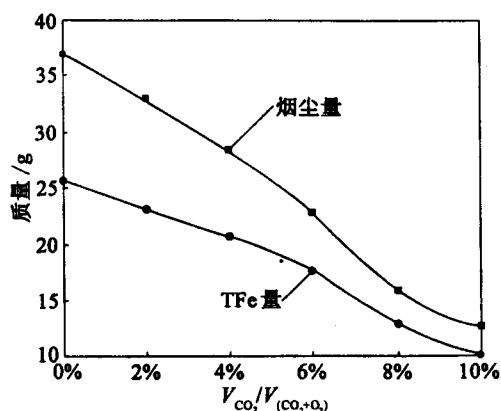


图 2 不同喷吹比例下烟尘及铁损量的变化

在实验中发现:随着氧气射流中二氧化碳比例的提高,烟尘的产生量逐步减少,当二氧化碳达到某一定值时,烟尘基本不产生,仅剩高温烟气排放。为进一步验证 COMI 炼钢工艺控制烟尘内循环的工业可行性,进行了 30t 转炉的 COMI 炼钢工艺试验。

4.2 烟尘内循环工业试验

COMI 炼钢工艺工业试验于 2008 年 9 月在福建三明炼钢厂 3 号转炉分 3 阶段共 60 余炉次进行。由于试验条件受限,在 $V_{\text{CO}_2}/V_{(\text{CO}_2+\text{O}_2)}$ 仅 10% 的条件下,COMI 炼钢工艺控制转炉烟尘内循环效果仍较好,与常规工艺相比,烟尘量平均减少约 12.50%,烟尘中 TFe 量平均减少约 12.75%,如图 3 所示。

工业试验烟尘内循环未达到实验室预期效果,主要由于工业试验二氧化碳供气比例受限,

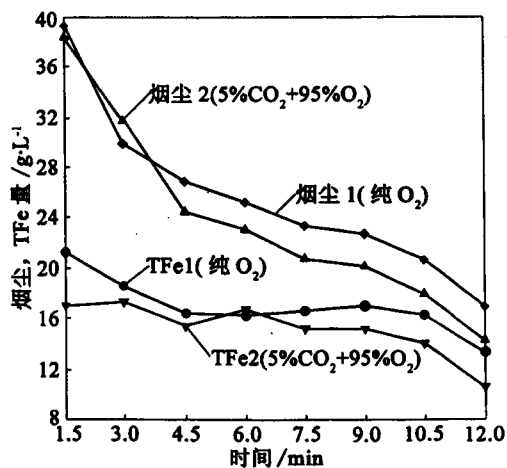


图 3 烟尘、TFE 平均含量随冶炼时间变化

COMI 炼钢工艺能否应用于炼钢工业, 实现炼钢烟尘内循环有待下阶段进一步研究。

5 结论

(1) 随着二氧化碳喷吹比例的增加, 烟尘及铁损量持续降低。

(2) 从 COMI 炼钢工艺工业试验可知, CO-MI 炼钢工艺实现转炉烟尘内循环效果较好, 与常规工艺相比, 烟尘量平均减少约 12.50%, 烟尘中 TFe 量平均减少约 12.75%。

参 考 文 献

- [1] 王令福. 炼钢粉尘处理工艺的最新发展 [J]. 冶金能源, 2006, 25 (4): 46-49.
- [2] 赵素华, 潘秀兰, 梁慧智. 少渣炼钢工艺的进步与展望 [J]. 鞍钢技术, 2008, (6): 13-16.
- [3] 许亚华. 电炉粉尘的处理和综合利用 [J]. 钢铁, 1996, 31 (6): 66-69.
- [4] 金恒阁, 谷丽群, 宋 斌等. 炼钢烟尘的回收利用 [J]. 中国资源再生, 1999, (11), 7-8.
- [5] D Cartwright, J Clayton. Recycling Oily Millscale and Dust by Injection into The EAF [J]. Steel Times Inter-

national, 2000, 24 (2): 42-43.

- [6] 李仲文. 电炉炼钢烟尘的综合利用 [J]. 南方金属, 2005, (14): 7-9.
- [7] M C Grimston, B Karakoussis, R Fouquet, et al. The European and Global Potential of Carbon Dioxide Sequestration in Tackling Climate Change [J]. Climate Policy. 2001, 1: 155.
- [8] K Hashimoto, M Yamasaki. Materials for Global Carbon Dioxide Recycling [J]. Corrosion Science 2002, 44: 371.
- [9] 张译中. 日本 JRCM 开发不产生粉尘的电炉系统. AMM, 2002. 5.
- [10] Ryoji TSUJINO, Masazumi HIRAI, Takamasa OHNO, Nobuyuki ISHIWATA and Tsutomu INOSHITA. Mechanism of Dust Generation in a Converter with Minimum Slag [J]. ISIJ International. 1989, 29(4): 291-299.
- [11] 野村宏之, 森一美. 高炭素领域における溶鉄の脱炭反应机构に関する研究 [J]. 鉄と鋼, 1971, 9: 1468-1473.
- [12] 野村宏之, 森一美. 低炭素领域における溶鉄の脱炭反应机构に関する研究 [J]. 鉄と鋼, 1972, 1: 30-40.

赵 艳 编辑

(上接第 42 页)

约软水费 $5 \times 75\% \times 24 \times 20 \times 345 = 62.1$ 万元, 项目施工、材料费用为 30 万元。综上合计, 年可创效益 $345 + 62.1 - 30 = 377.1$ 万元。

3.3 间接效益

(1) 降低了富余余热蒸汽外供生产单位的生产成本和工序能耗。①济钢将第三炼钢厂和中厚板厂的富余余热蒸汽外供 320m^2 烧结机余热发电机组, 按每小时回收余热蒸汽 5t, 利用率 75%, 余热蒸汽价格 60 元/t, 每年 345 天计算, 共降低第三炼钢厂和中厚板厂生产成本 $5 \times 75\% \times 24 \times 60 \times 345 = 186.3$ 万元。②以 2007 年度第三炼钢厂生产钢 449.7026 万 t、中厚板厂产板 210.1134 万 t, 每吨余热蒸汽折标准煤 100kg 计算, 分别冲减上述生产工序能耗。冲减三炼钢工序能耗 $5 \times 75\% \times 24 \times 345 \times 100/4497026 = 0.69\text{kgce/t}$; 冲减中厚板工序能耗 $5 \times 75\% \times 24$

$\times 345 \times 100/2101134 = 1.48\text{kgce/t}$ 。

(2) 通过项目的实施, 济钢有效地降低了第三炼钢厂和中厚板厂富余余热蒸汽放散量, 减少了环境污染, 按照年节约标准煤 3105t 计算, 年可以分别减排二氧化碳 9315t、二氧化硫 124t。

4 结论

通过对烧结工艺和余热发电工艺的技术分析, 找准解决问题的方向, 以循序渐进、稳步实施的调整思路, 在烧结、炼钢、中厚板生产稳定的基础上, 实现了蒸汽放散最小化, 机组发电最大化, 达到了回收除盐水和增加发电量的双重目标。项目产生直接费用为 30 万元, 而产生的年经济效益却有 377.1 万元, 投资回收期仅需一个月, 值得在冶金行业推广应用。

赵 艳 编辑