

高炉降焦潜力与措施探讨

刘竹林, 王建丽

(湖南工业大学 冶金工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 分析了我国高炉焦比现状、降低焦比的意义和潜能, 提出了当前降焦主要途径与措施, 对采用“双高”焦炭、预还原金属炉料、改善喷吹条件等降焦重点问题进行了探讨, 提出了不加熔剂条件下的简易配料计算式。

关键词: 高炉; 焦比; 喷吹煤粉

中图分类号: TF538

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2010)05-0001-04

Discussion on Measures and Potentials of Coke-Rate Reduction of Blast Furnace

Liu Zhulin, Wang Jianli

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

Abstract: Analyzed the status quo of coke rate of China's BF and the significance and potentials of reducing coke rate, presented the current main ways and measures on reducing coke rate. By discussing the adoption of "double high" coke and pre-reduction metal furnace charge, and the improvement of injection conditions etc., proposed the simple charge composition formula without adding melting agents.

Keywords: blast furnace; coke rate; injection coal

世界炼焦煤资源十分短缺, 据世界能源会议统计, 世界煤炭探明的可采储量共计 10 438.64 亿 t, 炼焦煤比例不到 10%^[1]。以 2006 年的消耗速度, 估计中国的主焦煤和肥煤资源在 70 a 内将消耗殆尽, 全世界的主焦煤和肥煤资源也将在 90 a 内消耗殆尽。因此, 除了寻找合理而有效的焦炭代用品之外, 当前降低高炉焦炭消耗也显得尤为重要。另外, 随着煤炭价格大幅

攀升, 降低焦比也成为炼铁降低生铁成本、提高效益的主要技术措施。根据最低理论碳比计算可知, 最低理论焦比约为 395 kg/t。从表 1 可以看出, 当前我国高炉综合焦比约 500 kg, 距理论最低焦比还有 100 kg 的下降空间。虽然高炉不可能达到最理想状态, 但最低理论碳比本身是可以继续降低的。因此, 进一步挖掘高炉降焦潜能是完全可能的。

表 1 2004~2008 年我国高炉生产主要技术指标^[2]

Table 1 The major technical indicators of China's blast furnace production in 2004~2008

年份	利用系数 / $t \cdot m^{-3} \cdot d^{-1}$	焦比 / $kg \cdot t^{-1}$	煤比 / $kg \cdot t^{-1}$	燃料比 / $kg \cdot t^{-1}$	风温 / $^{\circ}C$	入炉矿品位 / %	熟料率 / %	工序能耗 / $kgce \cdot t^{-1}$
2004	2.53	425	111	539	1 091	58.21	93.02	466.20
2005	2.62	412	124	536	1 081	58.03	91.45	450.79
2006	2.68	396	135	531	1 100	57.78		430.59
2007	2.68	392	137	529	1 125	57.71	91.45	426.84
2008	2.62	398	134	532	1 127	57.30		430.58

收稿日期: 2010-03-10

通信作者: 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

1 降低焦比的措施分析

高炉降焦手段主要有：

- 1) 采用高品位铁矿石、少渣操作；
- 2) 高风温与低湿度、高富氧、大喷吹；
- 3) 取消生熔剂直接入炉，降低热消耗和改善料柱透气性；
- 4) 降低烧结矿 FeO 含量，提高矿石还原性；
- 5) 改善煤气分布，保持高炉长期稳定，提高煤气利用率；
- 6) 改善粒度组成，分级入炉，尽量避开 70% 大颗粒 + 30% 小颗粒级组成，使透气性达到最佳状态；
- 7) 稳定原燃料成分与质量，进一步加强低硅生铁冶炼；
- 8) 进一步提高高炉顶压力和富氧率，以解决高炉强化和顺行的矛盾；
- 9) 使用金属化炉料（用非主焦煤代替焦煤）以降低高炉焦炭消耗；
- 10) 采用高强度、高反应性焦炭，提高降焦潜力与空间。

本文将对其中国内尚需重视或关注的部分内容作较详细分析。

1.1 生产并采用高强度、高反应性焦炭

当前低反应性焦炭主要反应区在 1 000 °C 左右，由 Rist 操作线计算表明，达到化学平衡时与实际生产时的操作线比较，焦比大约相差 10~20 kg，其下降空间十分有限，但若能在保证焦炭强度的前提下适度提高焦炭反应性，降低直接还原反应温度，将有利于使高炉碳比理想化、最低化。

根据操作线图 1 中 W 点（浮氏体还原平衡点）的坐标确定方法， X_w, Y_w 取决于浮氏体还原平衡温度，热贮备区与高温区的分界温度可根据 $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$ 进行温度确定，若能提高铁矿石的还原性并在保证强度的条件下增加焦炭反应性，让浮氏体还原平衡温度接近理论开始还原温度 685 °C，如图 700 °C 时，平衡 CO_2 浓度将达到 40%，与 1 000 °C 时 29% 相差 11%，煤气利用率将大幅提高，焦比下降的空间将非常巨大。由图 1 可知，将 W 点向右移动到 W' 点，可增大煤气实际浓度与平衡浓度的差值，这样不仅提高了降低燃料比的潜力，而且增大了浮氏体还原反应的驱动力，有利于高炉产量的提高。多年来，日本对高反应性焦炭的生产及应用做了不懈努力。1992 年 NKK 公司采用中温炼焦技术生产出高反应性焦炭并在高炉中进行了冶炼试验^[3]，2002 年 9 月，在 Hokkai 公司的 2 座工业焦炉上，采用配富 CaO 煤的方法生产出高反应性焦炭，CRI 指数提高至 30%，高反应性焦炭全部装入高炉进行冶炼试验，燃料比减少了 10 kg/t^[4]。

目前普遍认为焦炭反应性 CRI 低些较好，实际上高 CRI 不一定总是和低 CSR 相对应，高炉炼铁并不主张焦炭反应性越低越好，而是要求焦炭的反应性与铁矿石的还原性相适应。高炉溶损碳量和焦炭反应性没有直接关系，主要由参加直接还原的浮氏体多少决定。

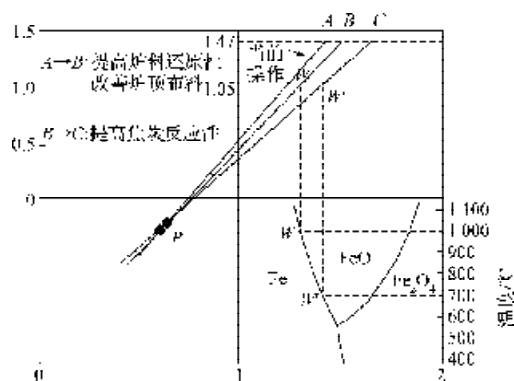


图 1 不同反应性焦炭的高炉操作线比较

Fig. 1 The operation lines of blast furnace for different reactivity coke

1.2 高炉使用预还原炉料

在使用金属化炉料操作线图 2 中，由于金属化炉料的采用，铁矿石的氧化度势必下降， W 点随之下降至 W' ，下降量值为金属化率 R ；使用金属化炉料后，浮士体的间接还原也将减小， V 点下移，若风温不变，热平衡点 P 也会垂直下降至 P' ，直线 $P'W'$ 斜率将下降，焦比随之降低。

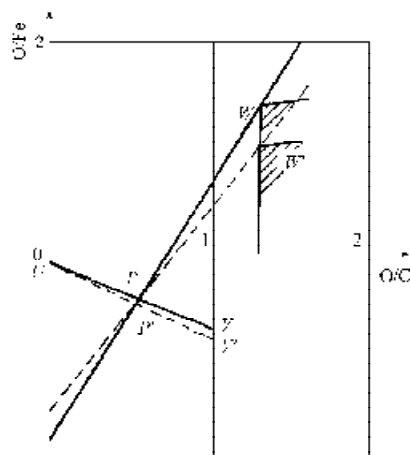


图 2 使用金属化炉料操作线

Fig. 2 Operation lines of using metallized charge

实践表明：高炉每吨铁使用 100 kg 的铁热压块（HBI）可降低焦比 27 kg/t^[5]；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^[6]。虽然生产金属化炉料也要耗能，但一般使用的是非焦煤，而且包括高炉在内的总能耗不一定增加。

1.3 改善喷煤技术

对于喷吹煤粉量已经达到 200 kg/t 以上大喷吹高炉来说，尽管采取一些措施后煤比会有所提高，但高炉必须保持一定的焦炭透气窗，维持煤气流的往上运动。一方面，随着焦炭负荷的不断提高，焦炭的料柱骨架作用会慢慢消失。每增加一份喷煤率，就会影响高炉的透气性，更加剧管道煤气的产生，而导致热损

的增加。另一方面, 在风口处增加了煤粉的燃烧量, 导致了增加风口的压差, 降低了富氧含量, 增加了未燃烧煤粉量。在高炉内小颗粒的积累恶化了透液性和透气性, 使得煤粉的置换比降低, 热流比(也就是说每单位体积煤气的热容对应物料热容量)降低, 并使管道和炉顶温度升高。由此进一步恶化了透气性, 同时增大了炉顶煤气的热损。

进一步提高煤比的主要措施: 提高富氧率和风温来提高理论燃烧温度, 提高煤粉的燃烧率; 提高焦炭的质量(热强度等); 采用精料; 降低煤粉的粒度, 提高喷吹效果。

1) 加强煤粉燃烧技术。图3显示了由不同喷煤速度和喷吹位置变化而对应的风口管道的煤气成分的组成^[7]。当喷吹量增加时, 煤粉燃烧也集中, 这表明最大程度集中了CO₂气体达到风口处(如图3 a)); 相比之下, 如果喷枪位置移动到接近高炉风口的吹管处, 那么燃烧带中心也就移动到高炉内部,(如图3 b))。这表明了从保证较完全的煤粉燃烧和阻止风口压差波动出发, 选择喷口的位置是相当重要的。

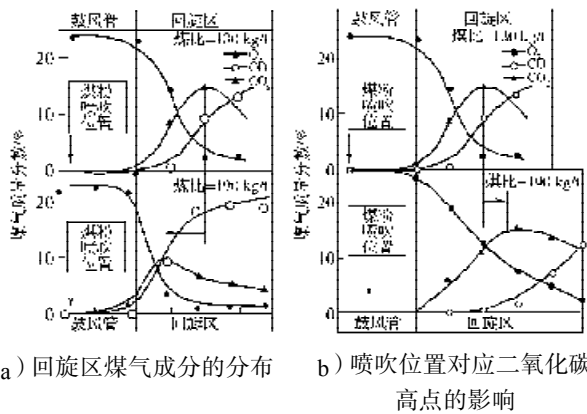


图3 喷吹位置对煤气的影响

Fig. 3 The impact of injection position on gas

当喷吹高炉喷吹煤粉量达到 200 kg/t 时, 燃烧程度就会降低, 这是因为大量煤粉的燃烧使氧气扩散成为限制性环节。为解决这一问题, 可采用双喷枪系统^[7], 如氧—煤喷枪^[8]等。新型喷枪已成为可控制燃烧程度的有力工具。Kobe 钢厂研发的双喷枪系统有 2 个煤粉喷枪只在一个风口上, 并且已证实它优于传统的单喷枪系统。管道内煤粉的分散度是可控的, 燃烧速度可以提高。

2) 负荷分布控制。在喷吹煤粉达到 250 kg/t 的实验操作中, 焦炭溶解损失率随中心死料粉末增加而升高。高炉中心和边缘的焦炭通过死料区表面层渗透进入死料区内而形成粉末, 由于进入死料区的焦炭基本失去反应性, 只能通过溶解损失。可由通过中心加焦、缩小风口直径、改变装入顺序或溜槽布料角度等措

施, 使中心气流减弱。

图4显示了Kakogawa高炉强化喷吹时, 负荷分布技术的基本观点。

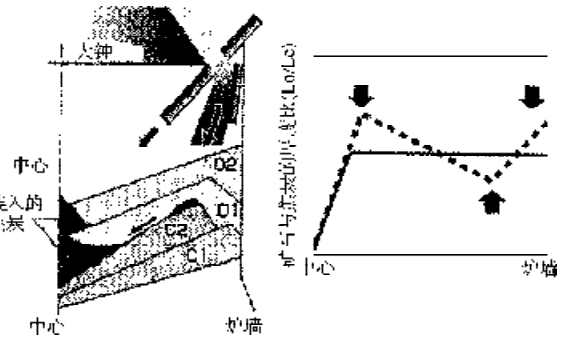


图4 钟式高炉负荷分布控制

Fig. 4 Load distribution control of Bell-type blast furnace

在钟式的装料系统中, 边缘煤气流是通过削减C2在边缘的装入量, 提高边缘区域料层厚度比率(L_0/L_c)来控制。因为下降的宽度较窄, C2的堆积会形成较高堆尖, 并且形成一个较低 L_0/L_c 区域。随着矿石O1层的落入将部分顶部焦炭刮入中心, 焦炭刮擦的数量根据C2和O1联合调整, 使 L_0/L_c 从中心到边缘区域较均匀分布。

L_0/L_c 的控制很大程度上取决于C2层的堆尖位置和O1装料位置的稳定性。在高O/C操作之下, 改变物料颗粒的大小导致下落的轨道的改变, 对分布控制的准确性和煤气流的稳定有很大的影响。适当增加焦炭粒级、增大矿批以维持较厚焦炭层, 保证焦炭透气窗是十分必要的。

1.4 高炉不加熔剂与配料计算问题

充分利用高碱度烧结矿($R \geq 1.8$)还原性好、强度高的优势, 搭配酸性炉料(球团矿和富块矿), 高炉不加熔剂的炉料结构越来越被高炉所接受。但也有部分中小企业小高炉仍然采用自熔性烧结矿(R 为1.3~1.5), 甚至还在高炉中补加熔剂, 这势必引起高炉高能耗。因为不管是加生石灰还是加石灰石对料柱透气性都有不利影响, 若直接加石灰石还将增加高温区域热量支出, 冲淡还原气氛, 不利于焦比的降低。

对于不断变化的炉料, 调节铁矿石配比与稳定炉渣碱度比较麻烦, 也有部分小高炉并不是严格按照配料计算确定各种矿石的比例, 而是根据经验来调剂, 比如以生铁中硫含量高低作为增减烧结矿配比的依据, 最后导致炉温的波动, 生铁能耗升高。

炉料结构的确定主要是根据企业铁矿石(包括烧结矿、球团矿、富块矿)的供应情况而定。近几年为追求较低成本, 优质生矿比例有上升趋势, 熟料比有所下降。铁矿石配比的确定应以不加石灰石为前提, 根据原料情况, 当熟料率为100%, 则根据高炉渣碱度

平衡求出烧结矿与球团矿的配比；需配块矿时则假设其中一种矿石配比（如块矿入炉比例），再确定烧结矿与球团矿的配比。

若高炉只采用烧结矿和球团矿，根据原料条件，假设烧结矿的配比为 x ，则球团矿的配比为 $(1-x)$ 。再按照生产经验确定炉渣碱度 $R_{渣}$ （ $R_{渣}$ 为 1.10~1.20），然后根据碱度平衡求出 x 。

$$R = \frac{xw(\text{CaO}_{\text{烧}}) + (1-x)w(\text{CaO}_{\text{球}}) - QK_{\text{焦}}w(\text{CaO}_{\text{焦}}) + xw(\text{SiO}_{2\text{烧}}) + (1-x)w(\text{SiO}_{2\text{球}}) + QK_{\text{煤}}w(\text{SiO}_{2\text{煤}})}{\frac{QK_{\text{焦}}w(\text{CaO}_{\text{焦}}) - 0.85 \times 1.75S_{\text{中}}}{QK_{\text{球}}w(\text{SiO}_{2\text{球}}) - 2.14Qw(\text{Si})}} \quad (1)$$

式中： $w(\text{CaO}_{\text{烧}})$ ， $w(\text{CaO}_{\text{球}})$ ， $w(\text{CaO}_{\text{煤}})$ ， $w(\text{CaO}_{\text{焦}})$ 分别表示烧结矿、球团矿、煤粉和焦炭中 CaO 的质量分数，%；

$w(\text{SiO}_{2\text{烧}})$ ， $w(\text{SiO}_{2\text{球}})$ ， $w(\text{SiO}_{2\text{煤}})$ ， $w(\text{SiO}_{2\text{焦}})$ 分别表示烧结矿、球团矿、煤粉和焦炭中 SiO_2 的质量分数，%；

$K_{\text{焦}}$ ， $K_{\text{煤}}$ 分别表示高炉焦比和煤比， $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ ；

$w(\text{Si})$ 表示生铁中 Si 的质量分数，%；

0.85 表示硫在炉渣中分配率^[9]；

1.75 表示 56/32，即脱硫反应（ $\text{CaO} + \text{FeS} = \text{CaS} + \text{FeO}$ ）中脱除单位质量的硫所消耗的 CaO 的质量；

Q 表示单位质量（如 1 t）混合矿的产铁量，假设焦、煤带入的铁和进入炉渣和炉尘的铁相等，即有

$$Q = \frac{xw(\text{Fe}_{\text{焦}}) + (1-x)w(\text{Fe}_{\text{煤}})}{w(\text{Fe})} \quad (2)$$

$w(\text{Fe})$ 表示生铁中 Fe 的质量分数，%。

根据以上式（1）和（2）就可求出烧结矿与球团矿的配比。

2 结论

1) 在保证较高强度的条件下，适度提高焦炭的反应性，有利于增大煤气实际浓度与平衡浓度的差值，提高降低燃料比的潜力。

2) 随着金属化球团技术发展和完善并被高炉采用，高炉焦比将达到较低水平。

3) 通过加速煤粉燃烧技术，改变布料技术以保证炉喉径向 L_0/L_c 的均衡，适当采取发展中心气流的调剂手段。

4) 当前炉料结构以高碱度烧结矿、球团矿和富块矿组合为较理想模式，取消高炉直接加熔剂的高能耗

工艺，通过矿石配比调节来稳定炉渣碱度，最终实现高产、低耗的目标。

参考文献：

- [1] 周师庸. 重新评价气煤类煤对焦炭质量的贡献[C]//1997中国钢铁年会论文集. 北京: 冶金工业出版社, 1997: 294-297. Zhou Shiyong. Re-Evaluation of Gas Coals Contributions to the Quality of Bituminous Coal[C]//1997 Proceedings of Annual Meeting of Chinese Steel Technology. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1997: 294-297.
- [2] 刘竹林, 李永清, 高泽平. 炼铁原料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007. Liu Zhulin, Li Yongqing, Gao Zeping. Ironmaking Raw Materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [3] 中山岳志. 高反应性コークス実炉操業試験[J]. 材料とプロセス, 1993, 6(1): 128. Takeshi Nakayama. Actual Operation Test of Highly Reactive Coke on Blast Furnace[J]. Materials and Processes, 1993, 6(1): 128.
- [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(3): 316.
- [5] Schmöle P, Lindenberg HU. The Chinese Society for Metals Eds. The 1st Chinese-German Seminar on Fundamentals of Iron and Steelmaking[C]// The Chinese Research Institute for Scientific and Technological Information. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2004: 1.
- [6] 孔令坛. 我国炼铁原料技术的进步和展望[J]. 炼铁, 2002, 21(5): 20-23. Kong Lingtan. Technical Advances and Prospects of Raw Materials for Ironmaking in China[J]. Ironmaking, 2002, 21(5): 20-23.
- [7] Ito R, Yoshida Y, Hoshino K, et al. Kobe Steel Engineering Reports[R]. Japan: Kobe Steel Ltd, 2000: 6.
- [8] Wikstrom J O, Skold B E, Karsrud K. 55th Ironmaking Conference Proceedings[C]//Ironmaking Conference Proceedings. Warrendale: Iron and Steel Society of AIME, 1996: 61.
- [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. Zhou Chuandian. Technical Manuals of Blast Furnace Ironmaking Production[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2002.

(责任编辑: 罗立宇)