

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20170366

高炉喷吹煤气工艺中炉顶煤气循环的变化规律

刘 颂¹, 吕 庆¹, 张旭升², 刘小杰¹, 王书恒¹, 李福民¹

(1. 华北理工大学冶金与能源学院, 河北 唐山 063009; 2. 河北钢铁集团唐钢公司炼铁部, 河北 唐山 063000)

摘 要: 高炉喷煤新技术结合了高炉和造气炉的传统工艺,通过炉顶煤气循环,实现了炉顶煤气的合理利用。结果表明,随着循环时间的增加,所需煤量增多,造气炉煤气中H₂和CO体积分数升高,高炉中总热收入和热量收支差降低;炉顶煤气中H₂和CO体积分数升高,N₂和CO₂体积分数降低,且随着煤气循环,最终达到气体成分基本不变,保证了高炉的最佳运行状态。

关键词: 煤气循环; 数学模型; 高炉; 造气炉

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2018)02-0078-05

Change rule of top gas circulation in blast furnace gas injection process

LIU Song¹, LÜ Qing¹, ZHANG Xu-sheng², LIU Xiao-jie¹, WANG Shu-huan¹, LI Fu-min¹

(1. College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, Hebei, China; 2. Ironmaking Department, Hebei Iron and Steel Group Tangshan Iron and Steel Company, Tangshan 063009, Hebei, China)

Abstract: The new technology of blast furnace coal injection combines traditional technology of blast furnace with gas-making furnace and achieves a rational use of top gas through top gas recycling. The results show that with the increase of the cycle time, the amount of coal required increases, the content of H₂ and CO in the gas-making furnace increases, and the total heat input and heat budget of blast furnace decrease. With the volume fraction of H₂ and CO in the top gas increasing, the volume fraction of N₂ and CO₂ decreasing and the circulation of gas, the gas composition is basically unchanged, and the optimum running state of the blast furnace is guaranteed.

Key words: gas recycling; mathematical model; blast furnace; gas making furnace

现代高炉在工艺、设备和技术等方面基本趋于成熟,节能减排工作已无太大的空间,因此,开创高炉炼铁新的节能减排技术将成为今后研究的重点^[1-2]。高炉炉顶煤气含有一定量的CO、CO₂,使用造气炉技术循环部分炉顶煤气能够降低高炉能耗、提高生产效率、减少CO₂的排放,其价值广泛受到各国关注^[3-5],许多国家也根据高炉自身需求提出了不同的喷吹方法,如HRG(俄罗斯)、OHNO(日本)、FINK(德国)和LU(加拿大)工艺等^[6-10]。高炉喷吹炉顶煤气虽然取得了较大进展,但该技术的推广和应用依赖于低价制氧技术、脱CO₂技术以及CO₂固定技术的发展。在目前技术条件下,使用上述工艺会增加炼铁成本^[11]。基于此,本项目提出高炉喷煤新工艺^[12],即把煤粉在风口前的燃烧气化这一复杂物理、化学过程转移到炉外,建立全新的高炉喷煤新技术。其工艺流程为:造气炉燃烧煤→产生高温煤气→喷入高

炉。其中,高炉炉顶部分煤气通过造气炉转化使CO₂生成CO是该新工艺重要组成部分。它克服了目前喷吹高炉炉顶煤气必须脱CO₂的难题。通过对炉顶煤气循环研究,找出煤气循环过程中的变化规律,以确定适宜的循环参数来满足高炉生产。

该造气炉是利用普通工业煤制造冶金煤气的半沸腾熔融制气炉,设计为4段式:生产时半沸腾熔融制气炉内部形成液态区、燃烧固定床区、还原、预热和布料半沸腾床区;下部风口喷入的气化剂和煤产生逆向运动,可以充分接触、反应,保证造气炉的CO₂转化率为95%以上;实现燃烧制气、产生H₂、循环利用高炉炉顶煤气和液态排渣功能。

1 数学模型的建立

炉顶煤气循环数学模型的建立是以传统高炉和造气炉实际反应过程为基准,以物料平衡和热平

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1360205)

作者简介: 刘 颂(1990—),男,博士生; **E-mail:** 358958433@qq.com; **收稿日期:** 2017-07-17

通讯作者: 吕 庆(1954—),男,博士,教授; **E-mail:** luqingts@163.com

衡计算为基础,参考现场原料成分和实际操作参数,结合新工艺思路编制的,是新工艺研究和最优参数确定的基础,能较准确反映新工艺下煤气经过高炉、造气炉时成分、温度等指标的变化情况,不同因素对循环过程的影响规律和不同参数下能否满足整个循环过程等问题^[13-19]。

炉顶煤气循环数学模型计算过程如图 1 所示。图 1 中,参数 a 为根据实际情况确定的煤气成分变化量; n_1 和 n_0 分别为不同循环时间下某种气体体积分数。当满足条件时,此后的煤气循环过程中成分基本无较大变化。计算过程中如果高炉、造气炉热量平衡不能满足其工艺正常运行,将停止循环,修改工艺条件后重新进行循环计算,直到确定适宜的循环参数。

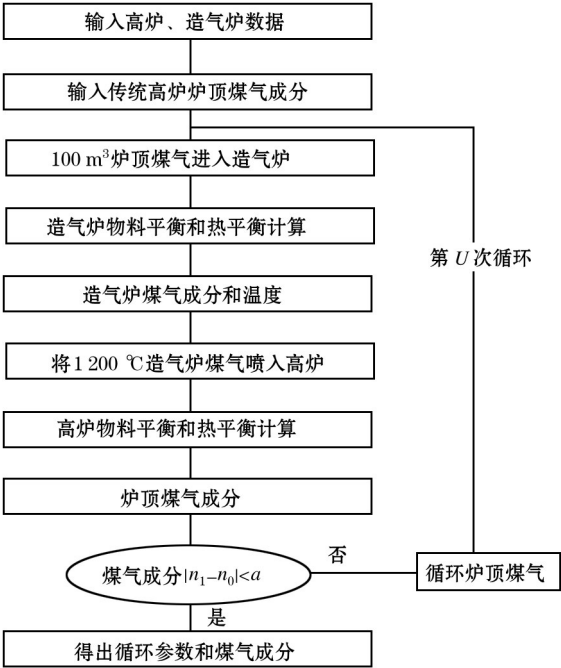


图 1 炉顶煤气循环计算流程
Fig. 1 Calculation flow of top gas recycling

2 结果与分析

2.1 原始数据

在炉顶煤气循环系统中,高炉部分所用原料为邯钢 2 500 m³高炉现场数据,设定煤比为 0 kg/t(Fe);铁的直接还原度 r_d 为 0.1^[20];氢气利用率 η_{H_2} 为 0.4;鼓风湿度为 1.5%;炉顶煤气温度为 200 ℃;鼓风温度为 1 200 ℃;富氧率为 2%。

以造气炉现场数据为基础,选取空气为造气剂,富氧率为 15%;炉顶煤气温度和鼓风温度都为 200 ℃,造气炉 CO₂ 转化率为 95% 以上。造气用煤成分见表 1,高炉炉顶煤气成分见表 2。

表 1 煤成分组成(质量分数)
Table 1 Elements of coal composition %

C	H	O	N	S	A	M
69.78	5.20	10	8.51	0.10	6.20	8.59

注: A 为灰分;M 为水分。

表 2 炉顶煤气成分(体积分数)
Table 2 Composition of top gas %

H ₂	CO	CO ₂	N ₂	CH ₄	H ₂ O
2.83	22.00	23.22	50.90	0.30	0.75

以传统高炉炉顶煤气成分为基准,鼓入造气炉与煤反应进行造气,将 1 200 ℃ 的造气炉煤气喷入高炉对原料进行还原,高炉煤气从炉顶排出再次进入造气炉完成一次煤气循环。本研究利用该方法进行造气炉、高炉系统循环,找出不同循环参数下造气炉、高炉运行规律,保证高炉合理高效生产。

2.2 炉顶煤气量与造气炉耗煤及成分的关系

将不同体积的高炉炉顶煤气喷入造气炉进行造气,在保证造气炉煤气出口温度为 1 200 ℃ 的条件下,改变煤量后,富氧率为 15%,造气炉煤气成分变化及运行情况见表 3。

表 3 不同高炉炉顶煤气量的计算结果
Table 3 Result in different top gas consumptions of BF

煤气量/m ³	煤量/kg	造气炉煤气					热收入/kJ	煤气温度/℃
		体积/m ³	CO/%	H ₂ %	N ₂ %	CH ₄ %		
0	105	277.20	46.11	12.69	41.20	0	2 967 637	1 200
50	162	467.02	47.07	12.00	40.90	0.03	4 588 639	1 200
100	219	656.85	47.47	11.71	40.77	0.05	6 209 640	1 200
150	276	846.67	47.70	11.55	40.70	0.05	7 830 641	1 200
200	333	1 036.50	47.84	11.45	40.65	0.06	9 451 642	1 200
250	390	1 226.33	47.94	11.38	40.62	0.06	11 072 643	1 200
300	447	1 416.15	48.01	11.33	40.60	0.06	12 693 644	1 200

造气炉煤气成分和煤量与高炉煤气量的关系如图2所示。

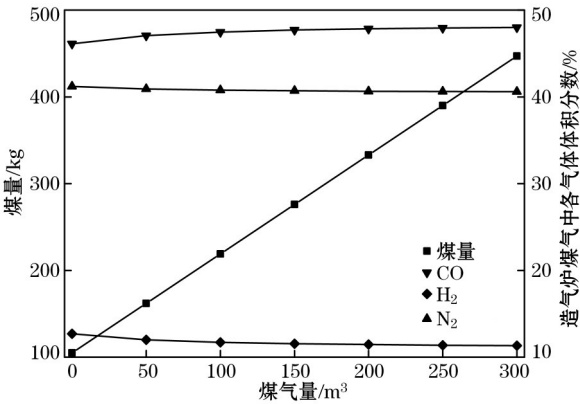


图2 高炉煤气量与造气炉煤气成分和煤量的关系
Fig. 2 Relationship between amount of blast furnace gas and gas composition as well as coal content of gas-making furnace

由图2可知,随着鼓入高炉煤气量的增加,造气炉煤气中CO和CH₄体积分数升高,N₂和H₂体积分数降低。为保证造气炉出口煤气温度稳定在1 200 ℃,需要更多的煤来提供热量,因此生成的CO气体增多,提高了造气炉煤气的还原能力。随着煤气量的增加,造气炉煤气成分逐渐稳定,有利于实现整个循环的稳定生产。

2.3 高炉煤气循环时间的确定

根据造气炉的运行情况和还原气体在高炉内的反应效果,选取造气炉煤量为219 kg,高炉炉顶煤气量为100 m³,高炉焦比为250 kg,喷吹造气炉煤气量为500 m³,进行高炉、造气炉整体循环。

循环以高炉煤气经过造气炉还原之后从风口喷入高炉进行反应,回到炉顶为一次。热量收支差是指高炉或造气炉在反应过程中总的热量收入减去总的热量支出,从热平衡上表示验证运行能否实现。如果热量收支差数值为正,代表整个循环过程中热量能够满足反应的进行;反之,说明热量不足。

确定高炉有效容积为2 500 m³,有效高度为29.4 m,鼓风量为3 000 m³/t(Fe),不考虑高压操作和煤气输送管道距离。根据文献[21-23]和高炉、造气炉生产情况,炉喉处空炉速度为1.1 m/s,考虑煤气的滞后、混合和计算的准确度等因素取煤气排出平均速度为0.8 m/s。从高炉风口到炉喉排出时间为29.4÷0.8=36.75 s。造气炉有效高度为8 m,造气能力为500 m³/t(Fe)^[20],煤气流速设定为0.6 m/s。从造气炉风口到炉顶排出时间为8÷0.6=13.30 s。选择确定高炉煤气循环1次时间为36.75+13.3=50.05 s。其运行情况见表4。

表4 不同循环时间的造气炉计算结果
Table 4 Calculation result of gas-making furnace in different cycle time

循环时间/s	煤量/kg	造气炉煤气					热收入量/kJ	煤气温度/℃
		体积/m³	CO/%	H₂/%	N₂/%	CH₄/%		
50.05	219	656.85	47.47	11.71	40.77	0.05	6 209 640	1 200
100.10	265	761.76	48.01	12.51	39.45	0.03	7 504 695	1 200
150.15	265	761.76	48.04	12.55	39.38	0.03	7 504 686	1 200
200.20	265	761.76	48.04	12.55	39.38	0.03	7 504 686	1 200

表4中第1个周期的循环是以传统高炉炉顶煤气成分开始,其成分中还原性气体体积分数高,而之后进入造气炉的煤气都是喷吹煤气高炉反应之后的炉顶煤气,其成分中还原性气体体积分数明显下降。造气炉中的煤起到把CO₂转化为CO的作用,同时提供热量。因此,之后的循环所需煤量明

显高于第1个周期的循环。

不同循环时间的高炉计算结果和炉顶煤气成分分别见表5和表6。

2.3.1 炉顶煤气循环对造气炉工艺参数的影响

不同循环时间下所需煤量和造气炉煤气成分的变化如图3所示。

表5 不同循环时间的高炉计算结果
Table 5 Calculation result of blast furnace in different cycle time

循环时间/s	风量		热收入量/kJ	热量收支差	
	体积/m³	质量/kg		热量/kJ	比例/%
50.05	545.31	700.36	3 131 708	117 263	3.74
100.10	545.31	700.36	3 131 284	94 816	3.03
150.15	545.31	700.36	3 131 272	93 703	2.99
200.20	545.31	700.36	3 131 272	93 703	2.99

表 6 不同循环时间的炉顶煤气成分
Table 6 Composition of furnace top gas in different cycle time

循环时间/s	炉顶煤气						
	体积/m ³	CO/%	H ₂ /%	CO ₂ /%	N ₂ /%	CH ₄ /%	H ₂ O/%
50.05	1 255.64	3.99	3.10	39.12	50.09	0.26	3.44
100.10	1 255.64	4.33	3.29	39.00	49.57	0.25	3.56
150.15	1 255.64	4.35	3.30	38.99	49.54	0.25	3.57
200.20	1 255.64	4.35	3.30	38.99	49.54	0.25	3.57

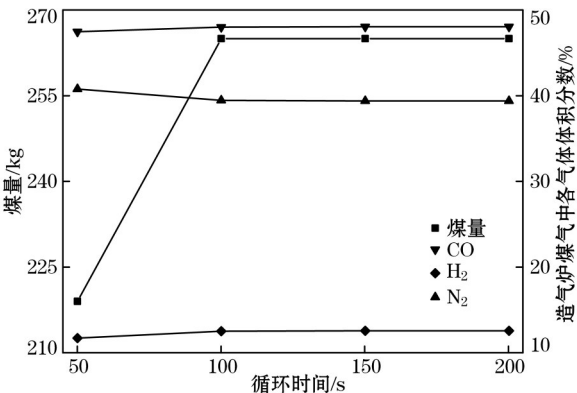


图 3 造气炉煤气成分和煤量与循环时间的关系
Fig. 3 Relationship between cycle time and gas composition as well as coal content of gas-making furnace

图 3 中,第 1 个周期为 0~50.05 s,煤量连续变化。由图 3 可知,随着循环时间的增加,所需煤量增多,造气炉煤气中 H₂和 CO 体积分数升高,N₂体积分数降低,在循环 150.15 s 时,造气炉成分和所需煤量基本稳定,保证了稳定生产。

2.3.2 炉顶煤气循环对高炉工艺参数的影响

炉顶煤气成分随循环时间的变化如图 4 所示。

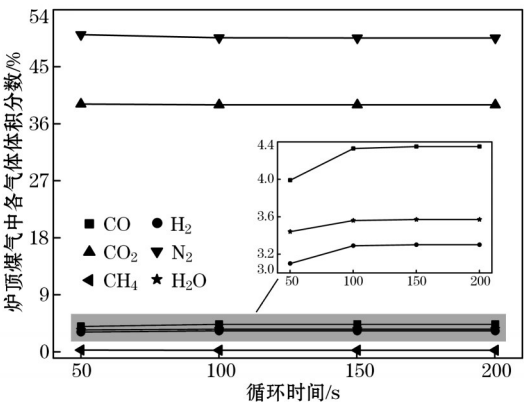


图 4 循环时间与炉顶煤气成分的关系
Fig. 4 Relationship between cycle time and composition of top gas

由图 4 可知,随着循环时间的增加,炉顶煤气中 H₂、H₂O 和 CO 体积分数升高,N₂和 CO₂体积分数降

低,在循环 150.15 s 时,H₂、H₂O、CO、CO₂、N₂和 CH₄ 的体积分数分别稳定在 3.3%、3.57%、4.35%、38.99%、49.54%和 0.25%。

高炉总热收入和热量收支差随循环时间的变化如图 5 所示,其用于验证喷吹煤气工艺能否满足高炉的热量要求。

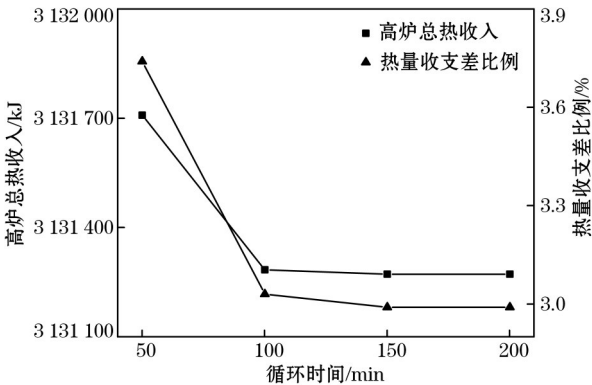


图 5 循环时间与高炉总热收入和热量收支差的关系
Fig. 5 Relationship between cycle time and heat income as well as heat payment balance of blast furnace

由图 5 可知,随着循环时间的增加,高炉总热收入和热量收支差比例降低,循环 150.15 s 时,分别稳定在 3 131 272 kJ 和 2.99%。

3 结论

(1) 随着鼓入高炉煤气量的增加,造气炉煤气量和总热收入升高;造气炉煤气中 CO 和 CH₄ 体积分数升高,N₂和 H₂ 体积分数降低,且造气炉煤气成分逐渐稳定,有利于实现整个循环的稳定生产。

(2) 以造气炉、高炉计算数据为基础,对炉顶煤气循环进行模拟。随着循环时间的增加,所需煤量增多,造气炉煤气中 H₂和 CO 体积分数升高,N₂ 体积分数降低;高炉中总热收入和热量收支差降低,炉顶煤气中 H₂和 CO 体积分数升高,N₂和 CO₂ 体积分数降低。

(3) 不同循环时间下,由于进入造气炉、高炉气体的变化,造气炉煤气和炉顶煤气也产生相应的改变,

但随着煤气循环 150.15 s 后,最终气体成分基本不变。高炉喷吹煤造气新工艺能满足高炉的运行。

参考文献:

- [1] 储满生,郭宪臻,沈峰满.高炉喷吹还原气操作的数学模拟研究[J].中国冶金,2007,17(6):34.(CHU Man-sheng, GUO Xian-zhen, SHEN Feng-man. Research on mathematical simulation of operation of blast furnace injected in reducing gas[J]. China Metallurgy, 2007, 17(6): 34.)
- [2] 陶荣尧,朱锦明.宝钢高炉大喷吹煤冶炼的能耗结构及CO₂排放量的变化[J].宝钢技术,2000(3):6.(TAO Rong-yao, ZHU Jin-ming. Energy consumption structure and CO₂ emission variation of large injection coal smelting at Baosteel blast furnace[J]. Baosteel Technology, 2000(3): 6.)
- [3] 张寿荣.炼铁系统节能——我国钢铁工业21世纪技术进步的重点[J].钢铁,2005,40(5):1.(ZHANG Shou-rong. Energy saving of ironmaking system—the key point of technical progress of China's iron and steel industry in twenty-first century[J]. Iron and Steel, 2005, 40(5): 1.)
- [4] 周春林,刘春明,董亚锋,等.国外炼铁状况及中国炼铁发展方向[J].钢铁,2008,43(12):1.(ZHOU Chun-lin, LIU Chun-ming, DONG Ya-feng, et al. Status of ironmaking abroad and development direction of ironmaking in China[J]. Iron and Steel, 2008, 43(12): 1.)
- [5] 徐匡迪.低碳经济与钢铁工业[J].钢铁,2010,45(3):1.(XU Kuang-di. Low carbon economy and iron and steel industry[J]. Iron and Steel, 2010, 45(3): 1.)
- [6] Nogami H, Yagi J I, Kiatmura S Y, et al. Analysis on material and energy balances of ironmaking systems on blast furnace operations with metallic charging, top gas recycling and natural gas injection[J]. ISIJ International, 2006, 46(12): 1759.
- [7] 金永龙,何志军,关志刚,等. H₂含量对冶炼过程影响的实践与理论分析[J].钢铁,2011,46(5):15.(JIN Yong-long, HE Zhi-jun, GUAN Zhi-gang, et al. Practice and theoretical analysis of the influence of H₂ content on smelting process[J]. Iron and Steel, 2011, 46(5): 15.)
- [8] 王锋,严定鑒,王海风,等.鼓风参数对炉顶煤气循环高炉的影响分析[J].钢铁研究学报,2014,26(5):8.(WANG Feng, YAN Ding-liu, WANG Hai-feng, et al. Analysis of influence of blast parameters on top gas circulating blast furnace[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2014, 26(5): 8.)
- [9] 苏亚杰,蔡涓夏,杜英虎,等.煤制气直接还原铁两段串联流程估算[J].中国冶金,2017,27(5):27.(SU Ya-jie, CAI Meixia, DU Ying-hu, et al. Estimation of two-section series DRI process using coal gas[J]. China Metallurgy, 2017, 27(5): 27.)
- [10] 刘颖昊,刘涛.基于LCA的高炉喷吹塑料节能减排研究[J].钢铁,2012,47(9):79.(LIU Ying-hao, LIU Tao. Research on energy saving and emission reduction of blast furnace injection plastics based on LCA[J]. Iron and Steel, 2012, 47(9): 79.)
- [11] 胡俊鸽,车玉满,周文涛.高炉喷吹炉顶煤气技术的进展[J].炼铁,2010,29(5):56.(HU Jun-ge, CHE Yu-man, ZHOU Wentao. Development of blast furnace top gas blowing technology[J]. Iron Smelting, 2010, 29(5): 56.)
- [12] 李福民.喷吹煤气高炉的炉料同化过程研究[D].沈阳:东北大学,2009.(LI Fu-min. Study on Burden Assimilation Process of Blast Furnace Gas Injection[D]. Shenyang: Northeastern University, 2009.)
- [13] Pukhow A P, Stelin B M, Tseitlin M A, et al. Introduction of blast furnace technology involving injection of hot reducing gas steel[J]. USSR, 1991, 21(8): 333.
- [14] 刘栋昌,葛履明,李世模.按周期式操作的冶金还原气造气炉数学模型[J].成都科技大学学报,1982(2):61.(LIU Dongchang, GE Lü-ming, LI Shi-mo. A mathematical model of metallurgical reduction gas gasifier by periodical operation[J]. Journal of Chengdu University of Science and Technology, 1982(2): 61.)
- [15] 李燕江,吕庆,白瑞国,等.含钛炉渣稀释剂对喷吹煤粉燃烧性能的影响[J].钢铁,2016,51(4):8.(LI Yan-jiang, LÜ Qing, BAI Rui-guo, et al. Influence of titanium-bearing slag diluents on combustion performance of pulverized coal injection[J]. Iron and Steel, 2016, 51(4): 8.)
- [16] 张统忠,余雪峰,薛庆国,等.不同喷吹煤种对除尘灰中未燃煤粉影响[J].钢铁,2016,51(3):9.(ZHANG Tong-zhong, SHE Xue-feng, XUE Qing-guo, et al. Different coal injection on unconsumed pulverized coal in BF dust[J]. Iron and Steel, 2016, 51(3): 9.)
- [17] 高建强,钟锡镇,王艳,等.O₂/CO₂煤粉锅炉炉膛实时仿真模型研究[J].华北电力大学学报,2012,39(5):82.(GAO Jian-qiang, ZHONG Xi-zhen, WANG Yan, et al. Research on real time simulation model of O₂/CO₂ pulverized coal fired boiler furnace[J]. Journal of North China Electric Power University, 2012, 39(5): 82.)
- [18] Klas Andersson, Filip Johnsson. Flame and radiation characteristics of gas-fired O₂/CO₂ combustion[J]. Fuel, 2007(86): 656.
- [19] 张旭升.高炉喷煤新技术的研究——高炉炉顶煤气循环利用的研究[D].唐山:河北联合大学,2015.(ZHANG Xu-sheng. Study on the New Technology of Pulverized Coal Injection in the Blast Furnace—The Research of Recycling Top Gas on Blast Furnace[D]. Tangshan: Union University of Hebei, 2015.)
- [20] 续飞飞,程树森,赵宏博,等.高炉块状带压差模型[J].钢铁研究学报,2013,25(5):8.(XU Fei-fei, CHENG Shu-sen, ZHAO Hong-bo, et al. Pressure difference model of blast furnace massive zone[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2013, 25(5): 8.)
- [21] 程素森,薛庆国.高炉炉料运动过程数学模型的建立及其数值模拟[J].金属学报,1999,35(4):407.(CHENG Su-sen, XUE Qing-guo. Establishment and numerical simulation of mathematical model for blast furnace burden movement[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1999, 35(4): 407.)
- [22] 郗亚娜.喷吹煤造气高炉煤气流数值模拟[D].唐山:河北联合大学,2014.(QIE Ya-na. Numerical Simulation on Gas Flow in Blast Furnace with the Injection of the Gas Made from Coal[D]. Tangshan: Union University of Hebei, 2014.)
- [23] 董择上,薛庆国,左海滨,等.氧气高炉喷吹焦炉煤气数学模型[J].钢铁,2017,52(4):18.(DONG Ze-shang, XUE Qing-guo, ZUO Hai-bin, et al. Mathematical model analysis on coke oven gas injection into oxygen blast furnace[J]. Iron and Steel, 2017, 52(4): 18.)