

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20180033

高炉炉缸侵蚀特征及侵蚀原因探析

马洪修¹, 张建良¹, 焦克新¹, 常治宇¹, 王一杰¹, 郑朋超²

(1. 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2. 首钢京唐钢铁联合有限责任公司, 河北 唐山 063200)

摘 要: 为了探析高炉炉缸侵蚀特征及其共性原因, 基于京唐 1 号高炉和通才 3 号高炉的现场数据, 分别计算了炉缸侧壁炭砖残余厚度和死料柱漂浮高度, 明确了炉缸炭砖的侵蚀原因, 证实了炉缸炭砖的侵蚀部位。结果表明, 当死料柱透气性变差时, 炉底温度逐渐降低, 铁水环流加重, 造成了耐火材料的异常侵蚀; 由京唐 1 号高炉死料柱根部位置和炭砖侵蚀位置的关系, 证实了死料柱根部对应炭砖易受到异常侵蚀, 即铁口中心线下方 1~3 m。由于死料柱物理状态和漂浮状态随生产参数和高炉状态的变化而变化, 因此侵蚀部位也随之变化, 故应稳定原燃料条件及生产参数, 并建立死料柱漂浮高度和炭砖残余厚度的实时监测机制, 从而保证高炉安全生产, 实现高炉长寿。

关键词: 高炉; 炉缸; 炭砖残厚; 死料柱; 高炉长寿

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2018)09-0014-06

Analysis of erosion characteristics and causes of blast furnace hearth

MA Hong-xiu¹, ZHANG Jian-liang¹, JIAO Ke-xin¹, CHANG Zhi-yu¹,
WANG Yi-jie¹, ZHENG Peng-chao²

(1. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Shougang Jingtang United Iron and Steel Co., Ltd., Tangshan 063200, Hebei, China)

Abstract: To further study erosion characteristics of carbon brick and common causes of lining erosion of blast furnace hearth, two domestic blast furnaces were investigated and the situations were analyzed. Based on the field data, the thickness of the hearth and the floating height of dead man were calculated, respectively. The root cause of erosion of hearth was identified, and the location of the erosion has been determined. The results showed that when the permeability of the dead man becomes worse, the circulation of molten iron is aggravated, resulting in erosion of brick in the root of dead man. However, the floating height of dead man varies correspondingly with the practical production parameters. An example was given, which verified the location of the erosion of the blast furnace hearth within the 1-3 m range below the tap hole. The key to prolong the service lies in the stable raw materials supply, operation and establish of mechanism, a system to check monitoring the floating height of dead man and residual thickness of carbon brick.

Key words: blast furnace; hearth; residual thickness of carbon brick; dead man; long campaign life

高炉长寿一直是高炉炼铁人员关注的重要课题, 高炉一代炉役的寿命对高炉炼铁成本有着重要的影响, 然而近年来高炉烧穿事故仍时有发生, 因此, 有必要分析高炉炉缸安全状态及其产生的共性原因。

炭砖的侵蚀是由于死料柱透液性较差和高炉渣流动性较差导致的^[1-4]。当高炉渣与死料柱物料润湿性较好时, 滞留在死料柱中的渣量增加, 死料柱透液性变差, 铁水不能穿透死料柱, 形成了铁水环流。研究者证实了炉缸内铁水对炭砖的剪切力为 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ m/s 时^[5-7], 其不足以对高炉炭砖造成影

响。焦克新等^[8]认为, 铁水流动行为对对流传热系数有较大影响, 随着对流传热系数的增加, 炉缸侧壁温度升高, 导致铁水的碳不饱和度增加, 炭砖不断向铁水中渗碳和溶解。死料柱的漂浮状态同样影响着铁水流动行为, 李洋龙等^[9]研究表明, 死料柱漂浮高度不同时, 铁水流动行为不同。朱进锋等^[10-11]分析了高炉死料柱的受力情况, 建立了一般条件下死料柱的受力模型, 推导了最小死铁层深度和死料柱浮起高度的计算公式。然而, 对高炉炉缸炭砖侵蚀的部位及其共性原因没有相关报道。

基金项目: 国家青年科学基金资助项目(51704019)

作者简介: 马洪修(1993—), 男, 硕士生; **E-mail:** hongxiума@126.com; **收稿日期:** 2018-01-23

通讯作者: 张建良(1965—), 男, 博士, 教授; **E-mail:** zhang.jianliang@hotmail.com

本文调研了京唐1号高炉和山西通才3号高炉的基本情况,计算了炉缸侧壁残余厚度,探析了高炉侵蚀严重位置的原因,并建立了高炉实时监测安全机制。

1 高炉炉缸侵蚀特征分析

为了探析高炉侵蚀特征,调研了首钢京唐1号高炉及山西通才3号高炉的基本情况,分析了炉缸炉底热电偶温度,计算了炉缸侧壁炭砖残余厚度。

1.1 京唐1号高炉安全状态分析

1.1.1 京唐1号高炉基本情况

京唐1号高炉(5 500 m³)于2009年5月21日投产开炉。如图1所示,炉缸侧壁(铁口中心线以下)布置第七、八、九层热电偶。炉缸侧壁内侧使用抗铁水侵蚀较强的NMA炭砖,外侧则使用导热系数较高的NMD半石墨炭砖,即能保证炭砖的抗铁水侵蚀能力,也有较好的导热性能,从而保证炉缸冷却,以延长炭砖使用寿命^[12-13]。

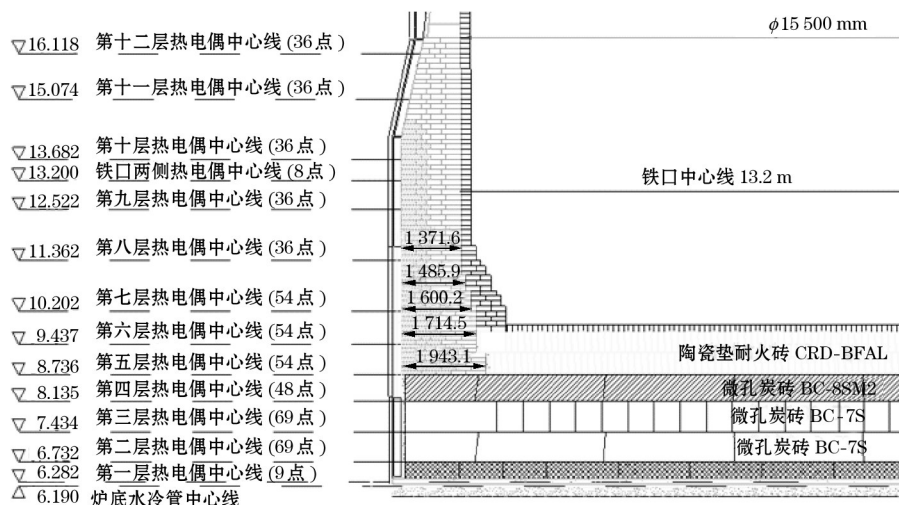


图1 京唐1号高炉炉缸炉底内衬结构及热电偶布置

Fig. 1 Hearth lining structure and thermocouple layout of Jingtang No.1 BF

1.1.2 京唐1号高炉炉缸侧壁炭砖残余厚度

京唐1号高炉从开炉至今,炉缸侧壁第七层(铁口下方2.998 m)和第八层(铁口下方1.838 m)热电偶多次升高,炉缸侧壁第七层内圈热电偶最高温达到570℃。根据1号高炉炉缸侧壁热电偶的历史温度(2009年5月—2017年12月)和一维稳态炭砖侵蚀模型^[14-19],计算了炭砖残余厚度,如图2所示。圆周方向上,铁口区域(夹角30°范围内)炭砖侵蚀较

为严重,非铁口区域炭砖侵蚀较轻;高度方向上,第七层及第八层热电偶对应的炭砖侵蚀较为严重。炭砖最薄厚度为500 mm左右。

1.2 通才3号高炉安全状态分析

1.2.1 通才3号高炉基本情况

山西通才3号高炉于2012年7月17日投产开炉。如图3所示,炉底从下向上依次使用炭复合砖、刚玉莫来石陶瓷垫,炉缸侧壁(铁口中心线以下)从

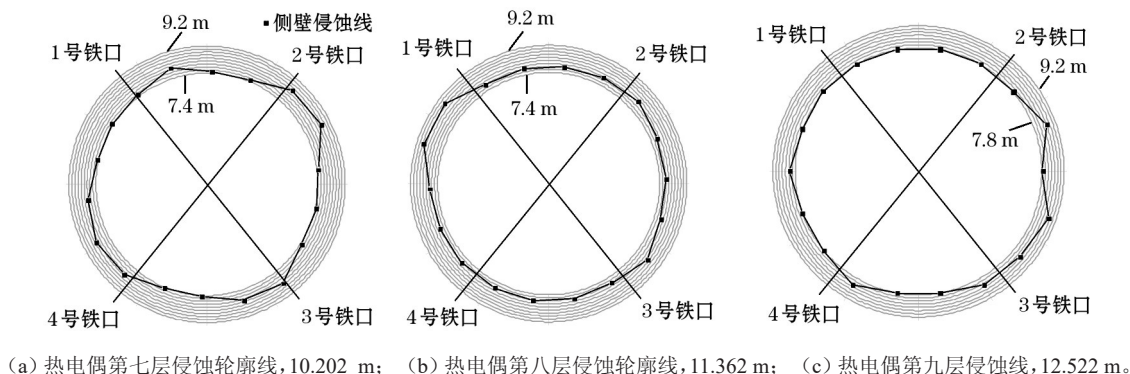


图2 不同标高处的轮廓侵蚀

Fig. 2 Variation of erosion shape with different heights

外到内依次使用炭复合砖和微孔刚玉陶瓷杯壁。分东西 2 个铁口, 22 个风口, 炉缸直径为 8.4 m, 死铁

层深度为 1.8 m。炉缸区域(铁口中心线下)布置 4 层热电偶。

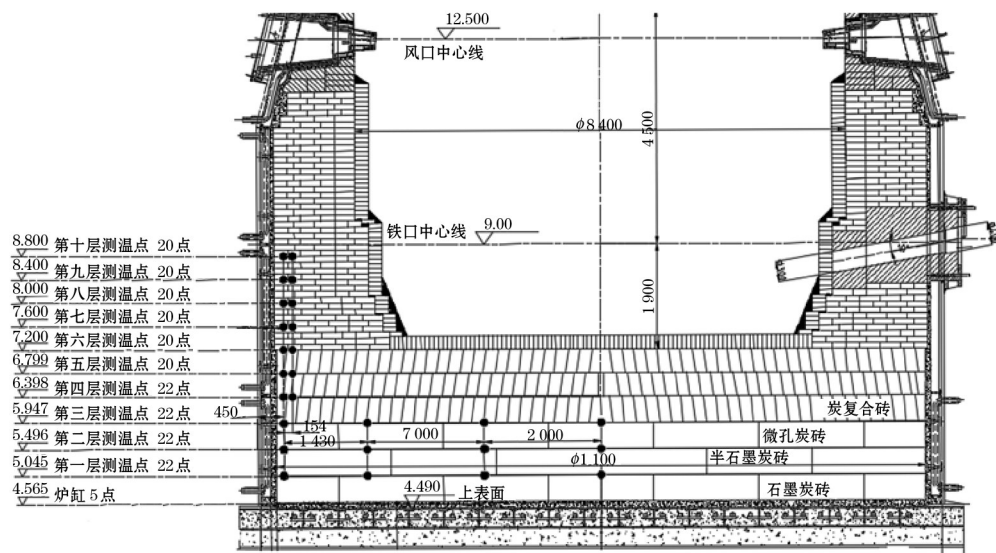


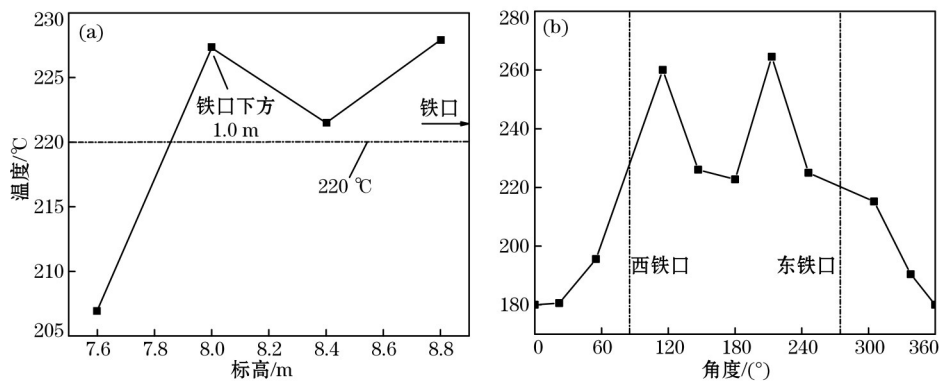
图 3 通才 3 号高炉炉缸炉底内衬结构及热电偶布置

Fig. 3 Hearth lining structure and thermocouple layout of Tongcai No.3 BF

1.2.2 通才 3 号高炉炉缸侧壁热电偶温度情况

炉缸区域不同标高处热电偶的温度情况如图 4(a)所示, 热电偶平均温度为 220 °C, 且随着高度的降低呈逐渐降低的趋势, 值得注意的是, 铁口中心

线下方 1.0 m 处热电偶温度较高。炉缸侧壁与炉底交界处周向热电偶的温度情况如图 4(b)所示, 铁口区域(铁口夹角 30°范围内)热电偶温度明显高于非铁口区域, 铁口区域热电偶最高温度为 260 °C。



(a) 纵向变化; (b) 周向变化。

图 4 热电偶纵向及周向变化

Fig. 4 Variation of temperature with longitudinal and circumferential

2 高炉炉缸侵蚀共性原因分析

通过对比分析首钢京唐 1 号高炉和通才 3 号高炉安全状态, 两座高炉侵蚀严重的部位纵向高度上均处于铁口中心线下方 1~3 m, 周向上均处于铁口区域, 为了探析炉缸侵蚀的共性原因, 分析了高炉炉缸热电偶温度和高炉出铁情况。

2.1 炉缸侧壁温度升高原因分析

京唐 1 号高炉炉底与侧壁热电偶温度情况如图

5 所示, 2012 年炉底温度不断下降, 当下降到一定温度时(180 °C), 侧壁温度开始异常升高。京唐 1 号高炉出铁时间随时间的变化情况如图 6 所示, 2012 年京唐 1 号高炉出铁时间不断下降。结果表明, 京唐 1 号高炉炉底与侧壁热电偶温度呈负相关趋势, 且 2012 年期间出铁时间逐渐下降, 炉缸进入不活跃状态, 这表明滞留在死料柱中渣量上升(图 7), 导致出铁次数增多、出铁量下降。

死料柱的漂浮状态和透液性都会影响铁水的

流动。不同的铁水流动状态必然影响着炉底及侧壁的温度^[7]。铁水流动分为3个阶段。出铁之前,铁滴不断生成和滴落,形成了由上到下的铁水流动,死料柱所受浮力也随之变化,再次影响着铁水的流动,并且冶炼强度越大,铁水流动越强烈。出铁期间,内外压差不同,内部铁水必然流出铁口。出铁之后,由于铁口附近出铁较多,出铁口区域与炉缸对侧形成了液面差,造成了铁水流动。值得注意的是,当死料柱透气性较差时,出铁期间及出铁后,铁水易形成围绕着死料柱的铁水环流(图7),且死料柱根部位置有效空间小,环流最为严重。因此,京唐1号高炉死料柱透气性变差时,炉缸侧壁热电偶温度异常升高。

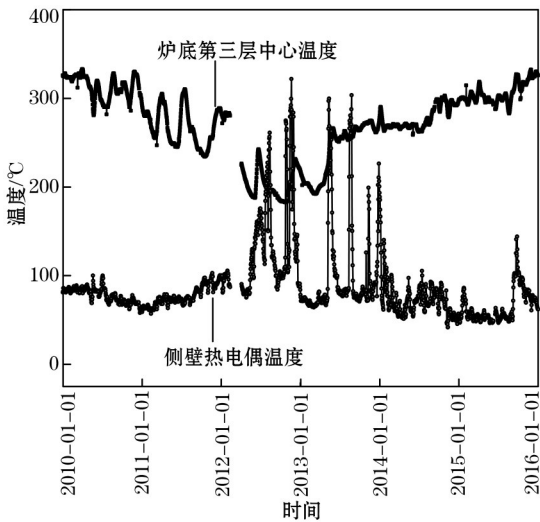


图5 京唐1号高炉炉底与侧壁热电偶温度关系
Fig. 5 Relationship between temperature of sidewall and temperature of bottom

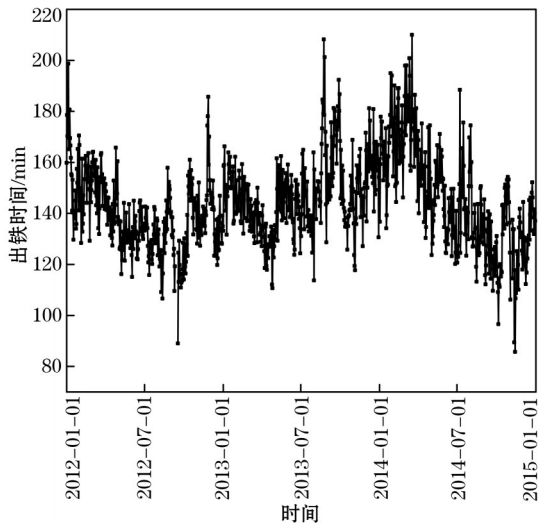


图6 出铁时间随着时间的变化情况
Fig. 6 Variation of tapping time with time

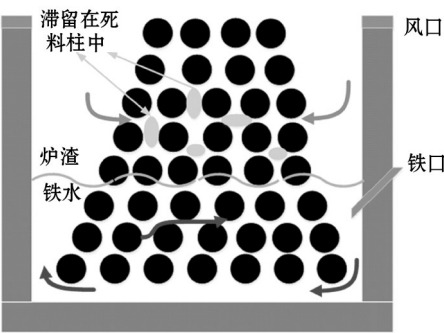


图7 死料柱渣铁穿焦示意图
Fig. 7 Schematic diagram of dead man

2.2 炉缸侧壁温度升高位置分析

京唐1号高炉炉缸侧壁炭砖侵蚀严重部位为铁口中心线下方2.998 m,通才3号高炉炉缸侧壁温度最高的位置为铁口中心线下方1.0 m。均位于象脚区域且与死料柱根部位置相近。假设京唐1号高炉侵蚀严重部位对应着死料柱根部,结合京唐1号高炉的设计参数及生产参数(表1),采用朱进锋等^[10-11]

表1 京唐1号高炉设计参数及操作参数
Table 1 Design parameters and operating parameters of Jingtang No.1 blast furnace

参数	数值
有效容积 V/m^3	5 500
炉喉直径 d_l/m	11.2
回旋区深度 d_{RW}/m	1.5
吨铁消耗焦炭 $m_c/(\text{kg}\cdot\text{t}^{-1})$	290
炉顶压力 p_{wp}/Pa	263 380
矿石密度 $\rho_o/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	3 520
炉料平均粒径 d_p/m	0.02
铁水密度 $\rho_l/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	7 000
渣比 $\gamma/(\text{kg}\cdot\text{t}^{-1})$	290
炉料下降速度 $\mu/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0.001
鼓风风速 $v_l/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	250
鼓风密度 $\rho_g/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1.293
炉缸直径 D/m	15.5
风口个数 $N/\text{个}$	42
铁口至风口距离 h_H/m	4.6
矿石品位 $w(\text{TFe})/\%$	59.5
鼓风压力 p_{bl}/Pa	476 110
焦炭密度 $\rho_c/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	990
死料柱孔隙率 ε_d	0.3
炉渣密度 $\rho_s/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	3 000
料线高度 h_l/m	1.3
块状带孔隙率 ε	0.55
设计死铁层深度 h/m	3.2

高炉死料柱受力计算模型, 计算了死料柱浮起高度, 见式(1)。

$$h_c = \lambda H_s - \lambda a(k+1) \quad (1)$$

式中: h_c 为死料柱浮起高度; H_s 为炉渣液面距离铁口的高度; a 为与高炉设计参数和实际操作数据有关的常数; λ 为与高炉炉况相关的常数; k 为炉渣、铁水深度比。

计算结果表明, 京唐 1 号高炉最小死铁层深度为 3.03 m, 而设计死铁层深度为 3.2 m, 浮起高度约为 0.2 m。因此, 京唐 1 号高炉死料柱小幅度浮起在炉缸中, 死料柱底部位于炉缸象脚部位, 即炉缸第七层热电偶所在位置。而侧壁高温点出现在第七层热电偶处, 与实际计算结果一致, 这证实了死料柱根部对应炭砖侵蚀最为严重。

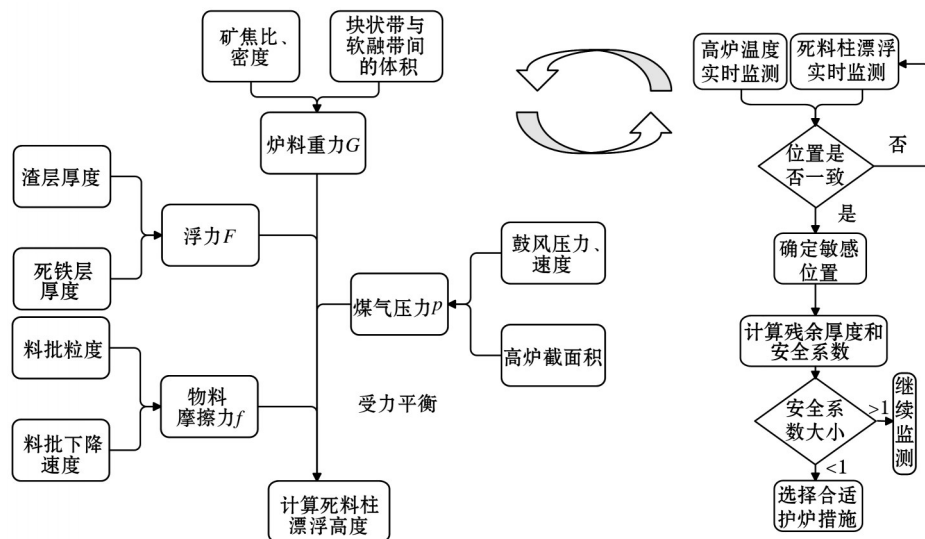


图 8 死料柱漂浮状态及炉缸安全状态实时监测机制流程

Fig. 8 A system to monitor floating height of deadman and residual thickness of carbon brick

煤气压力、鼓风压力、鼓风速度、渣层厚度等参数, 根据受力平衡, 从而计算死料柱漂浮高度。(2) 对比炭砖侵蚀严重位置及理论公式, 实时推测炉缸死铁层深度等参数。(3) 根据炭砖厚度剩余情况, 选择合适的冶炼强度和护炉措施。

3.2 高炉精料及活跃炉缸制度

实际生产中, 基于高炉死料柱和炭砖残余厚度实时监测机制, 当炉缸侧壁热电偶温度急剧上升时, 可及时采取相应措施, 调整死料柱漂浮高度, 使其远离相应位置; 增加死料柱透液性, 以活跃炉缸。因此有必要建立基于本厂的原燃料制度、操作预防制度。

(1) 精料制度。根据实际生产情况, 保证焦炭

3 预防高炉炉缸侵蚀的策略分析

3.1 高炉实时监测机制

京唐 1 号高炉第八层热电偶温度出现了异常升高现象, 这与死铁层深度、操作参数的改变有关, 致使死料柱漂浮高度升高, 最终导致侵蚀位置变动。由于高炉实际死铁层深度、布料及鼓风条件都会有所变化, 死料柱所受浮力和压力也随之变化。因此, 应针对每个高炉的实际情况建立在线监测机制, 以实时了解死料柱漂浮状态及死料柱根部位置, 针对特殊区域持续保护, 如喷淋冷却、加大水流速等措施, 以延长高炉寿命。

死料柱漂浮状态实时监测和炉缸安全状态实时监测机制流程如图 8 所示。由图 8 可知, (1) 在实际生产中应编写相应软件, 监测矿焦比、矿批粒度、

质量和粒度; 焦炭反应后强度越高, 落入炉缸中的焦炭强度相应地会越大, 死料柱孔隙率越大, 铁水环流越轻。

(2) 建立活跃炉缸机制。当炉底温度持续降低, 出铁时间变短, 出铁次数增多时, 这很有可能是炉缸活跃性差, 致使铁水环流加重和炭砖异常侵蚀。此时应从上下部调剂等多方面及时对高炉采取补救措施, 提高炉缸活跃性; 改变死料柱根部位置, 使死料柱根部远离侵蚀位置, 减少象脚区域炭砖的侵蚀, 保证高炉长寿。

4 结论

(1) 高炉炉缸侵蚀部位(热电偶温度最高的部

位)位于铁口中心线下方1~3 m。即死料柱根部对炭砖位置,大型高炉位于铁口下方2~3 m,小型高炉则位于铁口下方1~2 m。

(2) 死料柱透液性变差(炉缸进入不活跃状态)造成了炭砖异常侵蚀。由于原燃料或操作不稳定等原因,致使滞留在死料柱中的渣量上升,相继地会造成铁水环流加重、炉底温度下降和炉缸侧壁温度升高,保护层或炭砖的异常侵蚀,在实际生产中应稳定原燃料,保证焦炭粒度和质量以及合适的鼓风动能,以提高炉缸活性。

(3) 建立死料柱漂浮高度和炭砖残余厚度实时监测机制。由于生产参数不断变化,如死铁层深度或高炉送风压力的变化,均能够导致死料柱漂浮状态的变化,耐火材料侵蚀部位也随之变化。在线监测机制能够实时了解高炉情况,及时采取相应补救措施,保证高炉安全生产。

参考文献:

- [1] 徐万仁,张永忠,吴铿.高炉炉缸活性状态的表征及改善途径[J].炼铁,2010,29(3):23.(XU Wan-ren, ZHANG Yong-zhong, WU Keng. Characterization and improvement of the active state of blast furnace hearth[J]. Ironmaking, 2010, 29(3): 23.)
- [2] Jang D, Shin M, Oh J S, et al. Static holdup of liquid slag in carbonaceous beds[J]. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 2014, 54(6): 1251.
- [3] Oh J S, Lee J. Composition-dependent reactive wetting of molten slag on coke substrates[J]. Journal of Materials Science, 2016, 51(4): 1.
- [4] 张建良,焦克新,刘征建,等.长寿高炉炉缸保护层综合调控技术[J].钢铁,2017,52(12):1.(ZHANG Jian-liang, JIAO Ke-xin, LIU Zheng-jian, et al. Comprehensive regulation technology for hearth protective layer of blast furnace longevity[J]. Iron and Steel, 2017, 52(12): 1.)
- [5] Lei S, Henrik S. Model of blast furnace hearth drainage[J]. Steel Research International, 2012, 83(2): 197.
- [6] Brannbacka J, Saxen H. Model analysis of the operation of the blast furnace hearth with a sitting and floating dead man[J]. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 2003, 43(10): 1519.
- [7] 邓勇,张建良,焦克新.温度和铁水成分对炭砖溶解行为的影响[J].钢铁,2018,53(5):25.(DENG Yong, ZHANG Jian-liang, JIAO Ke-xin. Effects of temperature and composition of molten iron on dissolution behavior of carbon brick[J]. Iron and Steel, 2018, 53(5): 25.)
- [8] JIAO Ke-xin, ZHANG Jian-liang, HOU Qin-fu, et al. Analysis of the relationship between productivity and hearth wall temperature of a commercial blast furnace and model prediction[J]. Steel Research International, 2017, 88(9): 160.
- [9] LI Y L, CHENG S S, ZHANG P, et al. Sensitive influence of floating state of blast furnace deadman on molten iron flow and hearth erosion[J]. ISIJ International, 2015, 55(11): 2332.
- [10] 朱进锋,程树森,赵宏博,等.高炉炉缸死焦堆对渣滞留率的影响[J].北京科技大学学报,2009,31(2):224.(ZHU Jin-feng, CHENG Shu-sen, ZHAO Hong-bo, et al. Effect of deadman state on the residual rate of slag in a blast furnace hearth[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(2): 224.)
- [11] 朱进锋,赵宏博,程树森,等.高炉炉缸死焦堆受力分析与计算[J].北京科技大学学报,2009,31(7):906.(ZHU Jin-feng, ZHAO Hong-bo, CHENG Shu-sen, et al. Force analysis and calculation of deadman in a blast furnace hearth[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(7): 906.)
- [12] 张卫东,任立军,沈海波,等.首钢京唐5 500 m³高炉长寿技术的应用[J].炼铁,2010,29(5):11.(ZHANG Wei-dong, REN Li-jun, SHEN Hai-bo. Application of long campaign technology in Shougang Jingtang 5 500 m³ BF[J]. Ironmaking, 2010, 29(5): 11.)
- [13] 代兵,梁科,王学军,等.高炉合理鼓风动能与炉缸活性的关系[J].钢铁,2016,51(2):22.(DAI Bing, LIANG Ke, WANG Xue-jun, et al. Relationship between reasonable blast kinetic energy and hearth activity in blast furnace[J]. Iron and Steel, 2016, 51(2): 22.)
- [14] DENG Y, ZHANG J L, JIAO K X. Residual thickness of carbon brick calculation model and systematic analysis of heat transfer[J]. Metallurgical Research and Technology, 2017, 114(2): 210.
- [15] 王刚,李爱锋,刘风军,等.高炉炉缸长寿智能管理系统的开发与应用[J].中国冶金,2016,26(4):43.(WANG Gang, LI Ai-feng, LIU Feng-jun, et al. Development and application of intelligent management system for blast furnace hearth longevity[J]. China Metallurgy, 2016, 26(4): 43.)
- [16] 姜华,蔡九菊.在役高炉炉缸状态的辨析、诊断与维护[J].中国冶金,2015,25(11):33.(JIANG Hua, CAI Jiu-ju. Discrimination, diagnosis and maintenance for blast furnace hearth in service state[J]. China Metallurgy, 2015, 25(11): 33.)
- [17] 常治宇,张建良,宁晓钧,等.柳钢4号高炉侧壁温度升高与侵蚀状态分析[J].中国冶金,2018,28(6):13.(CHANG Zhi-yu, ZHANG Jian-liang, NING Xiao-jun, et al. Analysis of temperature rise and erosion state on sidewall of No.4 BF in Liusteel[J]. China Metallurgy, 2018, 28(6): 13.)
- [18] 张发辉.武钢4号高炉炉缸炉底侵蚀在线监测系统开发与应用[D].武汉:武汉科技大学,2015.(ZHANG Fa-hui. The Development and Application of Online Monitoring System for Hearth and Bottom Erosion in No.4 Blast Furnace in WISCO[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2015.)
- [19] 陈良玉,王长森.高炉炉缸侵蚀多维诊断与结构安全评估[C]//2014钢铁冶金设备及工业炉窑节能长寿技术交流会论文集,山东:河北省冶金学会,2014:34.(CHEN Liang-yu, WANG Chang-sen. Multi-dimensional diagnosis and structural safety assessment of blast furnace hearth erosion[C]//2014 Proceedings of Energy Saving and Longevity Technical Conference of Iron and Steel Metallurgical Equipment and Industrial Furnaces. Shandong: Hebei Metallurgical Society, 2014: 34.)