

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20180060

用评价高炉生产效率的新方法研讨大型高炉生产状况

项钟庸¹, 姜 曦^{2,3}

(1. 中冶赛迪工程技术股份有限公司, 重庆 401122; 2. 中国金属学会, 北京 100711;
3. 钢铁研究总院先进钢铁流程及材料国家重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 当前中国大型高炉的炉况波动较多, 影响高炉技术经济指标提升, 造成上述问题的原因主要是原燃料质量变化、炉料结构的调整以及适应原燃料质量下降条件下的低燃料比操作。且高炉操作制度频繁调整后高炉稳定性没有得到有效改善, 除了仍应采取精料方针及排除环境干扰以外, 高炉生产效率的有效评价对优化高炉各项指标及提高稳定性具有重要的意义。使用评价高炉生产效率的新方法统计分析了 2016 年 4 000 m³ 高炉的生产数据, 研究结果可为生产管理、技术人员、操作人员寻求合理的高炉操作制度提供依据。

关键词: 大型高炉; 生产效率; 炉腹煤气量指数; 燃料比

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2018)08-0038-06

Analysis of production indexes of large BF by new evaluation method for production efficiency

XIANG Zhong-yong¹, JIANG Xi^{2,3}

(1. CISDI Engineering Co., Ltd., Chongqing 401122, China; 2. The Chinese Society for Metals, Beijing 100711, China; 3. State Key Laboratory of Advance Steel Processes and Products, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: The large blast furnace conditions in China were changed largely in those days because of the variation of burden quality, burden structure and the lower fuel ratio adaption, affecting the operation indexes and economic profits. While the stability of blast furnace was worsening by frequently change the operation system. Except insist the high burden quality policy and eliminate the environmental interference, the effective evaluation of blast furnace production efficiency could benefits to optimize the operation indexes and improve stability of the blast furnace. In the present study, a new effective evaluation method was used to analysis the operation indexes of large blast furnace in China during 2016, the results could guide the operators and relative technician to find the reasonable operation systems for large blast furnace.

Key words: large blast furnace; production efficiency; bosh gas index; fuel ratio adaption

当前钢铁工业的环境有很大变化, 随着资源、能源和经济形势的变化以及 CO₂ 排放等^[1], 对钢铁生产各个部分提出了更加严格的要求。展望高炉炼铁技术的发展, 不能避开研讨与环境相适应的课题^[2]。适应原燃料质量的下降, 以降低燃料比为中心^[3], 提高高炉的操控能力, 调整生产弹性和确保稳产、高产是对高炉炼铁生产管理、技术的严峻挑战^[4-5]。

作者曾经对 2016 年大型高炉生产状况进行了分析^[6-8], 文中推荐了评价高炉生产效率的新方法。使用这种方法有助于在低燃料比、高利用系数条件下合理选择高炉操作参数, 以及寻找高炉炉况波动

的原因。本文仅使用统计分析的方法进行了一些探讨^[9-12], 未来还将从高炉炼铁的基本理论解释本文的某些分析。

1 合适的炉腹煤气量指数降低燃料比

对炉腹煤气量指数与燃料比进行了长期的研究, 统计了 1 350~3 200 m³ 高炉炉腹煤气量指数与燃料比, 发现两者具有“U”字形的关系^[11]。为了验证规律的可靠性和对大型高炉的适用性, 本文对 2016 年 4 000~5 800 m³ 高炉的月平均炉腹煤气量指数与燃料比进行了统计分析, 结果如图 1 所示。由图可知, B-1~B-5 高炉的数据比较集中, 这说明

作者简介: 项钟庸(1934—), 男, 大学本科, 教授级高级工程师;

E-mail: ZhongyongXiang@cisdi.com; **收稿日期:** 2018-02-09

通讯作者: 姜 曦(1977—), 女, 博士, 高级工程师;

E-mail: jx@csm.org.cn

高炉操作制度合理,炉况稳定,燃料比稳定在低的水平;而另一部分高炉的数据相当分散,月平均指标变化大,操作不稳定。有的高炉月间燃料比变化达到 50 kg/t,即使个别月份燃料比很低,可是年度燃料比也不可能低。因此,为了获得良好的经济指标,必须加强日常的工作,改进操作制度。

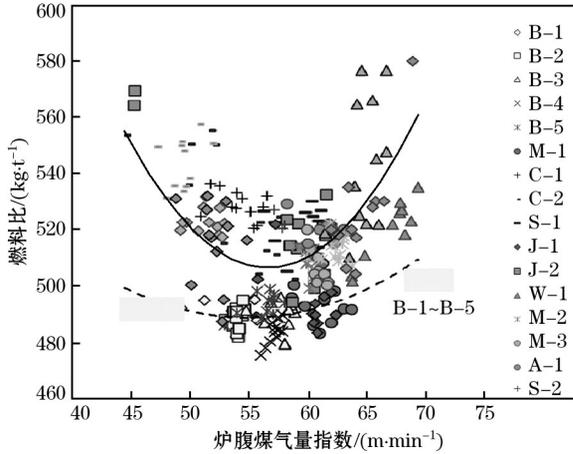


图 1 4 000~5 800 m³高炉月平均炉腹煤气量指数 χ_{BG} 与燃料比 FR 的关系

Fig.1 Relationship between bosh gas index per month and fuel ratio for 4 000 ~ 5 800 m³ FR

由图可以得到 4 000~5 800 m³高炉的炉腹煤气量指数 χ_{BG} 与燃料比 FR 的“U”字形实线的回归式为

$$FR=0.334 3\chi_{BG}^2-37.83\chi_{BG}+1 576.4 \quad (1)$$

曾经在 2013 年对 4 座 2 000 m³级高炉的炉腹煤气量指数与燃料比进行过分析^[5],得到如下的回归式。

$$FR=0.114 3\chi_{BG}^2-12.046\chi_{BG}+817.65 \quad (2)$$

两个级别高炉的回归式(1)和式(2)非常接近,由于所有 4 000 m³以上高炉的综合曲线包含了炉况波动较大的高炉,使得 4 000 m³以上高炉的燃料比偏高。相差最小的地方约 4 kg/t,在“U”字形曲线有效区间内的最高位置相差大些,约 30 kg/t。最低燃料比在炉腹煤气量指数 56 m/min 附近,2 000 m³级高炉的炉腹煤气量指数还低一些,在 54 m/min。这说明燃料比与炉腹煤气量指数有很强的规律性。4 000 m³以上高炉的“U”字形曲线两翼上跷得厉害。这说明 4 000 m³以上高炉对炉腹煤气量指数的变化比容积小的高炉敏感,并且近年来有一批高炉的作业稳定性较差,其实际炉腹煤气量指数确实变化很大。

由图 1 可知,不同时期不同容积的高炉虽然操作条件相差甚远,却可以得到参数几乎相同的“U”字形关系,这说明回归统计不可能完全精准,但这

个关系具有相当的价值。这就可以为研究制订合理的操作参数创造条件。因此,在调整高炉指标的同时兼顾工艺过程的节能、减排,“减量化”生产是可能的。

其次,由图 1 中可以看出,B-1~B-5 高炉的燃料比较低,而且数据点比较集中。这就说明这 5 座高炉操作稳定。即使如此,仍然可以用 5 座高炉炉腹煤气量指数和燃料比的数据进行统计分析,得到几乎与所有 4 000 m³以上高炉曲线平行的“U”字形关系,如图 1 中虚线所示。只不过随着炉腹煤气量指数上升,燃料比的上升要平缓得多。5 座高炉燃料比的回归方程为

$$FR=0.098 6\chi_{BG}^2-10.82\chi_{BG}+785.4 \quad (3)$$

众所周知,高炉稳定顺行才可以获得优秀的经济技术指标。相对而言,2016 年有一批大型高炉的炉况不稳定,指标较差,原本可以使回归曲线的最低点低至 490 kg/t 以下,但由于这些数据点的影响,燃料比的最低值上升到约 510 kg/t。如果单独把那些燃料比低的高炉做一个统计,也可以得到一条向更高方向平移的“U”字形曲线,而燃料比的最低点移动到炉腹煤气量指数 54 m/min。

究其原因是多方面的,操作思想、原燃料的因素、前后工序的保障等,总体上是没有适应环境的变化所致。如果所有大型高炉都能达到上述方程式(3)曲线的燃料比水平,那么中国的高炉炼铁水平将提升一个台阶。要达到这个水平,首先需要从领导到具体操作者对高炉认识的提升,转变过去长久以来“大风”、“有风就有铁”等错误观念,转变到实事求是、分析客观条件、利用好自然规律来搞好高炉生产,改变以高强度、片面高产而牺牲燃料比的生产方式。

高炉精料仍然是保证高炉高产、低燃料比的基础。由于大型高炉对原燃料质量波动的敏感性,大型高炉往往因原燃料质量的波动导致高炉长期失常而难以纠正。因此,在原燃料质量中,保证原燃料的供应、质量的稳定等几个方面,都应该给予重视。大型高炉不能随意变料。

由图 1 可知,当前选择合理的高炉冶炼参数、高炉稳定顺行,仍然是提高大型高炉整体水平的重要保障。

2 炉腹煤气量指数与操作的稳定性

由于高炉生产条件和环境是时刻变化的,高炉操作制度也必须进行相应的调整,炉腹煤气量对高

炉操作的影响是巨大的。寻求合理的送风制度和装料制度都离不开寻找适宜的炉腹煤气量。

因为炉腹煤气量指数是由高炉燃烧带排出煤气的空塔流速,它是送风制度和风口燃烧带的重要参数,也是表征一次煤气的重要参数。由于吨铁炉腹煤气量代表吨铁高炉风口燃烧带产生的煤气数量,与吨铁风口燃烧的炭素量相关,也是重要的鼓风参数。也要像关心高炉鼓风动能、风口风速等鼓风参数一样,对炉腹煤气量进行监视和控制,尽量使高炉操作点向图 1 中左上角集中。只有在高炉稳定顺行时,才能获得低的吨铁炉腹煤气量和低燃料比。因此,吨铁炉腹煤气量可以作为衡量高炉稳定顺行状态的重要参数。图 2 所示为 2016 年 4 000 m³ 以上高炉月平均炉腹煤气量指数与面积利用系数的关系。图中还用一组直线表示吨铁炉腹煤气量 V_{BG} 与面积利用系数 η_A 的关系。

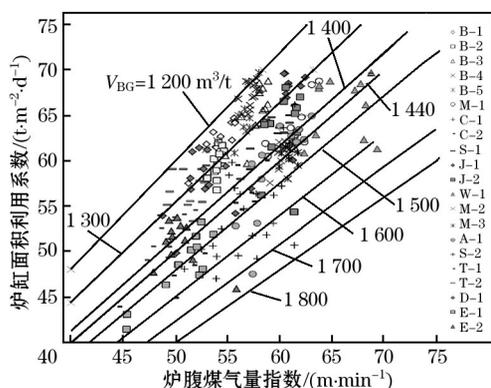


图 2 4 000 m³ 以上高炉月平均炉腹煤气量指数 χ_{BG} 与面积利用系数 η_A 的关系

Fig. 2 Relationship between bosh gas index per month and area utilization coefficient for large blast furnace

由图 2 可知,有较多的炉容 4 000 m³ 以上高炉的面积利用系数超过 65 t/(m²·d),而且有一批高炉接近 70 t/(m²·d)。炉腹煤气量指数只有一座高炉超过 65 m/min,这说明 4 000 m³ 以上高炉在强化程度总体上控制得比较好。在研究较高面积利用系数的高炉时,还应注意其操作的稳定性,短期有较高的利用系数,而波动较大的高炉说明高炉操作参数、操作制度还有待改进的地方,而且往往燃料比较高。只有面积利用系数长期稳定地处于高位,才能获得良好的综合指标。

控制较低的炉腹煤气量指数,并不是要企业降低产量,而是寻求既降低燃料比又高产的途径。吨铁炉腹煤气量与燃料比有密切的关系。以吨铁炉腹煤气量的高低把 4 000 m³ 和部分 3 000 m³ 高炉分

为三级。一级的炉腹煤气量指数与面积利用系数稳定,集中在较小的范围之内,吨铁炉腹煤气量低于 1 400 m³/t 的高炉如图 3 所示。

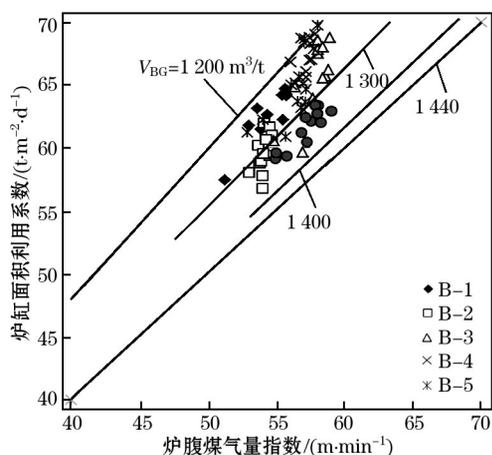


图 3 吨铁炉腹煤气量 V_{BG} 较小的高炉腹煤气量指数 χ_{BG} 与面积利用系数 η_A 的关系

Fig. 3 Relationship between bosh gas index per month and area utilization coefficient for blast furnace with small bosh gas volume

由图 3 可知,这批高炉除了控制炉腹煤气量指数以外,吨铁炉腹煤气量也低。高炉操作稳定是 B-1~B-5 高炉获得低燃料比的重要保证。达到低燃料比稳产高产的条件比较苛刻,工况范围比较狭窄,要做到在合适的炉腹煤气量指数范围内尽量降低吨铁炉腹煤气量,这对企业管理、生产组织、原燃料质量等各方面提出了较高要求。可是实际条件与要求有可能发生矛盾,要认真处理好两者的矛盾,提出调整高炉各项参数,选择适宜的炉腹煤气量指数,当然也不能缺少多方面的保障,避免炉况的波动对燃料比的影响。例如高炉的设备状况欠佳,原料设施能力不足,炉料结构调整和适应等都会影响面积利用系数和低燃料比。

另一级的炉腹煤气量指数较高,面积利用系数波动较大。这些高炉的吨铁炉腹煤气量都高于 1 400 m³/t,如图 4 所示。高炉月平均面积利用系数波动较大,虽然月平均的时间间隔较长,但也足以说明高炉的稳定顺行较差,潜藏着高炉失常的危险,越大的高炉越应该警惕。因为 4 000 m³ 以上高炉的炉况波动很难纠正,可能是灾难性的,不可忽视。

中间一级炉腹煤气量指数偏高一些,面积利用系数的波动稍好一些,吨铁炉腹煤气量在 1 400 m³/t 附近。

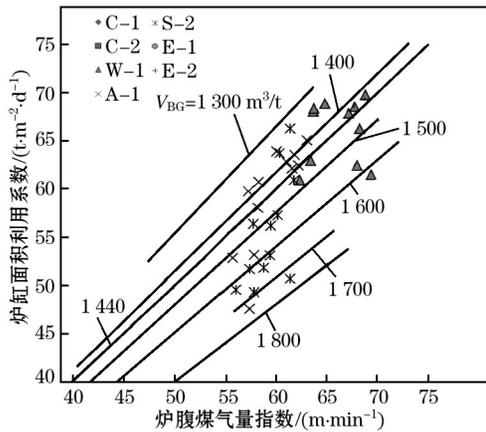


图 4 吨铁炉腹煤气量 V_{BG} 较高高炉的腹煤气量指数 χ_{BG} 与面积利用系数 η_A 的关系

Fig. 4 Relationship between bosh gas index per month and area utilization coefficient for blast furnace with large bosh gas volume

比较图 3 与图 4 可知,控制合适的炉腹煤气量对稳定高炉操作、获得良好的操作指标很重要。虽然在图 4 中不乏知名的高产高炉,认为“高产”就是“高效”,可是用评价高炉炼铁生产的新方法来评判,以高产来概括一切是不全面的,在一些操作制度上还有需要修正的地方。

高炉炉况波动的原因很多。由图 4 可以看出,炉腹煤气量指数越高,数据点的分散程度越高,也就是说,其中一些高炉的稳定程度越差,所以高炉操作中对影响炉况的各种因素要进行充分的估计、分析,例如当原燃料质量下降、渣铁比升高时,增加的渣量要折算到高炉产量之中。曾经指出:在宝钢 250 kg/t 左右的条件下,多冶炼 1 t 炉渣,相当于多冶炼 1.77 t 生铁,高炉利用系数应该相应降低^[10],该折算值与德国蒂森的数据相符。高炉要对这些客观条件的变化作出正确判断,如果条件变化而不调整产量计划,盲目强化,也会造成高炉炉况波动甚至失常。3 000 m³ 级高炉的炉况波动虽然较好治理,但是在炼铁界重视的程度远比大型高炉差。

3 降低吨铁炉腹煤气量,提高煤气利用率,降低燃料比

根据各高炉提供的风量、氧量和鼓风湿度计算的吨铁风口耗氧量 v_{O_2} ,能计算风口燃烧炭素消耗量。因此,从吨铁风口耗氧量就能估算高炉燃料比。曾经指出,吨铁风口耗氧量是高炉操作水平的标志性指标,可以作为识别能否提高炉腹煤气量指数的一个标志性指标^[9]。图 5 所示为 2016 年容积

4 000 m³ 以上高炉月平均炉腹煤气量指数与煤气利用率 η_{CO} 和吨铁风口耗氧量 v_{O_2} 之间的关系。图 5 中实线为煤气利用率,虚线为吨铁风口耗氧量。

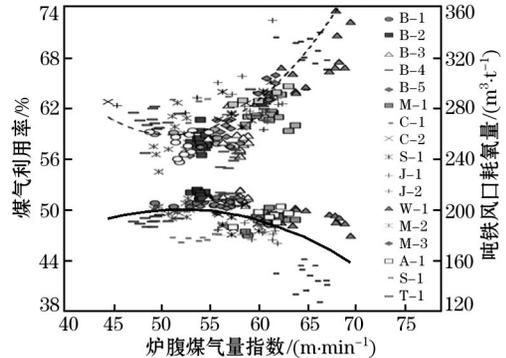


图 5 高炉炉腹煤气量指数与煤气利用率和吨铁风口耗氧量的关系

Fig. 5 Relationship of bosh gas index and gas utilization rate and oxygen consumption volume in raceway zone

综合以上分析证明,当炉腹煤气量指数 χ_{BG} 过高时,利用系数并没有升高。也就是说,在冶炼吨铁炉腹煤气量增加的同时,吨铁风口耗氧量 v_{O_2} 和风口燃烧炭素量也随之增加,高炉的生产效率下降。

对 4 000 m³ 以上高炉的炉腹煤气量指数 χ_{BG} 与煤气利用率 η_{CO} 和吨铁耗氧量 v_{O_2} 进行统计分析,得到如下的回归方程式,分别为

$$\eta_{CO} = -0.02986\chi_{BG}^2 + 3.154\chi_{BG} - 33.31 \quad (4)$$

$$v_{O_2} = 0.3547\chi_{BG}^2 - 36.25\chi_{BG} + 1185.6 \quad (5)$$

从 4 000 m³ 以上高炉的煤气利用率来看,生产稳定的高炉煤气利用率远高于回归曲线的最高值,反之,高炉生产不稳定,会导致生产效率下降,高炉吨铁风口耗氧量将更高。

曾经对 4 座 2 000 m³ 级高炉的炉腹煤气量指数与煤气利用率 η_{CO} 和吨铁耗氧量 v_{O_2} 进行过统计分析,得到如下的回归方程式,分别为^[5]

$$\eta_{CO} = -0.0274\chi_{BG}^2 + 3.0131\chi_{BG} - 32.824 \quad (6)$$

$$v_{O_2} = 0.1721\chi_{BG}^2 - 15.662\chi_{BG} + 585.72 \quad (7)$$

比较两组回归方程式(4)~式(7),由其差别可知,煤气利用率呈倒“U”形,其最高点都在 50%,4 000 m³ 以上高炉的最高点在炉腹煤气量指数 52 m/min 处出现,4 座 2 000 m³ 级高炉的最高点在炉腹煤气量 55 m/min 处,都与燃料比的最低位置相符。两组高炉中 4 000 m³ 以上高炉的曲线要陡些,下降得快,在 4 000 m³ 以上高炉曲线的有效最高炉腹煤气量 70 m/min 时,煤气利用率相差达 2.5%。两组曲线的特征也与燃料比曲线相似。

吨铁风口耗氧量与燃料比曲线相似,呈“U”字形。4 000 m³以上高炉曲线的最低位置在炉腹煤气量指数 52 m/min 处,约为 260 m³/t; 2 000 m³级高炉的最低点低于回归曲线的有效范围以外,约在炉腹煤气量 50 m/min 处,约为 240 m³/t。同样,4 000 m³以上高炉随着炉腹煤气量指数的增加,曲线上升快。两条曲线在炉腹煤气量指数 70 m/min 处吨铁风口耗氧量相差达到 30 m³/t 左右。

B-1~B-5 高炉的炉腹煤气量指数在靠近最低燃料比的合适范围内,煤气利用率和吨铁风口耗氧量分别为 50.5%~52.5%及 240~260 m³/t。5 座高炉年平均吨铁风口耗氧量 v_{O_2} 为 253.7 m³/t; 平均煤气利用率 η_{CO} 为 51.3%。由吨铁耗氧量 v_{O_2} 就可计算吨铁风口燃烧的炭素量,并且估计燃料比。随着炉腹煤气量指数的提高,高炉的风口吨铁耗氧量 v_{O_2} 迅速上升,而炉顶煤气利用率 η_{CO} 的下降速度加快。

维持炉腹煤气量指数在一个合适的范围是取得良好生产指标、提高生产效率的先决条件,可是还有一批高炉,例如 C-1、D-1、S-1、T-1、T-2 等,虽然炉腹煤气量指数在靠近最低燃料比的合适范围内,由于环境条件和操作因素导致炉况不稳定,煤气利用率 η_{CO} 和吨铁风口耗氧量的波动仍然较大,煤气利用率 η_{CO} 也不能维持在高水平上,吨铁风口耗氧量也不低。

由图 5 可知,当炉腹煤气量指数超过 60 m/min 时,风口吨铁耗氧量 v_{O_2} 和煤气利用率 η_{CO} 有明显变化。因此,在低燃料比的条件下,炉腹煤气量指数更不宜超过 64 m/min,否则风口燃烧炭素将迅速升高,导致燃料比升高。

此外,有个别高炉炉腹煤气量指数低于合适的范围,也不能取得良好的操作指标。因为炉腹煤气量指数过低,炉内软熔带的位置过低,软熔带与死料堆之间的距离太小,煤气通过阻力增大。软熔带下部还原不充分的滴落物进入死料堆,使死料堆的湿度下降,影响死料堆的透气性和透液性,影响正常操作。如果炉腹煤气量小于 45 m/min,高炉操作将发生困难。

炉腹煤气量指数比较高的高炉,炉内煤气流速比较高,煤气在炉内的停留时间缩短,炉料与煤气的接触条件变差,在炉腹煤气量高的区域,燃料比升高的同时炉顶煤气利用率 η_{CO} 下降。从炉内过程解释:首先,吨铁风口耗氧量增加,炉内的煤气流量

多,携带的 CO 量多,分摊到炉料上,矿石供给的氧气量不足,不能与过量的 CO 结合,炉顶排出煤气中的 CO 比例上升,这可以从物料平衡的角度进行解释;其次,由于风口燃烧炭素的增加,热量过多,使软熔带和高温区上升,块状带缩小,煤气在块状带的停留时间缩短,炉料与煤气的接触条件变差,间接还原不足,提供的过量焦炭被直接还原所消耗,煤气的热能和化学能不能被很好利用;第三,煤气量大,炉料下降的阻力较高,为了维持顺行,让大量的煤气较顺畅地通过料柱,就必须采取疏松边缘或者中心的布料措施,也使煤气的利用率降低。可惜,目前还不可能建立起炉内煤气流速或停留时间与燃料比或煤气利用率之间的数学关系。本文进行了大量数理统计来寻求合适的炉腹煤气量指数的范围。

4 结语

近年来,国内许多炼铁专家,如张寿荣院士、杨天钧教授等多次提出使用高炉炉缸断面利用系数来评价高炉生产效率^[13-14],作者也认为启用《中国钢铁工业生产统计指标体系》^[15]中规定的高炉炉缸断面利用系数的条件已经成熟。几年来对使用评价高炉生产效率的新方法也取得了实践的验证,证明其是一种更为实用的方法。该方法用炉缸面积利用系数和炉腹煤气量指数来取代容积利用系数和焦炭冶炼强度,可以有效地分析高炉生产中的问题,有助于制订合理的操作制度。

(1) 炉腹煤气量指数与燃料比普遍存在“U”字形的关系。最低燃料比在炉腹煤气量指数 54 m/min 的位置。

(2) 如果为了提高高炉面积利用系数,即使燃料比低的高炉,其炉腹煤气量指数也会比最低燃料比的位置高出约 5~6 m/min。而此时,高炉已经接近敏感地带,更需要质量优良的原燃料,操作必须谨慎小心,必须精细化,严防环境波动造成的高炉炉况失常。

(3) 对于原燃料条件较好的高炉,必须保持环境条件比较宽松,在不引起燃料比升高的条件下,保持炉况稳定顺行,适当提高炉腹煤气量指数,提高面积利用系数。

(4) 炉腹煤气量指数与煤气利用率有倒“U”形的关系,与吨铁风口耗氧量有“U”字形的关系。当炉腹煤气量指数超过 60 m/min 后,煤气利用率迅速下降,吨铁耗氧量迅速上升。这说明高炉的还原效率下降,炭素消耗和热量消耗急剧上升。

(5) 用炉腹煤气量指数、吨铁炉腹煤气量、吨铁风口耗氧量、煤气利用率作为尺度来判断高炉的效率比较准确。分析面积利用系数及上述 4 个参数的变化,可以找出炉况变化的潜在因素,从而采取适当措施。

(6) 在目前条件下,操作良好高炉的面积利用系数大于 $62 \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,燃料比为 $490 \text{ kg}/\text{t}$,适宜的炉腹煤气量指数为 $50 \sim 58 \text{ m}/\text{min}$,吨铁炉腹煤气量小于 $1350 \text{ m}^3/\text{t}$,煤气利用率高于 50% ,吨铁风口耗氧量低于 $260 \text{ m}^3/\text{t}$ 。这些符合,那就达到了世界喷煤高炉的先进水平。

本文运用了评价高炉生产效率的新方法,对 4000 m^3 以上高炉进行了统计分析,并结合对 2000 m^3 级高炉的分析结果,揭示了高炉的许多重要操作参数与炉腹煤气量指数有很强的相关性。作者还将用高炉炼铁的基本理论对这些统计规律进行解释。

参考文献:

- [1] 张春霞,上官方钦,胡长庆,等. 钢铁流程结构及对 CO_2 排放的影响[J]. 钢铁, 2010, 45(5): 1. (ZHANG Chun-xia, SHANGGUAN Fang-qin, HU Chang-qing, et al. Steel process structure and its impact on CO_2 emission[J]. Iron and Steel, 2010, 45(5): 1.)
- [2] 李新创. 优化产业布局提高钢铁竞争力[J]. 中国冶金, 2015(6): 1. (LI Xin-chuang. Optimize industrial layout to improve competitive power of the steel industry[J]. China Metallurgy, 2015(6): 1.)
- [3] ZHOU D D, CHENG S S, WANG Y S, et al. Production and development of large blast furnaces from 2011 to 2014 in China [J]. ISIJ International, 2015: 2519.
- [4] ZHOU D D, CHENG S S, WANG Y S, et al. The production and development of large blast furnaces in China during 2015 [J]. Ironmaking and Steelmaking, 2017, 44(5): 351.
- [5] 姜曦,周东东. 近年来中国大高炉生产指标浅析[J]. 炼铁, 2016, 35(3): 10. (JIANG Xi, ZHOU Dong-dong. Analysis on production indexes of domestic large sized BF in recent years[J]. Ironmaking, 2016, 35(3): 10.)
- [6] 周东东,姜曦,周翔. 2016年上半年中国大高炉生产指标浅析[J]. 中国冶金, 2016, 26(12): 1. (ZHOU Dong-dong, JIANG Xi, ZHOU Xiang. Analyses of production indexes of large blast furnaces in China during first half of 2016[J]. China Metallurgy, 2016, 26(12): 1.)
- [7] 张寿荣,姜曦. 中国大型高炉生产现状分析及展望[J]. 钢铁, 2017, 52(2): 1. (ZHANG Shou-rong, JIANG Xi. Production and development of large blast furnaces in China[J]. Iron and Steel, 2017, 52(2): 1.)
- [8] 姜曦,张寿荣,项钟庸. 我国大型高炉生产现状分析及展望 [N]. 中国冶金报, 2017-08-17(5). (JIANG Xi, ZHANG Shou-rong, XIANG Zhong-yong. Production and development of large blast furnaces in China[N]. China Metallurgical News, 2017-08-17(5).)
- [9] 项钟庸,王筱留,邹忠平,等. 炉腹煤气量指数与 Rist 线探析 [J]. 炼铁, 2015, 34(1): 26. (XIANG Zhong-yong, WANG Xiao-liu, ZOU Zhong-ping, et al. Analysis of gas volume index and Rist chart of blast furnace[J]. Ironmaking, 2015, 34(1): 26.)
- [10] 项钟庸,王筱留,等. 高炉设计—炼铁工艺设计理论与实践 [M]. 第 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 2014. (XIANG Zhong-yong, WANG Xiao-liu, et al. Blast Furnace Design: Theory and Practice of Ironmaking Process Design[M]. Version 2. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2014.)
- [11] 项钟庸,银汉. 高炉生产效率的评价方法[J]. 钢铁, 2011, 46(9): 17. (XIANG Zhong-yong, YIN Han. Evaluation method on productive efficiency of ironmaking in blast furnace[J]. Iron and Steel, 2011, 46(9): 7.)
- [12] 项钟庸,王筱留,银汉. 再论高炉生产效率的评价方法[J]. 钢铁, 2013, 48(3): 86. (XIANG Zhong-yong, WANG Xiao-liu, YIN Han. More discussion on evaluation method for productive efficiency of ironmaking blast furnace[J]. Iron and Steel, 2013, 48(3): 86.)
- [13] 张寿荣,银汉. 高炉强化冶炼的评价方法[J]. 炼铁, 2002, 21(2): 1. (ZHANG Shou-rong, YIN Han. Evaluation of blast furnace intensified smelting[J]. Ironmaking, 2002, 21(2): 1.)
- [14] 杨天钧. 化解产能 脱困发展 技术创新实现炼铁工业的转型升级[J]. 炼铁, 2016(3): 1. (YANG Tian-jun. Transformation and upgrade of ironmaking industry via addressing over capacity, defusing difficulty and by technical innovation[J]. Ironmaking, 2016(3): 1.)
- [15] 中国钢铁工业协会. 中国钢铁工业生产统计指标体系[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004. (China Iron and Steel Industry Association. China Steel Industry Production Statistics System [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004.)