包钢3#高炉合理煤气流分布的探索*

杨 帆[1],白晓光[1],李 磊[2],苗文平[2],陈 凯[2]

(1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心,内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司炼铁厂,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 煤气流分布对于高炉冶炼具有重要影响,包钢3#高炉在中修开炉后以经济指标为参考,通过对上下部调剂的数据分析,提出了高炉合理煤气流分布的控制区间,实现了煤气流分布的合理控制,达到了煤气利用率提高、焦比降低的目的,保持了高炉长期的稳定、顺行。

关键词: 鼓风动能; 风口回旋区深度; 中心加焦; 矿焦比
中图分类号: TF543.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2021)02-0024-05
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2021.02.006

Exploration on Reasonable Gas Flow Distribution of 3# Blast Furnace of Baotou Steel

Yang Fan[1], *Bai Xiao-guang*[1], *Li Lei*[2], *Miao Wen-ping*[2], *Chen Kai*[2]

(1. *Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Iron-making Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: The influence of gas flow distribution on blast furnace smelting is important. After the blow-on of 3# blast furnace of Baotou Steel for medium maintenance, the control interval of reasonable gas flow distribution of blast furnace is put forward based on the data analysis of upper and lower adjustments by taking economic indicators as reference so that the reasonable control of gas flow distribution is realized. As a result, the goals of improving utilization rate of gas and reducing coke ratio are reached so that the long-term stability and smooth operation of blast furnace are maintained.

Key words: blast momentum; depth of tuyere raceway; add coke in the center; ore coke ratio

高炉煤气分布的合理与否是影响高炉顺行、高炉经济技术指标以及高炉长寿的关键因素,可以说操作高炉就是控制煤气流。在高炉生产中热风从风口鼓入,需经过风口回旋区、滴落带、软熔带、块状带,最后从炉顶料面排出,成为炉顶煤气。煤气流分布受各区域透气性的影响,自下而上可分为风口回旋区的初始煤气流分布、炉腰至炉身下部的煤气流分布和炉身上部的煤气流分布,即煤气在高炉内的三次分布[1]。

高炉在冶炼过程中,煤气流和炉料的逆流运动是炉内一切反应的基础,是影响传热和传质过程的根本因素,因此稳定合理的煤气流分布是高炉取得

* 收稿日期:2021-01-11
作者简介:杨 帆(1989-),男,内蒙古乌海市人,工程师,现从事炼铁工艺研究工作。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

良好技术经济指标的关键。包钢炼铁厂 3# 高炉于 2017 年 6 月 28 日中修后点火开炉，实现了两天半快速达产，开炉后，高炉操作人员充分借鉴和学习国内先进企业的操作理念，并通过自身不断摸索和调剂形成了较为稳定的操作炉型，煤气流也较开炉前有了更为合理的分布，本文以煤气流分布控制为出发点，将上下部调剂的主要措施进行总结。

1　鼓风动能及风口回旋区深度的分析

1.1　鼓风动能和风口回旋区深度的理论计算

要实现高炉合理的煤气流分布，送风制度的确立是基础，高炉的下部调剂参数主要包括风量、风速、风温、风压、富氧量、喷吹量及进风面积等。在下部调剂过程中风口前焦炭和煤粉的燃烧是核心反应，因为它会形成高炉操作人员比较重视的燃烧带。燃烧带是高炉煤气的发源地，它的大小决定了煤气流的初始分布，同时也对高炉整体煤气流分布是否合理起到了至关重要的作用。通常为了保证炉缸的活跃性，高炉操作者会使用合理且充足的鼓风动能来满足生产需求，鼓风动能的理论计算公式主要由动能公式 $E = \frac{1}{2}mr^2$ 推导而来。得出鼓风动能计算式为[3]：

$$E = 4.201 \times 10^{-14} \times \frac{Q_0^3}{n^3 \cdot s^2} \times \frac{T^2}{p^2} \quad (1)$$

式中：E 为高炉鼓风动能，kJ/s；Q_0 为高炉风量（标准状态），m^3/min；n 为高炉工作风口数；T 为热风温度，K；p 为热风压力 + 标准大气压，MPa；s 为风口截面积，m^2。

由推导的公式可以看出，影响高炉鼓风动能的主要因素包括风量、风温、风压、风口面积等。

风口回旋区深度经验计算公式为[3]：

$$D = 0.88 + 0.000\ 092 \times 9.8 \times E/1\ 000 - 0.000\ 31PCI/n \quad (2)$$

式中：D 为回旋区深度，m；E 为鼓风动能，kJ/s；PCI 为喷煤量，t/h；n 为风口个数。

由经验公式可以看出，影响风口回旋区大小的主要因素就是鼓风动能，两者呈正比例线性关系。

根据国内外较为成熟的经验表明，风口回旋区深度所覆盖的炉缸截面积应占整个炉缸截面积的 50% 左右。3# 高炉炉缸直径为 10.75 m，经过计算得出 3# 高炉风口回旋区深度为 1.575 m。然后通过上述经验公式，得出 3# 高炉鼓风动能为 74.5 kJ/s，再结合 3# 高炉的重要经济指标最终确定鼓风动能与风口回旋区深度较为合理的取值范围。

1.2　合理鼓风动能范围及风口回旋区深度的确定

选取 3# 高炉自开炉后的产量和燃料比作为重要参数指标，具体线性关系见图 1、图 2。

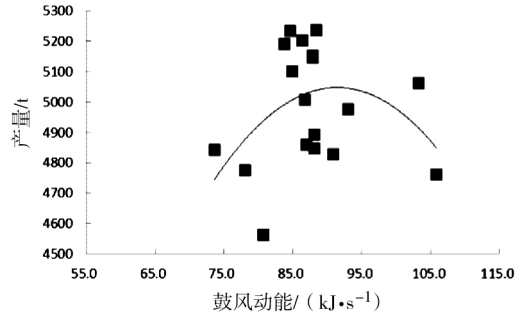


图 1　3# 高炉产量与鼓风动能的关系

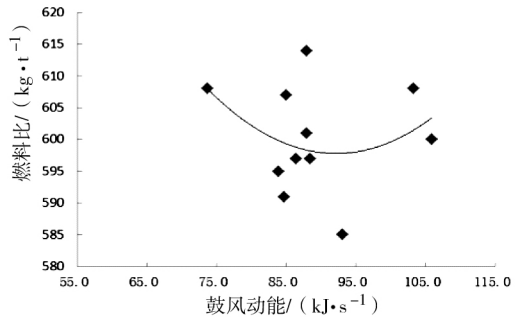


图 2　3# 高炉燃料比与鼓风动能的关系

结合图 1、图 2 分析可知 3# 高炉产量和燃料比与鼓风动能的线性关系存在区间拐点，当鼓风动能取值在 83.3 ~ 93.1 kJ/s 之间时，产量高于 4 850 t/d 和燃料比低于 600 kg/t 的落点最多，该区间高于理论计算值 11.8% ~ 25.0%，对应风口回旋区深度为 1.66 ~ 1.75 m，高于理论计算值 5.4% ~ 11.1%。生产中一些重要的经济技术指标应当成为我们参考的依据，只有找到下部鼓风动能的合理范围，才能为中上部的调剂打下良好的基础[4]。由于 3# 高炉所使用的原燃料质量相对较差，尤其在焦炭方面，使用的是捣固焦，且水分波动较大，有时还会混用一部分干熄焦，综合负荷较难把控，因此将鼓风动能维持在略高于理论计算值，这样既有利于增强高炉的抗波动能力，也可以防止因动能不足造成的中心堆积、炉缸不活。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表1是炼铁工作者通过长期实践总结出的鼓风动能经验区间[5-6]，参照该表可以间接的印证上述研究计算的可行性。

表1 不同容积高炉鼓风动能区间

高炉容积/m^3	炉缸直径/m	鼓风动能/(kJ·s^{-1})
1 500	8.6	49.0~68.6
2 000	9.8	58.8~78.4
2 500	11.0	68.6~98.0
3 000	11.8	88.2~107.8

1.3 3#高炉开炉前后鼓风动能的对比分析

对3#高炉开炉前后经济技术指标进行整理，具体见表2。

结合表1、表2可以发现，3#高炉中修前的鼓风动能是偏大的，远超理论计算值和合理取值区间，风口回旋区过深，判断应属于中心过吹型，初始煤气流分布的不合理导致煤气利用率普遍偏低，燃料消耗偏高。而中修开炉后，高炉操作人员更注重了对初始煤气分布的控制，开始有意识的在摸索合适的鼓风动能，并严格控制在一定范围内，再根据压力、富氧、喷煤等冶炼条件进行适当调整，最终取得了较好的效果。

表2 3#高炉部分月份经济指标

时间	日产量/t	利用系数/(t·m^{-3}·d^{-1})	燃料比/(kg·t^{-1})	焦比/(kg·t^{-1})	煤比/(kg·t^{-1})	煤气利用率/%	鼓风动能/(kJ·s^{-1})
2015年4月	4 893	2.22	621	495	126	37.22	108.1
2015年5月	4 790	2.15	615	483	132	38.37	106.5
2015年6月	4 788	2.14	619	484	135	39.11	105.3
2018年4月	5 204	2.37	597	458	139	41.27	86.3
2018年5月	5 192	2.36	595	450	145	42.64	83.8
2018年6月	5 234	2.38	591	455	136	43.60	84.7
2018年7月	5 153	2.34	614	460	154	41.94	87.9
2018年8月	5 100	2.32	607	455	152	41.89	84.9
2018年9月	5 236	2.38	597	452	145	41.78	88.4

2 上部调剂对煤气流分布的影响分析

2.1 区域矿焦比的确定

经统计，2018年期间3#高炉在原燃料质量相对稳定时期，鼓风动能在84.3~88.7 kJ/s波动，此范围完全包含在上述理论计算值的合理区间内，可以认为原燃料质量在相对稳定时期的初始煤气流分布合理。

在此时期，3#高炉总体使用了3种布料矩阵，料线深度稳定在1.3~1.5 m，矿批稳定在56~60 t/批，焦批稳定在15.5~16.3 t/批，布料制度会随着中心、边缘气流的轻重、原燃料质量的变化进行调整。下面就结合这3种布料制度对3#高炉在不同稳定期内的矿焦比进行理论测算。布料矩阵见表3。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3　3# 高炉稳定期内布料矩阵及矿焦比

时间	对应时期	布料矩阵	矿焦比/(t·t⁻¹)			中心加焦量/%	煤气利用率/%
			中心区域	中间环带	边缘环带		
4 月	第一阶段	C 10 8 7 6 4 1 / 3 2 2 2 2 1 O 9 8 7 6 4 / 3 2 2 2 3	3.44	3.44	3.44	8.33	41.27
6 月—7 月	第二阶段	C 10 8 7 6 4 / 3 3 2 2 2 O 9 8 7 6 4 / 2 3 2 2 2	2.25	4.5	3.75	14.30	41.94 ~ 43.60
9 月	第三阶段	C 10 8 7 6 4 1 / 3 3 2 2 2 2 O 9 8 7 6 4 / 1.5 3 2 2 1	1.27	5.07	3.80	14.30	41.78

表 3 对布料环位进行了 3 个区域的划分: 即边缘环带为 8—10 号环位、中间环带为 5—7 号环位、中心区域为 1—4 号环位,3# 高炉一直采用中心加焦的布料模式,它属于平台 + 漏斗布料模式的一种变形。

2.1.1　第一阶段布料矩阵的控制分析

2018 年 4 月份,烧结矿质量较为稳定,焦炭质量向好发展,没有出现局部原燃料指标大幅下滑现象,观察表 3 可以看出,该月份与其他月份存在较大区别,其三个区域的矿焦比达到了一致,同时结合表 4,发现该阶段第 4 环位径向矿焦比较重,其余各环位矿焦比相同,由此分析可知,该布料矩阵属于减小中心加焦量兼顾边缘气流的布料制度,目的就是减少燃料消耗量,提升经济指标。

表 4　第一阶段布料矩阵各环位径向矿焦比

参数	布料环位					
焦环位	10	8	7	6	4	1
焦圈数	3	2	2	2	2	1
每环比例/%	25.00	16.67	16.67	16.67	16.67	8.33
矿环位	9	8	7	6	4	
矿圈数	3	2	2	2	3	
每环比例/%	25.00	16.67	16.67	16.67	25.00	
径向矿焦比/(t·t⁻¹)	3.68	3.68	3.68	3.68	5.52	

在使用该种布料矩阵下,煤气利用有了较大改善,由 39% 上升至 43%,高炉透气阻力系数 K 值一直保持在 6.0 以下,高炉可操作性较好,特别是当时风温只有 1 005 ℃,相比于同年 9 月份风温低 105 ℃,折算成焦比影响 21 kg/t,但经济指标却取得了较高的水平,燃料比基本保持在 597 kg/t,日产量超过 5 200 t,两项经济指标均与 9 月份持平,说明在原燃料质量稳定向好的时期,该种制度可行性很高。

2.1.2　第二阶段布料矩阵的控制分析

进入 2018 年 6 月份以后,原燃料质量在整体较为稳定的水平上,局部波动开始增多,烧结矿 5 ~ 10 mm 占比升高 6 个百分点,平均粒度下降 1 mm,熔滴区间变宽 81 ℃,入炉粉末量增加 0.35 个百分点,这些因素均严重影响高炉透气性,炉况表现为热风压力超上限次数增多,加减风频繁,稳定性变差。于是在 6 月初进行了制度调整,调整后,炉况趋稳,当月也取得了开炉以来 3# 高炉最优的经济指标。由表 3 可以看出,第二阶段中心加焦量比例较第一阶段增加 5.97 个百分点,中心区域矿焦比逐步减轻,中间、边缘环带矿焦比呈不同程度的加重。结合表 5 分析可知,该布料矩阵较第一阶段,在第 4 环位矿焦比减轻 0.69 t/t,9—10 环位矿焦比减轻 0.46 t/t。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表5 第二阶段布料矩阵各环位径向矿焦比

参数	布料环位					
焦环位	10	8	7	6	4	1
焦圈数	3	3	2	2	2	2
每环比例/%	21.43	21.43	14.29	14.29	14.29	14.29
矿环位	9	8	7	6	4	
矿圈数	2	3	2	2	2	
每环比例/%	18.18	27.27	18.18	18.18	18.18	
径向矿焦比/(t·t^{-1})	3.22	4.83	4.83	4.83	4.83	

2.1.3 第三阶段布料矩阵的控制分析

在2018年7月初期原燃料质量进一步下滑，烧结矿5～10 mm比例由37.6%最高升至57.51%，$RDI_{+3.15}$下降4.4个百分点，入炉粉末量较同年6月份升高近0.50个百分点。原燃料质量的波动加剧，导致3#高炉从5日起风量由之前的3 993 m^3/min逐步减小到8日的3 853 m^3/min，热风压力连续超出上限，中心气流有明显的减弱趋势，Z值呈下降趋势。可是7月份依然沿用了6月份的布料制度，高炉抗波动能力逐渐变弱，经济指标小幅下降。具体指标参数见图3、图4。

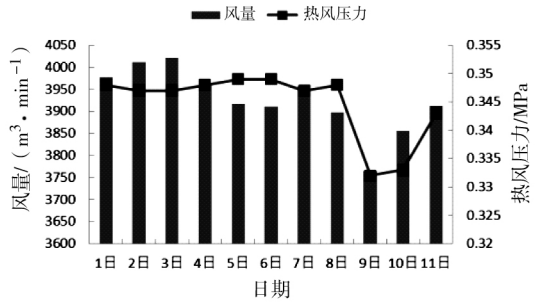


图3 3#高炉7月初期风量、热风压力变化图

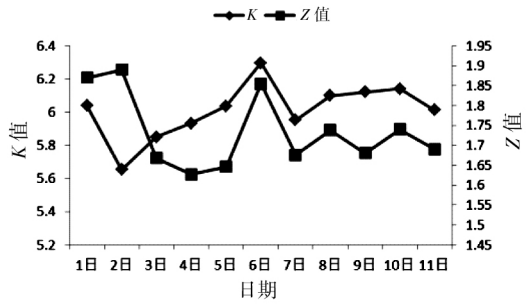


图4 3#高炉7月初期K值、Z值变化图

类似的原燃料情况也出现在了2018年9月份，不同的是在布料制度上对中心区域的矿焦比进一步减轻，中心加焦量不变，通过对第4环位矿石缩减1圈，来达到调整效果。结合表5、表6来看，第4环位矿焦比减轻2.12 t/t，9—10环位矿焦比减轻0.51 t/t，调整后3#高炉压量关系由紧张逐渐转为合适，气流分布趋于规整。

表6 第三阶段布料矩阵各环位径向矿焦比

参数	布料环位					
焦环位	10	8	7	6	4	1
焦圈数	3	3	2	2	2	2
每环比例/%	21.43	21.43	14.29	14.29	14.29	14.29
矿环位	9	8	7	6	4	
矿圈数	1.5	3	2	2	1	
每环比例/%	15.79	31.58	21.05	21.05	10.53	
径向矿焦比/(t·t^{-1})	2.71	5.43	5.43	5.43	2.71	

对比表7可以看出，9月份经济指标优于7月份。说明第三阶段布料制度较第二阶段在原燃料整体平稳、局部波动频繁时更适用于3#高炉。

表7 3#高炉在原燃料质量相对稳定时期取得的经济指标

时间	日产量/t	煤比/(kg·t^{-1})	焦比(含焦丁)/(kg·t^{-1})	燃料比/(kg·t^{-1})	煤气利用/%
2018年4月	5 204	139	458	597	41.27
2018年6月	5 234	136	455	591	43.60
2018年7月	5 153	154	460	614	41.94
2018年9月	5 236	145	452	597	41.78

3 结论

(1) 经过理论推导计算和实际数据线性分析可以得出，3#高炉鼓风动能合理取值区间在83.3～93.1 kJ/s，对应风口回旋区深度在1.66～1.75 m。

(下转第69页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.4　使用效果

根据 GB/T 12470—2018《埋弧焊焊丝－焊剂组合分类要求》[4] 中熔敷金属性能、Q/SY GJX 0102—2018《螺旋缝埋弧焊管技术条件》[5] 中 X80 钢管焊接接头性能的要求，熔敷金属屈服强度≥540 MPa，抗拉强度≥620 MPa，伸长率≥17%，－40 ℃条件下，熔敷金属冲击吸收功平均值不小于 27 J。BGX80 制丝后，配合宝鸡 BG－S101H1 焊剂，进行熔敷金属检验，熔敷金属力学性能见表 3。

表 3　BGX80 熔敷金属力学性能

屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	延伸率 /%	－40 ℃冲击吸收功/J			
			试样 1	试样 2	试样 3	平均值
600	660	25.6	51	45	43	46.3

从检验结果可以看出，BGX80 熔敷金属力学性能满足 X80 管线钢标准要求。

4　结论

(1) 包钢生产的 BGX80，成分设计合理，满足盘条力学性能指标要求。

(2) 炼钢、轧钢工艺路线设计合理，轧钢控轧控冷工艺参数设定正确，盘条金相组织理想，性能稳定，通条抗拉强度差小于 50 MPa。

(3) BGX80 配合宝鸡 BG－S101H1 焊剂进行熔敷金属检验，熔敷金属力学性能满足 X80 管线钢标准要求。

参　考　文　献

[1] 张振永. 中俄东线 X80 钢级 Φ1 422 mm 管道工程设计关键技术应用[J]. 焊管，2019，42(7)：64－71.

[2] 毕宗岳. 新一代大输量油气管材制造关键技术研究进展[J]. 焊管，2019，42(7)：10－25.

[3] 王晓香. 2016—2017 年以来我国焊管产业的运行情况及技术进步[J]. 焊管，2018，41(6)：1－6.

[4] GB/T 12470—2018. 埋弧焊焊丝一焊剂组合分类要求[S].

[5] Q/SY GJX 0102—2018. 螺旋缝埋弧焊管技术条件[S].

(上接第 28 页)

(2) 3# 高炉在中修开炉后，注重了煤气流分布各阶段的调整和控制，其中鼓风动能下降 17.6～22.5 kJ/s，保证了初始煤气流分布的合理，避免了中心过吹。

(3) 3# 高炉在 2018 年原燃料质量相对稳定时期，3 个区域矿焦比取值区间如下：中心区域矿焦比在 1.2～3.5 t/t 之间，中心环带矿焦比在 3.4～5.1 t/t之间，边缘环带矿焦比在 3.4～4.0 t/t 之间，且在该条件下，3# 高炉取得了较为理想的经济指标。

参　考　文　献

[1] 冯广斌，曹锋，袁苗苗，等. 长钢 9 号高炉煤气流分布的合理控制[J]. 炼铁，2013，32(4)：43－44.

[2] 那树人. 炼铁计算辨析[M]. 北京：冶金工业出版社，2009.

[3] 朱仁良. 宝钢大型高炉操作与管理[M]. 北京：冶金工业出版社，2015.

[4] 姜喆，车玉满，郭天永，等. 鞍钢 2 号高炉合理鼓风动能的探讨[J]. 炼铁，2017，36(2)：14－15.

[5] 成兰伯. 高炉炼铁工艺及计算[M]. 北京：冶金工业出版社，1991.

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

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net