生产实践

本钢2600 m³高炉消除炉墙黏结实践

李秀峰,周洋,高维平
(本钢板材股份有限公司炼铁总厂,辽宁 本溪 117000)

摘要: 针对本钢板材股份有限公司炼铁总厂2600 m³高炉长期炉墙黏结、水温差较低、炉腹区域不活跃、经济技术指标较差等问题,分析认为原燃料有害元素长期超标、低槽位运行、高炉操作调剂不及时,导致的高炉风量不全、鼓风动能不足、炉缸堆积、炉墙大幅度黏结、炉况长期不顺是造成上述现象的主要原因。通过采取调整装料制度、优化壁体冷却制度、改善原燃料条件、锰矿洗炉、堵风口、加焦热洗炉缸等措施,高炉炉况逐步恢复至正常生产状态。

关键词: 炉况波动;低槽位;中心加焦;炉墙黏结
中图分类号: TF5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4613(2026)01-0058-05
DOI:10.3969/j.issn.1006-4613. 2026. 01. 008

Practice of Eliminating Wall Bonding in 2600 m³ Blast Furnace of Benxi Steel

LI Xiufeng, ZHOU Yang, GAO Weiping
(Ironmaking Plant of Benxi Iron & Steel Co., Ltd., Benxi 117000, Liaoning, China)

Abstract: Aiming at the problems of 2600 m³ blast furnace in Benxi Steel, the main causes such as long-term furnace wall bonding, low water temperature difference, inactive bosh area and poor economic and technical indicators were analyzed. The causes were identified as the long-term excessive harmful elements in raw fuels, low bin level operation, and untimely adjustment of blast furnace operation. Insufficient blast volume, inadequate blast kinetic energy, hearth accumulation, severe furnace wall bonding and long-term unstable furnace condition were collectively induced by these factors. By adopting measures such as adjusting the charging system, optimizing the wall cooling system, improving the raw fuel quality, conducting manganese ore flushing, plugging tuyere, and adding coke for hot flushing of the hearth, the furnace condition gradually recovered to the normal production state.

Key words: furnace condition fluctuation; low bin level; central coke charging; furnace wall bonding

本钢板材股份有限公司炼铁总厂6号高炉有效容积为2600 m³,设有30个风口和3个出铁口。第二代炉役开始于2018年9月6日。大修期间对对炉体、水渣、炉顶、上料、水处理、煤气清洗、高炉控制系统以及相关工辅设施进行了设备更新和工艺技术升级。高炉开炉后快速达产达效,产量不断提升,2020年全年产量达到251.8万t,2021年2月日均产量达到7 321 t,并创下单日产量最高7 413 t记录。2022年受市场低迷影响,6号高炉于7月25日至9月1日封炉38.3天,复风2周后产量提升至6 800 t/d;11月外围原燃料条件开始恶化,有害元素长期超标,炉况持续波动,技术经济指标显著下滑,并最终导致炉墙严重黏结,恢复难度极大。通过系统分析高炉炉况波动及炉墙黏结的根本原因,并采取一系列恢复措施,高炉逐步恢

李秀峰,高级工程师,1997年毕业于鞍山钢铁学院钢铁冶金专业。E-mail:btu-zy-134@163.com

复正常，本文对相关工作进行介绍与总结。

1 炉况波动原因分析

1.1 高炉操作影响

2022年6号高炉原燃料条件发生改变，大块干熄焦比例由70%下降至50%以下，6号高炉自身操作调剂不到位，炉况发生波动。后经几次调整，炉况顺行得到改善，但随即在急于提产的过程中再次造成气流分布失衡。此时风量4 800 m^3/min，比全风状态少200~300 m^3/min，压差维持在185~190 kPa，高炉长期处于高压差操作、鼓风动能不足状态，加之采用中心加焦量偏大的布料模式，中心死焦堆过大[1]，在风量长期萎靡后，无法吹透中心，高炉透气性持续变差，加风困难，造成炉缸堆积，边缘气流不稳，炉墙大幅度黏结[2-3]。高炉主要经济技术指标及参数如表1所示。

表1 高炉主要经济技术指标及参数

Table 1 Main Economic and Technical Indicators and Parameters of Blast Furnace

时间	产量/(t/d)	风量/(m^3/min)	焦比/(kg/t)	燃料比/(kg/t)	压差/kPa	水温差/℃
2022年11月	6 417	4 862	409	538	174	1.0~2.0
2022年12月	4 966	4 645	489	545	174	0.9~1.5
2023年1月	4 630	4 565	502	572	175	0.9~1.5
2023年2月	4 908	4 487	455	554	178	0.9~1.5

高炉运行状态的典型表征如下：

（1）7~13段冷却壁温度整体呈缓慢下行趋势，波动幅度明显减小，各段冷却壁水温差随之减小。炉腹区域11~13段铸铁冷却壁温度由100~230 ℃下降至50~55 ℃，7~10段铜冷却壁温度由50~60 ℃下降至38~40 ℃，水温差由1.0~2.0 ℃下降至0.9~1.5 ℃，表明炉腹、炉腰热负荷明显不足，炉墙换热趋于冷却强而热量不足的状态。炉顶多点温度分布区间拉大，高温与低温扇区交替出现，气流分布不均。

（2）高炉对高风量的承载能力显著减弱，在几次炉况波动后，操作风量由4 862 m^3/min下降至4 487 m^3/min，风量、风压严重不对称，长期高压差操作，炉身对气流阻力增大，炉况应变能力明显减弱[4]，大幅度减负荷后顺行仍未见改观。

（3）3个出铁场炉温偏差大，2#铁口与3#铁口相比，铁水[Si]含量波动范围可相差0.3个百分点以上，出铁物理温度时高时低，炉温平衡难度加大。

（4）炉芯温度下降，由正常530~590 ℃逐步下降至475 ℃以下，炉缸活跃程度持续恶化，产量降低至4 908 t/d。

综上，在原燃料条件变化的情况下，高炉操作未能及时完成从高强度冶炼向稳定顺行的操作模式转换，长期处于低风量、高压差、中心死焦堆大的不利炉型，成为炉况波动及炉墙黏结的直接诱因。

1.2 焦炭灰分影响

6号高炉主要入炉焦四焦炭，配加一定量焦二、焦三中块及外购焦，焦三、焦四灰分控制标准≤12.8%。受低灰分焦煤资源紧张影响，12月中旬焦三、焦四焦灰分开始上升，由上旬的12.89%上升至下旬的13.20%，2023年1月焦三、焦四月平均灰分为13.27%，最高达13.58%。焦炭的强度，特别是高温强度是软熔带焦窗和滴落带焦窗透气性和透液性的决定性因素，焦炭灰分升高后，焦炭气孔率下降，固定碳减少，渣量增加，焦炭强度降低[5]，焦炭易碎裂且含粉量增加。灰分长期高水平运行，高炉透气性变差，影响高炉炉缸活跃及煤气流分布[5]。2023年1月焦四焦炭灰分变化情况如图1所示。

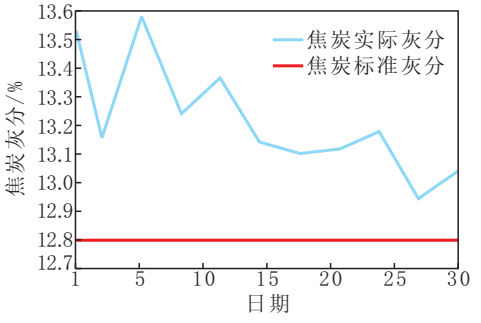


图1 2023年1月焦四焦炭灰分变化情况

Fig. 1 Variation of Coke Ash Content in No. 4 Area in January 2023

1.3 烧结矿质量影响

冬季生产中，受低温和含水量影响，烧结混匀矿及熔剂中冻块多且块度较大。与此同时，受原料作业区皮带故障影响，烧结机多次出现待铁料、待熔剂停机，上料量不足，导致烧结工况波动较大。一烧混匀矿TFe含量在59.13%~62.20%波动，石灰石CaO含量在47.00%~51.73%波动，生石灰CaO含量在80.05%~82.86%波动，波动幅度较大[6]，烧结矿化学成分与质量波动明显，加大了高炉操作难度。

1.4 低槽位运行影响

入冬后原料分厂皮带事故频发，仅2023年1月皮带故障即达25次，造成原燃料保供困难，影响焦炉、烧结机稳定生产，导致高炉焦炭和烧结矿低槽位，炉料摔打次数增加，粉末增多且质量变差。6号高炉2022年12月至2023年2月烧结低槽位(≤2 500 t)运行达53班次(每月约106班次)，焦炭低槽位(≤250 t)运行达70班次。

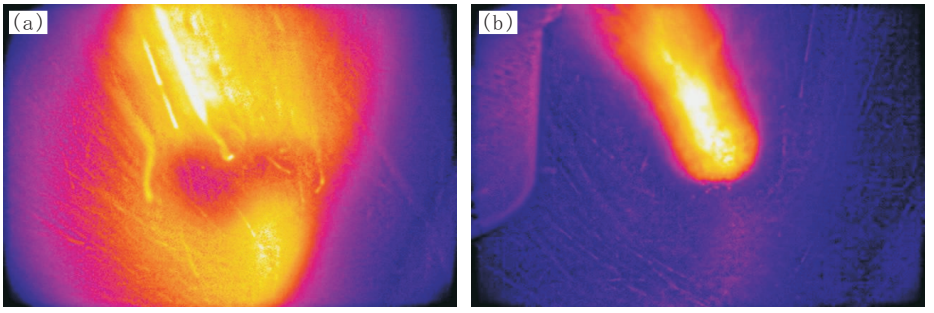
1.5 有害元素影响

入炉原燃料有害元素偏高，入炉锌负荷在0.5~0.7 kg/t，1月末最高达到1.18 kg/t，主要为烧结配料中尘泥干粉锌含量高(锌含量1.0%)。锌的挥发温度较低，在炉内易发生循环富集，使炉内炉料及焦炭中锌含量显著高于入炉平均水平。锌蒸汽在炉内上部冷却后氧化并沉积于炉衬砖缝和炉壁表面，引起体积膨胀并造成结瘤，增加炉料在高炉下降过程中的阻力，加大了高炉日常操作难度，加剧了炉墙黏结[6]。

2 炉况恢复过程

2.1 前期炉况调整

(1) 调整装料制度，减少中心焦量，拓宽矿石平台。以稳定高炉中心气流为主，疏导边缘气流，拓宽布料平台，形成合理的两道气流制度[7-8]，增强高炉稳定性。逐步减少中心焦量(7.5圈→7.0圈→6.5圈)，增大外扬最外环布料角度(40.5°→41.5°)，拓宽矿角差(8°→9°)，中心矿由1圈变为2圈，稳定煤气流。调整后煤气流分布稳定，煤气利用率由36.5%上升至38.5%，炉温易于平衡。调整前后气流热成像如图2所示，可见中心气流明显加强，周边异常管道气流明显减少。



(a) 调整前；(b) 调整后

图2 调整前后气流热成像

Fig. 2 Thermal Imaging of Airflow before and after Adjustment

(2) 休风更换坏风口，集中加焦热洗。炉况不稳定，导致坏风口数量增多，向炉内大量漏水，影响高炉恢复进程。于1月15日加焦100 t，休风更换掉8个坏风口，堵4个风口送风，并改全焦冶炼。复风后各段壁体温度呈上升趋势，水温差由0.8 ℃上升至最高2.0 ℃。部分区域壁体温度上升，炉墙黏结消除。炉芯温度开始上升，由最低475 ℃逐步上升至565 ℃。

(3) 加强炉温管理，控制压差操作。通过适当降低冶炼强度，将铁水[Si]含量控制在0.50%~0.60%，下调炉渣碱度，改善渣铁流动性、炉缸透液性。日常操作中将压差控制在180 kPa以下，操作压差170~175 kPa，压差超限无下行趋势及时减风处理，避免高压差操作导致炉况出现大幅度波动，视参数情况稳定使用风量(4 650±50)m³/min。

(4) 提高风温使用水平。因炉况欠稳、风温使用偏低，造成鼓风动能不足，对炉况恢复强化不利，随焦炭负荷增加，逐步提高鼓风风温，风温由

1 020 ℃提高至1 110 ℃，提高鼓风动能、理论燃烧温度，降低燃料消耗。

（5）配加锰矿洗炉。2月9—25日配加锰矿洗炉，提高生铁含锰量，每批料配加2 t锰矿，生铁含锰由0.14%提高至0.42%，改善渣铁流动性，活跃炉缸，处理炉缸堆积。

（6）改善原燃料条件。通过调整配煤结构，采用增加低灰煤资源降低焦炭灰分，焦炭灰分由2月初13.5%逐步降低，至2月末降低至12.8%以下，受焦煤资源条件限制，灰分维持在12.7%~12.9%。2023年2月焦炭灰分变化情况如图3所示。

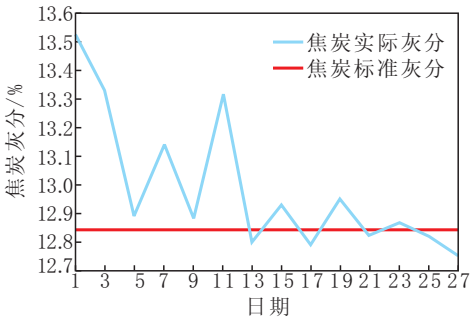


图3 2023年2月焦炭灰分变化情况

Fig. 3 Variation of Coke Ash Content in February 2023

2.2 休风炉况恢复措施

2.2.1 集中加焦堵风口热洗

2月27日白班利用计划检修期间，安排休风并分批集中加焦，对炉缸进行热洗处理。休风期间共分3批次加焦430 t（200 t+150 t+80 t），热洗炉缸，集中加焦采取平铺方式、取消中心焦量，并改全焦冶炼，燃料比提高至648 kg/t。总计休风23 h44 min，更换4个坏风口，7#、16#、26#、30#使用加长风口（640 mm），更换布料溜槽，堵10个风口送风恢复，风口面积0.222 6 m²，提高风速和鼓风动能、保证炉缸活跃程度[9]。休风期间测量料面形状发现，炉内料面偏差较大，人孔部位料线1.58 m，点火孔部位0.94 m，料面高差达到0.67 m。因12#~20#风口上方壁体温度活跃，料面偏深，采用该区域多堵风口方式，其他方向壁体温度平稳且低，采用少堵风口方式[10]。休风后堵风口情况见图4。

2.2.2 测量料面轨迹及校正溜槽角度

休风后料线控制在5.0 m，利用北科亿力公司的红外线扫描仪进行料流轨迹测试，掌握炉料在特定料线下的最大极限角度，并对溜槽倾角进行校正，将偏差控制在0.2°以内。对于不同料线深度（5.0 m→4.0 m→3.0 m→2.0 m），通过布料试验，测量出炉料在特定料线下与炉墙碰撞的极限角度。

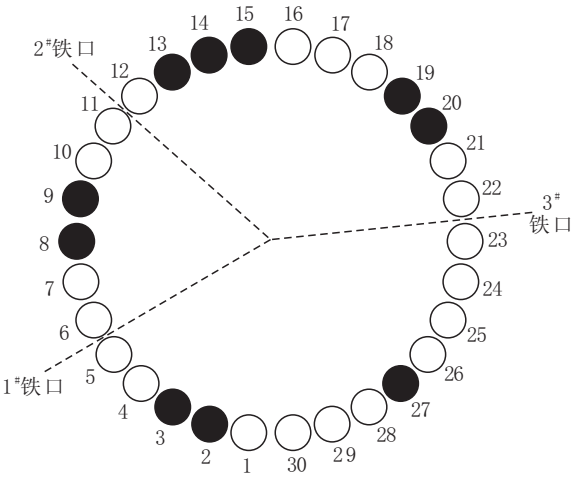
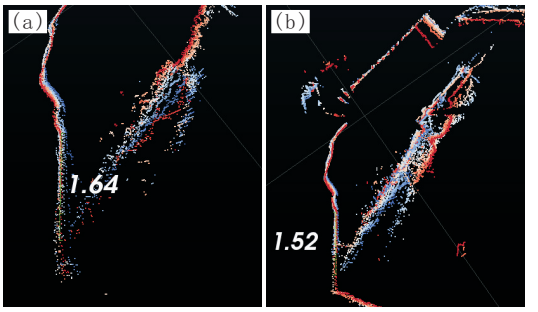


图4 休风后堵风口情况

Fig. 4 Condition of Tuyere Plugging after Blow down

测量结果显示，料线1.64 m，溜槽倾角41°的情况下，矿石的落点刚好与炉墙根部吻合；料线1.52 m，溜槽倾角42°的情况下，焦炭的落点刚好与炉墙根部吻合。料流轨迹测试碰撞点见图5。



（a）矿石41°碰撞点；（b）焦炭42°碰撞点

图5 料流轨迹测试碰撞点

Fig. 5 Impact Points in Material Trajectory Test

根据测量结果及实际料面形状，复风后优化布料制度，角度整体内移1°，最外环角度由42°调整为41°，矿角差保持不变。休风前后布料制度调整情况如表2所示。

2.2.3 加风节奏控制

为确保炉况一次恢复成功，对加风节奏进行了严格控制。2月28日7:18送风，风量1 550 m³/min，压差74 kPa，堵10个风口。在集中加焦的基础上

表2 休风前后布料制度调整情况

Table 2 Adjustment of Charging System before and after Blow down

档位	溜槽倾角/(°)		圈数	
	休风前	休风后	焦	矿
9	42.0	41.0	2	3
8	40.2	39.2	2	3
7	38.0	37.0	2	3
6	35.5	34.5	2	2
5	33.0	32.0	2	1
4	30.0	29.0	1	—
1	15.0	15.0	5	—

逐步提高炉温，铁水[Si]最高达到3.6%左右，高炉在高炉温（铁水[Si]1.8%～2.5%）区间运行时间超过48 h，实现对炉缸的充分热洗，促进炉墙黏结层剥落。加风阶段严格控制加风节奏：上风初期将炉温控制在1.0%～1.5%，自3月1日起壁体热负荷和炉芯温度均呈现活跃及上升状态（见图6和图7）。3月1日22个风口送风，风量加至3 200 m³/min，风速200 m/s，顶压80 kPa，压差150 kPa；3月2日23个风口送风，风量加至3 500 m³/min，风速215 m/s，顶压90 kPa，压差155 kPa；3月4日25个风口送风，风量加至4 400 m³/min，风速245 m/s，顶压170 kPa，压差170 kPa，7～16段壁体水温差达到3.0 ℃；3月5日26个风口送风，风量加至4 800 m³/min，风速255 m/s，顶压190 kPa，压差165~170 kPa。3月6日开始，送风风口个数增加到28个，风量达到5 050 m³/min以上，风速260 m/s，顶压218 kPa，压差167~173 kPa，3月10日炉芯温度上行至594 ℃，3月15日矿批重加至78 t，焦比降至405 kg/t，产量提升至6 500 t/d，炉况恢复正常。

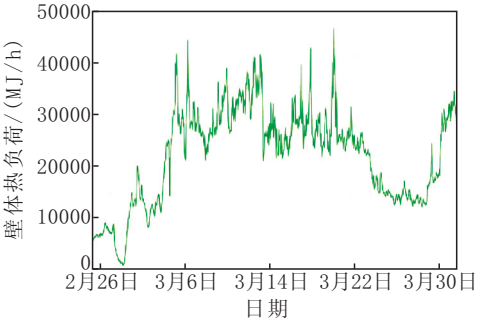


图6 7～16段壁体热负荷变化趋势

Fig. 6 Thermal Load Change Trends of Furnace Wall from 7 to 16 Section

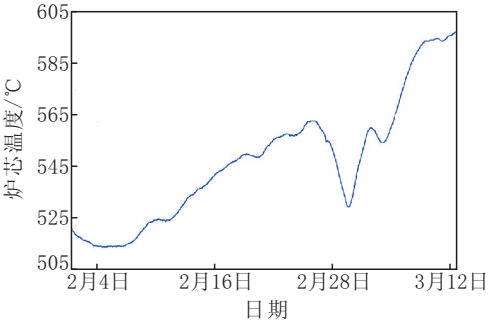


图7 炉芯温度变化趋势

Fig. 7 Change Trends of Furnace Core Temperature

3 高炉运行状态

炉况恢复正常后，继续优化各项操作制度，调整布料矩阵、加强高炉操作管理，强化炉况，2023年6月以后高炉各项指标开始好转，高炉趋于稳定顺行，产量、焦比、燃料比恢复至正常生产水平。优化后高炉主要经济技术指标及参数见表3。

表3 优化后高炉主要经济技术指标及参数

Table 3 Main Economic and Technical Indicators and Parameters of Blast Furnace after Optimization

日期	产量/(t/d)	风量/(m³/min)	焦比/(kg/t)	燃料比/(kg/t)	压差/kPa	总水温差/℃
2023年4月	6 306	4 901	427	532	170	2.5~4.0
2023年5月（休风94 h）	5 215	4 847	449	561	168	2.5~4.0
2023年6月	6 412	4 904	402	541	170	2.5~4.0
2023年7月	6 629	5 063	407	543	171	2.5~4.0
2023年8月	6 614	5 053	410	536	171	2.5~4.0

4 结语

本钢6号高炉的生产实践表明，原燃料质量波动及有害元素负荷偏高是炉况波动和炉墙黏结的首要因素。通过采取如下措施：调整装料制度，减少中心焦量，拓宽矿石平台；利用计划检修期间安排休

（下转第67页）

经过上述改造，可精确控制煤气和空气供入量，从源头实现节能降耗，精准的气氛控制能够有效降低氧化烧损，减少钢材在加热过程中的损耗。同时，系统可根据煤气热值波动和压力波动，实时动态调整燃烧配比，适应煤气热值波动范围更广，保障加热炉稳定、高效且环保运行。

3.2 自动控制系统

根据低氮燃烧技术应用方案可知，自动化控制系统做适应性改变，间拔阀和脉冲控制信号、氧含量监测信号进入加热炉电力线通信（Power Line Communication，PLC）系统，增加相应模块，为检测设备运行情况，设置一套个人数字助理（Personal Digital Assistant，PDA）系统，同时对相关人机界面（Human-Machine Interface，HMI）人机交互画面及控制程序进行修改。

4 低氮燃烧技术应用效果

朝阳钢铁加热炉应用低氮燃烧技术后，燃烧污染物的排放浓度符合国家标准，对正常生产的某个时段的污染物进行统计可知，污染物能够达标排放，氮氧化物排放浓度均值由182 mg/m^{3}降至93 mg/m^3。对炉内气氛精准监测控制可以保证燃料完全燃烧，由能源统计数据可知，燃料高焦混合煤气的消耗由0.91 GJ/t降至0.90 GJ/t，节约燃料0.01 GJ/t。

5 结语

结合鞍钢集团朝阳钢铁有限公司ASP热轧加热炉的生产实际，制定并应用了低氮燃烧技术。实践表明，该技术应用后，氮氧化物排放浓度均值由182 mg/m^{3}降至93 mg/m^3。对炉内气氛精准监测控制可以保证燃料完全燃烧，节约燃料0.01 GJ/t，不仅减少了污染物排放，还降低能源消耗，达到了节能环保与绿色降碳的目的。因此，建议相关企业在具备实施条件时，积极推动低氮燃烧技术在热轧加热炉上的应用与推广。

参考文献

[1] 祁永平，孙文君，汪全儒，等.冶金工业加热炉先进自动燃烧控制系统设计与应用研究[J].工业加热，2025，54(5)：12-15.
[2] 赵国凌，畅哲峰，高德仁，等.PM2.5限排与燃煤工业锅炉发展[J].工业锅炉，2013(1)：35-41.
[3] 魏秀东，苗龙，徐小科.1700 ASP热轧加热炉双蓄热技术改造探索[J].鞍钢技术，2022(4)：37-40，50.
[4] 王艳丽.基于降低氮氧化物排放量的加热炉低氮燃烧器的改造[J].工业加热，2017，46(3)：19-21.
[5] 夏信虎.石化行业工艺加热炉烟气脱硝技术分析[J].化工管理，2019(22)：210-212.
[6] 宁中赫.超低排放燃烧技术在包钢长材厂高线加热炉中的应用[J].冶金管理，2023(4)：26-27.
[7] 宁方尧，梁勇，谢绍锐，等.蔗渣锅炉烟气双达标治理的实践[J].广西糖业，2021(4)：28-30.
[8] 林杨，李俊达.不同燃料对氮氧化物排放浓度的影响[J].天津冶金，2016(S1)：57-58，61.
[9] 范新庆.加热炉高精度燃烧控制技术的研究与应用[J].中国资源综合利用，2020(9)：178-179.
[10] 许京铭，朱继民，李新林，等.轧钢加热炉采用低氮燃烧法降低NOx排放的改造与实践[J].冶金能源，2021，46(3)：42-44.

（编辑 许营）
修回日期：2025-07-10

（上接第62页）

风并分批集中加焦，对炉缸进行热洗处理；使用红外线扫描仪进行料流轨迹测试，测量出炉料在特定料线下与炉墙碰撞的极限角度后校正等，有效活跃了炉缸，消除了炉墙黏结，保证了高炉稳定顺行，为类似条件下高炉的操作调整提供了有益经验。

参考文献

[1] 吴胜利，王筱留，张建良. 钢铁冶金学（炼铁部分）[M]. 第4版. 北京：冶金工业出版社，2019：168-172.
[2] 项钟庸，王筱留. 高炉设计-炼铁工艺设计理论与实践[M]. 第2版. 北京：冶金工业出版社，2014.
[3] 许钦伸，郭泽华. 马钢B高炉炉役后期稳定操作炉型实践[J]. 冶金动力，2022(6)：105-109.
[4] 周洋. 本钢7号高炉炉况失常原因分析及恢复实践[J]. 工程技术，2022(3)：297-301.
[5] 朱仁良. 宝钢大型高炉操作与管理[M]. 北京：冶金工业出版社，2015：213-215.
[6] 周传典. 高炉炼铁生产技术手册[M]. 北京：冶金工业出版社，2002：109-112.
[7] 车玉满，孙鹏，李连成，等. 鞍钢铜冷却壁高炉操作炉型管理模型开发与应用[J]. 炼铁，2007，26(5)：18-21.
[8] 林国太. 三钢8号高炉炉况失常及恢复处理[J]. 福建冶金，2017，46(2)：12-14.
[9] 王志堂，刘响. 马钢4号高炉稳定渣皮的操作措施[J]. 炼铁，2020，39(2)：15-18.
[10] 谷键. 太钢5号高炉炉况波动的原因及应对措施[J]. 炼铁，2022，41(1)：39-42.

（编辑 查松妍）
修回日期：2025-09-01