

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2012.01.021

萍钢降低高炉燃料比措施分析

刘竹林¹, 王建丽¹, 苏振江¹, 杨旭², 刘康²

(1. 湖南工业大学 冶金工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 江西萍钢实业股份有限公司 九江分公司, 江西 九江 332500)

摘要: 针对萍乡钢铁公司高炉炼铁燃料比高的现状, 从原料冶金性能与粒度组成、炉料结构、合理冶炼强度、造渣制度、多环布料、适宜煤粉喷吹量、低硅生铁冶炼等方面, 分析了降低高炉燃料比的技术措施。研究表明: 改善焦炭质量, 加强筛分与整粒, 选择适宜冶炼强度, 选择适宜 MgO 的渣系, 缩小加权平均角差, 避免过度中心加焦, 根据原燃料条件选择煤比, 稳定生铁的含硅量是降低高炉燃料比的关键技术措施。

关键词: 燃料比; 冶炼强度; 多环布料; 低硅冶炼; 炉渣

中图分类号: TF538

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2012)01-0096-05

Analysis of the Measurement on Reducing the Fuel Rate of Blast Furnace in Pingxiang Iron and Steel Co.

Liu Zhulin¹, Wang Jianli¹, Su Zhenjiang¹, Yang Xu², Liu Kang²

(1. School of Metallurgy Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. Jiujiang Branch of Pingxiang Iron and Steel Company, Jiujiang Jiangxi 332500, China)

Abstract: In view of ironmaking fuel ratio of blast furnace in PingGang, discussed the technical measures of reducing fuel ratio from various aspects of raw materials metallurgical properties, grain composition, burden design, reasonable smelting intensity, slagging regime, multi-circle burden distribution, appropriate for coal powder, smelting low silicon Iron and so on. The study shows that the key technical measures to lowering the fuel rate are improving the quality of coke, further screening and size stabilization, choosing the suitable smelting strength and appropriate MgO slag system, narrowing weighted average angle difference, avoiding excessive center coke charging, choosing coal ratio according to the raw material and fuel conditions and stabilizing silicon content of pig iron

Keywords: fuel rate; smelting strength; multi-circle burden distribution; smelting low silicon; slag

1 研究背景

江西萍钢实业股份有限公司(以下简称萍钢)高炉炼铁产量由1999年的69万t提高到2010年的1000万t,高炉座数达11座,总容积为8570m³,平均炉容为780m³,其中4座炉容为1000m³以上。随着炼

铁技术的提高,燃料比逐年下降,生铁产量不断提高,但与全国重点企业相比,仍存在一定差距。表1为2009—2010年萍钢与全国重点企业高炉主要技术经济指标,并单独列出萍钢3#高炉(1780m³)的技术经济指标。由表可知,萍钢在高风温、高熟料比以及较高品位的条件下,并未获得较低的燃料比

收稿日期: 2011-09-11

作者简介: 刘竹林(1965-),男,湖南茶陵人,湖南工业大学教授,主要研究方向为烧结球团与高炉炼铁,

E-mail: liuzhuling60@yahoo.com.cn

指标。因此,本文对萍钢降低高炉燃料比的措施进行探讨。

降低高炉燃料比的常用措施有:1)采用高品位铁矿石、少渣操作;2)高风温与低湿度;3)提高矿石热强度与还原性;4)合理布料,改善煤气分布,保持炉况长期稳定,提高煤气利用率;5)改善粒度组成,分级入炉;6)稳定原燃料成分与质量,强化低

硅生铁冶炼;7)适当提高炉顶压力和富氧率,以解决高炉强化和顺行的矛盾^[1]。

参照降低高炉燃料比的常用措施,对萍钢高燃料比的现状进行分析研究,结果表明:萍钢原燃料质量,冶炼强度的选择,合理炉料结构、造渣制度、喷吹量以及上部装料制度的确定等为影响萍钢燃料比的主要因素。

表1 高炉主要技术经济指标

Table 1 The main technical and economic indicators of blast furnace

| 企业或高炉 | 年份 | 燃料比/ (kg·t ⁻¹) | 焦比/ (kg·t ⁻¹) | 煤比/ (kg·t ⁻¹) | 风温/℃ | 矿品位/% | 熟料率/% | 利用系数/ (t·m ⁻³ ·d ⁻¹) | 休风率/% | 顶压/MPa | 渣铁比/ (kg·t ⁻¹) |
|------------|------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------|-------|-------|--|-------|--------|-------------------------------|
| 萍钢 | 2009 | 547 | 402 | 145 | 1 176 | 59.40 | 90.00 | 2.250 | 2.179 | 0.23 | 337 |
| | 2010 | 544 | 387 | 157 | 1 203 | 58.77 | 95.00 | 2.330 | 1.676 | 0.24 | 337 |
| 萍钢 3#高炉 | 2009 | | | | | | | | | | |
| | 2010 | 539 | 379 | 160 | 1 238 | 58.96 | 94.00 | 2.270 | 2.064 | 0.24 | 331 |
| 全国 重点企业 | 2009 | 519 | 374 | 145 | 1 158 | 57.62 | 91.38 | 2.615 | 1.661 | | |
| | 2010 | 517 | 369 | 148 | 1 152 | 57.52 | 91.31 | 2.590 | 1.604 | 0.27 | 280 |

注:1.萍钢3#高炉仅列出2010年数据作参考;2.未收集到重点企业高炉顶压与渣铁比,仅以2010年首都钢铁公司曹妃甸5500m³高炉数据作参考;3.重点企业与萍钢的燃料比均不包括焦丁用量。

2 提高原燃料质量

高炉原燃料主要包括烧结矿、球团矿和焦炭。烧结矿是萍钢高炉的主要含铁原料,其主要指标见表2。

表2 萍钢烧结矿主要指标

Table 2 The main indicators of Pinggang sinter

| 品位/ % | 二元 碱度 | 转鼓 指数/% | 筛分 指数/% | w(SiO ₂)/ % | w(MgO)/ % | w(FeO)/ % |
|----------|----------|------------|------------|----------------------------|--------------|--------------|
| 55.85 | 1.64 | 71.72 | 4.30 | 5.64 | 2.48 | 9.27 |

由表1可知,烧结矿品位、转鼓指数处于国内平均水平,二元碱度偏离高碱度烧结矿的范围,FeO含量偏高,烧结矿的机械强度与还原性难以保证。一般而言,烧结矿中FeO含量越低,还原性越好,间接还原度提高,直接还原度降低,炉缸直接还原消耗的焦炭量减少,这有利于高炉冶炼节焦降耗,提高经济效益^[2]。经验表明,烧结矿的w(FeO)每提高1%,焦比将升高3 kg/t。国外(日本和法国)先进企业烧结矿的w(FeO)为4%~5%,上海宝山钢铁股份有限公司、武汉钢铁股份有限公司烧结矿的w(FeO)约为7%^[3]。

烧结矿的碱度与FeO含量存在反向关系,表2中烧结矿的碱度为1.64,低于优质烧结矿的碱度(1.8~2.0),也低于全国重点企业烧结矿的平均碱度(1.9)。低碱度烧结矿不利于形成较多数量的铁酸钙液相,烧结矿的强度与还原性达不到理想状态。萍钢个别高炉采用碱度为1.05和0.62的低碱度烧结矿,FeO含

量较高,矿石还原性较差,直接还原度较高,导致燃料比升高。

在喷吹量较高时,焦炭质量也是影响高炉燃料比的重要因素。萍钢所用焦炭指标M₂₅=92.6%,M₁₀=5.4%,CRI=36.9%,CSR=57.6%,这说明焦炭的冷态强度较好,但是其热性能与国际、国内的要求有较大差距。焦炭质量标准,国外是澳大利亚最高(CRI<17.1%,CSR>74.1%),欧洲较低(CRI为20%~31%,CSR>60%),美国居中(CRI<23%,CSR>61%)^[4]。目前,我国大型高炉对焦炭的要求是CRI≤26%,CSR≥65%;中小型高炉为CRI≤30%,CSR≥59%。

焦炭较高的反应性会增加焦炭的熔损,降低焦炭的发热值,导致直接还原上升。低反应后强度(CSR=57.6%)的焦炭在炉内高温作用下容易破碎,影响高炉透气性,从而影响高炉顺行。为达到顺行,必须采取过度的高炉技术操作,如过多的中心加焦等,这使得高炉燃料比升高。

3 选择合理的冶炼强度与煤比

高炉冶炼强度通常是以每天单位容积内燃烧的焦炭量来计算,单位为t/(m³·d)。萍钢高炉综合冶炼强度较高,如450 m³高炉综合冶炼强度达1.96~2.06t/(m³·d)。根据新余钢铁集团有限公司的经验,300~450 m³的高炉,综合冶炼强度一般为1.9 t/(m³·d),1 000 m³高炉为1.45~1.5 t/(m³·d),2 500 m³高炉为1.25 t/(m³·d)。

从新余钢铁集团有限公司高炉综合冶炼强度选

择的经验可以看出,不同容积的高炉综合冶炼强度相差较大,很难有统一标准。这说明以容积为单位评价高炉的强化程度不科学,因为高炉某些部位的容积与强化程度并无直接关系。欧美国家将炉缸部分容积扣除,即按高炉工作容积来计算利用系数与冶炼强度,理由是炉缸下部容积仅仅是贮存熔渣和铁水的部位,与高炉产量和焦炭消耗量并无关系^[5]。因此,有学者提出以炉腹煤气量指数来衡量高炉强化程度^[6]。

3.1 炉腹煤气量指数的概念与冶炼强度的选择

炉腹煤气量指数是指单位炉缸断面积上通过的炉腹煤气量,单位为 m^3/m^2 ,其计算公式为

$$X_{\text{BG}} = \frac{4V_{\text{BG}}}{\pi d^2}$$

式中: V_{BG} 为通过高炉炉腹煤气量; d 为炉缸直径。

实际计算结果是以炉缸面积为基准,该指标与面积冶炼强度即燃烧强度相近,但采用单位面积上通过的煤气量较单位面积燃烧的焦炭量更精确。从高炉软熔带透气机理分析,单位面积上通过的煤气量是受限的,受限的关键是煤气流能否顺利通过软熔带焦炭窗。在原料条件一定的前提下,顺利通过单位面积软熔带焦炭窗的最大煤气量基本是一定的。煤气量小,冶炼强度低,冶炼不充分,反应与冶炼进程慢;煤气量太大,冶炼强度高,煤气很难穿过软熔带,不仅不能加快进程,反而会阻碍高炉顺行,产生一系列诸如液泛、流态化以及悬料与管道行程等问题。

通过比较,在条件基本一致的情况下,大小不同的高炉炉腹煤气量指数较接近,一般为 $58\sim 66\text{ m}^3/\text{m}^2$,小高炉较大高炉略高。因此,高炉炉腹煤气量指数,能较好地衡量高炉冶炼强化程度。

总之,要根据原料情况、高炉大小、高炉实际运行状况等,合理选择高炉冶炼强度,切忌盲目追求高产量而强化冶炼,否则会导致燃料比升高,高炉使用寿命缩短。

3.2 最佳煤比的选择

喷煤量受到原燃料条件、炉缸热状态、煤粉燃烧速率、高炉稳定顺行、置换比和操作水平等诸多因素的限制。超过冶炼条件允许的高喷煤量,会使煤粉在高炉内无法全部消化,造成煤粉在高炉内的利用率和置换比降低,还可使燃料比升高。煤比过高的特征,除尘灰和布袋灰中含碳量大幅提高。在当今高炉炼铁原料质量变差的条件下,中小高炉不宜追求高喷煤量。2010年及2011年前5个月的统计资料显示,我国重点企业的煤比均有下降趋

势,焦比有上升趋势。

煤比选择过高会引起未燃煤粉增加,造成能源浪费,并给高炉透气性带来不利影响。尽管萍钢高炉风温达到 $1203\text{ }^\circ\text{C}$,富氧达到 3.5% 的水平,但所用矿石冶金性能与焦炭的热性能较差, $\text{CSR}=57.6\%$, $\text{CRI}=36.9\%$,也未采用脱湿鼓风,而萍钢3#高炉2010年煤比达 160 kg/t ,高于国内重点企业 148 kg/t 的水平。要提高喷煤量,必须改善矿石高温冶金性能和焦炭的热性能。

4 优化造渣制度

萍钢高炉炉渣的主要成分如下: $w(\text{CaO})=37.5\%$, $w(\text{MgO})=10.3\%$, $w(\text{SiO}_2)=34.2\%$, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)=15.0\%$;将其换算为 100% 后, $w(\text{CaO})=38.6\%$, $w(\text{MgO})=10.6\%$, $w(\text{SiO}_2)=35.3\%$, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)=15.5\%$ 。炉渣二元碱度 $R=1.10$ 。通过相图查出该渣相的熔化温度为 $1350\sim 1400\text{ }^\circ\text{C}$,见图1;黏度为 $0.6\sim 0.8(\text{Pa}\cdot\text{s})$,见图2;二者均在适宜范围内。从炉渣二元碱度及黏度看,脱硫能力较好;但从 MgO , CaO 含量及 R 三者间的关系看,炉渣还有进一步优化的空间。

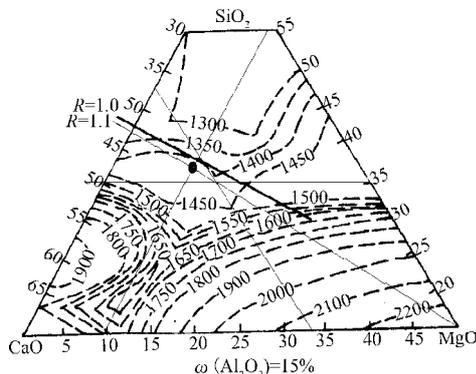


图1 炉渣熔化温度图

Fig. 1 Smelting temperature of slag

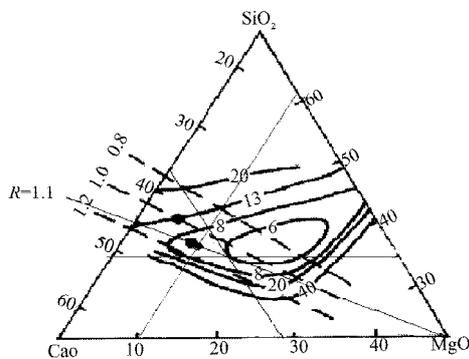


图2 炉渣黏度图

Fig. 2 Viscosity of slag

一定含量范围内的 MgO ,对不同碱度的炉渣降低黏度的程度不同,酸性渣比碱性渣降得更多;当

炉渣碱度超过一定值后,增加MgO反而会使黏度升高^[7]。日本学者指出,当 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 超过13%时,炉渣黏度依然随 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 的增加而继续降低,直到为15%左右时,炉渣黏度才达到最低值^[8],因而日本采用高 Al_2O_3 (质量分数为13%~15%)、低MgO(质量分数为4%~7%)、高碱度($w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2)$ 为1.2~1.3)的渣型。

由于增加MgO会降低烧结的一部分指标,降低烧结矿品位,增加高炉渣量。因此,在维持 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为15%左右的条件下,萍钢可以将二元碱度提高至1.15~1.25,将 $w(\text{MgO})$ 由10.3%降低至8.0%~9.0%,稳定 $w(\text{MgO})+w(\text{CaO})$ 总量,并使 R_3 为1.45~1.5, R_4 为1.0左右。高 Al_2O_3 时,可考虑按照 $w(\text{MgO})/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为0.6~0.65规律调节MgO含量。

5 优化多环布料方式

萍钢3#高炉采用的多环布料矩阵为

$$\begin{matrix} 41^\circ 39' 37'' 34'' 31'' & 39^\circ 37' 34'' 31'' 12'' \\ \text{O} & 2 & 4 & 3 & 2 & 2 & \text{C} & 2 & 2 & 3 & 2 & 3 \end{matrix}$$

布料采取中心加焦技术,使中心透气性改善,利于形成倒V型软熔带,使高炉顺行。布料方式总体较合理,但计算后发现, $\alpha_0=36.8^\circ$, $\alpha_c=29.3^\circ$,加权平均角差 $\Delta\alpha=7.5^\circ$ 。实践经验表明, $\Delta\alpha$ 为 $2^\circ\sim 5^\circ$ 较为适宜,如:包头钢铁集团有限公司2200 m^3 高炉,当 $\Delta\alpha=3^\circ\sim 4^\circ$ 时生产指标较好,当 $\Delta\alpha<2^\circ$ 时生产指标较差^[9];莱芜钢铁股份有限公司1880 m^3 高炉布料矩阵为

$$\begin{matrix} 42^\circ 41' 39.5'' 38'' 36.5'' 34.5'' 33'' & 41^\circ 39.5' 38'' 36.5'' 34.5'' 32'' 26'' \\ \text{O} & 1 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 1 & \text{C} & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 3 \end{matrix}$$

$\Delta\alpha=3.1^\circ$ ^[10]。由于中小高炉炉喉直径相对较小,焦炭相对容易布往中心,因此中小高炉宜取小值,萍钢高炉加权平均角差以 $2.5^\circ\sim 4^\circ$ 为宜。

另外,不能忽视高压操作给高炉带来的影响,萍钢高炉顶压与同类型高炉相比偏高,较高顶压可能抑制中心气流的发展,所以只能通过过度中心加焦才能疏通中心,造成焦比升高。

6 加强低硅生铁冶炼

萍钢生铁成分中, $w(\text{Si})$ 约为0.53%,且波动较大,这是引起较高燃料比的原因之一。萍钢生产原料来源复杂,化学成分波动大、不稳定,焦炭热强度低、反应性过高,操作制度调节频繁等,都是引起生铁中 $w(\text{Si})$ 波动的重要原因。

SiO_2 还原反应式为 $\text{SiO}_2+2\text{C}=2\text{CO}+\text{Si}$,其平衡常数热力学表达式为

$$K=-29\,246/T+18.03, \quad (1)$$

式中 T 为炉内温度,单位为K。

根据 SiO_2 还原反应式,可得到平衡常数 K 的表达式为

$$K = a_{\text{Si}} P_{\text{CO}}^2 / a_{\text{SiO}_2} = w(\text{Si}) f_{\text{Si}} P_{\text{CO}}^2 / a_{\text{SiO}_2}, \quad (2)$$

式中: a_{SiO_2} 为 SiO_2 的活度;

f_{Si} 为铁水中Si的活度系数,铁水成分一定时,其值为常数;

P_{CO} 为气相中CO的分压。

由式(2)得

$$w(\text{Si}) = K a_{\text{SiO}_2} / f_{\text{Si}} P_{\text{CO}}^2 \quad (3)$$

从式(1)和式(3)可看出,影响生铁中硅含量的因素有:炉内温度、炉渣 SiO_2 的活度以及高炉内CO的分压。因此,适当降低理论燃烧温度和炉腹区域温度,适当提高二元碱度以降低炉渣 SiO_2 的活度,并提高炉顶压力对降硅有利。杭州钢铁股份有限公司、南京钢铁联合有限公司、上海宝山钢铁股份有限公司、武汉钢铁股份有限公司高炉炉渣二元碱度 R 为1.2~1.25,日本钢铁企业,当 $w(\text{Si})=0.2\%$ 时, R 高达1.27。二元碱度提高不仅可以降低 a_{SiO_2} ,而且可以在低硅冶炼的条件下,提高一级品率。

由于焦炭灰分中CaO等碱性氧化物含量较少,焦炭灰分中的 SiO_2 呈自由状态存在, a_{SiO_2} 几乎为1;高炉冶炼条件下,炉渣中 a_{SiO_2} 大约为焦炭灰分中 a_{SiO_2} 的1/10^[11],而且焦炭灰分中 SiO_2 与C接触紧密,很容易发生反应。因此,降低焦炭灰分,并提高焦炭的热强度对高炉低硅铁冶炼有重要作用。

日本学者田村等人根据热力学和动力学原理推导出铁水含硅公式^[12]

$$w(\text{Si}) = \frac{5.55 \times 10^{26} a_{\text{SiO}_2} H_0 \exp(-109\,800/T)}{P_{\text{CO}} \eta^{2/3} (V_u/d)^{2/3}}, \quad (4)$$

式中: H_0 为滴落带高度;

η 为高炉利用系数;

V_u 、 d 分别高炉容积和炉缸直径。

式(4)表明生铁含硅量与滴落带高度成正比,而采用高软熔温度的矿石有利于降低滴落带高度,对降硅有益。

7 结论

降低高炉燃料比是个系统工程,高炉原燃料条件、风温水平、冶炼强度与煤比的选择、设备状况、炉顶压力、合理布料与低硅冶炼技术水平等,均与能耗高低密切相关。通过分析萍钢高炉燃料比较高的原因与对策,可得如下结论:

1) 原燃料质量直接影响高炉燃料比, 应加强烧结试验研究, 提高烧结矿的冶金性能, 适当降低烧结矿中 FeO 含量, 生产碱度为 1.8~2.0 的烧结矿; 适当抑制焦炭的反应性。

2) 以炉腹煤气量指数作为高炉强化的技术指标, 避免过度强化冶炼。

3) 根据原燃料条件、炉况状态选择适宜喷煤量, 以防过度追求高煤比。煤比过高会引起未燃煤粉量增加, 造成能源浪费并给高炉透气性带来不利影响。

4) 当 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 15% 左右时, 提高二元碱度至 1.15~1.25, 将 $w(\text{MgO})$ 由 10.3% 降低至 8.0%~9.0% 水平, 稳定 $\text{MgO}+\text{CaO}$ 总量, 使 R_3 为 1.45~1.5, R_4 为 1.0 左右。当 Al_2O_3 含量较高时, 考虑按照 $w(\text{MgO})/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 0.6~0.65 的规律调节 MgO 含量。

5) 由于中小高炉炉喉直径相对较小, 焦炭相对容易布往中心, 因此, 萍钢 1 780 m^3 高炉的多环布料加权平均角差以 $2.5^\circ \sim 4^\circ$ 为宜。

6) 降低并稳定焦炭灰分在 13% 以下, 提高焦炭热强度与矿石软熔性能, 以利于低硅生铁的冶炼。

参考文献:

- [1] 刘竹林, 王建丽. 高炉降焦潜力与措施探讨[J]. 湖南工业大学学报, 2010, 24(5): 1-4.
Liu Zhulin, Wang Jianli. Discussion on Measures and Potentials of Coke-Rate Reduction of Blast Furnace[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2010, 24(5): 1-4.
- [2] 高泽平, 李永清, 刘竹林, 等. 湘钢炼铁 CO_2 减排措施研究[J]. 湖南工业大学学报, 2010, 24(5): 5-9.
Gao Zeping, Li Yongqing, Liu Zhulin, et al. Study of CO_2 Emission Reduction from Ironmaking in Xiangtan Iron and Steel Co.[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2010, 24(5): 5-9.
- [3] 刘竹林. 烧结矿 FeO 含量的影响因素探讨[J]. 重庆科技学院学报, 2005, 7(1): 8-9, 13.
Liu Zhulin. On Influence Factors of FeO in Sinter[J]. Journal of Chongqing University of Science, 2005, 7(1): 8-9, 13.
- [4] 胡俊鹤, 吴美庆. 国内外关于提高焦炭质量研究的最新进展[J]. 鞍钢技术, 2004(6): 13-17.
Hu Junge, Wu Meiqing. Recent Development of Research Regarding Coke Quality Improvement of the World[J]. Angang Technology, 2004(6): 13-17.
- [5] 唐文权, 李学金, 董炳军. 讨论“高炉利用系数”[J]. 炼铁, 2005, 24(6): 53-54.
Tang Wenquan, Li Xuejin, Dong Bingjun. Discussion on Utilization Coefficient of BF[J]. Ironmaking, 2005, 24(6): 53-54.
- [6] 项钟庸. 用高炉炉腹煤气量指数来衡量高炉强化程度[J]. 炼铁, 2007, 26(2): 2-4.
Xiang Zhongyong. Application of BF Bosh Gas Index to Evaluating the Extent of BF Combustion Intensity[J]. Ironmaking, 2007, 26(2): 2-4.
- [7] 甘雪萍, 戴曦, 张传福. 高镁炉渣性能研究进展[J]. 有色金属, 2001, 53(1): 67-69.
Gan Xueping, Dai Xi, Zhang Chuanfu. Advance of Properties Research of Magnesia-Rich Slags[J]. Nonferrous Metals, 2001, 53(1): 67-69.
- [8] Choi Jayong, Lee Haegwon, Kim Jeongsik. Dissolution Rate of Al_2O_3 into Molten $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ Slags[J]. ISIJ International, 2002, 42(8): 852-860.
- [9] 周传典. 高炉炼铁生产技术手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002: 331-332.
Zhou Chuandian. Technical Manuals of Blast Furnace Ironmaking Production[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2002: 331-332.
- [10] 周生华, 程树森, 孙建设. 莱钢 1 号 1 880 m^3 高炉装料制度的探索[J]. 炼铁, 2007, 26(1): 33-36.
Zhou Shenghua, Cheng Shusen, Sun Jianshe. Exploration on Charging System of No.1 1 880 m^3 Blast Furnace in Laiwu Iron and Steel Co. [J]. Ironmaking, 2007, 26(1): 33-36.
- [11] 邓守强, 施月循. 高炉硅还原探讨和研究[J]. 钢铁, 1989, 24(10): 1-5.
Deng Shouqiang, Shi Yuexun. Reduction Mechanism of Silica in Blast Furnace[J]. Iron and Steel, 1989, 24(10): 1-5.
- [12] 冯燕波. 龙钢高炉低硅铁水冶炼研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
Feng Yanbo. Research of the Smelting with Low Silicon Hot Metal in Blast Furnace at Longmen Steel CO. Ltd[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2007.

(责任编辑: 邓光辉)