

湘钢炼铁 CO₂ 减排措施研究

高泽平, 李永清, 刘竹林, 贺道中

(湖南工业大学 冶金工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 计算分析了湘钢炼铁工序的 CO₂ 排放量, 结果表明, 湘钢目前高炉炼铁 CO₂ 减排尚有较大潜力。通过努力进一步提高现有高炉的能源利用效率, 并加强研究和应用能大幅度降低能源消耗的新技术, 可进一步减少炼铁 CO₂ 排放量。

关键词: 炼铁; CO₂; 减排; 措施

中图分类号: TF053; X383

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2010)05-0005-05

Study of CO₂ Emission Reduction from Ironmaking in Xiangtan Iron and Steel Co.

Gao Zeping, Li Yongqing, Liu Zhulin, He Daozhong

(School of Metallurgical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: The CO₂ emission from the blast furnace in Xiangtan Iron and Steel Co. is calculated and analyzed. The results show that there are huge potential for CO₂ emission reduction. Energy utilization efficiency can be improved further, and the amount of CO₂ emission can be decreased by applying new technologies.

Keywords: ironmaking; CO₂; emission reduction; measures

0 引言

主要温室气体 CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, SF₆ 中, CO₂ 排放量较大, 且降解时间较长, 对全球温室气体的贡献约占 55%, 因此, 它被广泛认为是产生温室效应并导致全球气候变暖的主要气体。

中国经济的快速发展使我国成为全球二氧化碳排放量仅次于美国的第二大排放国家。针对这一现状, 国家对节能减排高度重视, 2007 年以来, 中国连续出台了一系列节能减排、节约资源、保护环境、应对气候变化等的政策。温家宝总理提出, 到 2020 年单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 40%~45%; 我国的减排目标将作为约束性指标纳入国民经济和社会发展的中长期规划。

煤炭、石油等化石燃料的燃烧是二氧化碳排放的主要来源, 钢铁工业是消耗燃料(焦炭、煤粉等)的大户, 因此也是二氧化碳排放的大户。按照 2009 年世界粗钢总产量 12.2 亿 t、高炉铁水/粗钢比 0.7 t/t、每吨高炉铁水发生 CO₂ 量 1.489 t 计算, 钢铁工业每年的 CO₂ 排放总量达 12.72 亿 t。

近年来, 我国钢产量平均年增长率高达 20% 以上, 随着钢产量的增加, 降低二氧化碳排放已成为中国钢铁工业亟待解决的问题。在整个钢铁生产流程中, 高炉炼铁工序能耗较高, 由直接碳素消耗引起的总 CO₂ 排放中, 炼铁工序所占比例约为 65%, 因此炼铁工序带来的环境负荷较大。

本文针对湘钢(湖南华菱湘潭钢铁有限公司, 简称湘钢)炼铁厂的情况, 分析了高炉炼铁工序中的 CO₂

收稿日期: 2010-03-30

基金项目: 湖南省教育厅科研基金资助项目(08D099)

通信作者: 高泽平(1965-), 男, 湖南宁乡人, 湖南工业大学教授, 主要从事现代冶金工艺教学与研究,

E-mail: gaozep0675@163.com

排放现状,提出了实现进一步减排的措施。

1 湘钢炼铁 CO₂ 排放现状

湘钢2009年产铁556万t。现有炼铁高炉4座,其中1号、2号高炉有效容积为2580m³,3号高炉有效容积为1080m³,4号高炉有效容积为1800m³,新2号高炉于2010年3月24日顺利出铁。

湘钢炼钢生产使用的金属炉料主要是高炉铁水,废钢比仅为10%。因此,进一步了解炼铁CO₂排放现状,对湘钢制订和实施能源消耗与循环利用战略,开发节能、减排温室气体的技术十分重要。

高炉炼铁使用焦炭和煤粉作为燃料。高炉内燃烧反应后的炉缸煤气流在自下而上的流动中,把自上而下的炉料加热、还原和熔炼成生铁和炉渣,最后到达炉顶,成为炉顶煤气,主要含有CO、CO₂、N₂、H₂和CH₄。因此,燃料中的碳素主要有两大去向:渗入铁水中中和进入高炉煤气。渗入铁水中的碳,在后续炼钢过程中依钢种规格要求大部分被氧化成CO,成为转炉煤气。除了消耗碳素产生CO₂外,炼铁还要消耗风、水、电、氧气、氮气、压缩空气等能源介质,对使用火电的湘钢来说,最后都归结到烧煤排放CO₂上。

根据湘钢2009年的实际情况,焦比(含焦丁)371.71kg/t,煤比159.14kg/t,焦炭和煤粉的固定碳的质量分数分别为86.1%、78.3%,则吨铁碳素消耗量为444.65kg,对应吨铁CO₂排放量约为1630.38kg。计算得吨铁风量为1330.33m³,高炉平均富氧率为2.58%,相应吨铁消耗的氧气量为34.32m³。采用变压吸附制氧技术,每立方米氧气消耗的电能约为0.38kW·h,则吨铁耗电约13.04kW·h。根据文献[1],如果采用火力发电,则每发1kW·h的电能将释放0.70kg的CO₂,由此得富氧鼓风对应的CO₂排放量为9.13kg/t。碳素燃烧产生的CO₂与富氧鼓风对应的燃煤生成的CO₂之和为1640kg/t。

目前,全国重点钢铁企业平均入炉焦比已降到390kg/t左右,最好的宝钢已经降到293kg/t。如果湘钢焦比达到320kg/t、煤比在180kg/t,假定焦炭和煤粉的固定碳含量不变,则高炉碳素消耗量为416.46kg/t,CO₂排放量约为1527kg/t(不计与鼓风富氧相关的CO₂排放量),与上述计算相比,CO₂排放量减少103kg/t。因此,湘钢目前高炉炼铁CO₂减排的潜力较大。

2 湘钢炼铁 CO₂ 减排措施

2009年湘钢高炉炼铁的能耗构成如表1所示。由表1可见,降低固体燃料的消耗和加强能源的回收利用对降低高炉能耗和CO₂减排作用显著。

表1 湘钢高炉炼铁能耗构成

Table 1 The constitutions of energy consumption in blast furnace ironmaking

项 目	固体燃料	气体燃料	电力	其它	回收利用	合计
能耗/(kgce·t ⁻¹)	530.85	2.52	42.6	90.5	-275.3	391.2
比例/%	135.7	0.6	10.9	23.1	-70.3	100

2.1 降低燃料比

2.1.1 改善原燃料质量

1) 焦炭。生产实践表明^[2]:随着高炉容积的扩大,喷煤比提高,高炉料柱中矿焦比增加,焦炭在炉内停留的时间更长,焦炭在炉内受破损作用的几率更大,焦炭在软熔带和滴落带的骨架作用更加突出,高炉炼铁对焦炭质量的要求更高。现代高炉炼铁技术对焦炭质量的要求,至少应当包括更高的冷态机械强度(M₄₀、CSR),更低的热反应性(CRI),低灰分、低硫分、低而且稳定的水分。

技术措施包括优化配煤、煤料捣固、型煤压块、煤调湿(CMC)、煤预成型技术(DAPS)、选择粉碎,以及降低结焦速度或焖炉、干熄焦(CDQ)、新型湿法熄焦、焦炭整粒等。

湘钢目前部分采用干熄焦技术,并严格控制槽下焦炭筛分,入炉焦炭质量得到了提高,M₄₀达83%。但湘钢焦炭灰分高达12.4%,硫高达0.83%,水分含有3.42%。国产焦炭灰分与先进工业国家相比大约高出2%~3%。焦炭灰分高,不仅使高炉炉渣增加、燃料消耗增加、冶炼低硅生铁难度加大,而且还提高了焦炭的热反应性,影响焦炭反应后强度。建议研究应用低灰分弱粘结性煤的配煤技术,并采用上述技术措施,生产优质焦炭以满足大高炉的要求。

目前炼铁界要求降低焦炭反应性的原因主要是,反应性低意味着焦炭的开始气化温度高,有利于缩小高炉的热保存区,延长铁矿石的间接还原时间,提高间接还原度,降低焦比。但是,当使用高还原性铁矿石时,提高焦炭反应性对高炉生产反而有利^[3]。多年来,日本对高反应性焦炭的生产及应用做了不懈努力。增大焦炭反应性有降低结焦温度和使用催化剂(CaO等碱金属和碱土金属的氧化物)2种方法。2002年9月,在Hokkai公司的2座工业焦炉上,采用配富CaO煤的方法生产出反应性高、热强度也高的焦炭,CRI指数提高至30%以上,高反应性焦炭全部装入高炉进行冶炼试验,燃料比减少了10kg/t铁^[4]。

2) 烧结矿。它是高炉炼铁使用的最主要的含铁原料,湘钢炼铁炉料结构中烧结矿占78%。烧结矿质量包括品位、碱度、转鼓强度、还原性能和高温冶金性能等多个方面,目标是生产以针状铁酸钙(SFCA)为主

要粘结相的低 FeO、高碱度烧结矿。为生产高质量烧结矿, 要做好以下工作: ①优化配矿; ②强化制粒; ③厚料层低温烧结; ④重视烧结矿的高温冶金性能。

目前, 湘钢烧结矿质量基本接近全国重点钢铁企业水平, 但 FeO 含量达 8.76%, 宝钢、武钢为 7% 左右。一般来说, 烧结矿 FeO 越低, 还原性越好。烧结矿 FeO 每提高 1%, 焦比升高 3 kg/t。烧结矿 FeO 下降, 降低直接还原度, 铁矿石在高炉冶炼生产中, 将增加间接还原, 减少炉缸直接还原消耗的焦炭量, 这将有利于高炉冶炼节焦降耗, 增加经济效益。但随着烧结矿 FeO 降低, 一方面是烧结矿的还原性变好, 另一方面却可能使低温还原粉化率 (RDI) 增加。武钢采用了在烧结矿表面喷洒 3% 的 CaCl₂ 或 MgCl₂ 溶液的技术, 使 RDI 比不喷洒时降低了 30% 以上^[5]。

近年日本开发的预还原烧结矿技术, 是指铁矿在烧结机上就发生部分预还原的技术, 属于还原剂对铁矿粉的直接还原, 从而减少了高炉中发生的间接还原, 所以可降低铁矿还原所用的燃料。工业试验证明, 高炉使用预还原烧结矿, 可大大降低燃料比, 如果烧结矿预还原率为 70%, 整个炼铁工序的燃料比减少 10% 以上^[6]。

3) 球团矿。我国球团矿是作为炉料结构的一个组成部分配合高碱度烧结矿使用。湘钢入炉球团矿中 SiO₂ 质量分数较高, 为 6.1%, 影响高温冶金性能。在还原过程中, Fe₂O₃ 还原在表面已出现金属铁, 而中心仅还原到 FeO, FeO 与 SiO₂ 结合形成 2FeO · SiO₂, 阻碍进一步还原, 造成球团矿高温还原性能差, 增加了高炉内直接还原, 影响高炉的燃料比, 因此提高品位、降低 SiO₂ 是十分重要的。解决途径是“细磨深选”, 既提高品位和降低 SiO₂, 又解决粒度粗和表面积小的问题, 也就解决了目前添加膨润土配加量过高而降低球团矿品位和增加 SiO₂ 含量的问题。

向高炉炉料中加入一部分经过预还原的球团矿, 不仅节省铁氧化物还原需要的碳素, 而且能够节省加热炉料需要的热量, 以及减少炉渣带走的热量。如使用 100% 金属化率为 65% 的球团矿, 燃料比可降到 364 kg/t 的水平; 在高炉中每使用 30 kg 用高炉粉尘制造的还原球团矿可节约 7 kg 还原剂^[1]。

2.1.2 改善煤粉燃烧条件

高炉喷吹煤粉置换焦炭是国内外炼铁节能降耗的重要技术措施。限制喷煤量进一步提高主要有 4 个因素^[2, 5]:

1) 煤粉在风口前的燃烧率。研究和实践表明, 煤粉在风口前的燃烧率应维持在 80% 左右。提高燃烧率的途径是: 选择燃烧性能好的混合煤 (燃烧性能好的烟煤与无烟煤混合, 使挥发分维持在 (20 ± 2)%, 见

图 1 和图 2、长焰烟煤、贫煤等; 将煤粉磨到一定的细度 (无烟煤 -200 目 > 80%, 烟煤 -200 目 > 60%), 富氧鼓风 (3% ~ 4%), 提高风温 (1 200 °C 以上) 等。

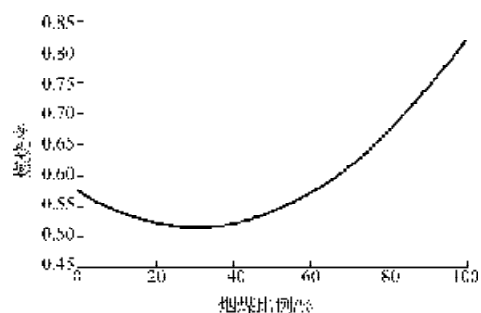


图 1 两种煤不同比例配合时的燃烧率

Fig. 1 Burning rate of different coal proportions

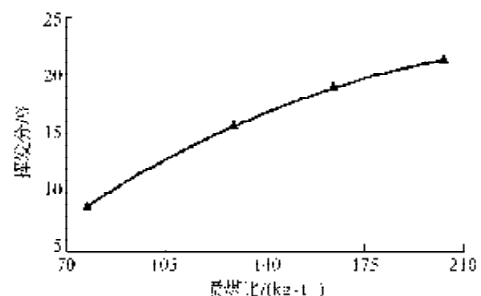


图 2 喷煤比对应的混合煤挥发分

Fig. 2 The volatile matter content of different coal injection proportion

2) 炉缸热状态。可以承受大喷煤量的炉缸热状态, 首先应该有合适的理论燃烧温度 ($t_{理}$), 一般认为宜维持在 (2 100 ± 50) °C (而不要低于 2 050 °C), 焦炭进入燃烧带时的温度应在 0.75 $t_{理}$, 不要低于 0.7 $t_{理}$ 。目前生产上通过提高风温 (1 200 ~ 1 250 °C)、富氧 (3% ~ 4%) 和鼓风脱湿 (全年达到冬季大气湿度水平), 可以达到大喷煤量所要求的理论燃烧温度。

3) 煤气运动阻力。喷煤以后煤气运动遇到的阻力必然增加, 炉内矿焦比增加, 高炉料柱中透气性最好的焦炭数量减少, 软熔带内的煤气流通过的焦窗容积和滴落带焦炭柱中空隙度减少, 液态生成物 (炉渣和铁滴) 流过的阻力增加, 这些都给高炉顺行带来麻烦。为了维持大喷煤下的炉况顺行, 必须提高精料水平, 使吨铁渣量降到 280 kg/t 以下, 提高焦炭质量 ($M_{40} > 85%$, $M_{10} < 7%$, $CRI < 25%$, $CSR > 65%$), 采用必要的富氧鼓风, 减少通过煤气量, 以降低煤气流速, 从而提高炉内消化未燃煤粉的能力, 并通过上下部调剂, 保持合理的煤气流分布。

4) 置换比。随着喷煤量增加, 置换比下降是客观规律, 但可以通过各种技术手段来减缓下降速度。例如, 保持高炉内良好的炉缸热状态, 上下部调剂保持

煤气流合理分布,炉况顺行,提高煤粉在风口前的燃烧率,提高炉内未燃煤粉消化能力等。即使如此在喷煤量超过 200 kg/t 时,置换比仍然可能显著下降,这是目前国内外高炉喷煤不能长久地维持在 210 kg/t 以上的主要原因之一。

因此,高炉厂家应在自身冶炼客观条件下,寻求最低燃料比下的最适宜喷煤量,才能达到节能降耗的目的。目前湘钢采取混合喷煤,烟煤比例 15%,富氧率 2.58%,风温 1 159 °C,可进一步改善燃烧条件,提高喷煤比。

2.1.3 提高煤气利用率

高炉炼铁生产中根据具体生产条件和喷吹煤粉情况,采用上下部调节结合使煤气合理分布,既提高其热能利用率(炉顶温度可望降到 150 °C 以下),又提高其化学能利用率(CO 利用率达到 50% 以上)。提高煤气利用率的关键因素有:高炉上部调整批重和提高矿焦比(见图 3),无料钟炉顶多环布料,使炉顶形成平台加浅漏斗的稳定料面,中心是否加焦和加焦的多少则影响到上部煤气流的合理分布;下部根据喷煤比大小合理调整风口直径、伸入炉内长度等,控制好边缘和中心煤气流的合理初始分布,并特别要注意喷煤量多少对气流分布的影响。总之,针对具体情况,采用适合具体高炉条件的上下部调剂。目前湘钢高炉炉顶煤气温度为 195 °C,CO 利用率为 44%,煤气利用率进一步提高。

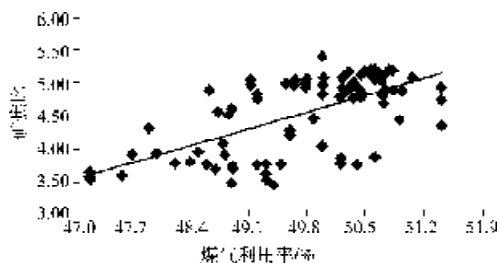


图 3 高炉矿焦比和煤气利用率的关系

Fig. 3 The relation of ore coke ratio and the utilization rate of coal gas

提高炉顶压力也是降低燃料比的重要技术措施,高压操作有利于消化未燃煤粉和适应低硅生铁的冶炼,而提高炉顶压力使风机多消耗的电能,可以由高炉炉顶煤气余压回收透平发电技术(TRT)发电来得到补偿。

2.2 加强二次能源利用

二次能源回收利用是降低吨铁能耗的一个重要方面。由表 1 可知,回收能源占湘钢高炉炼铁总能耗的比例高达 70.3%。这充分说明继续加强回收余热余能对 CO₂ 减排的重要意义。

1) 高炉煤气余热余压利用^[7]。

① TRT 技术。TRT 是利用高炉炉顶煤气中的压力能及热能经透平膨胀做功来驱动发电机发电,可以回收高炉鼓风机所需能量的 30% 左右。如采用干法除尘,可以再提高 30% 的发电能力。一座 2 000 m³ 高炉如果稳定运行,其 TRT 系统的运行效率可以达到 85%,全年发电量可达 0.5 亿 kW·h,相当于节约原煤 3 万 t。

② 全烧高炉煤气锅炉技术。通常条件下,高炉煤气除高炉热风炉自身使用外,还有大量富余,一般情况是在燃煤动力锅炉中掺烧一部分或供小型混合煤气锅炉混烧,回收量都不是很大。首钢电力厂等单位研制的全烧高炉煤气的高温高压电站锅炉,为钢铁企业创造出了一条清洁高效回收高炉煤气的新途径。

③ 低热值煤气燃气轮机技术(CCPP)。经除尘加压的高炉煤气与加压的空气混合后进入燃烧室并燃烧,所产生的高温、高压烟气进入燃气透平机组膨胀做功,燃气轮机通过减速齿轮传递到汽轮发电机组发电;燃气轮机做功后的排气进入余热锅炉,产生蒸汽后进入蒸汽轮机做功,带动发电机组发电,组成煤气-蒸汽联合循环发电系统。CCPP 排烟中的 CO₂ 排放比常规火力电厂减少 45%~50%。

目前湘钢 4 座高炉均采用了炉顶余压发电技术,高炉 TRT 装置小时发电能力约 26 000 kW·h。2009 年湘钢高炉 TRT 发电量为 30 kW·h·t⁻¹,包钢为 40.4 kW·h·t⁻¹(其中 6 号高炉 TRT 机组月平均吨铁发电量近 60 kW·h)。湘钢提高 TRT 发电量仍有较大潜力。通过采用稳定高炉操作、优化 TRT 运行参数、合理调整 TRT 入口静叶角度、加强管理等措施,可提高 TRT 发电量。

2) 炉渣显热利用。根据第二总热平衡算法,当渣量为 314 kg/t 时,炉渣带走显热占热量总收入的 11.84%^[8]。按照 2009 年 556 万 t 生铁和 340 kg/t 渣比计算,湘钢炉渣年产量高达 189 万 t。用水冲渣制成水渣,可供水泥工业做原料,但炉渣的显热在冲渣过程中消耗于冲渣水的汽化和使冲渣水温度升高,炉渣的大量物理热不能得到有效利用。日本钢铁公司对高炉渣干式制粒技术进行过研究,也曾开发出流化床式炉渣显热回收法,日本近年的高炉渣显热回收技术研究主要集中在转杯/转盘粒化法^[6]。建议湘钢今后加强回收高炉炉渣显热的技术研究。

3) 热风炉烟道废气余热利用。热风炉烟道废气余热回收主要应用于 2 个方面^[9]:一是作为喷煤制粉系统的干燥介质和输送载体,二是用作预热煤气和助燃空气。作为制粉系统的干燥介质,可节约制粉系统燃烧炉的煤气量,降低制粉能耗。有人认为,将热风炉烟道废气提高到 500 °C 左右,然后通过可靠的高效换热器,将煤气和助燃空气双预热到 250 °C,在全用高炉煤气的情况下,就可以使热风炉拱顶温度达到 1 400 °C,在

送风周期 45 min 时, 可以稳定地达到 1 200 °C 风温。目前, 湘钢 4 座高炉均采用了热风炉烟气余热系统, 对煤气和空气进行预热, 预热后的温度在 150 ~ 180 °C, 可提高风温 30 ~ 50 °C。

2.3 其他减排措施

1) 寻找碳的可替代物作还原剂, 如天然气、氢气、废塑料等。过去, 高炉喷吹天然气在美洲高炉已经大量应用。使用废塑料技术在日本应用较多, 在我国废塑料的收集和来源是个问题。也有开展氢气作还原剂可行性研究的, 但氢的来源和制取是很棘手的。

2) 炉顶煤气循环利用可有效改善高炉效率, 将炉顶煤气(其中含 C 和 H₂) 喷入高炉可减少 CO₂ 排放量。目前正在研究的有无氮高炉、等离子高炉, 仍需进一步研究。

3) 回收高炉产生的 CO₂ 并加以有效利用, 从而达到减排效果。国内宝钢开展了采用回收的 CO₂ 替代氩气用于转炉底吹的研究, 也开始了对回收的 CO₂ 进行固存的技术研究^[6]。

3 结语

根据湘钢 2009 年的炼铁生产技术指标与原燃料条件计算, 炼铁 CO₂ 排放量达 1 640 kg/t, 与国内先进企业相比, 至少有 100 kg/t 的减排潜力。结合湘钢的具体条件, 提出了为实现高炉炼铁 CO₂ 进一步减排, 湘钢可以采取的措施主要有: 改善原燃料质量与煤粉燃烧条件, 加强二次能源利用, 开发节能减排新技术等。

参考文献:

- [1] 毕学工. 武钢炼铁 CO₂ 排放现状及减排方向[J]. 炼铁, 2008, 27(1): 17-21.
Bi Xuegong. Present Status of CO₂ Emission form Ironmaking in WISCO and Potential Analysis of Emission Reduction[J]. Ironmaking, 2008, 27(1): 17-21.
- [2] 杨天钧. 节能减排 环境友好 实现我国炼铁生产可持续发展[J]. 炼铁, 2008, 27(3): 1-9.

- Yang Tianjun. Energy Saving, Emission Reducing and Environment Friendly Measures for Sustainable Development of Ironmaking Production in China[J]. Ironmaking, 2008, 27(3): 1-9.
- [3] 毕学工. 焦炭质量与高炉冶炼关系的再思考[J]. 过程工程学报, 2009, 9(增刊 1): 438-442.
Bi Xuegong. Reconsideration of the Relationship between Coke Quality and Blast Furnace Performance[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2009, 9(S1): 438-442.
- [4] Nomura S, Ayukawa H, Kitaguchi H, et al. Improvement in Blast Furnace Reaction Efficiency through the Use of Highly Reactive Calcium Rich Coke[J]. ISIJ Int., 2005, 45: 316-324.
- [5] 项钟庸, 王筱留. 高炉设计—炼铁工艺设计理论与实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
Xiang Zhongyong, Wang Xiaoliu. Designing of Blast Furnace—Theory and Practice of Designing for Ironmaking Technology[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2007.
- [6] 胡俊鸽, 张东丽, 曲余玲. 炼铁领域节能减排技术的发展[J]. 世界钢铁, 2009(4): 26-31.
Hu Junge, Zhang Dongli, Qu Yuling. Development of Energy Saving and Emission Reduction Technologies in Ironmaking [J]. World Steel, 2009(4): 26-31.
- [7] 舒型武. 简析钢铁工业节能减排的途径[J]. 冶金能源, 2008, 27(3): 6-9.
Shu Xingwu. Simple Analysis of the Way of Energy Saving and Discharge Reduction in the Steel Industry[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2008, 27(3): 6-9.
- [8] 周传典. 高炉炼铁生产技术手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
Zhou Chuandian. The Technical Manual for Blast Furnace Ironmaking[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2002.
- [9] 杨天钧, 左海滨. 中国高炉炼铁技术科学发展的途径[J]. 钢铁, 2008, 43(1): 1-5.
Yang Tianjun, Zuo Haibin. Scientific Development Strategy of Blast Furnace Ironmaking Technology in China[J]. Iron and Steel, 2008, 43(1): 1-5.

(责任编辑: 罗立宇)