

# 高炉操作线的限制条件与其斜率影响因素分析

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:** 高炉操作线受物料平衡  $A$ 、 $C$  点、化学平衡  $W$  点、热平衡  $P$  点的限制, 在一定的原料和高炉操作条件下, 操作线斜率基本固定。为寻找降低高炉操作线斜率的有效措施, 分析了影响各平衡点的影响因素与计算方法, 探讨高风温、金属化球团、高压操作以及低硅生铁冶炼等技术措施对操作线斜率的影响。

**关键词:** 操作线; 限制条件; 焦比

中图分类号: TF538

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2011)03-0001-03

## Analysis on Limiting Conditions of Blast Furnace Operation Line and Its Slope Factors

Liu Zhulin, Wang Jianli

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

**Abstract:** Blast furnace operation line is restricted by material equilibrium points  $A$  and  $C$ , chemical equilibrium point  $W$  and thermal equilibrium point  $P$ . The operation line slope is fixed basically at certain raw materials and operating conditions. To find effective measures for lowering the slope, analyzes the influencing factors and calculation methods and discusses the effects of high temperature, metallic pellets, high pressure operation, low Silicon pig iron smelting operation and other technical measures on operation line slope.

**Keywords:** operation line; limiting condition; coke rate

高炉操作线采用简单的直角坐标图, 把原料组成、生铁成分、炉顶煤气成分、直接还原度、热平衡状态和焦比之间的关系联系起来, 从而便于分析高炉生产操作状况, 指明降低焦比的潜力和途径, 简便且直观地表达出高炉冶炼中各种重要参数的影响规律, 故而目前应用较为广泛。

### 1 高炉操作线的限制条件

高炉内铁氧化物间接还原的发展状况, 特别是浮氏体间接还原的发展程度, 对碳耗起着决定性的影响。根据操作线作图原理, 高炉操作线受物料平

衡  $A$ 、 $C$  点、化学平衡  $W$  点、热平衡  $P$  点的限制。 $A$  点反映入炉矿石铁的氧化程度 ( $y_A$  位于 1~1.5) 和进入炉顶煤气中碳的氧化程度 ( $x_A$  位于 1~2)。高氧化度、还原性好的矿石可使  $A$  点右移, 操作线斜率降低;  $C$  点为铁氧化物直接还原传递的氧与其它来源的氧分界点 ( $x_C$  位于 0~1);  $W$  点为化学平衡限制点;  $P$  点为热平衡限制点; 直线的斜率表示高炉的焦比, 且斜率的减小有利于降低焦比。

#### 1.1 化学平衡与炉身工作效率

$W$  点的位置取决于平衡温度, 此温度一般选取浮氏体开始直接还原时的温度, 通常为 900~1 000 °C,

收稿日期: 2011-03-17

作者简介: 刘竹林 (1965-), 男, 湖南茶陵人, 湖南工业大学教授, 主要从事烧结球团与高炉炼铁方面的研究,

E-mail: liuzhuling60@yahoo.com.cn

$W$  点的横坐标在 1.284 ~ 1.315 (见图 1),  $W$  点限制了  $AE$  操作线斜率的降低。有研究表明, 高炉富氧喷吹煤气会使  $W$  点右移<sup>[1]</sup>, 为高炉操作线斜率下降提供了空间与可能; 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  $W$  点右移, 使高炉碳比理想化、最低化<sup>[2]</sup>。

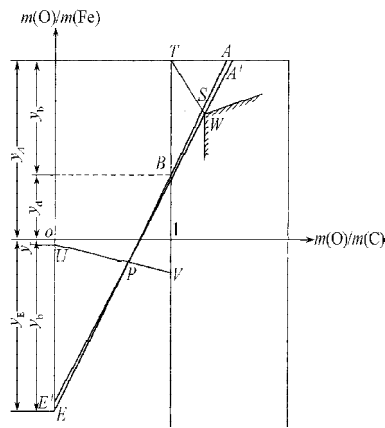


图 1  $W$  点限制的操作线

Fig. 1 Operation line limited by point  $W$

$S$  点为炉身效率工作点。炉身效率  $\eta = TS/TW$ ,  $\eta$  可用于评价炉内化学能利用程度。 $S$  点可联立  $AE$  线和  $TW$  线方程求解, 通过  $S$  点的坐标可算出炉身效率。

1)  $TW$  线的斜率  $\mu_{TW}$

$$TW \text{ 线斜率的表达式为: } \mu_{TW} = \frac{y_T - y_W}{x_T - x_W}$$

2)  $TW$  线方程  $y_{TW}$

$$TW \text{ 线的截距方程为: } y_{x=0} = \mu_{TW} x D_W + y_W;$$

$$TW \text{ 线方程的表达式为: } y_{TW} = \mu_{TW} x + y_{x=0}$$

3) 炉身效率  $\eta$

先算出  $S$  点的坐标, 再求  $\eta$ , 即

$$x_S = \frac{y_{x=0} - y_E}{\mu - \mu_{TW}}, \eta = \frac{x_S - 1}{x_W - 1}$$

当  $S$  点和  $W$  点重合时, 即理想操作线  $AE$ , 炉身煤气中  $CO_2$  的体积分数达 100%, 煤气利用率最佳。一般情况下, 高炉的  $AE$  线越接近  $T$  点, 焦比越高; 越接近  $W$  点, 焦比越低。

### 1.2 热平衡

煤气中  $CO$  体积分数远高于  $FeO$  还原的平衡气相成分, 表明单位生铁热量消耗过大。降低热耗, 也就降低了碳比。从热平衡与理想操作线的关系, 即可求出节碳的潜力。

$y_b \cdot q_b$  为风口燃烧碳产生的有效热量,  $Q$  表示非铁元素的还原耗热、渣铁热、碳酸盐分解热、冷却水带走的热量和散热损失等,  $y_d \cdot q_d$  为直接还原  $FeO$  所消耗的热量, 则根据热平衡关系:  $y_b \cdot q_b = y_d \cdot q_d + Q$ , 将等式两边同时除以  $q_d$ , 得:

$$\frac{y_b \cdot q_b}{q_d} = y_d + \frac{Q}{q_d}$$

对上式进行变化可得:

$$\frac{y_b}{y_d + Q/q_d} = \frac{q_d}{q_b} = \frac{UE}{BV}$$

依据  $\Delta UEP$  和  $\Delta VBP$  相似这一关系 (见图 2), 可得

$$\frac{UE}{BV} = \frac{x_p}{1 - x_p} = \frac{q_d}{q_b}$$

因而可得  $P$  点的坐标为:

$$x_p = \frac{q_d}{q_b + q_d}$$

$$y_p = y_u + x_p (y_v - y_u)$$

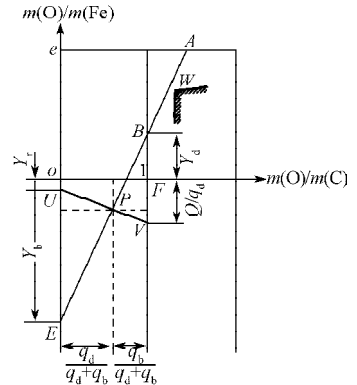


图 2 热平衡限制操作线图

Fig. 2 The chart of operation line limited by thermal equilibrium

## 2 降低操作线斜率的措施

### 2.1 采用高温

在高温区域, 所需的有效热量一定, 即保持  $UV$  线不变的情况下, 提高风温使  $P$  点沿  $UV$  线向左移动。依据  $x_p = \frac{q_d}{q_b + q_d}$  可知, 当直接还原度一定时,  $P$  点横坐标取决于高温区的热收入。若风温提高,  $q_b$  随之增大,  $x_p$  将减小,  $P$  点左移, 操作线斜率减小, 焦比降低 (见图 3)<sup>[3]</sup>。

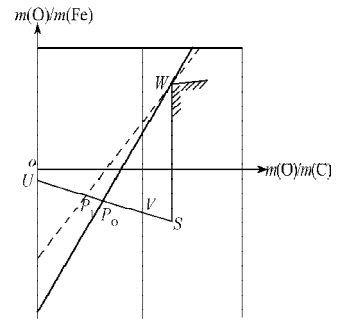


图 3 高温对操作线斜率的影响

Fig. 3 Effect of high temperature on operation line slope

### 2.2 使用金属化炉料

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  $W'$ ; 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 (见图 4)。

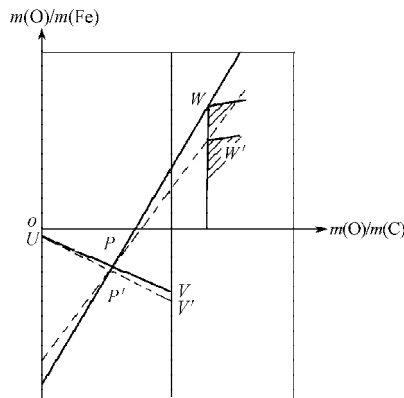


图 4 金属化炉料对操作线斜率的影响

Fig. 4 Effect of metal charging on operation line slope

生产实践表明: 高炉每吨铁使用 100 kg 的铁

热压块 (hot briquetted iron, HBI) 可以降低焦比  $27 \text{ kg/t}^{[4]}$ ; 使用  $100\%$  金属化率为  $65\%$  的球团矿, 燃料比可降到  $3\ 641 \text{ kg/t}$  的水平<sup>[5]</sup>。

### 2.3 高压操作

高炉高压操作有利于抑制碳的熔损反应 ( $\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$ ), 促进间接还原, 降低  $y_d$ ; 另外, 用于减少热量消耗,  $Q/q_d$  下降, 操作线斜率降低, 焦比下降。

### 2.4 低硅生铁的冶炼

生铁中硅含量的变化会使  $U$ ,  $V$  和  $P$  点的位置发生移动,  $W$  点不变, 因而会改变操作线的斜率, 其变化值为:

$$\Delta\mu = -\frac{x_p(\Delta y_v - y_u) + \Delta y_u}{x_w - x_p}。$$

因此, 抑制非铁元素 (尤其是热量消耗巨大的  $\text{Si}$ ) 的还原, 可以使  $U$ ,  $V$  和  $P$  点的位置上移, 操作线斜率下降, 焦比降低。

## 3 结论

每座高炉的操作线不尽相同, 但均受制于物料平衡  $A, C$  点、化学平衡  $W$  点和热平衡  $P$  点, 使得操作线在一定范围内变化。操作线的斜率反映了高炉的燃料消耗, 因此, 降低操作线的斜率的措施均有利于降低能耗。合理采用高氧化度与还原性的矿石、高风温、高压操作及低硅生铁冶炼技术, 适度配加使用金属化炉料, 减少熔剂直接入炉, 脱湿鼓风, 利用上下部调剂手段改善煤气利用率<sup>[6]</sup>, 适度提高焦炭的燃烧性等, 都是降低操作线斜率的有效措施。

### 参考文献:

[1] 王婷婷, 吕庆, 郭豪. 富氧喷吹煤气新工艺条件下的

高炉操作线[J]. 河北理工大学学报, 2007, 29(4): 26-31.  
Wang Tingting, Lv Qing, Guo Hao. Rist Operation Line of BF Operating by Enriched Oxygen and Gas-Injection from Tuyeres[J]. Journal of Hebei Institute of Technology, 2007, 29(4): 26-31.

[2] 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.

[3] 周传典. 高炉炼铁生产技术手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002: 834-836.

Zhou Chuandian. Technical Manuals of Blast Furnace Ironmaking Production[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2002: 834-836.

[4] Schmöle P, Lindenberg H U. 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.

[5] 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.

[6] 高泽平, 李永清, 刘竹林, 等. 湘钢炼铁  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  Emission Reduction from Ironmaking in Xiangtan Iron and Steel Co[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2010, 24(5): 5-9.

(责任编辑: 廖友媛)