

# 干馏温度对高炉喷吹用半焦可磨性能的影响研究

邹冲 李宝 赵俊学 李小明

(西安建筑科技大学 冶金工程学院 陕西 西安 710055)

**摘要:** 为了研究干馏温度对高炉喷吹用低温干馏半焦可磨性能的影响,采用哈氏可磨性指数测定仪研究了3种原煤在不同干馏温度下制得半焦的可磨性,并采用激光粒度分析仪考查了半焦的破碎特征。研究表明,半焦的可磨性指数随着干馏温度的提高,呈现先升高后降低的趋势,低温干馏半焦的最大可磨性指数对应的最佳干馏温度为540℃;煤的可磨性预测方程不能预测半焦的可磨性;半焦的破碎过程以体积破碎为主,也进行表面破碎,干馏温度对半焦的破碎特征影响较大,半焦破碎后的粒度大小与可磨性存在对应关系。在煤低温干馏的规模化生产过程中,可以通过适当降低现有干馏操作条件优化半焦的可磨性能,以利于低温干馏半焦在高炉喷吹中的应用。

**关键词:** 半焦; 低温干馏; 干馏温度; 可磨性; 粒度分布

中图分类号: TQ534 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2016)01-0071-06

## Effects of pyrolysis temperature on grindability of char using pulverized coal injection in Blast furnace

ZOU Chong, LI Bao, ZHAO Junxue, LI Xiaoming

(School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** In order to investigate the effects of pyrolysis temperature on grindability of char, Hardgrove grindability index (HGI) of different char prepared from three kinds of coal was tested by HGI apparatus, and the crushing feature of chars was investigated by laser particle size analyzed. The results showed that the grindability of char increased first then decreased with the increase of pyrolysis temperature. The pyrolysis temperature corresponding to the highest value of HGI was 540℃. The grindability of char couldn't be predicted by the prediction equations of coal. The pulverization pathway of char was volume crushing-based, followed by surface crushing. The pyrolysis temperature played a critical role in char crushing process, and there should be corresponding relationships between the level of particle size and grindability. During the low temperature pyrolysis technology, the grindability of char for using PCI could be improved by properly decreasing the pyrolysis temperature in the scale production of lower temperature pyrolysis of coal.

**Key words:** char; low temperature pyrolysis; pyrolysis temperature; grindability; particle size distribution

## 0 引 言

高炉喷吹煤粉作为降低生铁成本、减轻环境污染和优化工艺结构的重要技术手段,被国内外钢铁企业广泛重视<sup>[1]</sup>。为了兼顾燃料的煤/焦置换比和燃烧效率,目前国内外钢铁企业大多采用烟煤、无烟煤或混合煤进行高炉喷吹,其中无烟煤是喷吹单种煤或混合煤的主体煤种<sup>[2]</sup>。然而,无烟煤储量仅占

我国煤炭储量的10.9%,稀缺性不断凸显,优质喷吹无烟煤的价格逐年提高,导致高炉喷吹煤粉的成本不断增长。因此,寻求喷吹新型燃料代替无烟煤进行高炉喷吹是冶金工作者研究的重点。低温干馏半焦(又称兰炭)是以长焰煤、不黏结煤或弱黏结煤等高挥发烟煤在中低温条件下干馏得到的较低挥发分的固体碳质产品。近年来,国内学者根据半焦的固定碳含量高、硫含量低和灰分低等优点,提出利用

收稿日期: 2015-09-28; 责任编辑: 孙淑君 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2016.01.014

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51374166)

作者简介: 邹冲(1988—),男,陕西西安人,讲师,博士,从事冶金煤洁净利用方面的研究。E-mail: zouchong985@163.com

引用格式: 邹冲,李宝,赵俊学,等.干馏温度对高炉喷吹用半焦可磨性能的影响研究[J].洁净煤技术,2016,22(1):71-76.

ZOU Chong, LI Bao, ZHAO Junxue et al. Effects of pyrolysis temperature on grindability of char using pulverized coal injection in Blast furnace [J]. Clean Coal Technology 2016, 22(1): 71-76.

半焦作为高炉喷吹原料,替代部分价格高昂的喷吹无烟煤的思路,并进行了基础研究和工业实验<sup>[3-6]</sup>。研究表明,兰炭末在高炉喷吹利用过程中具有输送性能良好、无爆炸性和置换比高等优势,是潜在的优质高炉喷吹燃料之一。然而,半焦的可磨性存在着较大的波动性<sup>[4,7-10]</sup>,若半焦的可磨性能较差,配加到喷吹燃料中则会造成混合煤的可磨性降低<sup>[4]</sup>,使磨煤成本明显增加,在一定程度上限制了其高炉喷吹中的应用。因此,研究调控半焦可磨性能的方法不但能扩大廉价燃料在高炉喷吹燃料所占比例,降低高炉炼铁成本,而且能提高半焦的资源化利用率。

煤的可磨性与煤的硬度、强度、韧性以及解离程度紧密相关<sup>[11]</sup>。这些性质又受煤的变质程度<sup>[12]</sup>、煤岩成分<sup>[13]</sup>、煤质类型<sup>[14]</sup>以及矿物质分布特性<sup>[15]</sup>的影响。通过对相关影响因素的评估,可得到不同的煤可磨性预测方法及模型<sup>[11,14,16]</sup>。然而,目前还没有关于半焦可磨性能的影响因素的研究报道。笔者在文献调研的基础上,通过实验考查了干馏温度对半焦的可磨性能影响,并探讨半焦可磨性能与破碎机理之间可能存在的联系。

## 1 低温干馏半焦的可磨性能影响因素分析

图1为文献中36种半焦样本的可磨性能分布及与挥发分的关系<sup>[4-7,9,17-20]</sup>。由图1可见,半焦的哈氏可磨指数(HGI)在30~90波动,其中仅有14种半焦满足高炉对喷吹燃料可磨性的要求(HGI>60)<sup>[21]</sup>,半焦的可磨性与挥发分间的关联性不强。这说明不同样本半焦的可磨性不但受到半焦性质影响,还受到干馏煤性质、干馏方式及干馏条件等多方面因素的制约。

图2为文献中5种半焦的干馏温度与可磨性的关系<sup>[3,10]</sup>,由图2可知,干馏温度对半焦的可磨性的影响很大。可见,干馏温度是影响单一煤种可磨性

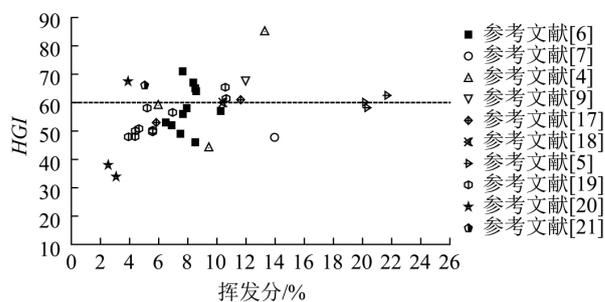


图1 半焦的挥发分与可磨性的关系

Fig. 1 The relationship between volatile and HGI

能的重要因素,应进一步研究半焦干馏温度和可磨性之间的联系。本文在以上文献调研的基础上,采用哈氏可磨性指数测定仪研究了3种原煤在不同干馏温度下制得半焦的可磨性,并采用激光粒度分析仪考查了半焦的破碎特征与半焦可磨性能之间可能存在的联系。

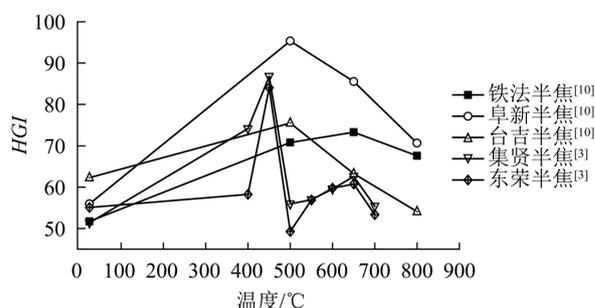


图2 半焦干馏温度与可磨性的关系

Fig. 2 The relationship between pyrolysis temperature and HGI

## 2 实验

### 2.1 实验原料

实验所用煤样分别是取自陕北地区不同煤矿的3种煤:孙家岔煤(SJC)、王家沟煤(WJG)和碱房沟煤(JFG)。煤质工业分析和元素分析见表1。由工业分析可知,3种煤的挥发分在35%左右,变质程度接近,均为典型的长焰煤。

表1 煤样的工业分析和元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of the coal

%

样品	工业分析					元素分析				
	$M_t$	$M_{ad}$	$A_{ad}$	$V_{ad}$	$FC_{ad}$	$w(C_{ad})$	$w(H_{ad})$	$w(O_{ad})$	$w(N_{ad})$	$w(S_{t ad})$
JFG	8.20	1.2	5.75	35.62	57.43	74.98	4.77	11.69	1.24	0.37
WJG	5.8	1.04	6.90	34.38	57.68	74.84	4.56	11.26	1.02	0.38
SJC	9.6	3.41	2.64	37.79	56.16	76.84	4.71	11.61	0.99	0.26

## 2.2 实验方法

### 2.2.1 半焦的制备

采用竖式干馏炉制备低温干馏半焦样品, 实验装置示意如图 3 所示。将 0.25 kg 样品置于炉内, 在高纯氮气气氛下, 将样品按程序升温加热到干馏温度并保温 10 min, 干馏终温分别为 420、480、540、600 和 660 °C。采用两级冷却收集焦油。干馏完成后先将半焦取出并置于干燥皿中保存, 再进行进一步性质分析。

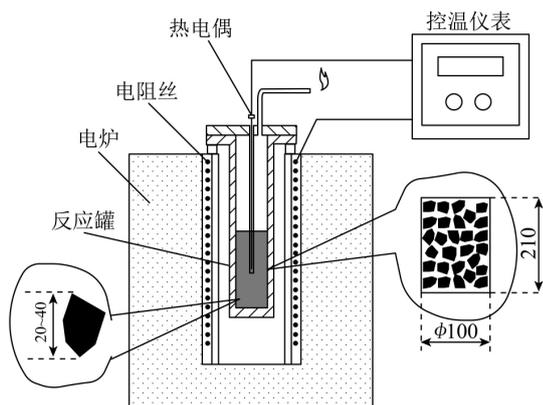


图 3 干馏实验装置示意

Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus for pyrolysis

### 2.2.2 可磨性的检测

可磨性采用 CNK-60 哈德格罗夫可磨性指数测定仪并按照 GB/T 2565—2014《煤的可磨性指数测定方法》中哈德格罗夫法的规定进行分析。为了排除实验误差, 对每种干馏样品分别进行 3 次可磨性指数的检测。

定方法》中哈德格罗夫法的规定进行分析。为了排除实验误差, 对每种干馏样品分别进行 3 次可磨性指数的检测。

### 2.2.3 粒度的检测

采用 Malvern 激光粒度分析仪 (Mastersizer 2000) 检测经可磨性测试后所得半焦的粒度分布。

## 3 结果与分析

### 3.1 干馏温度对半焦组分的影响

温度是影响煤干馏的最主要因素<sup>[22-23]</sup>。干馏是使煤中的氢富集到焦油和煤气中, 同时得到富碳的半焦的过程。为了建立干馏温度与半焦可磨性的关系, 首先考查了干馏温度对半焦组分的影响。不同干馏温度下半焦的工业分析结果如图 4 所示。由图 4 可知, 随着干馏温度的提高, 煤的转化率不断提高, 煤中挥发分析出率提高, 半焦中挥发分降低, 固定碳和灰分在半焦中所占比例增加, 这是由于煤中有机质在进行裂解反应的结果。在 420 ~ 540 °C, 半焦成分随温度变化最明显, 这一阶段主要是煤中弱键发生断裂, 生成大量的一次焦油和小分子碳氢化合物。540 ~ 660 °C, 半焦的成分随温度变化趋势减弱, 此阶段半焦主要以热缩聚为主, 煤气的析出减少, 灰分和固定碳趋于稳定。目前, 国内低阶煤低温干馏主要采用内热直立式炉, 干馏温度在 580 ~ 700 °C, 因而煤的热解转化率较高, 半焦中挥发分一般低于 8%。

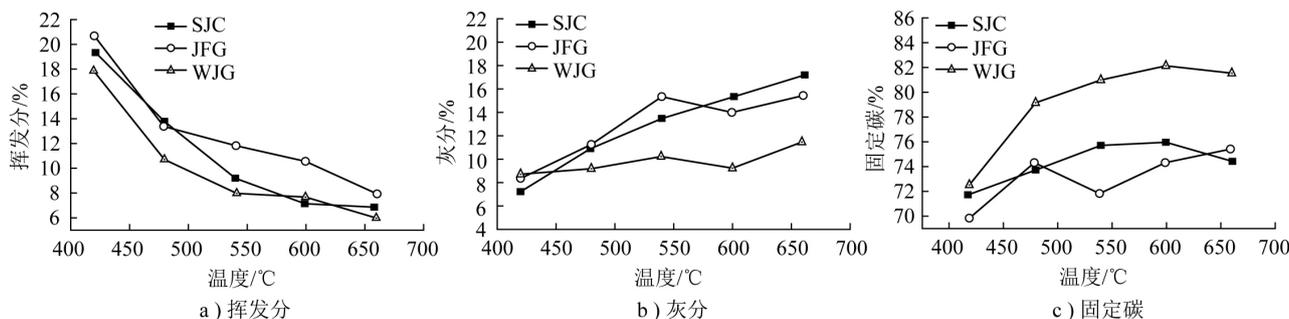


图 4 不同干馏温度下半焦的工业分析

Fig. 4 The proximate analysis of char under the different pyrolysis temperature

### 3.2 干馏温度对半焦可磨性的影响

文献[16 24-25]采用煤质的工业分析统计学规律预测 HGI, 并具有较高的相关系数。对实验制得的半焦也按照此模型中的一次预测方程(1)和二次预测方程(2)进行预测,

$$HGI = 95.11266 - 1.869M - 0.9145V + 0.46A \quad (1)$$

$$HGI = -167.5 - 10.1M + 4.933A + 2.17V + 2.55FC + 1.99M^2 - 0.0356A^2 - 0.0015V^2 - 0.0038FC^2 \quad (2)$$

依据模型对半焦可磨性的预测结果(图中(1)、(2)分别代表采用方程(1)和(2)计算)如图 5 所示。由图 5 可知, 尽管 2 种方程预测的半焦可磨指数差异较大, 但总体规律为: 随着干馏温度升高, 可

磨性指数提高。

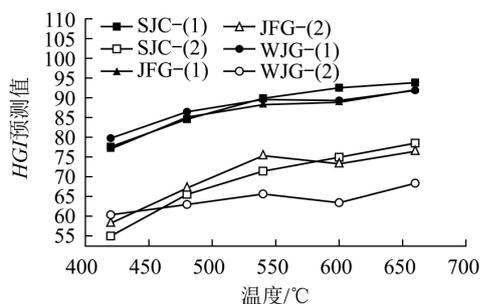


图5 不同温度下半焦可磨性指数的预测值

Fig. 5 The predicted value of HGI of char under different pyrolysis temperatures

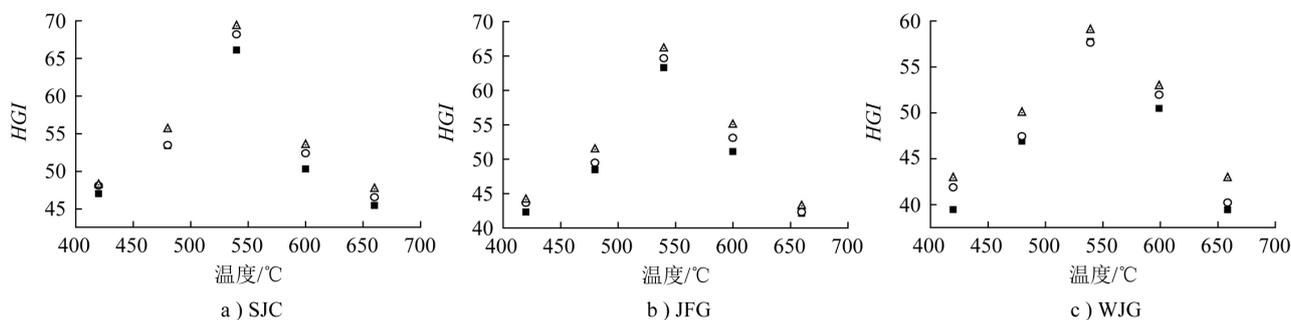


图6 不同干馏温度下半焦可磨性指数的实验值

Fig. 6 The experiment value of char under different pyrolysis temperature

但在 540 °C 之后,两者的趋势明显不同。这表明,煤的可磨性指数的预测方程不适用于半焦的可磨性预测。分析认为,尽管多种因素都会影响半焦的可磨性指数,但当煤种和干馏方式确定后,干馏温度对半焦的化学组成影响最为明显。赵虹等<sup>[12]</sup>研究表明,在煤中挥发分较高的条件下,随着挥发分的降低,可磨性指数升高;但当煤中挥发分较低时,再降低挥发分则会使可磨性指数降低,这表明挥发分对半焦和煤的可磨性能的影响规律一致。

在最大可磨性对应的干馏温度条件下,王家沟煤和孙家岔煤制得的半焦固定碳含量接近干馏过程中的最大值,而碱房沟煤的固定碳含量较低(见图 4c)。这说明固定碳含量和可磨性之间的关联性弱于挥发分与可磨性之间的关联性。

### 3.3 干馏温度对半焦破碎特征的影响

为了进一步研究不同温度条件下制得半焦的破碎规律,对经过可磨性测试后的样品进行了破碎特征的分析。张妮妮等<sup>[26]</sup>研究表明,煤颗粒的粉碎是体积粉碎和表面粉碎 2 种模型的叠加,表面粉碎模型构成最终的细粉产物,体积粉碎模型构成中间过度的粗粉成分。本文以孙家岔煤制得的半焦为代

采用可磨性指数测定仪得到半焦样品的可磨性指数如图 6 所示。由图 6 可见,半焦的可磨指数随着干馏温度的提高,呈现先升高后降低的趋势,这与文献 [3, 10] 中的规律一致,低温干馏半焦的最大可磨性指数对应的干馏温度为 540 °C,制得半焦均满足或基本满足高炉喷吹对可磨性的要求。此外 3 种煤制得的半焦可磨性指数也存在一定差异,按照由大到小的顺序为:孙家岔煤>碱房沟煤>王家沟煤。

对比可磨性指数的预测值和实验值发现,在 540 °C 之前,尽管预测值和实验值的绝对数值存在差异,但两者的趋势基本一致,即随着干馏温度升高,半焦的可磨性增加。

表 1 分析干馏温度对半焦破碎特征的影响。经过可磨性测试后半焦颗粒粒径分布及经过孔径为 74 μm 的筛子筛分后的筛下物粒径分布分别如图 7 和图 8 所示。

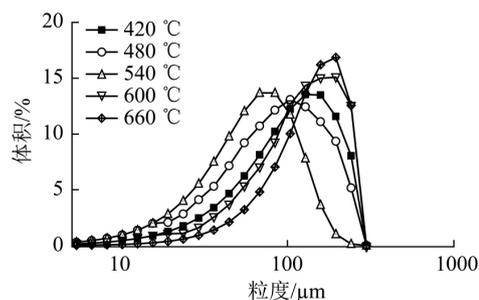


图7 不同样品经过可磨性测试后的粒度分布

Fig. 7 The particle size distribution of different samples after HGI test

由图 7 可见,半焦颗粒的粒径分布曲线粗粉和细粉分布较为均匀,粗细颗粒过渡平缓,表明半焦的破碎过程以体积破碎为主,也进行表面破碎。5 种半焦颗粒的分布区间差异较为明显,干馏温度为 420、480、540、600 和 660 °C 的半焦的颗粒分别集中在: 80 ~ 250、70 ~ 200、30 ~ 100、80 ~ 250 和

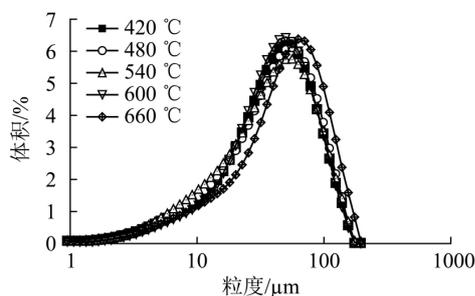


图8 不同样品经过可磨性检测后 74  $\mu\text{m}$  筛下物的粒度分布

Fig. 8 The particle size distribution of different samples after HGI test and screening by 74  $\mu\text{m}$

100 ~ 250  $\mu\text{m}$ 。对比图 6 发现,半焦的可磨性能与破碎后的粒度大小存在对应关系,改变干馏温度能明显改变半焦的破碎特征。

由图 8 可见,干馏温度为 420 ~ 600  $^{\circ}\text{C}$  条件下的 4 种半焦细粉主要颗粒分布区间范围差异不大,660  $^{\circ}\text{C}$  干馏温度下半焦的粒度明显大于其他 4 种半焦。不同粒径区间的颗粒所占比例有所不同,在 3 ~ 20  $\mu\text{m}$  四种半焦细粉的粒度分布对应的干馏温度为:540  $^{\circ}\text{C}$  最高,其次为 480  $^{\circ}\text{C}$ ,最低为 600  $^{\circ}\text{C}$  和 420  $^{\circ}\text{C}$ ;在 20 ~ 70  $\mu\text{m}$  粒度分布对应的干馏温度为:600  $^{\circ}\text{C}$  最高,其次为 420  $^{\circ}\text{C}$ ,再次为 480  $^{\circ}\text{C}$ ,最低为 540  $^{\circ}\text{C}$ 。由于筛下细粉对应的破碎类型为表面粉碎形式,说明存在最佳的干馏温度使半焦的表面粉碎最容易,较高或较低的干馏温度均不利于半焦的表面粉碎。

不同样品的平均粒度对比如图 9 所示。由图 9 可知,不论总体粒径和细粉半焦的平均粒度均随着干馏温度的升高先增加后降低,此趋势与半焦的可磨性能的变化趋势相同,进一步说明了两者的对应关系。

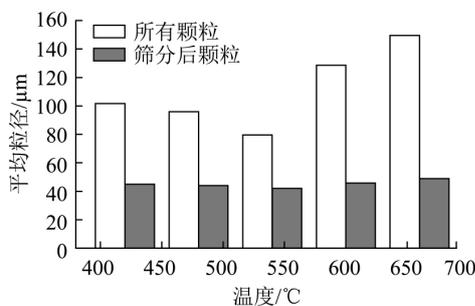


图9 不同样品的平均粒度

Fig. 9 The average particle size of different samples

目前规模化干馏装置的操作温度较高,使得半焦的可磨性变差,磨煤成本增加。通过以上研究表

明,干馏温度与半焦的可磨性及破碎特征之间的关系较为明确,即半焦的可磨性随着干馏温度的升高先增加后降低,破碎后的粒度则随着干馏温度的升高先减小后增大,存在一定干馏温度使半焦的可磨性能及破碎后粒径最佳。可以通过适当降低现有干馏操作条件优化半焦的可磨性能,以利于低温干馏半焦在高炉喷吹中的应用。

## 4 结 论

1) 干馏温度是影响高炉喷吹用低温干馏半焦可磨性能的重要指标,3种半焦的可磨指数随着干馏温度的提高,呈现先升高后降低的趋势,其最大可磨性指数对应的干馏温度为 540  $^{\circ}\text{C}$ ,制得半焦均满足或基本满足高炉喷吹对可磨性的要求,3种半焦可磨性指数按照由大到小的顺序为:孙家岔煤>碱房沟煤>王家沟煤。挥发分变化对半焦和煤的可磨性能的影响规律一致。

2) 半焦的破碎过程以体积破碎为主,也进行表面破碎,以最佳干馏温度为界(540  $^{\circ}\text{C}$ )较高或较低的干馏温度均不利于半焦粉碎,改变干馏温度能明显改变半焦的破碎特征,半焦破碎后的粒度大小与可磨性能存在对应关系。

3) 现有规模化煤低温干馏生产过程中,操作温度过高导致半焦可磨性能不佳( $HGI < 60$ )。可以通过适当降低现有干馏操作条件优化半焦的可磨性能,以利于低温干馏半焦在高炉喷吹中的应用。

## 参考文献:

- [1] Du S, Chen W, Lucas J A. Pulverized coal burnout in blast furnace simulated by a drop tube furnace [J]. Energy 2010, 35(2): 576-581.
- [2] Raygan S, Abdizadeh H, Rizi A E. Evaluation of four coals for blast furnace pulverized coal injection [J]. Journal of Iron and Steel Research International 2010, 17(3): 8-12.
- [3] 马国君,戴和武. 年轻煤热解半焦作高炉喷吹燃料的研究 [J]. 煤炭分析与利用, 1992, 3(1): 4-7. Ma Guojun, Dai Heyu. Research on the char of young coal reparation in pyrolysis for using blast furnace fuel [J]. Coal Analysis and Use, 1992, 3(1): 4-7.
- [4] 杨双平,蔡文森,郑化安,等. 高炉喷吹半焦及其性能分析 [J]. 过程工程学报, 2014, 14(5): 896-900. Yang Shuangping, Cai Wenmiao, Zheng Huanan, et al. Performance analysis of semi-coke for blast furnace injection [J]. The Chinese Journal of Process Engineering 2014, 14(5): 896-900.
- [5] 王雅军,张永,张静. 喷吹低温半焦的实验室研究 [J]. 包钢科技, 2012, 38(1): 6-8.

- Wang Yajun ,Zhang Yong ,Zhang Jing. Lab study of low-temperature semicokes for injection [J]. Science & Technology of Baotou Steel 2012 ,38(1):6-8.
- [6] 张典波,徐 辉,朱锦明. 宝钢2号高炉喷吹兰炭生产试验[J]. 炼铁 2015 34(1):40-43.  
Zhang Dianbo ,Xu Hui ,Zhu Jiming. Baosteel No. 2 blast furnace injection portland charcoal production test [J]. Ironmaking 2015 , 34(1):40-43.
- [7] 李鹏程,张建良,徐润生,等. 改质煤、兰炭和木炭作为高炉喷吹用燃料的基础研究[J]. 冶金能源 2015 34(3):41-45.  
Li Pengcheng ,Zhang Jianliang ,Xu Runsheng *et al.* Representation of characteristics for modified coal ,semi-coke and coke used in blast furnace injection [J]. Energy for Metallurgical Industry , 2015 34(3):41-45.
- [8] 张立国,任 伟,刘德军,等. 半焦作为高炉喷吹用煤研究[J]. 鞍钢技术 2015 391(1):13-17.  
Zhang Liguo ,Ren Wei ,Liu Dejun *et al.* Study on semi-coke used as pulverized coal for injection into blast furnace [J]. Angang Technology 2015 391(1):13-17.
- [9] 赵巧玲,张海龙. 高炉喷吹兰炭末工业试验研究[J]. 中小企业管理与科技 2014(11):314-315.  
Zhao Qiaoling ,Zhang Hailong. Industrial experimental study of semi-coke powder for blast furnace [J]. Management & Technology 2014(11):314-315.
- [10] 李永镇,李肇毅,阎劳拉,等. 半焦的爆炸性、可磨性的实验室研究[J]. 炼铁 1985 3(2):21-26.  
Li Yingzhen ,Li Zhaoyi ,Yan Laola *et al.* Lab Study of explosivity and grindability of semi-coke [J]. Ironmaking ,1985 3(2):21-26.
- [11] Rao B V ,Gopalakrishna S J. Hardgrove grindability index prediction using support vector regression [J]. International Journal of Mineral Processing 2009 91(1/2):55-59.
- [12] 赵 虹,郑 敏,周永刚. 不同煤化程度煤的可磨性指数变化和破碎特性[J]. 能源工程 2006(6):29-31.  
Zhao Hong ,Zheng Min ,Zhou Yonggang. Experimental investigation in the grinding behavior and the comminuting character of coals of different rank [J]. Energy Engineering 2006(6):29-31.
- [13] Chelgani S C ,Hower J C ,Jorjani E *et al.* Prediction of coal grindability based on petrography ,proximate and ultimate analysis using multiple regression and artificial neural network models [J]. Fuel Processing Technology 2008 89(1):13-20.
- [14] Hansen A E ,Hower J C. Notes on the relationship between micro-lithotype composition and Hardgrove grindability index for rank suites of Eastern Kentucky (Central Appalachian) coals [J]. International Journal of Coal Geology 2014 131(1):109-112.
- [15] Jorjani E ,Hower J C ,Chelgani S C *et al.* Studies of relationship between petrography and elemental analysis with grindability for Kentucky coals [J]. Fuel 2008 87(6):707-713.
- [16] Sengupta A N. An assessment of grindability index of coal [J]. Fuel Processing Technology 2002 76(1):1-10.
- [17] 焦 阳. 兰炭煤对酒钢高炉喷煤过程的影响研究 [D]. 唐山: 河北联合大学 2011.  
Jiao Yang. Effects of using semi-coke on pulverized coal injection process of BF of JISCO [D]. Tangshan: Hebei United University Master Thesis 2011.
- [18] 王 舜,张建良,祁成林,等. 兰炭用于高炉喷吹的可行性初探 [C]//第九届中国钢铁年会论文集,北京:冶金工业出版社 2013.  
Wang Shun ,Zhang Jianliang ,Qi Chenglin *et al.* Feasibility of semi-coke for blast furnace injection [C]//Ninth China Steel Symposium. Beijing: Metallurgical Industry Press 2013.
- [19] 竺维春. 神府半焦用于首钢高炉喷吹的实验室研究 [J]. 首钢科技 2000(6):12-14.  
Zhu Weichun. Laboratory studies Shenmu semi-coke for blast furnace injection of Shougang [J]. Shougang Technology 2000(6):12-14.
- [20] 代芳草,徐 君,王月明,等. 长焰煤热解产物高效利用的研究 [J]. 燃料与化工 2014 45(5):9-14.  
Dai Fangcao ,Xu Jun ,Wang Yueming *et al.* Study on how to use pyrolysis product of flaming coal with high-efficiency [J]. Fuel & Chemical Processes 2014 45(5):9-14.
- [21] 杜 刚,杨双平. 高炉喷吹用煤的可磨性研究 [J]. 钢铁研究 , 2012 40(6):16-30.  
Du Gang ,Yang Shuangping. Research on the grindability of pulverized coal used for blast furnace injection [J]. Research on Iron and Steel 2012 40(6):16-30.
- [22] Jiang H ,Zhang J ,Fu J *et al.* Properties and structural optimization of pulverized coal for blast furnace injection [J]. Journal of Iron and Steel Research International 2011 18(3):6-12.
- [23] 胡召永,解桂林,郭志航,等. 热解温度对高水分印尼褐煤半焦孔隙特征及燃烧特性的研究 [J]. 热力发电 2014 43(10):74-78.  
Hu Zhaoyun ,Xie Guilin ,Guo Zhihang *et al.* Effects of pyrolysis temperature on pore structure and combustion characteristics of high-moisture Indonesia lignite semi-coke [J]. Thermal Power Generation 2014 43(10):74-78.
- [24] Li P ,Xiong Y ,Yu D *et al.* Prediction of grindability with multivariable regression and neural network in Chinese coal [J]. Fuel , 2005 84(18):2384-2388.
- [25] 高建强,汪 宁,王玉兰. 1025 t/h 褐煤富氧燃烧锅炉制粉系统设计与分析 [J]. 热力发电 2015 44(2):106-109.  
Gao Jianqiang ,Wang Ning ,Wang Yulan. Design and analysis of coal pulverizing system of a 1025 t/h oxy lignite fired boiler [J]. Thermal Power Generation 2015 44(2):106-109.
- [26] 张妮妮,周永刚,翁善勇,等. 俄罗斯煤和平朔煤混煤的粉碎机理和可磨性规律研究 [J]. 电站系统工程 2005 21(6):14-16.  
Zhang Nini ,Zhou Yonggang ,Weng Shanyong *et al.* Experimental investigation in the comminuting mechanism and the grinding behavior of several blends of Russian coal and Pingshuo coal [J]. Power System Engineering 2005 21(6):14-16.