

· 试验研究 ·

100 t RH 顶吹氧去除真空室内壁冷钢的数值模拟和应用

刘金刚^{1,2,3} 解家英¹ 史志强⁴ 李战军¹ 初仁生¹ 郝宁¹

(1 首钢技术研究院宽厚板所,北京 100043;2 绿色可循环钢铁流程北京市重点实验室,北京 100043;

3 北京市能源用钢工程技术研究中心,北京 100043;4 秦皇岛首秦金属材料有限公司炼钢部,秦皇岛,066326)

摘要 对钢厂 100 t RH 将原天然气烘烤改为顶吹氧去除真空室内壁冷钢工艺改造进行了研究。对 5.5 ~ 7.5 m 氧枪位置及 750 ~ 1 300 m³/h 氧气流量下的速度场进行了数值模拟,根据计算确定了在枪位为 5.5 ~ 6.5 m,氧气流量为 900 ~ 1 200 m³/h 时 RH 顶吹氧去除冷钢是可行的。工业生产应用结果表明,采用该顶吹氧去除冷钢工艺,明显提高了 RH 的连续处理能力,RH 月处理能力由不到 28.5% 提高到 36.0% 左右,单月 RH 处理能力最高比例达到 48.8%。

关键词 RH 顶吹氧 去除真空室内壁冷钢 氧枪位置 氧气流量

Numerical Simulation of Removal of Cold Steel in Inner Wall of Vacuum Chamber of 100 t RH Unit by Top Oxygen-Lance Blowing and Application

Liu Jingang^{1,2,3}, Xie Jiaying¹, Shi Zhiqiang⁴, Li Zhanjun¹, Chu Rensheng¹ and Hao Ning¹

(1 Plate Technology Department, Shougang Technology Research Institute, Beijing 100043;

2 Beijing Key Laboratory of Green Recyclable Process for Iron and Steel Production Technology, Beijing 100043;

3 Beijing Engineering Research Center for Energy Steel, Beijing 100043;

4 Steelmaking Division, Shouqin metal Materials Co Ltd, Qinhuangdao 066326)

Abstract The technology revamping of removing the cold steel in inner wall of vacuum chamber of 100 t RH unit at steel by top oxygen blowing process to replace original nature gas baking process has been studied. The numerical simulation on velocity field with oxygen lance level 5.5 ~ 7.5 m and oxygen flow rate 750 ~ 1 300 m³/h is carried out and based on calculation it is defined that the RH top oxygen blowing with lance level 5.5 ~ 6.5 m and oxygen flow rate 900 ~ 1 200 m³/h to remove the cold steel is available. Commercial production application results show that the RH continuous processing capacity significantly increases by the top oxygen blowing to remove cold steel process, the RH monthly processing capacity increases from original less than 28.5% to about 36.0%, and the highest RH processing percentage of single month is up to 48.8%.

Material Index RH, Top Oxygen Blowing, Removal Cold Steel in Inner Wall of Vacuum Chamber, Oxygen Lance Level, Oxygen Flow Rate

钢水在 RH 真空处理期间,循环氩气泡在钢液面表面破裂及碳氧反应等造成的沸腾喷溅,在真空室内壁上逐渐会累积形成的冷钢圈。在冶炼过程中,冷钢的熔化易造成钢水成分和温度的波动,熔化的钢水还给高级别钢种钢水的洁净度带来不良影响;较大的冷钢圈还能挡住部分调料合金,阻止合金正常进入钢液,造成成分偏差;冷钢量过大时,还会造成 RH 真空室中部槽封堵,削弱 RH 脱气功能。如不能有效的去除冷钢将对生产组织、钢水质量和耐材成本构成较大影响^[1-2]。

钢厂 100 t 炼钢炉因受喷吹天然气的能源条件限制,真空室内壁仅能达到 800 °C,无法保障国内一般烘烤温度 1 000 °C 以上的水平。去除其真空室冷钢的原设计为天然气和氧气进行在线烘烤,流量分别为 100 m³/h 和 300 m³/h,且由于最低枪位为 5.5 m,高温

区距离冷钢位置较远,造成去除效果不佳,再加上烘烤时熔化的钢水易在下流过程中慢慢降温凝固,堵塞浸渍管,同时由于天然气成本高,不具备较长时间高温烘烤的真空室的条件,因此基本以保温为主。

钢厂 RH 处理钢种主要为“LF + RH”双联工艺,温度较低,无法有效实现真空室去除冷钢,虽然总体真空处理比例仅为 30% 左右,相对较小,但阶段性真空处理比例需求较高,再加上氧枪短天然气烘烤效果差等原因,造成 RH 冷钢一直困扰“LF + RH”双联品种钢的正常生产。国内外一些先进的钢厂均配备顶枪吹氧去除冷钢,该方法可以实现快速去除冷钢,与烘烤去除冷钢相比具有较大优越性。虽然钢厂 RH 在硬件上具备基本的顶枪吹氧去除冷钢条件,但设计上并无此功能,因此为了使 RH 顶枪吹氧得以实现,对其不同的吹氧参数进行了数值模拟以

确定顶枪吹氧去除冷钢工艺参数,从而确定钢厂 100 t RH 顶吹氧去除冷钢工艺开发的可行性^[3-5]。

1 顶枪吹氧去除冷钢工艺研究

1.1 数值计算模型的建立及试验方案

顶枪吹氧去除冷钢为一个复杂的物理化学反应,按反应先后和反应界面由外向内包括:气相与固相表面的化学反应、固相表面向液相的转化、气相与表面液相的化学反应及强烈放热、强烈放热加热表面液相、表面液相向内部固相的传热、内部固相继续向内部的传热等,还包括固相转化为液相之后的流动滴落,现阶段的数值模拟计算无法完全模拟这一工作,而顶枪吹氧主要靠喷入的氧气与高温冷钢发生强烈的化学反应来不断熔化去除冷钢,因此本文主要对不同枪位及氧气流量下的喷吹气体的速度场进行了模拟。

依据 RH 喷枪的结构,建立相应的仿真模型,如图 1 所示,其中真空室下部两横线之间为冷钢圈区域,距真空室底部 1.5 ~ 2.0 m,氧枪最低枪位为 5.5 m,氧枪枪头距冷钢圈最小距离达到 3.5 m。氧枪使用上限枪位为 7.5 m,因此本文根据氧位的极限条件及流量的使用范围设定了 12 种工况进行研究,如表 1 所示。

1.2 枪位 5.5 m 时不同吹氧量对速度场的影响

为了确认最低枪位下的最小流量,对氧气流量 750 ~ 1 300 m³/h 的速度场进行了计算,其中 750 m³/h 和 900 m³/h 对应的计算结果如图 2 所示,包括速度云图、速度矢量图、流线图,同时也给出了真空室竖直方向两个垂直对称面上靠近真空室壁面 ($l_1 = l_2 = 0.010$ m,图 1 中 A、B 为起点)处距离真空室底不同位置氧气流速的变化,如图 3 所示。

从图 2 中的速度云图可知,当枪位为 5.5 m 氧气流量为 750 m³/h 时,冷钢圈位置流速过低,处于

氧气高速流股的边缘,当流量 ≥ 900 m³/h 后,高速流股基本可以覆盖冷钢圈位置。结合图 3,在距真空室底部 2.0 m 的时候,流量为 750 m³/h 时冷钢圈位置的壁面氧气流速为 0.7 m/s,速率较小,随着流量

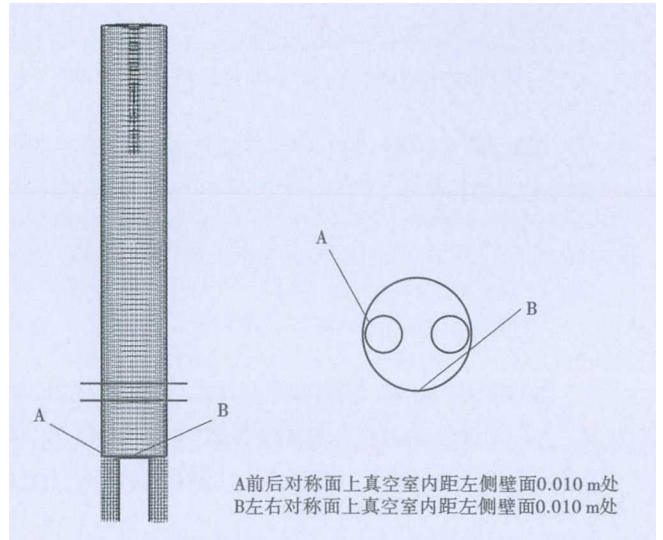


图 1 RH 顶吹氧枪物理模型:(a)正视图;(b)俯视图

Fig. 1 Physical model of RH top oxygen lance blowing: (a) front view; (b) plan view

表 1 数值模拟的工艺参数

Table 1 Process parameters for numerical simulation

工况	顶枪枪位/ m	氧气流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	目的
1		750	
2		900	
3	5.5	1 050	确定最低枪位下的 最小流量
4		1 200	
5		1 300	
6		750	
7		900	
8	7.5	1 050	确定该枪位的可行性 以及相应的最小流量
9		1 200	
10		1 300	
11		900	确定该枪位的可行性 以及相应的最小流量
12	6.5	1 200	

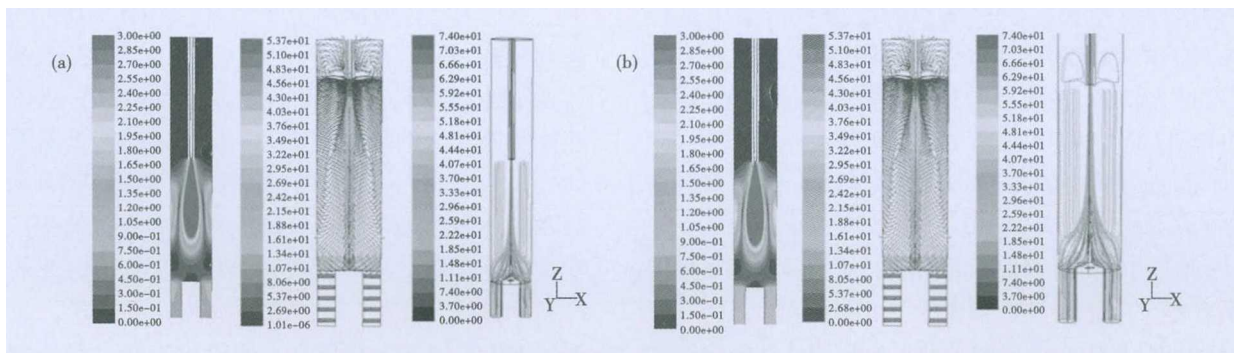


图 2 枪位 5.5 m,氧气流量 750 m³/h (a) 和 900 m³/h (b) 时,100 t RH 真空室速度云图,速度矢量图和流线图

Fig. 2 Diagram of speed cloud, speed vector and flow line in 100 t RH vacuum chamber with oxygen flow rate 750 m³/h (a) and 900 m³/h (b), lance level 5.5 m

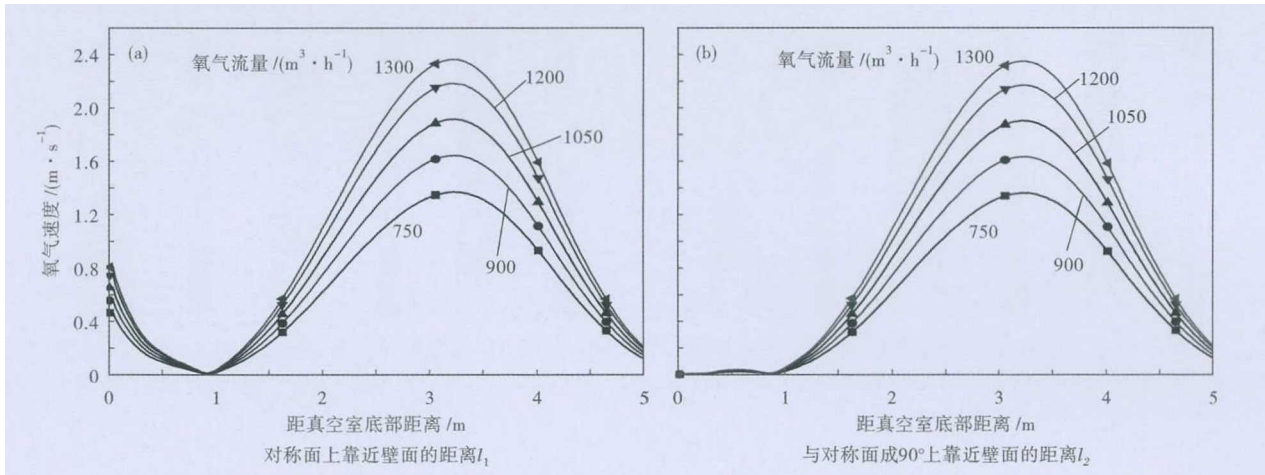


图 3 枪位 5.5 m, 氧气流速随真空室底部距离的变化曲线: (a) 前后对称面上距左侧壁面 0.010 m 处; (b) 左右对称面的距侧壁面 0.010 m 处

Fig. 3 Curves of variation in oxygen flow rate at distance from bottom of vacuum chamber: (a) distance from left wall face 0.010 m at front-behind symmetry face; (b) distance from side face 0.010 m at left-right symmetry face, lance level 5.5 m

的增加, 壁面氧气流速呈增加趋势。从图 2 中的速度矢量及流线图来看, 氧气自喷枪喷出后方向向下中心流速很大, 在轴心处始终保持向下的速度, 在接近冷钢圈区域时开始向外向上卷回, 这对于冷钢圈的形状来说非常有利, 即当冷钢氧非常严重时氧气可以直接穿过仅中间有孔的冷钢圈, 然后再向上卷到冷钢圈的底面四周, 有利于氧气和冷钢的充分接触, 使冷钢与氧气发生反应, 加快熔化。因此当枪位为 5.5 m 时, 最小氧气流量为 900 m³/h 时可满足要求。

1.3 枪位 7.5 m 时速度场的分布

为确认枪位上限 7.5 m 的可行性, 对枪位为 7.5 m 时不同氧气流量进行了计算, 其中氧气流量为 1 300 m³/h 下对应的计算结果如图 4 所示, 其中包括速度云图、速度矢量图、流线图。真空室对称面

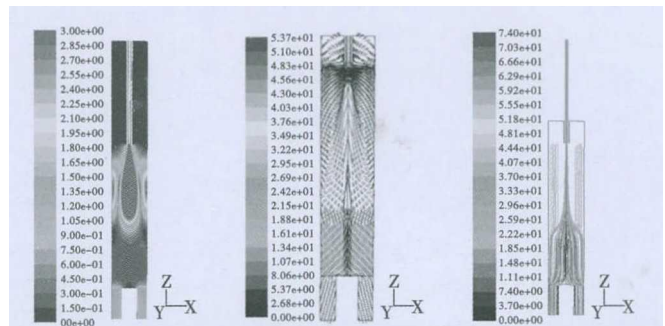


图 4 氧气流量 1 300 m³/h 枪位 7.5 m 时 100 t RH 真空室速度云图, 速度矢量图和流线图

Fig. 4 Diagram of speed cloud, speed vector and flow line in 100 t RH vacuum chamber with oxygen flow 1 300 m³/h and lance level 7.5 m

及垂直于对称面的平面上靠近真空室壁面处 ($l_1 = l_2 = 0.010$ m, 图 1 中 A、B 为起点), 距离真空室底部

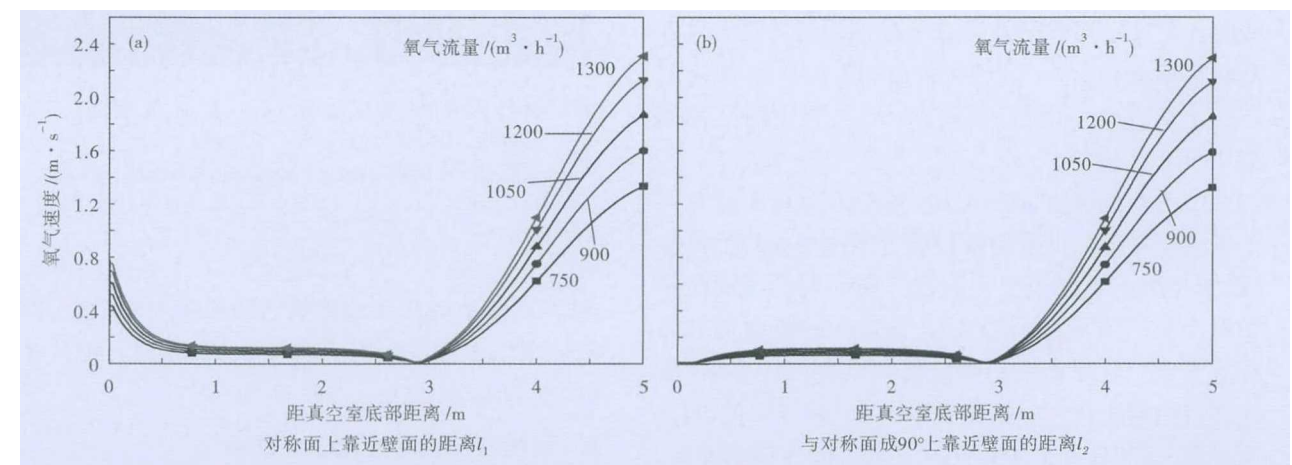


图 5 枪位 7.5 m, 氧气流速随真空室底部距离的变化曲线: (a) 前后对称面上距左侧壁面 0.010 m 处; (b) 左右对称面的距侧壁面 0.010 m 处

Fig. 5 Curves of variation in oxygen flow rate at distance from bottom of vacuum chamber: (a) distance from left wall face 0.010 m at front-behind symmetry face; (b) distance from side face 0.010 m at left-right symmetry face, lance level 7.5 m

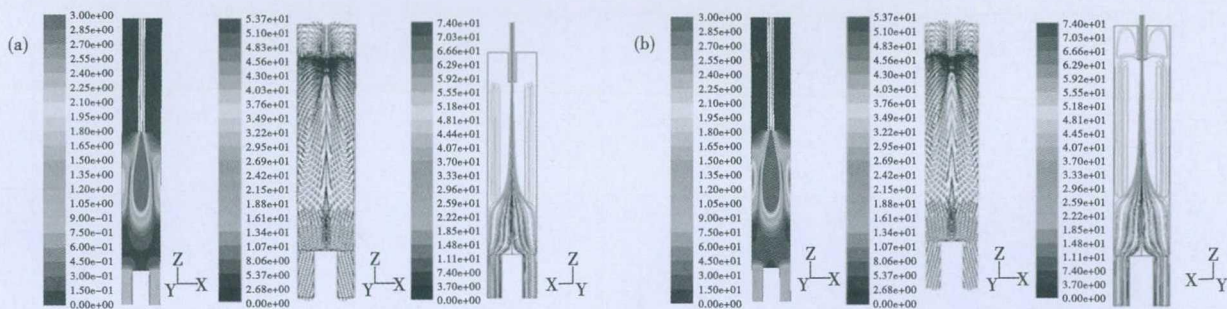


图 6 枪位 6.5 m, 氧气流量 900 m³/h(a) 和 1 200 m³/h(b) 时 100 t RH 真空室的速度云图, 速度矢量图和流线图

Fig. 6 Diagram of speed cloud, speed vector and flow line in 100 t RH vacuum chamber with oxygen flow rate 900 m³/h (a) and 1 200 m³/h (b), lance level 6.5 m

不同位置氧气流速的变化如图 5。

由图 4 的速度云图可知, 当枪位为 7.5 m 氧气流量 1 300 m³/h 时冷钢圈位置处氧气流速均过小, 结合图 5, 在距真空室底部 2.0 m 时冷钢圈位置的壁面氧气流速仅为 0.05 ~ 0.17 m/s, 虽然随着流量增加冷钢圈处氧气流速增加, 但增加值过小。从图 4 中的速度矢量, 氧气自喷枪喷出后在远离冷钢圈的上部就形成了回流, 而冷钢圈位置的氧气在整个截面上均为向下方向流动。这显然不易使氧气与冷钢圈下部接触, 即影响冷钢熔化效果。因此枪位为 7.5 m 过高, 最大氧气流量也无法满足要求。

1.4 枪位 6.5 m 时不同吹氧量对速度场的影响

枪位为 6.5 m 时不同氧气流量下对应的计算结果如图 6 所示, 其中包括速度云图、速度矢量图、流线图。真空室对称面及垂直于对称面的平面上靠近真空室壁面处 ($l_1 = l_2 = 0.010$ m, 图 1 中 A、B 为起点), 距离真空室底部不同位置氧气流速的变化如图 7 所示。

由图 6 的速度云图可知, 当枪位为 6.5 m 时两个氧气流量情况下冷钢圈位置处氧气流速均为最小值, 结合图 7, 在距真空室底部 2.0 m 时冷钢圈位置的壁面氧气流速接近为 0, 且并未随着流量增加而有所变化。从图 6 中的速度矢量及流线图来看, 氧气自喷枪喷出后在冷钢圈处形成了向上和向下的分流现象, 显然这样的枪位无法实现去除冷钢的效果, 而且可以得知此枪位为流速发生方向以及大小改变的临界值, 从速度云图也可以得出, 低于此枪位后这种情况下氧气流速会快速增大, 因此, 综合分析可

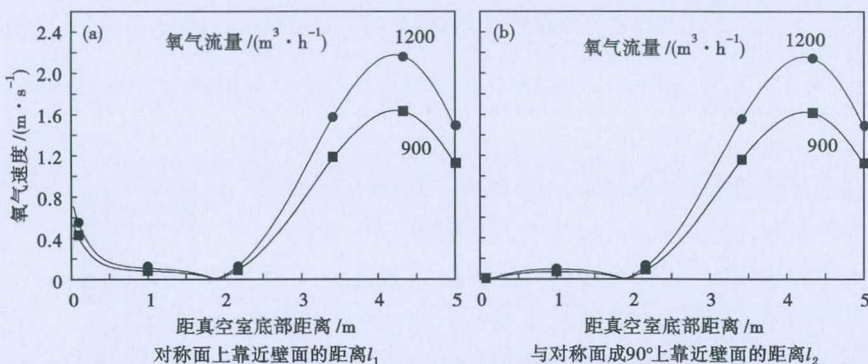


图 7 枪位 6.5 m, 氧气流速随真空室底部距离的变化曲线: (a) 前后对称面上距左侧壁面 0.010 m 处; (b) 左右对称面的距侧壁面 0.010 m 处

Fig. 7 Curves of variation in oxygen flow rate at distance from bottom of vacuum chamber: (a) distance from left wall face 0.010 m at front-behind symmetry face; (b) distance from side face 0.010 m at left-right symmetry face, lance level 6.5 m

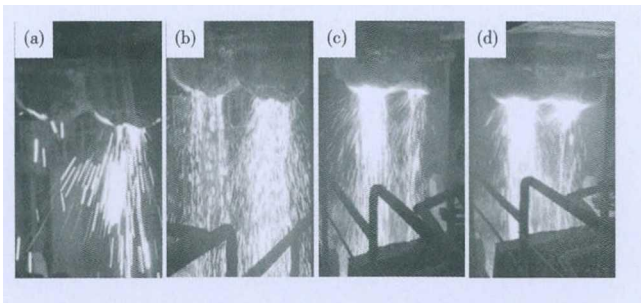


图 8 RH 枪位/m- 氧气流量/(m³·h⁻¹): 5.5-750(a); 5.8-1 000(b); 5.5-1 200(c) 和 5.5-1 300(d) 时去除冷钢效果

Fig. 8 Removal effect on cold steel with RH lance level /m- oxygen flow rate / (m³·h⁻¹): 5.5-750 (a); 5.8-1 000 (b); 5.5-1 200 (c) and 5.5-1 300 (d)

知, 6.5 m 的枪位为喷吹氧气的临界上限枪位, 因此喷吹氧气去除冷钢的工艺参数初步定为: 枪位小于 6.5 m, 流量为 900 ~ 1 200 m³/h。

2 顶枪吹氧去除冷钢工业试验

基于计算结果, 分别对 [5.5 m, 6.5 m] 不同枪位和 900 ~ 1 300 m³/h 的不同流量进行了工业实验, 试验部分结果列于图 8。

图 8(a) 显示,当顶枪氧气流量为 $750 \text{ m}^3/\text{h}$,枪位 5.5 m 时,氧流量偏小,流速较低,熔化去除冷钢效果差,验证了数值模拟结果,仅有零星火花,效率很低。图 8(b) 显示,当氧气流量 $1000 \text{ m}^3/\text{h}$,枪位 5.8 m 时,化钢效果较为明显。图 8(c,d) 显示,枪位 5.5 m ,氧气流量分别为 1200 、 $1300 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,去除冷钢效果更加明显。但氧气流量为 $1300 \text{ m}^3/\text{h}$ 时出现较强的喷溅,因此为防止后期清理困难,最大流量定为 $1200 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

结合计算和试验结果,确定吹氧去除冷钢的喷吹工艺参数定为:枪位 [5.5 m , 6.5 m], 流量 $900 \sim 1200 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

3 顶枪吹氧去除冷钢应用效果

通过本研究,吹氧去除冷钢工艺得以成功与

表 2 RH 工艺优化前后去除冷钢效果对比

Table 2 Comparison of effect to remove cold steel before and after optimization of RH process

项目	工艺优化前	工艺优化后
时间	2013 年 12 月前	2014 年 1 月后
去除冷钢方式	天然气烘烤 + 人工清理	顶枪吹氧
能源介质/流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	天然气 + 氧气/ $100 + 300$	氧气/ $900 \sim 1200$
枪位/m	5.5	5.5
月处理能力: 平均/最大/%	28.5/36.6	36.0/48.8
效果	慢,且易堵塞浸渍管	快,效果好

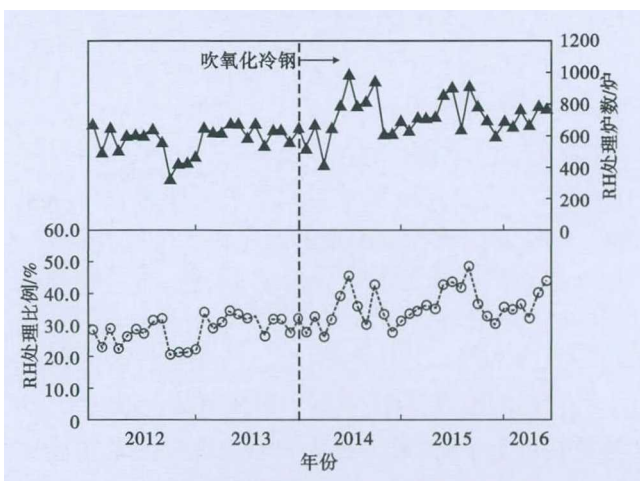


图 10 顶吹氧化冷钢前后 RH 处理比例及炉数变化
Fig. 10 Change of RH treated heats ratio and heats number before and after using top oxygen blowing process to remove cold steel

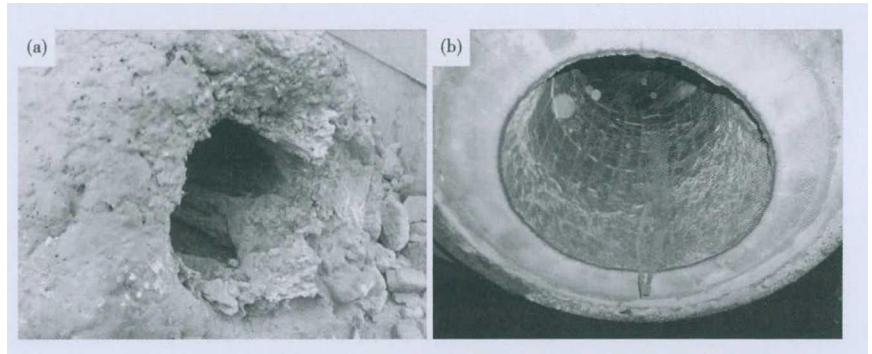


图 9 (a) 烘烤化冷钢浸渍管和 (b) 顶吹氧化冷钢环流管形貌
Fig. 9 Morphology of immersed nozzle with baking to remove cold steel (a) and circulation tube with top oxygen blowing to remove cold steel (b)

应用实施,一改原喷吹天然气烘烤时浸渍管易被熔化流下的冷钢凝结封堵的情况,顶吹氧化冷钢处理后的环流管和浸渍管非常干净,效果显著,对比如表 2 所示,效果如图 9(a,b) 所示。

顶枪吹氧去除冷钢工艺的开发与应用使 RH 连续处理能力得到了明显提高,月处理能力由 28.5% 提高到 36.0% 左右,单月最高比例达到 48.8% ,如图 10 所示。

4 结论

(1) 钢厂利用原有天然气烘烤顶枪进行吹氧去除冷钢具备可行性,适宜的喷吹工艺参数为:枪位 [5.5 m , 6.5 m], 流量 $900 \sim 1200 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

(2) 烘烤化冷钢浸渍管易被熔化流下的冷钢凝结封堵,而顶枪吹氧化冷钢处理后的环流管和浸渍管非常干净,效果更好。

(3) 顶枪吹氧去除冷钢工艺的开发与应用彻底解决了多年来困扰生产的问题,使 RH 连续处理能力得到了明显提高,月处理能力由 28.5% 提高到 36.0% 左右,单月最高比例达到 48.8% 。

参考文献

- [1] 萬谷志郎. 钢铁冶炼[M]. 李宏,译. 北京:冶金工业出版社, 2001:176-179.
- [2] 单庆林,王雷川,彭国仲. RH 真空槽冷钢和结渣形成的原因及解决措施[J]. 首钢科技, 2016(1):17-19.
- [3] 李大明,张文辉,林立平. RH 顶吹氧技术在武钢第二炼钢厂的应用[J]. 炼钢, 2007, 23(6):5-9.
- [4] 张鉴. 炉外精炼的理论与实践[M]. 北京:冶金工业出版社, 1993:541-548.
- [5] 屠浩. RH 真空精炼喷吹工艺参数优化的物理模型研究[D]. 武汉:武汉科技大学冶金工程, 2015:27-28.

刘金刚(1976-),男,博士(2006年北京科技大学),高级工程师,低成本洁净钢开发及相关工艺技术研究。

E-mail:liujg9916@163.com

收稿日期:2017-08-02