

高炉富氧鼓风对高炉热状态的影响及对策

郁肖兵¹, 宋文刚², 倪文杰¹, 邹宗树¹
(1. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 宝山钢铁股份有限公司 炼铁厂, 上海 201900)

摘 要: 为进一步探究高炉富氧操作下的冶炼规律, 用已建立的高炉富氧综合模型对不同操作条件下的高炉热状态进行计算和分析. 结果表明: 炉缸喷吹循环煤气能有效抵消富氧操作引起的燃料比增长, 且在低富氧操作时高炉不需喷吹循环煤气就能满足上下部热量平衡; 增加喷煤量需要与提高富氧率相对应, 不同的喷煤量具有不同的富氧操作区间. 模型求得富氧操作条件下鼓风加湿极限值, 即鼓风加湿不应超过 21.2 g/m^3 , 相应的富氧率极大值约为 4.6% .

关 键 词: 高炉; 富氧极限; 燃料比; 喷煤; 鼓风加湿
中图分类号: TF 538.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2018)10-1413-05

Influence of Oxygen-Enriched Operation on Thermal State of Blast Furnace and Corresponding Countermeasures

YU Xiao-bing¹, SONG Wen-gang², NI Wen-jie¹, ZOU Zong-shu¹
(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Ironmaking Plant, Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China. Corresponding author: ZOU Zong-shu, E-mail: zouzs@mail.neu.edu.cn)

Abstract: In order to further explore the smelting law under the oxygen-enriched blast furnace operation, a previous blast furnace oxygen-enriched comprehensive model was revised to study the thermal state of the blast furnace under different operating conditions. The results showed that furnace cylinder injection of circulating gas can effectively offset the increase of fuel ratio caused by oxygen enrichment operation, and in the low-oxygen enrichment operation, the blast furnace can meet the upper and lower heat balance without spraying the circulating gas. Increasing the amount of coal injection needs to correspond to increasing the oxygen enrichment rate, and different coal injections have different oxygen-enrichment operating intervals. From the model, the limit value of humidification under oxygen-enriched operation can be obtained, where the blast humidity should not exceed 21.2 g/m^3 , and the corresponding oxygen enrichment rate maximum is about 4.6% .

Key words: blast furnace; oxygen-enrichment extreme; fuel ratio; coal injection; blast humidity

高炉在生产大量铁水满足炼钢需要的同时也消耗大量资源. 节焦增效一直是冶金工作者的追求^[1-7], 而高炉富氧是实现该目标的一条有效途径. 高炉在富氧之后吨铁所需鼓风量减少, 在保证鼓风量不变的前提下高炉冶炼强度会增强. 富氧的引入还会使得风口前端燃烧带理论燃烧温度升高, 有利于煤粉的分解、煤粉焦炭置换比的提高和喷煤的增加. 此外, 富氧操作时由于热风引入的 N_2 减少, 煤气中 CO 和 CO_2 浓度得以提高, 炉顶煤气热值相应增大, 对煤气二次利用和环保处理有利.

与传统高炉相比, 富氧操作由于吨铁所需鼓风量下降, 高炉内部热状态具有新的特点, 如“上冷下热”等. 确保热量收支平衡是冶炼正常进行的必要条件, 因此有必要研究富氧操作下的高炉内部热量收支变化规律并最大限度地发挥富氧节

焦增效的作用. 本文应用高炉富氧综合模型进一步探究高炉富氧操作下的冶炼规律,包括富氧操作对燃料比、喷煤量和鼓风湿度的要求三个部分.

1 高炉富氧模型

1.1 模型简述

高炉富氧模型以高炉物料收支平衡和热量收支平衡计算为基础,目标是解决富氧操作引起炉

顶煤气温度下降的问题. 为研究高炉上下部分热量收支情况,把高炉分为上部低温区和下部高温区,两者划分的界限是 1 000 ℃ 的炉料温度,该温度下炉料一般开始软熔、软熔带开始形成,分界线处的煤气温度可通过模型计算求得. 在满足约束条件(包括全炉热平衡、高温区热平衡、低温区热平衡、物料平衡)的前提下,分别求解高温区和低温区的

热量分布状态. 基本算例求解流程图如图 1 所示.

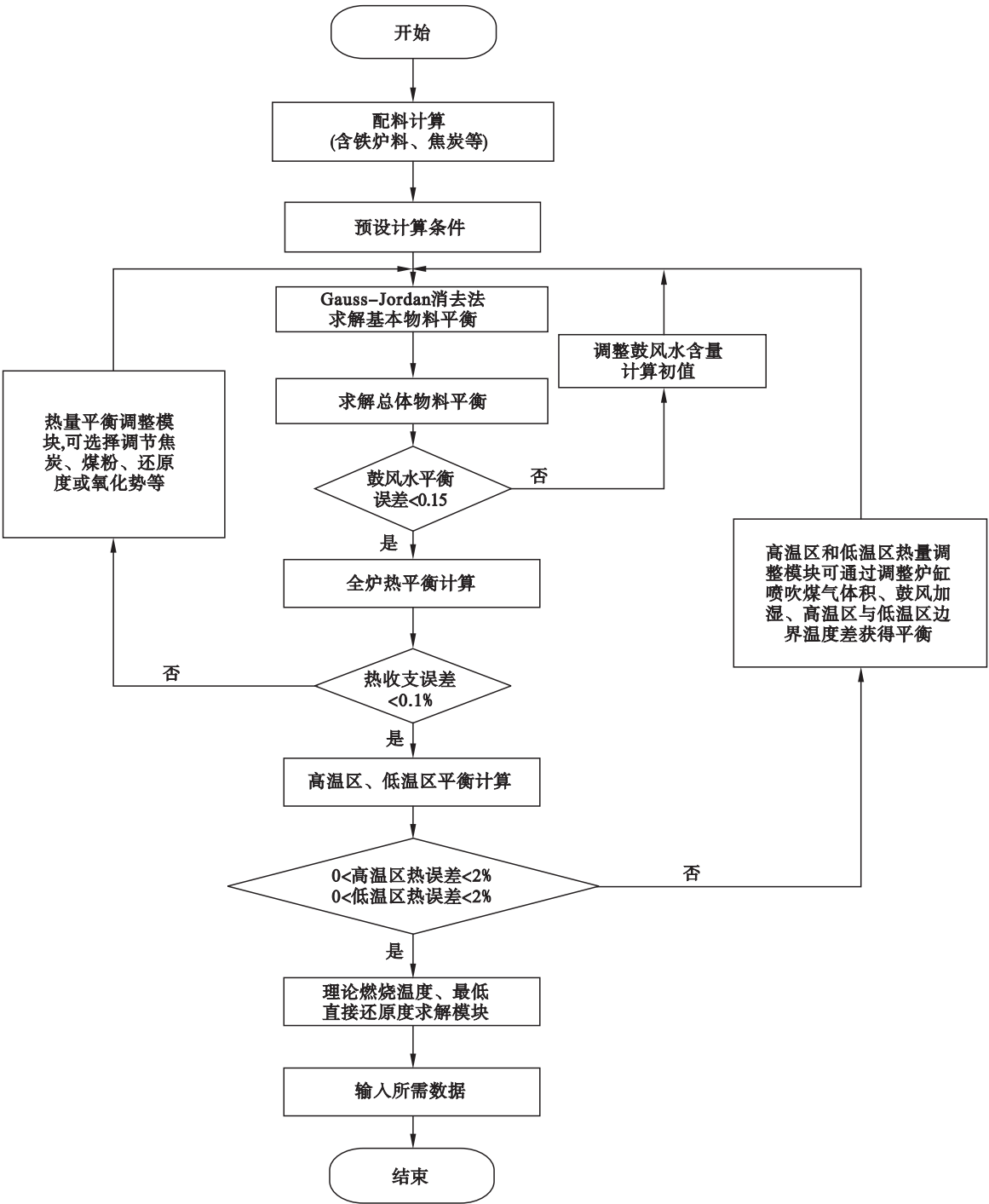


图 1 基本算例求解流程图
Fig. 1 Flow chart for solving basic case

1.2 直接还原度的确定

考虑到理论最低直接还原度和生产实际中所能达到的直接还原度两者之间的关系(高炉实际生产对应的直接还原度可以通过炉顶煤气利用率和原燃料数据进行反推得到),在探究不同富氧率及操作条件对冶炼指标的影响时使用下式对直接还原度进行放大:

$$R_d = \varphi \cdot R_{dmin}.$$

(1)

式中: R_{dmin} 是不同操作条件下对应的理论最低直接还原度; φ 为比例系数,燃料比随该系数的增大而增加.

当碳量既能满足总体热量需求和直接还原消耗,又能为间接还原提供足量的 CO ,两者折合的碳量刚好相等时,该碳量为高炉冶炼所需的最低碳量,对应的直接还原度为理论最低直接还原度 R_{dmin} . 需明确的是不同操作条件(富氧率、煤比、加湿量)对应不同 R_{dmin} ,该值可以通过理论计算求得. 理论最低碳量求解式为

$$\sum_i m_i + \sum_k m_k = \sum_j m_j.$$

(2)

式中: m_i, m_k, m_j 分别为满足热平衡、直接还原与间接还原所需碳的质量.

2 计算结果及讨论

2.1 对燃料比的影响

在限定炉顶煤气温度(200 ℃)且吨铁焦炭消耗量与吨铁喷煤量的质量比为 7:3 的前提下,模型求得冶炼所需燃料比及煤气利用率随富氧率的变化关系如图 2 所示.

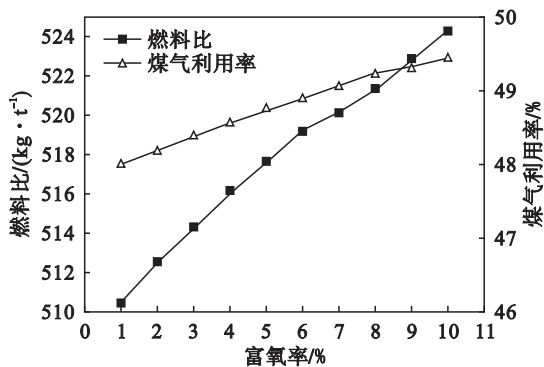


图 2 富氧无喷吹循环煤气的部分冶炼指标
Fig. 2 Variations of some smelting indexes with oxygen-enrichment in the case of no top gas recycling

由图 2 可知,在既定条件下燃料比随富氧率的增加而增加,从 1% 富氧率对应的 510.5 kg 增加到 10% 富氧率对应的 524.3 kg. 由计算可知,富氧率增加有利于降低理论最低直接还原度,但

由于富氧操作时煤气生成量减少,高炉上部热量收入“不足”,炉顶煤气温度会逐渐下降. 为了确保炉顶煤气有足够的温度,高炉需燃烧更多的燃料,燃料比因此增加. 从图 2 中还可以看出,富氧对提高煤气利用率有利,这主要是由直接还原度下降引起的.

当炉缸进行喷吹循环煤气操作时,其中循环煤气成分为 CO ,其来源可通过对炉顶煤气改质、分离实现,喷吹温度为 900 ℃,鼓风湿度 0.8%,炉顶煤气温度和焦/煤比保持不变,计算得到循环煤气喷吹量和燃料比随富氧率的变化关系如图 3 所示. 可知,在低富氧率条件下,高炉不需要喷吹循环煤气就能满足上下部热量平衡,但此时燃料比随富氧率的增大而增加. 当富氧率继续增加时,为满足全炉和分区热量平衡就要增加循环煤气喷吹量. 循环煤气在高炉中的主要作用是携带炉缸热量进入炉身上部以满足维持炉顶煤气温度所需热量,进而减少高炉对热量焦炭的需求. 当富氧率从 4% 增加到 10%,循环煤气喷吹量从约 0.6 m³/t 增加到约 146.2 m³/t,相应燃料比从 516.1 kg/t 降到 507.8 kg/t,这表明喷吹循环煤气操作对降低燃料比有利.

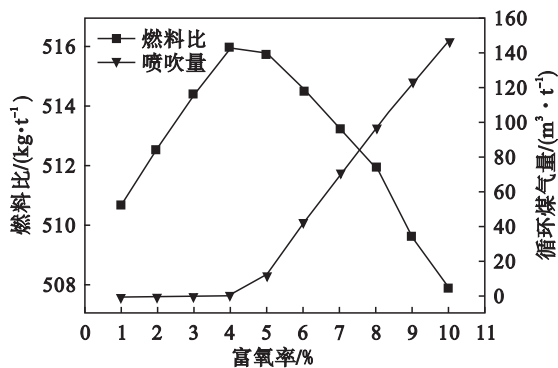


图 3 富氧喷吹循环煤气的部分冶炼指标
Fig. 3 Variations of some smelting indexes with oxygen-enrichment in the case of top gas recycling

图 4 是不同富氧率操作条件下有无炉顶煤气循环对应的部分冶炼参数. 无喷吹操作时,理论燃烧温度随富氧率增加而增加:从 2 320 K(富氧率 4%)增加到 2 450 K(富氧率 10%),这主要是由富氧条件下吨铁所需鼓风量下降及燃烧带气体生成量下降所致;对于喷吹循环煤气的操作,其理论燃烧温度随富氧率的增加不升反降,出现这种现象的原因是循环煤气喷吹量与富氧引起的炉缸煤气减少量相抵造成的. 为保证高炉冶炼的正常进行,理论燃烧温度应处于合理的范围之内,过高或过低均会对冶炼产生不利影响,理论燃烧温度一

一般为 2 273 ~ 2 373 K.

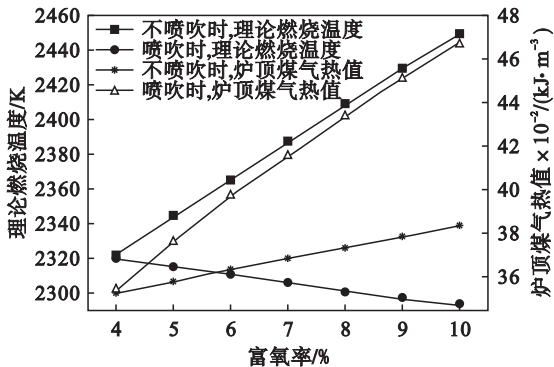


图 4 富氧有无喷吹循环煤气的部分冶炼指标
Fig. 4 Variations of some smelting indexes with oxygen-enrichment for the cases with and without top gas recycling

富氧和喷吹循环煤气对提高炉顶煤气热值均有利. 其中,前者是由于富氧提高了炉顶煤气 CO 浓度,后者主要是受引入还原性气体的影响.

2.2 增加喷煤的影响

为了考察富氧操作条件下喷煤量对冶炼指标的影响,选取吨铁喷煤量为 150 ~ 250 kg,富氧 10%,加湿 0.8% 作为基本计算条件,得到部分冶炼指标随喷煤量的变化关系,见图 5、图 6.

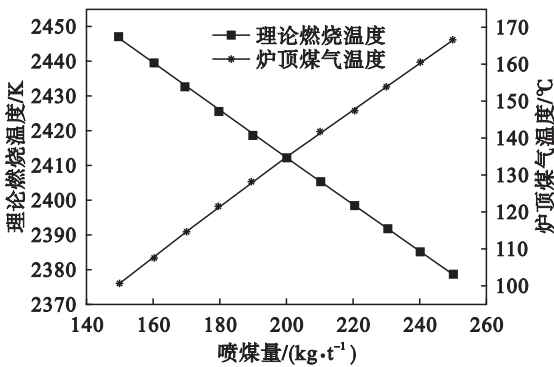


图 5 理论燃烧温度和炉顶煤气温度随喷煤量的变化
Fig. 5 Variations of theoretical combustion temperature and top gas temperature with coal injection

由图 5 可知,在无炉顶煤气循环时,炉顶煤气温度随着喷煤量的增加而增加:从喷吹 150 kg 煤粉对应的 100.8 ℃ 增加到 250 kg 煤粉对应的 166.5 ℃. 而理论燃烧温度随喷煤量增加的变化趋势与之相反:从 2 446 K 降到 2 378 K. 产生这种现象的原因是煤粉含氢量比较高,炉缸煤气生成量相对增加,加之煤粉分解需要吸收热量,两者综合作用的结果使理论燃烧温度和炉顶煤气温度变化呈相反变化趋势.

基于基本计算条件,得到炉顶煤气热值和炉腹煤气量随喷煤量的变化关系如图 6 所示. 可知,

炉顶煤气热值和炉腹煤气量随喷煤量的增加而增大,且均呈现较为明显的线性关系. 这主要受喷煤操作时燃料比增加及煤粉成分^[8]的影响. 根据项钟庸等^[9]的研究结果可知,炉腹煤气量的增加不利于冶炼强度提高,即增加喷煤量可能会使高炉日产铁量下降.

无喷吹操作时,为探究富氧率与喷煤操作的关系,在基本约束的基础上引入理论燃烧温度和炉顶煤气温度两个约束. 认为合理的理论燃烧温度区间为 2 273 ~ 2 373 K,炉顶煤气温度不低于 180 ℃. 基于这些约束,求得不同喷煤量对应的富氧率浮动范围如图 7 所示.

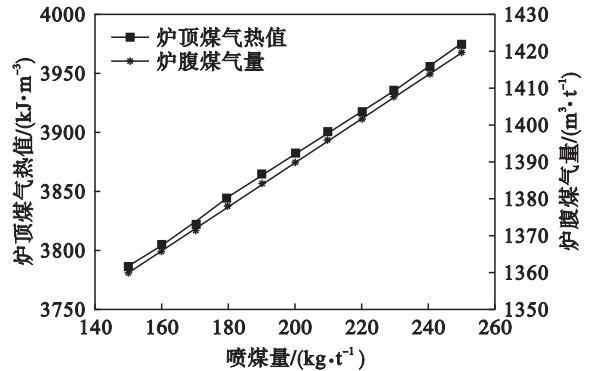


图 6 不同喷煤量操作对应的炉顶煤气热值和炉腹煤气量
Fig. 6 Variations of top gas calorific value and bosh gas volume with coal injection

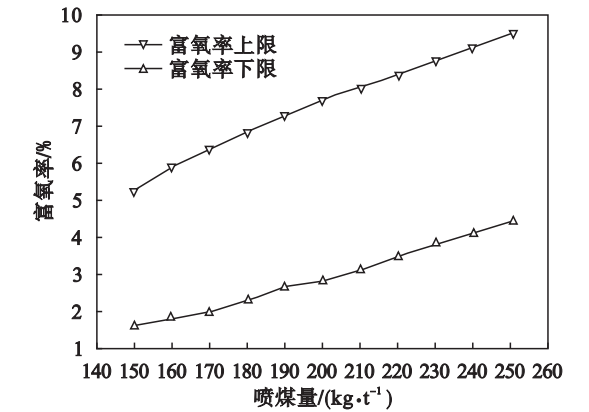


图 7 不同喷煤量对应的富氧操作区间
Fig. 7 Variation of feasible oxygen enrichment range with coal injection

由图 7 可知,富氧率极值随喷煤量的增加而增大. 其中极大值从喷煤 150 kg/t 对应的 5.29% 增加到喷煤 250 kg/t 对应的 9.53%;极小值从 1.65% 增加到 4.50%.

2.3 鼓风加湿的影响

为了探究鼓风湿度与富氧操作的关系,在喷煤量 150 kg/t、无炉顶循环煤气条件下分别计算了不同富氧率和不同鼓风加湿量对应的冶炼参

数. 图 8 是鼓风湿度分别为 1% 和 2% (均为体积分数) 所对应的理论燃烧温度和炉顶煤气温度随富氧率的变化关系.

由图 8 可知,理论燃烧温度和炉顶煤气温度随富氧率的增加呈现相反的变化规律,即富氧操作在满足高炉下部理论燃烧温度需要和上部炉顶煤气温度需要之间存在矛盾. 增加鼓风湿度可有效降低理论燃烧温度,即能适度缓解富氧引起的理论燃烧温度过度升高. 此外,鼓风湿度 2% 对应的炉顶煤气温度要低于鼓风湿度 1% 的操作,这与企业实测结果^[10]相符合.

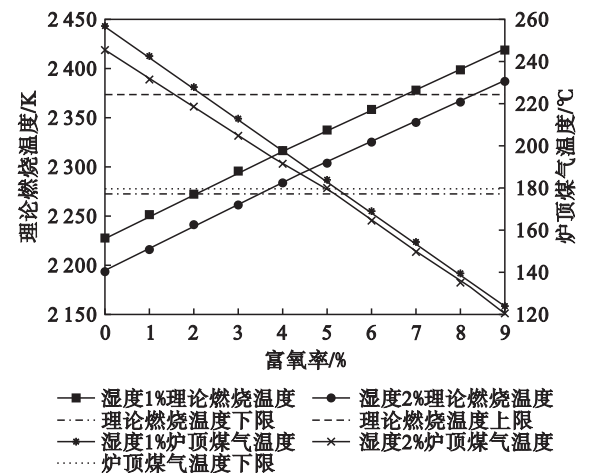


图 8 不同富氧加湿操作对应的理论燃烧温度和炉顶煤气温度
Fig. 8 Variations of theoretical combustion temperature and top gas temperature of oxygen-enriched operation with blast humidity

图 8 中 3 条水平虚线对应的是理论燃烧温度约束和炉顶煤气温度约束. 为了同时满足这 2 个约束,在鼓风湿度 1% (折合 8.04 g/m³) 操作条件下富氧率应介于 2% ~ 5.2%;而对于 2% 鼓风湿度 (折合 16.07 g/m³) 的操作富氧率应介于 3.5% ~ 4.9%.

图 9 是不同加湿条件下的极限富氧率,可知,当鼓风湿度从 0 增加到约 24.11 g/m³ 时,所需满足的富氧率下限从 0.5% 增加到约 5.3%,富氧率上限从 5.4% 减小到 4.5%. 随鼓风湿度的增加富氧率可选操作区间越来越窄,最后相交于一点,这表明富氧操作下鼓风加湿具有极限. 基于本模型的约束条件可求得高炉极限加湿量约为 21.2 g/m³,相应的富氧率为 4.60%.

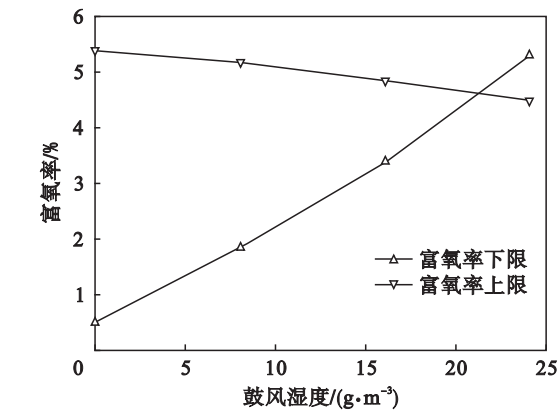


图 9 不同鼓风湿度对应的富氧操作区间
Fig. 9 Variation of feasible oxygen-enrichment range with blast humidity

3 结 论

- 1) 当限定炉顶煤气温度时,燃料比随富氧率的增加而增大;炉缸喷吹循环煤气能有效降低富氧操作的燃料比同时确保炉顶煤气温度处于合理区间,是解决富氧引起高炉“上冷下热”问题的有效途径.
- 2) 增加喷煤量需要与提高富氧率相适应,不同的喷煤量对应不同的富氧操作区间,当喷煤量为 150 kg/t 时,其相应的富氧区间为 1.65% ~ 5.29%;当喷煤量为 250 kg/t 时,其相应的富氧区间为 4.50% ~ 9.53%. 另外,增加喷煤对提高炉顶煤气温度有利.
- 3) 鼓风加湿会降低理论燃烧温度和炉顶煤气温度;富氧操作下的鼓风加湿存在极限值,基于本模型的约束条件可求得鼓风加湿不应超过 21.2 g/m³,相应的极限富氧率为 4.60%.

参考文献:

[1] Ohno Y, Matsuura M, Mitsufuji H, et al. Process characteristics of a commercial-scale oxygen blast furnace process with shaft gas injection[J]. *ISIJ International*, 1992, 32(7): 838-847.

[2] Yamaoka H, Kamei Y. Theoretical study on an oxygen blast furnace using mathematical simulation model [J]. *ISIJ International*, 1992, 32(6): 701-708.

[3] Helle H, Helle M, Saxén H. Nonlinear optimization of steel production using traditional and novel blast furnace operation strategies[J]. *Chemical Engineering Science*, 2011, 66(24): 6470-6481.