

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20170273

## 炉缸活跃性指数及改善措施

陈 川, 安 钢

(首钢京唐钢铁联合有限责任公司炼铁作业部, 河北 唐山 063200)

**摘 要:** 随着高炉冶炼的不断强化, 炉缸活跃性问题日益引起高炉操作者的重视, 为了更加合理地评价炉缸活跃性, 进而指导高炉生产, 定义了一种炉缸活跃性评价指数, 定量分析影响炉缸活跃性的各个因素, 同时根据冶炼实践, 提出了改善炉缸活跃性的主要措施。研究表明, 影响炉缸活跃性指数的因素包括料柱的固有属性以及渣铁的物理特性, 通过提高炉缸焦炭粒径、孔隙度以及降低炉渣黏度可以提高炉缸活跃性指标。高炉实际生产过程中, 应保证全风炉温, 同时合理控制喷煤量以及碱金属负荷, 从而提高炉缸内焦炭的更新速率, 降低焦炭劣化, 改善炉缸活跃性。

**关键词:** 炉缸; 活跃性; 焦炭; 孔隙度; 炉渣

**文献标志码:** A    **文章编号:** 0449-749X(2018)1-0029-05

## Activity index and improvement measure of BF hearth

CHEN Chuan, AN Gang

(Ironmaking Plant, Shougang Jingtang United Iron and Steel Co., Ltd., Tangshan 063200, Hebei, China)

**Abstract:** With the increasing of smelting intensity, more and more attention has been paid to the activity of BF hearth by the operators. In order to reasonably evaluate the hearth activity and guide the blast furnace production, the influencing factors of the hearth activity were analyzed quantitatively by the definition of activity index of BF hearth. Meanwhile, main measures were put forward to improve hearth activity according to smelting practice. The results indicate that the influencing factors of hearth activity include the intrinsic property of stock column and physical characteristics. The hearth activity can be improved by enhancing the coke size and void ratio and decreasing slag viscosity. During smelting process, the blast volume, hot metal temperature, pulverized coal injection and alkali load must be optimized in order to enhance the coke update rate and reduce the coke degradation, which can improve the hearth activity.

**Key words:** BF hearth; activity index; coke; void ratio; slag

炉缸直接接触高温的渣铁水, 在出铁过程中不断受到渣铁水的冲刷和侵蚀, 因此炉缸是高炉本体最难维护的区域, 当炉缸的侵蚀过于加剧, 高炉必须进行大修时, 表征着一代炉役的结束, 因此炉缸又是决定高炉寿命的关键部位。炉缸活跃性是评价高炉工作状态的重要指标之一, 目前尚未给出公认的定义, 实际生产过程中, 高炉操作者所谓的炉缸“活”或者“不活”, 主要是通过炉缸料柱的透气透液性以及渣铁的流动性来判断, 透气透液性为料柱的固有属性, 主要受炉缸内焦炭粒径以及孔隙度的影响, 流动性为渣铁的物理属性之一, 受渣铁黏度的影响。因此, 炉缸活跃性可以表征为炉缸内渣铁穿透料柱的能力<sup>[1]</sup>。提高炉缸活跃性对高炉生产实现“高效、优质、低耗、长寿”的目标起着非常重要的作用, 直接影响高炉的顺行以及一代炉龄<sup>[2-7]</sup>。

近年来, 随着高炉冶炼的不断强化, 炉缸活跃性问题日益引起高炉操作者的重视, 但是对如何定量评价炉缸活跃性的相关研究较少。陈辉<sup>[8]</sup>等、徐万仁<sup>[9]</sup>等根据渣铁流动阻力以及渣铁温度评价炉缸活跃性, 这种评价方式受渣铁流动速度的影响, 实际过程中不易测量, 并且不能够直接反应炉缸焦炭料柱的固有属性。张贺顺<sup>[10]</sup>等通过炉芯温度和炉缸侧壁温度的比值定义炉缸活跃性, 这种评价方式的优点是现场可以实时在线得到热电偶温度数据, 易于高炉操作人员使用, 但是由于不同高炉炉缸热电偶插入深度以及碳砖导热系数差异比较大, 因此不便于不同高炉之间进行对比。

本文根据卡曼方程, 定义了一种新的炉缸活跃性指数的评价方法, 并分析了影响炉缸活跃性的主要因素, 在此基础上结合高炉冶炼实践, 给出了改善炉缸活跃性的主要途径以及操作思路。

## 1 炉缸活跃性指数的定义

根据 Kozeny-Carman 方程, 炉缸内渣铁流过焦炭料柱时受到的压降梯度表达式见式(1)。

$$\frac{\Delta P}{L} = 180 \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{d_p^2 \varepsilon^3} \cdot \mu \cdot v \quad (1)$$

式中:  $\Delta P$  为渣铁流过焦炭料柱时的压力损失, Pa;  $L$  为焦炭料柱长度, m;  $d_p$  为炉缸内焦炭平均粒径, m;  $\varepsilon$  为焦炭料柱的孔隙度;  $\mu$  为渣铁的动力黏度, Pa·s, 表示渣铁的流动特性;  $v$  为渣铁流动速度, m/s。

影响渣铁压降梯度的因素可表示为阻力系数  $\zeta$  与流动速度  $v$  的乘积, 见式(2)和式(3)。

$$\frac{\Delta P}{L} = \zeta \cdot v \quad (2)$$

$$\zeta = 180 \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{d_p^2 \varepsilon^3} \cdot \mu \quad (3)$$

将上述阻力系数进行无量纲化后可得式(4):

$$\zeta' = 180 \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\left(\frac{d_p}{d_0}\right)^2 \cdot \varepsilon^3} \cdot \frac{\mu}{\mu_0} \quad (4)$$

式中:  $\zeta'$  为无量纲化的渣铁流过焦炭料柱时的阻力系数;  $d_0$  为特征粒径, 表示入炉焦炭的平均粒径, mm;  $\mu_0$  为特征黏度, 根据 CaO-SiO<sub>2</sub> 二元渣系黏度和温度之间的关系<sup>[1]</sup>, 当温度为 1 500 °C, 碱度为 1.2 时,  $\mu_0 = 0.35$  Pa·s。

炉缸活跃性指数  $ACT$  定义见式(5)。

$$ACT = \frac{C}{\zeta'} = C \cdot \frac{\left(\frac{d_p}{d_0}\right)^2 \cdot \varepsilon^3}{\frac{\mu}{\mu_0} \cdot (1-\varepsilon)^2} \quad (5)$$

式中:  $C$  为常数,  $C = 1.0 \times 10^5$ , 设置常数  $C$  的主要目的是为了提提高炉缸活跃性指数的量级, 便于高炉操作人员使用。

从炉缸活跃性指数的定义可以看出, 影响炉缸活跃性指数的因素主要包括两个方面: (1) 焦炭料柱的固有特性——焦炭粒径以及料柱孔隙度; (2) 渣铁的物理特性——动力黏度。生产过程中实时获取焦炭以及渣铁参数比较困难, 因此可以利用高炉检修的机会进行风口焦取样, 直接获取风口前焦炭的粒径分布, 并测量焦炭试样的孔隙度, 同时利用黏度分析仪测定渣铁水黏度, 从而对炉缸活跃性进行阶段性的评价。

## 2 炉缸活跃性指数的影响因素

京唐高炉炉缸直径为 15.5 m, 入炉焦炭平均粒

度保持在 51.1~53.6 mm, 2011—2016 年利用多点移动式高炉风口取焦机对 2 号高炉进行了风口焦取样, 2 号高炉取样深度为 2.5 m, 风口焦平均粒度为 13.85~24.02 mm, 风口焦试样孔隙度为 0.2~0.4, 平均孔隙度为 0.3, 越靠近炉缸中心孔隙度越低, 炉缸活跃性指数如图 1 所示, 计算过程中京唐高炉炉渣的动力黏度为 0.3 Pa·s。从图中可以看出, 2013 年京唐 2 号高炉炉缸活跃性指数最低为 2.4, 2016 年最高为 7.3。

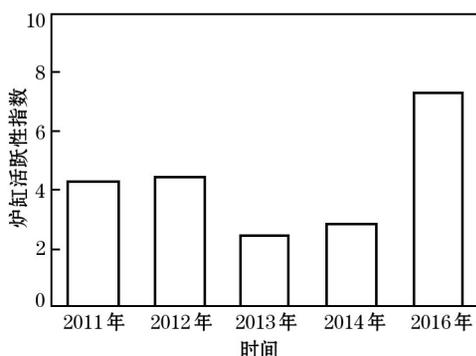


图 1 首钢京唐 2 号高炉炉缸活跃性指数

Fig. 1 Activity index of No.2 BF at Shougang Jingtang

高炉下部压差表示煤气在高炉下部流动过程中受到的阻力, 在一定程度上可以反应炉缸内焦炭料柱的孔隙度以及焦炭粒径的大小, 焦炭料柱的孔隙度以及粒径越小, 煤气穿透焦炭料柱受到的阻力越大, 高炉下部压差越大。首钢京唐 2 号高炉下部压差情况如图 2 所示, 数据为风口焦取样前 1 个月以内高炉下部压差的平均值。从图中可以看出, 2013 年下部压差最高为 133 kPa, 2016 年最低为 113 kPa, 下部压差的变化趋势基本与炉缸活跃性指数相反, 这也在一定程度上说明了炉缸活跃性指数定义的合理性。

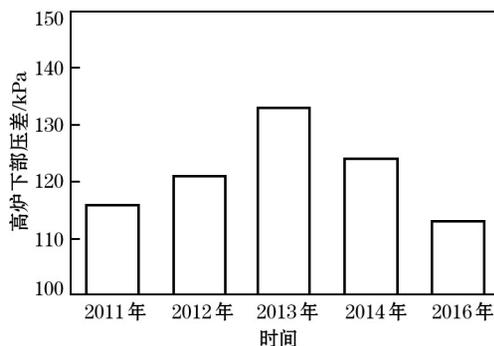


图 2 首钢京唐 2 号高炉下部压差情况

Fig. 2 Differential pressure in lower region of No.2 BF at Shougang Jingtang

### 2.1 焦炭粒度

焦炭粒度对炉缸活跃性指数的影响如图 3 所示,从图中可以看出,随着焦炭粒度的增大,炉缸活跃性指数逐渐提高,而且粒径越大,炉缸活跃性指数的上升幅度越大。提高风口焦炭粒度的途径主要包括两个方面:(1)提高焦炭指标,例如焦炭粒度、强度以及热态性能等;(2)提高炉缸内焦炭的更新速率,降低焦炭在炉缸内的停留时间,从而提高炉缸内焦炭粒度。实际生产过程中,良好的冶金焦和炼焦煤在全世界范围内越来越稀缺,对于大型高炉而言,进一步提高焦炭指标的空间有限,生产中很难实现。因此,在原燃料条件基本固定的基础上,提高炉缸内焦炭的更新速率是改善炉缸活跃性有效的途径之一。

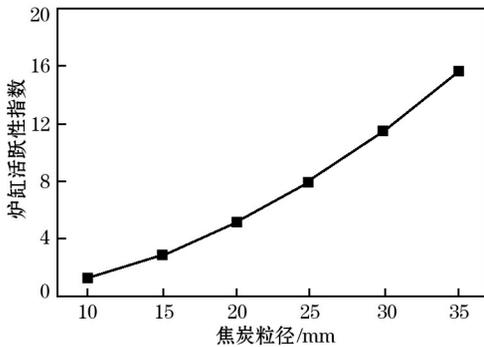


图3 焦炭粒度对炉缸活跃性指数的影响

Fig. 3 Influence of coke size on activity index of BF hearth

### 2.2 料柱孔隙度

料柱孔隙度对炉缸活跃性指数的影响如图 4 所示。从图中可以看出,当炉缸内焦炭孔隙度为 0.2、0.3、0.4 时,炉缸活跃性指数分别为 2.6、11.4、36.9,炉缸活跃性指数随孔隙度的增大逐渐提高,并且提高的幅度越来越大。通过风口焦取样发现高炉风口前端孔隙度为 0.4 左右,炉缸中心焦炭孔隙度为 0.2 左右,中心与风口前端的活跃性指数差异非常大。实际冶炼过程中,提高炉缸焦炭孔隙度的主要途径就是降低焦炭粉末量,提高炉缸焦炭粒度的均匀性。

### 2.3 炉渣黏度

炉渣黏度对炉缸活跃性指数的影响如图 5 所示。从图中可以看出,随着炉渣黏度的上升,炉缸活跃性指数逐渐降低,说明降低炉渣黏度有利于提高炉缸活跃性。实际生产过程中,高炉渣多为碱性渣,碱度一般控制在 1.1~1.3,当温度降低到一定值

时,黏度会迅速升高,导致炉缸活跃性降低,因此,必须保证渣铁具有足够高的物理热,防止黏度剧烈波动。

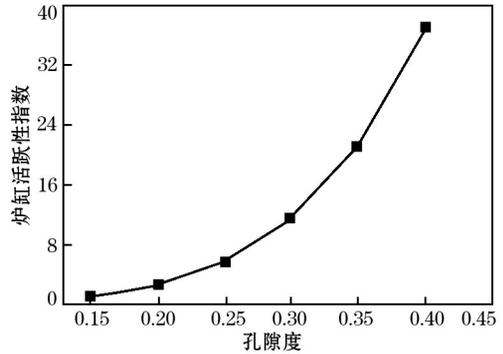


图4 料柱孔隙度对炉缸活跃性指数的影响

Fig. 4 Influence of void ratio on activity index of BF hearth

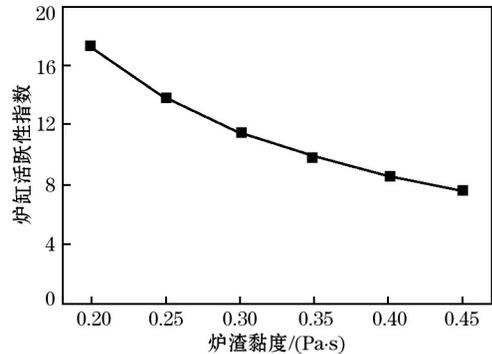


图5 炉渣黏度对炉缸活跃性指数的影响

Fig. 5 Influence of slag viscosity on activity index of BF hearth

## 3 改善炉缸活跃性的主要措施

### 3.1 保证风量

高炉风量是炼铁生产者控制的重要参数之一,风量对炉缸内焦炭的更新速率的影响主要表现在两个方面:(1)鼓风中的氧与焦炭发生燃烧反应,直接消耗焦炭;(2)风量直接影响高炉的铁水产量,在高炉富氧率、焦炭负荷等操作参数不变的条件下,高炉风量与高炉日产量、风口前焦炭日消耗量的关系如图 6 所示,其中高炉日产量为风量与高炉吨铁耗风量之间的比值,风口前焦炭日消耗量可根据焦炭的燃烧反应计算得到。从图中可以看出,随着高炉风量的提高,高炉日产量以及焦炭消耗量逐渐上升,说明提高风量不仅有利于提高风口前焦炭的消耗量,而且会增加铁水产量,提高铁水渗碳。因此,在保证高炉顺行的前提下提高风量有利于提高炉缸内焦炭的更新速率,从而改善炉缸活跃性。

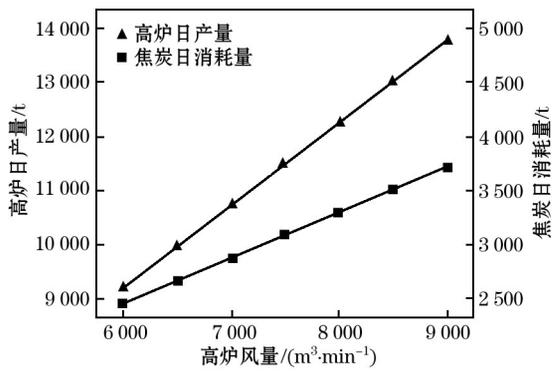


图6 高炉风量对产量以及焦炭消耗量的影响

Fig. 6 Influence of blast volume on hot metal production and coke consumption

### 3.2 合理的炉温

炉温表示铁水中的硅质量分数，在一定条件下，铁水中的硅元素质量分数与铁水温度呈正比。提高炉温一方面可以提高铁水温度，从而提高铁水中的碳质量分数，另一方面提高炉温可以降低炉渣黏度。因此，控制炉温也是高炉操作者改善炉缸活跃性常用的手段之一。

2017年第一季度国内部分4 000 m<sup>3</sup>以上大型高炉的炉温控制水平如图7所示(炉温的变化用铁水中硅质量分数表示)。铁水中硅质量分数过高会增加燃料消耗，硅质量分数过低会导致渣铁流动性变差，降低炉缸活跃性，因此需要控制合适的炉温，受原料水平和操作制度的影响，不同的高炉对炉温的控制标准会有所差异，需要在生产过程中不断摸索。

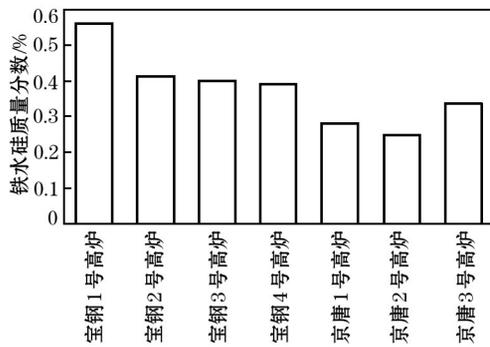


图7 国内部分大型高炉炉温控制水平

Fig. 7 Silicon content in hot metal for main large BF in China

### 3.3 控制喷煤量

高炉操作过程中不能一味地追求喷煤降焦，焦炭负荷长期过重不利于高炉的稳定顺行，当高炉原燃料质量下降或者高炉炉况失常时，应主动退负荷适应，同时降低喷煤量，若喷煤量过高，一方面容易导致煤粉不能充分燃烧，未燃煤粉聚集在死料柱内，降低死料柱的孔隙度；另一方面高煤比会延长焦炭在炉缸内的停留时间，导致粉末量增加。

为了考察不同喷煤量对炉缸内焦炭粒度的影响，宝钢在焦炭质量和高炉操作条件基本相同时，在风口前端进行了焦炭取样，取样结果如图8所示<sup>[12]</sup>。从图中可以看出，随着喷煤量的提高，大部分风口焦炭试样的平均粒度逐渐减小，当煤比超过200 kg/t时，焦炭的粒度下降非常显著，说明喷煤量过高会延长焦炭在高炉内的停留时间，加剧焦炭劣化，进而导致炉缸活跃性降低。因此，实际操作过程中为确保一定的焦炭更新指数，应合理控制喷煤量，以保障高炉炉缸活跃性。

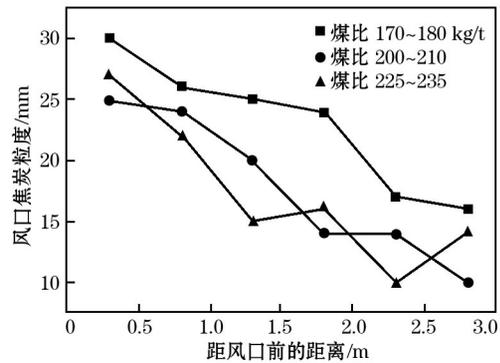


图8 煤比对风口焦炭粒度的影响

Fig. 8 Influence of pulverized coal injection rate on coke size at front of tuyere

### 3.4 控制有害元素

碱金属与焦炭会形成层间化合物，发生体积膨胀，导致焦炭产生裂纹而破碎，从而降低焦炭粒径<sup>[13]</sup>。京唐和宝钢高炉入炉焦炭粒径、碱负荷以及风口焦粒径统计分析见表1，结果表明，尽管京唐高

表1 风口焦炭粒度对比

Table 1 Comparison of coke size at front of tuyere

项目	京唐1号BF	京唐2号BF	宝钢1号BF	宝钢2号BF
炉容/m <sup>3</sup>	5 500	5 500	4 966	4 062
时间	2012-04-25	2011-10-11		2001
煤比/(kg·t <sup>-1</sup> )	148	162	170~180	173
碱负荷/(kg·t <sup>-1</sup> )	3.4	3.3	<2.0	
入炉焦炭粒径/mm	55	55	52	52
风口焦炭粒径/mm	16.00	18.30	25.00	24.42

炉入炉焦炭粒径高于宝钢,但由于碱负荷过重,焦炭严重劣化,造成了风口焦炭粒径偏小。因此,高炉操作者必须重视碱金属对高炉炉缸活跃性的影响,一方面应该控制入炉碱金属质量分数,另一方面应制定合理的排碱措施,降低碱金属对炉缸焦炭的破坏作用。

## 4 结论

(1) 影响炉缸活跃性指数的因素主要包括两个方面,焦炭料柱的固有特性——焦炭粒径和料柱孔隙度以及渣铁的物理特性——动力黏度。

(2) 全风炉温可以有效提高焦炭的更新速率,并且保证较好的炉渣流动性,从而改善炉缸活跃性指标。

(3) 煤量过高会延长焦炭在高炉内的停留时间,加剧焦炭劣化,降低炉缸内焦炭粒径以及孔隙度,导致炉缸活跃性降低。

(4) 碱负荷过重会导致焦炭严重劣化,造成了风口焦炭粒径偏小。因此,高炉操作者必须重视碱金属对高炉炉缸活跃性的影响,一方面应该控制入炉碱金属质量分数,另一方面应制定合理的排碱措施,降低碱金属对炉缸焦炭的破坏作用。

### 参考文献:

- [ 1 ] 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):23.(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): 23.)
- [ 2 ] 代兵,梁科,王学军,等.高炉炉缸活跃性量化计算模型的开发与实践[J].中国冶金,2015,25(12):45.(DAI Bing, LIANG Ke, WANG Xue-jun, et al. Development and practice of quantitative calculation models of blast furnace hearth activity [J]. China Metallurgy, 2015, 25(12): 45.)
- [ 3 ] 杜屏,雷鸣,刘建波,等.高炉操作对炉缸侵蚀的影响[J].钢铁,2012,47(12):16.(DU Ping, LEI Ming, LIU Jian-bo, et al. Effect of BF operation on hearth erosion[J]. Iron and Steel, 2012, 47(12): 16.)
- [ 4 ] 邹忠平,项钟庸.高炉操作维护与炉缸长寿的探讨[J].中国冶金,2013,23(7):21.(ZOU Zhong-pin, XIANG Zhong-yong. Study on blast furnace maintenance and long campaign life[J]. China Metallurgy, 2013, 23(7): 21.)
- [ 5 ] 孙金铎,黄晓煜,杜续恩.高炉炉缸破损的原因与控制[J].钢铁,2015,50(6):1.(SUN Jin-duo, HUANG Xiao-yu, DU Xu-en. Reason and control of blast furnace hearth corrosion[J]. Iron and Steel, 2015, 50(6): 1.)
- [ 6 ] 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.)
- [ 7 ] 陈俊.宣钢高炉长寿高效生产实践[J].中国冶金,2016,26(4):38.(CHEN Jun. Practice of long-life and high-efficiency production for blast furnace in Xuansteel[J]. China Metallurgy, 2016, 26(4): 38.)
- [ 8 ] 陈辉,吴胜利,余晓波.高炉炉缸活跃性评价的新认识[J].钢铁,2007,42(10):12.(CHEN Hui, WU Sheng-li, YU Xiao-bo. New index of evaluating activity of blast furnace hearth[J]. Iron and Steel, 2007, 42(10): 12.)
- [ 9 ] 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):1.(XU Wan-ren, ZHANG Yong-zhong, WU Keng. Representation and improvement measure of blast furnace hearth activity [J]. Ironmaking, 2010, 29(3): 1.)
- [ 10 ] 张贺顺,马洪斌.首钢2号高炉炉缸工作状态探析[J].炼铁,2009,28(4):11.(ZHANG He-shun, MA Hong-bin. Analysis on working conditions of No.2 blast furnace hearth in Shougang Iron and Steel Co. Ltd[J]. Ironmaking, 2009, 28(4): 11.)
- [ 11 ] 陈家祥.炼钢常用图表数据手册[M].北京:冶金工业出版社,2010.(CHEN Jia-xiang. Commonly Used Chart and Data Book of Steelmaking[M]. Beijing: Press of Metallurgy Industry, 2010.)
- [ 12 ] 徐万仁,吴铿,朱仁良,等.提高喷煤量对高炉风口焦性状的影响[J].钢铁,2005,40(2):12.(XU Wan-ren, WU Keng, ZHU Ren-liang, et al. Influence of increasing PCI rate on characteristics of tuyere coke in blast furnace[J]. Iron and Steel, 2005, 40(2): 12.)
- [ 13 ] 王筱留.钢铁冶金学(炼铁部分)[M].北京:冶金工业出版社,2008.(WANG Xiao-liu. Iron and Steel Metallurgy (Ironmaking Part)[M]. Beijing: Press of Metallurgy Industry, 2008.)