优化炼钢模型控制超低碳钢转炉冶炼终点*

张 胤[1], 刁望才[1], 赵永军[2], 徐 涛[2]

(1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢金属制造有限责任公司, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: 超低碳钢终点氧含量直接关系到后续工艺处理及最终产品质量。包钢金属制造公司对转炉冶炼过程底吹、副枪模型系统计算参数进行了优化, 提高了冶炼过程底吹供气强度, 加强底吹对熔池搅拌, 同时针对超低碳钢制定了底吹供气模式。结果表明, 采取以上工艺, 能够降低终点氧含量, 提高超低碳钢终点碳含量、温度、氧含量命中率, 为后续工序提供较好的钢水条件。

关键词: 超低碳钢; 供气强度; 底吹供气模式; 终点氧含量; 副枪模型
中图分类号: TF713 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2021)01-0034-04
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2021.01.010

Optimization of Steel-making Model to Control End Point of Converter Smelting for Ultra-low Carbon Steel

Zhang Yin[1], *Diao Wang-cai*[1], *Zhao Yong-jun*[2], *Xu Tao*[2]

(1. *Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Inner Mongolia Baotou Steel Metal Manufacturing Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: The oxygen content at end point of ultra-low carbon steel is directly related to the subsequent fabrication processing and quality of final product. The bottom blowing in the process of converter smelting and the calculating parameters of sublance model system are optimized by company so that the intensity of bottom blowing gas supply is increased, stir of bottom blowing to molten pool is strengthened and bottom blowing gas supply mode is established for ultra-low carbon steel. The results showed that the oxygen content at end point could be reduced, hit ratio of carbon content as well as temperature and oxygen content for ultra-low carbon steel at end point could be improved with the above process, which could provide better molten steel for the subsequent processes.

Key words: ultra-low carbon steel; intensity of gas supply; bottom blowing gas supply mode; oxygen content at end point; sublance model

超低碳钢是高级别钢种的典型代表, 其生产工艺是衡量一个钢铁企业生产水平的重要标志之一。目前以超低碳钢为基础发展起来的高防腐蚀性能深冲热镀锌IF钢板、深冲高强度IF钢板、深冲高强度烘烤硬化IF钢板等系列超低碳钢, 已广泛应用于汽车内板与面板的生产[1]。

* **收稿日期:** 2020-03-02
作者简介: 张 胤(1985-), 男, 河北省张家口市人, 工程师, 现从事炼钢工艺研究工作。

包钢金属制造公司炼钢厂现有鱼雷倒罐站 2 座、复合喷吹脱硫设备 3 座、240 t 顶底复吹转炉 3 座，配套 LF 精炼炉 2 座、RH 真空炉装置 2 座，板坯连铸机 2 台，已实现超低碳钢系列产品的稳定生产。随着下游工业产业的迅猛发展，国内市场对高质量、低缺陷的超低碳钢系列产品提出了更高的要求。炼钢作为超低碳钢生产的源头工序，必须为精炼和连铸提供优质洁净的钢水，从而降低最终轧材的缺陷率。

1　转炉冶炼超低碳钢脱碳动力学

在转炉冶炼超低碳钢过程中，动力学条件对脱碳反应尤其是冶炼末期脱碳反应速率和终点碳、氧含量的影响至关重要。对转炉吹炼末期脱碳反应进行分解，可以确定转炉吹炼末期影响脱碳速率和终点碳含量动力学限制条件[2]，反应步骤如下。

氧枪喷射出的氧气射流与钢液中 Fe 反应，生产 FeO 和 Fe_2O_3，反应式如下:

$$2Fe + O_2 = 2(FeO) \quad (1)$$

$$4Fe + 3O_2 = 2(Fe_2O_3) \quad (2)$$

铁的氧化产物迁移到渣—金属界面，其中 Fe_2O_3 同金属 Fe 发生反应生成 FeO，反应如下:

$$(Fe_2O_3) + [Fe] = 3(FeO) \quad (3)$$

在氧气射流冲击力作用下，上述反应所生成的 FeO 部分进入钢液，参与脱碳反应; 部分进入炉渣，炉渣的 FeO 参与渣—金属界面发生脱碳反应。FeO 和 [C] 发生反应生成气态 CO。CO 气泡长大和上浮，先后通过金属相和渣相进入炉气。

在上述反应步骤中，包括了物质在气相、熔池和渣层中的迁移过程以及化学反应过程和生成 CO 气泡的排出。FeO 在熔池中的迁移速度和渣—金属反应界面的大小为吹炼末期脱碳反应动力学限制条件[3]。

2　超低碳钢转炉冶炼终点控制

2.1　转炉原料

脱硫后铁水成分统计如表 1 所示。

表 1　脱硫后铁水条件统计

	硅含量/%	磷含量/%	硫含量/%	温度/℃
一季度	0.40	0.159	0.001	1 280
二季度	0.42	0.148	0.001	1 301
三季度	0.37	0.141	0.001	1 287
四季度	0.38	0.147	0.001	1 290
平均	0.39	0.149	0.001	1 289

由表 1 可见，全年铁水硅含量、温度、脱硫后硫含量相对稳定。

2.2　底吹系统

转炉底吹系统由达涅利康力斯公司提供，设计供气强度范围 300 ~ 2 350 m^3/h，冶炼过程底吹系统情况如表 2 所示。

表 2　转炉底吹主要参数

供气元件及支数	工作压力/MPa	设计供气强度/($m^3 \cdot h^{-1}$)	底吹气体种类	冶炼供气强度/($m^3 \cdot h^{-1}$)
集束透气转，12 支	1.0 ~ 1.1	300 ~ 2 350	N_2、Ar	320 ~ 1 100

2.3　副枪模型

转炉副枪系统由达涅利康力斯公司提供，配套静态及动态模型计算。生产中静态模型测量后，动态模型进行计算得出终点所需供氧时间与物料平衡结果。

通过模型可以进行静态计算和动态计算，模型进行静态计算以炼钢前已有的有效数据为基础，而模型的动态计算要求输入实际炼钢过程的测量数据。在自动采集相应的测量数据后，模型依据转炉热平衡、物料平衡公式对终点结果进行计算，为实际生产提供理论计算结果依据[4]。

2.4　冶炼现状

转炉冶炼过程采用顶底复吹冶炼工艺，生产冶炼过程底吹供气强度模式采用中—低—高—低模式并配合副枪静态、动态模型测量冶炼过程熔池温度及碳含量。在超低碳钢实际生产过程中，转炉终点控制反映出以下几点问题:

(1) 在冶炼过程中转炉底吹效果不明显，在结束供氧前，底吹对熔池内搅拌作用有限，造成转炉碳氧积不稳定，终点钢水氧含量波动。

(2) 副枪静态模型测量值与模型计算值偏差较大，终点温度命中率较低。

(3) 终点氧含量平均值波动在 0.048% ~ 0.125% 之间，平均终点氧含量 0.092%。终点氧含量达标率为 89.4%。

(4) 终点温度平均值波动在 1 634 ~ 1 712 ℃ 之

间，平均终点温度为1 675℃，温度达标率为89.5%。

统计转炉终点状态如图1所示。

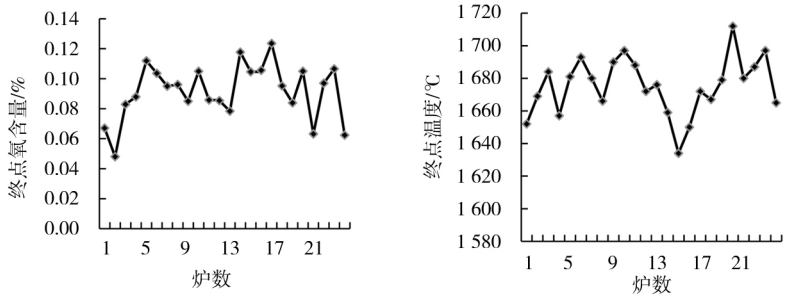


图1 钢水终点氧含量、温度

3 转炉终点控制工艺优化

3.1 底吹供气强度优化

结合转炉脱碳动力学机理及实际生产过程问题，对冶炼过程转炉底吹控制工艺进行了优化。结合冶炼过程实际及国内大型转炉底吹系统应用情况[5-6]，提出供气强度优化方法如表3所示。

表3 底吹供气强度优化方案 m^3/min

阶段	冶炼初期	冶炼前期	冶炼中期	冶炼后期	副枪测量期	冶炼末期	静置期
优化前	600	600	780	1 100	700	1 000	320
优化后	1 500	500	500	1 500	700	1 500	780

底吹供气强度优化后，提高冶炼初期强度，促进钢渣界面的反应，有助于冶炼前期脱磷反应进行；前期、中期供气强度低，避免炉渣FeO快速消耗对脱磷反应平衡影响，保证脱磷效率；在冶炼后期钢渣中FeO含量较高的情况下，采取供气强度高模式，利用良好的底吹搅拌动力学条件，为低磷钢种后期脱磷提供了保障。末期加强底吹对钢液搅拌作用，稳定降低终点钢水氧含量。结束供氧进入静置期后，底吹搅拌继续促进降低钢水终点碳含量，并使脱碳和钢渣界面反应继续进行，进一步降低了钢水的氧含量和终渣的氧化性。

3.2 副枪计算模型优化

转炉副枪系统生产中采用静态模型测量后，动态模型进行计算得出终点所需供氧时间与物料平衡结果。生产数据统计表明，模型计算公式参数有偏差，造成复吹后终点氧含量高，温度命中率低。对副枪静态、动态模型热平衡、氧平衡参数进行调整，提高模型计算准确率。图2为热平衡、氧平衡参数调整前模型计算结果。图3为热平衡、氧平衡参数调整后模型计算结果。


主吹数值设定

热平衡： 996 氧平衡： 1822

Items 线形

	设定	True	修正标示
主吹过程热平衡	996.0	996.0	2
主吹过程氧平衡	1822.0	1360.0	
副吹过程热平衡	1091.0	1265.0	2
副吹过程氧平衡	996.0	1015.0	
副吹矿石减少	350.0	350.0	
碳氧浓度积	27.6	28.0	2
熔池液面 [cm]	995.0	995.0	2
出钢过程中温降 [℃]	9.8		1
期望出钢时间 [min]	7.2	7.3	

	温度 [℃]
1	1533.8
2	1517.9
3	1500.3
4	1482.7
5	1470.2
6	1452.5
7	1409.2

图2 参数调整前计算结果


主吹数值设定

热平衡： 994 氧平衡： 1808

Items 线形

	设定	True	修正标示
主吹过程热平衡	994.0	1005.0	2
主吹过程氧平衡	1808.0	1904.0	
副吹过程热平衡	1082.0	1118.0	
副吹过程氧平衡	986.0	1026.0	2
副吹矿石减少	350.0	350.0	
碳氧浓度积	27.6		2
熔池液面 [cm]	995.0		0
出钢过程中温降 [℃]	9.8		1
期望出钢时间 [min]	7.1	8.0	

	温度 [℃]
1	1533.8
2	1517.9
3	1500.3
4	1482.7
5	1470.2
6	1452.5
7	1409.2

图3 参数调整后计算结果

平衡参数调整后，模型计算结果与实际值 Ture 偏差明显减小。

3.3　底吹供气模式制定

在超低碳钢生产中，只使用一种底吹供气模式无法应对多变的铁水原料条件。针对铁水硅含量不同，制定了相应得底吹模式如表 4 所示。

表 4　底吹冶炼供气模式

铁水硅含量/%	冶炼初期	冶炼前期	冶炼中期	冶炼后期	副枪测量期	冶炼末期	静置期
≤0.40	高	低	低	中	固定联锁值	高	中
≥0.40	高	中	中	高	固定联锁值	高	中

当铁水硅含量小于 0.40% 时，冶炼初期采用高流量底吹，保证泡沫渣形成，提高脱磷能力；冶炼前期、中期减弱底吹对熔池的搅拌强度，增加炉渣中 FeO 含量，从而促进转炉“化渣”，保证脱磷；冶炼后期采用中流量底吹，减缓碳氧反应速率，使钢水温度可以均匀上升；末期使用高流量底吹，加大熔池内动力学条件，进一步降低钢水氧含量及炉渣氧化性；当铁水硅含量大于 0.40% 时，适当加强冶炼前期、中期熔池搅拌，控制炉渣 FeO 含量，使得熔池碳氧反应缓慢进行从而使熔池温度均匀上升，防止因熔池温度突然变化导致爆发性喷溅；后期使用高流量底吹，加速碳氧反应进行，均匀钢水温度，减少供氧时间，降低成本。

4　转炉终点控制工艺优化结果

在对底吹供气强度、底吹供气模式及副枪计算模型参数进行优化调整后，超低碳钢冶炼终点控制取得很大改善。对比结果如图 4 所示。

（1）优化后终点氧含量平均值波动在 0.058% ~0.111% 之间，平均终点氧含量 0.081%。终点氧含量达标率为 92.2%。

（2）终点温度平均值波动在 1 668 ~1 702 ℃之间，平均终点温度为 1 683 ℃，温度达标率为 92.8%。

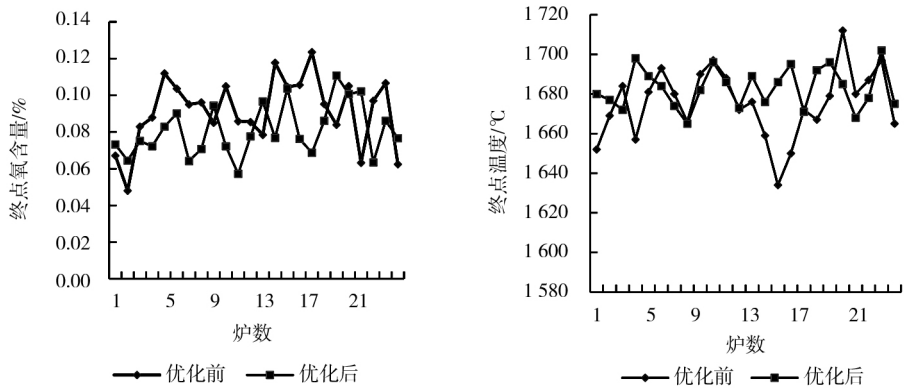


图 4　优化前后钢水终点氧含量、温度对比

5　结束语

通过对底吹供气强度、供气模式及副枪模型计算参数的优化，超低碳钢转炉终点控制得到提升。优化后，平均终点钢水氧含量降低了 0.011 个百分点；终点氧含量达标率上升了 2.8 个百分点；最大氧含量由 0.125% 下降到 0.111%；稳定了终点氧含量。终点钢水温度达标率提升了 3.3%。各项指标改善的同时，降低了转炉冶炼成本，为后续工序提供了优质的钢水条件。

参　考　文　献

[1]　王小善，魏元. IF 钢的转炉工艺研究 [J]. 鞍钢技术，2016，(2)：52 -55.

（下转第 84 页）

445 500 元/a = 44.55 万元/a，经济效益十分可观。

(6) 使用滚动轴承之后，磨机可去掉轴瓦循环冷却水装置。

(7) 安装轴承温度检测系统随时观察到轴承温度，高于一定温度还能报警。

7 结束语

现五系列二次 Φ3.6 m × 6.0 m 球磨机采用滚动轴承代替滑动轴承后效果较好，改造后与改造前相比，达到同样装球量，磨机运行电流下降 10% 以上。一台磨机投资约 80 万元，一年节约电费约 44.55 万元，稀油站运转每年约消耗 5 万元备件、材料费用，两年就收回成本。另外，避免了“研瓦”事故。今后将安排在其它系列磨机更换滚动轴承可大大降低磨机能耗和设备故障的发生。

参 考 文 献

[1] 翟黎明. 球磨机滚动轴承的选型及配合 [J]. 矿业工程. 2006,(6):44 – 45.

[2] 徐灏. 新编机械设计师手册(下册) [M]. 北京: 机械工业出版社,1995.

(上接第 37 页)

[2] 林东，赵成林，张贵玉，等. 复吹转炉炼钢过程脱碳模型 [J]. 钢铁研究,2006,34(6):12.

[3] 张明博，秦哲，仇圣桃，等. 超低碳钢 BOF 渣成分对终点 [C] 含量影响 [J]. 工程科学学报,2015,37(11):1422 – 1428.

[4] 刁望才，杨吉春. 转炉副枪系统的设备功能与应用 [J]. 包钢科技,2015,(6):26 – 28.

[5] 倪翀奕，廖相巍. 超低碳钢转炉冶炼终点控制技术 [J]. 鞍钢技术,2014,(4):16 – 19.

[6] 朱国强，王鹏，王鹏飞，等. 鞍钢 260 t 转炉底吹工艺优化与实践 [J]. 鞍钢技术,2016,(6):45 – 48.