

不黏煤小焦炉炼焦试验研究

张文成^{1,2} 高志芳³ 郑明东¹

(1.安徽工业大学 化学与化工学院 安徽 马鞍山 243002; 2.上海梅山钢铁股份有限公司技术中心 江苏 南京 210039;
3.安徽工业大学 冶金工程学院 安徽 马鞍山 243002)

摘要:为研究预处理不黏煤对配煤炼焦特性的影响,利用小焦炉进行配煤炼焦试验,研究了预处理不黏煤与未处理不黏煤配煤对配煤变质程度、黏结性能、小焦炉炼焦焦炭冷热强度及光学组织的影响。结果表明,预处理后不黏煤的镜质组最大反射率由 0.46% 上升到 1.20%,其根本原因是处理后含氧官能团含量降低;预处理后不黏煤仍没有黏结性,但配煤黏结性的下降幅度减小。小焦炉炼焦试验表明,添加不黏煤的焦炭冷热强度降低,在相同配比下添加预处理煤的焦炭强度降低幅度更小,在配比 3% 时,预处理不黏煤的焦炭转鼓强度上升了 0.5%,反应后强度降低 1%;而未处理不黏煤的转鼓强度和反应后强度分别降低了 1% 和 4%,其主要原因是焦炭光学组织中中粒镶嵌结构增加,焦炭各项异性指数提高 7.7%~15.8%。

关键词:不黏煤;配煤;炼焦;焦炭

中图分类号:TQ52 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2016)06-0060-06

Coking test of non-caking coal in a small coke oven

ZHANG Wencheng^{1,2}, GAO Zhifang³, ZHENG Mingdong¹

(1. Department of Chemistry and Chemical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China; 2. Shanghai Meishan Iron and Steel Corporation Technology Center, Nanjing 210039, China; 3. School of Metallurgy Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China)

Abstract: In order to study the effect of pretreatment on non-caking coal blending and coking, a small coke oven was used in coal blending and coking test. The differences between non-caking coal and pretreatment non-caking coal were studied, which included metamorphic degree and bonding properties of blending coal, coke strength and coke optical tissue. The results indicated that the vitrinite maximum reflectance increased from 0.46% to 1.20% because of the decrease of oxygen-containing functional groups. The pretreatment didn't make the non-caking coal more sticky and the caking property of blending coal fell slightly. The small coke oven test showed that, the barrate strength of coke prepared from pretreatment non-caking coal increased by 0.5%, the post-reaction strength decreased by 1%. The barrate strength and post-reaction strength of coke prepared from non-caking coal decreased by 1% and 4% respectively. The pretreatment increased the medium grain mosaic structure and the anisotropic index increased by 7.7% to 15.8%.

Key words: no-caking coal; coal blending; coking; coke

0 引 言

我国煤炭资源呈现不均衡性,一方面,炼焦煤资源紧缺,特别是优质炼焦煤更是少之又少,肥煤、气肥煤和焦煤等强黏结性煤储量总体较低^[1];另一方

面,我国低煤化度煤资源较丰富,其中低阶不黏烟煤约占全国煤炭储量的 30%。随着我国焦炭产能、优质煤资源及焦炭质量需求之间矛盾的日益加深,迫使人们将炼焦用煤资源扩大到低灰、低硫、储量相对丰富的低阶不黏烟煤。合理利用低变质程度的高挥

收稿日期:2015-08-10;责任编辑:白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2016.06.012

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1361128, 51404003)

作者简介:张文成(1972—),男,河北泊头人,高级工程师,博士,从事配煤炼焦技术工作。E-mail: zhangwencheng@baosteel.com。通讯作者:郑明东,教授,从事煤化工相关研究。E-mail: Zhmd118@ahut.edu.cn

引用格式:张文成,高志芳,郑明东.不黏煤小焦炉炼焦试验研究[J].洁净煤技术,2016,22(6):60-65.

ZHANG Wencheng, GAO Zhifang, ZHENG Mingdong. Coking test of non-caking coal in a small coke oven [J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(6): 60-65.

发分不黏煤可以有效解决我国炼焦煤资源匮乏的紧张状态^[2-3], 缓解优质炼焦煤资源的不足, 对于配煤炼焦具有重要意义。低阶不黏烟煤配煤炼焦研究主要集中在不黏煤直接配煤炼焦工艺、不黏煤捣固炼焦工艺和不黏煤预处理炼焦工艺。任学延^[4]通过焦炉试验, 分析了长焰煤配入粒度、配入比例及配煤结构对焦炭质量的影响, 结果表明, 长焰煤配入粒度以小于 3 mm 为宜, 配入比例可达 3%, 对焦炭质量的影响不明显。陈勇等^[5]在焦化厂进行了不黏煤的配煤试验, 通过落实原料均质化管理, 强化生产过程控制等手段, 在大容积焦炉生产中配入 3%~5% 的不黏结性煤是可行的。赵俊娥等^[6]研究表明配煤中不黏煤配加量不超过 10% 的混合煤料捣固炼焦后, 可以生产出合格的冶金焦。松浦慎^[7]、Kouchi 等^[8]、Minkina 等^[9]按成型条件进行煤的热成型处理, 研究了热成型条件和煤的品质对成型产率和成型煤强度的影响。Shui 等^[10]、Takagi 等^[11]研究了水处理煤的抽提特性规律。郑明东等^[12]、甘恢玉等^[13]研究了高挥发分不黏煤的预热改质与成焦行

为, 分析了热处理条件对含氧官能团、煤分子结构、镜质组随机反射率以及高温热解和黏结倾向的影响。笔者对不黏煤进行预处理, 利用小焦炉试验研究了不黏煤及预处理煤对炼焦配煤及焦炭质量的影响, 以为不黏煤的生产应用提供支持。

1 试验

1.1 试验煤样

试验用煤样包括不黏煤(BNM)、肥煤(FM)、焦煤(JM)、气煤(QM)、1/3焦煤(SJ)和瘦煤(SM), 煤样性质分析见表1。

由表1可知, 不黏煤灰分为 5.09%, 远低于炼焦煤的 9.27%~10.26%; 硫分较低, 接近瘦煤; 挥发分为 37.96%, 高于其他炼焦煤, 镜质组最大反射率 $R_{o,max}$ 为 0.46%, 远低于其他煤种, 属于低变质程度煤; 黏结指数和胶质层最大厚度均为 0, 属于无黏结性煤。与炼焦煤相比, 不黏煤具有低灰分、低硫分、高挥发分、低变质程度及无黏结性的特征, 对配煤炼焦产生不利影响。

表1 不黏煤和炼焦煤性质分析

Table 1 Properties analysis of non-caking coal and caking coal

煤样	$M_d / \%$	$A_d / \%$	$V_{daf} / \%$	$w(S, \mu) / \%$	$R_{o,max} / \%$	黏结指数 G	胶质层最大厚度 Y/mm
不黏煤	11.44	5.09	37.96	0.41	0.46	0	0
肥煤	10.21	9.57	28.14	0.78	0.95	94	26.4
焦煤	12.23	9.89	22.01	1.48	1.23	88	18.0
气煤	7.46	9.27	34.02	0.80	0.76	83	13.9
1/3焦煤	12.34	10.26	28.06	0.50	0.97	85	15.8
瘦煤	11.54	10.20	14.53	0.42	1.51	42	5.9

1.2 试验设备

不黏煤的处理设备采用管式加热炉, 具体如图1所示。

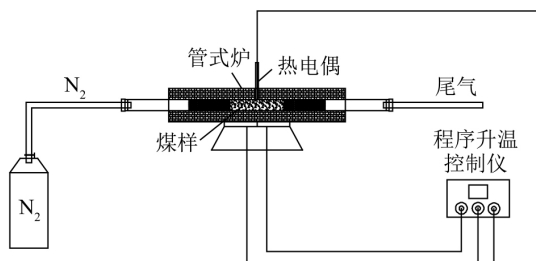


图1 管式加热炉示意

Fig. 1 Schematic of tubular furnace

小焦炉配煤炼焦试验条件见表2。

表2 小焦炉试验条件

Table 2 Test condition of small coke oven

项目	控制值	项目	控制值
装煤量/kg	68	炭化室温度/℃	1 050±5
配煤水分/%	10±1	焦饼中心温度/℃	>950
细度/%	约 85	周转时间/h	18

1.3 试验方法

预处理试验条件: 煤样破碎至 <3 mm 占 85% 以上, 开始以 5 L/min 流速通入 N_2 以排除空气, 载气温度控制在 380~450 °C, 煤样温度约 420 °C, 预处理时间控制在 40~60 min, 处理后煤样干燥无灰基挥发分控制在 28%~30%。

小焦炉炼焦试验条件:将预处理后不黏煤按一定配比进行配煤炼焦,结焦时间18 h,水分10%,细度85%,红焦采用氮气干法熄焦,熄焦后焦炭进行焦炭冷强度和焦炭反应后强度检测。

2 结果与讨论

2.1 预处理前后不黏煤煤质变化

对高挥发分低灰低硫的不黏煤进行预处理,利用 N_2 介质,在380~450℃下处理40~60 min,随热处理温度的升高和处理时间的延长,煤样的干燥无灰基挥发分降低。

2.1.1 预处理前后煤岩特性分析

预处理前后不黏煤的镜质组最大反射率分布如图2所示。

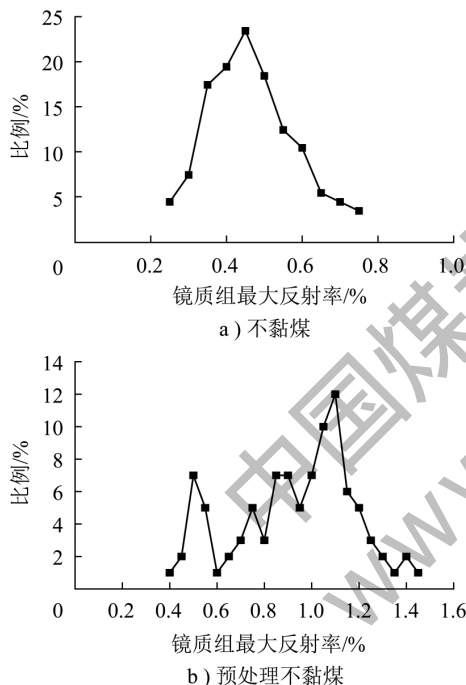


图2 预处理前后不黏煤的镜质组最大反射率分布

Fig.2 Vitrinite maximum reflectance of non-caking coal before and after pretreatment

由图2可知,预处理前后不黏煤的反射率有较大变化,镜质组最大反射率由0.46%上升到1.20%。根据煤的镜质组最大反射率分级标准,一般反射率0.50%~0.65%为长焰煤,1.10%~1.60%为焦煤。可见预处理后煤样变质程度由长焰煤上升到焦煤。这可能是由于热处理使得煤样结构内部分子聚集特性发生急剧变化,分子排列更趋向石墨化、紧密化,稠环芳核层片变大,因而表现出煤的镜质组最大反射率有所提高。

2.1.2 预处理不黏煤与炼焦煤挥发分与反射率关系

预处理不黏煤与炼焦煤的挥发分与镜质组最大反射率的关系如图3所示。

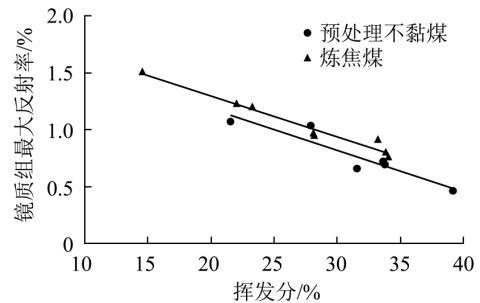


图3 预处理不黏煤与炼焦煤的挥发分与镜质组最大反射率的关系

Fig.3 Relationship of volatile and vitrinite maximum reflectance of pretreatment non-caking coal and coking coal

由图3可知,炼焦煤与预处理后不黏煤的挥发分与镜质组最大反射率之间存在着负相关关系,即挥发分提高镜质组最大反射率降低。预处理不黏煤对应曲线在炼焦煤下部,即相同挥发分下,预处理不黏煤的镜质组最大反射率比炼焦煤低,差值在0.1%左右。

2.1.3 预处理前后煤的质量特性分析

预处理前后煤的质量特性分析见表3。由表3可知,预处理后,低变质程度不黏煤水分由8.39%降至3.33%,这是由于不黏煤孔隙结构发达,内在水分较高,经预处理后,水分大幅减少。预处理煤样的 V_{daf} 由39.11%降至21.51%,这是由于不黏煤预处理后部分分解所致。氧含量由14.11%降至7.37%,氧元素作为含氧官能团的重要组成部分,具有较强的反应活性,氧元素的降低有利于煤的加工利用。

2.2 预处理前后不黏煤配煤特性

不黏煤经过热处理后变质程度加深,但处理后不黏煤仍不具有黏结性。而焦炭质量取决于炼焦煤的变质程度和黏结性能。为了考察预处理不黏煤的热处理效果,对添加不黏煤及添加预处理不黏煤方案进行对比。

2.2.1 预处理前后不黏煤配煤配比及煤质分析

对预处理前后的不黏煤配煤进行小焦炉试验,配煤配比及配煤质量分析见表4。

由表4可知,方案1为不添加不黏煤和预处理煤的方案,确定为基准方案。预处理前后不黏煤配煤的配比分别为3%、5%、8%和10%。随着预处理

表3 预处理前后煤的质量特性

Table 3 Coal quality of non-caking coal before and after pretreatment

样品	工业分析/%				元素分析/%				
	M_{ad}	A_{ad}	V_{daf}	FC_{daf}	$w(C_{daf})$	$w(H_{daf})$	$w(S_{daf})$	$w(N_{daf})$	$w(O_{daf})$
不黏煤	8.39	3.61	39.11	60.89	79.33	4.49	0.67	1.40	14.11
预处理不黏煤	3.33	4.92	21.51	78.49	85.34	3.80	0.62	1.87	7.37

表4 预处理前后不黏煤配煤配比及煤质分析

Table 4 Blending ratio and quality analysis of non-caking coal before and after pretreatment

方案	煤样	配比/%	A_d /%	V_{daf} /%	G	$R_{o,max}$ /%
1	基准	0	9.46	29.15	82	1.01
2	预处理煤	3	9.00	29.17	81	1.03
3	不黏煤	3	9.07	29.38	78	1.02
4	预处理煤	5	8.84	29.19	79	1.02
5	不黏煤	5	9.02	29.54	77	1.04
6	预处理煤	8	9.47	29.22	78	1.00
7	不黏煤	8	8.60	29.78	76	1.04
8	预处理煤	10	8.57	29.23	72	0.98
9	不黏煤	10	9.31	29.93	71	1.05

后不黏煤配比的增加,配煤灰分 A_d 从 9.46% 降至 8.57% 配煤黏结指数 G 由 82 降至 71,而配煤挥发分 V_{daf} 为 29.15%~29.93% 配煤的镜质组最大反射率为 0.98%~1.05%。总体上,配煤灰分降低,黏结指数降低,挥发分和镜质组最大反射率变化不大。这是由于预处理不黏煤挥发分和镜质组最大反射率与炼焦煤相近,同时预处理不黏煤灰分低且不具有黏结性。

2.2.2 预处理前后不黏煤对配煤变质程度的影响

表征煤化程度的指标主要有挥发分和煤的镜质组最大反射率,不黏煤配比与配煤镜质组最大反射率的关系如图 4 所示。

由图 4 可知,随着不黏煤比例的增加,配煤镜质组最大反射率呈下降趋势;而随着预处理不黏煤比例的增加,配煤镜质组最大反射率略有上升。这主要是由于不黏煤镜质组最大反射率仅为 0.46%,远低于基准配煤的 1.01%,而处理后不黏煤镜质组最大反射率达到 1.20%,较基准配煤反射率略高。由于煤的镜质组最大反射率决定了配煤的变质程度,影响成焦过程的收缩及气孔,因此配煤镜质组最大反射率的变化趋势将对焦炭质量产生一定影响。

2.2.3 预处理前后不黏煤对配煤黏结性能的影响

表征黏结性能的指标主要有黏结指数和胶质层

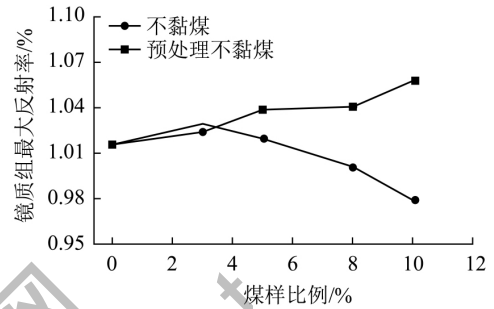


图4 不黏煤配比与配煤镜质组最大反射率的关系

Fig. 4 Relationship of coal blending ratio and vitrinite maximum reflectance

最大厚度等指标,在此仅对黏结指数进行分析。不黏煤配比与黏结指数的关系如图 5 所示。

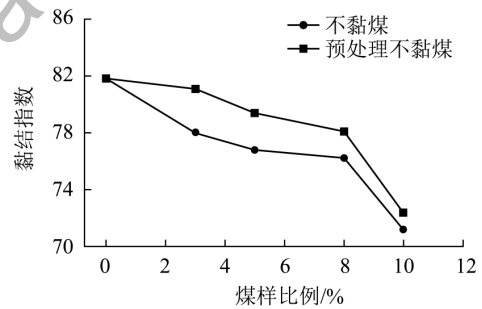


图5 不黏煤配比与配煤黏结指数的关系

Fig. 5 Relationship of coal blending ratio and G

由图 5 可知,随着不黏煤与预处理煤配比的增加,黏结指数均呈下降趋势,但下降幅度不同。配比 3% 时,预处理煤的 G 下降 1,而不黏煤的 G 降低 4;配比 5% 时,预处理煤和不黏煤的 G 分别下降 3 和 5;配比 8% 时,分别下降 4 和 6;配比 10% 时,分别下降 9 和 10。可见,在相同配比下预处理煤的降低幅度比不黏煤小,这是由于处理后的不黏煤与配煤的相似性提高,对配煤黏结能力的破坏较小。

2.3 预处理前后不黏煤对焦炭质量特性影响

2.3.1 不黏煤炼焦对焦炭冷强度的影响

根据表 4 的配煤方案,不黏煤和预处理煤比例为 3%、5%、8% 和 10% 利用 70 kg 试验焦炉进行配煤炼焦,并对焦炭质量进行分析。不黏煤配比与焦

炭转鼓强度的关系如图6所示。由图6可知,随着不黏煤与预处理煤配比的增加,焦炭转鼓强度总体呈下降趋势,但下降幅度不同。配比3%时,预处理煤炼制焦炭的转鼓强度上升了0.5%,而不黏煤炼制焦炭的转鼓强度降低1%;配比5%时,预处理煤和不黏煤炼制焦炭转鼓强度分别下降1%和2%;配比8%时,分别下降3%和4%;配比10%时,分别下降3%和5%。可见,在相同配比下,预处理后不黏煤的下降幅度要小,这是由于处理后的不黏煤的膨胀性能与配煤的相似性提高,减少了裂纹的产生,保证其冷态强度下降幅度稍小。

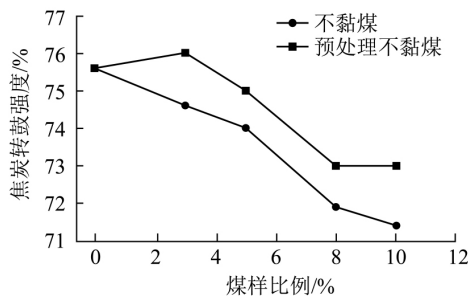


图6 不黏煤配比与焦炭转鼓强度的关系

Fig. 6 Relationship of coal blending ratio and barrate strength index of coke

2.3.2 不黏煤配煤对焦炭热强度的影响

不黏煤配比与焦炭反应后强度的关系如图7所示。

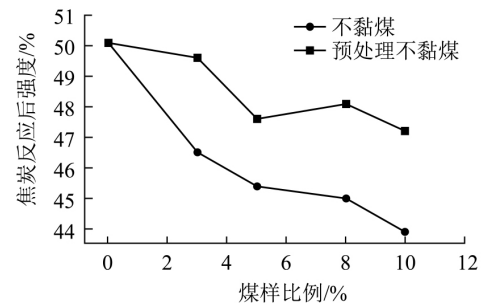


图7 不黏煤配比与焦炭反应后强度的关系

Fig. 7 Relationship of coal blending ratio and the post-reaction strength

由图7可知,随着不黏煤与预处理煤配比的增加,焦炭反应后强度总体呈下降趋势。配比3%时,预处理煤炼制焦炭的反应后强度下降1%,而不黏煤炼制焦炭的反应后强度降低4%;配比5%时,分别下降3%和5%;配比8%时,分别下降2%和5%;配比10%时,分别下降3%和6%。可见,同样配比下,预处理不黏煤的下降幅度要小,这主要由于处理后的不黏煤的结构特性发生了变化,与配煤的融合性提高,同时减少了裂纹及大气孔的产生,反应比表面积减少,致使焦炭反应后强度降低幅度变小。

2.3.3 不黏煤配煤对焦炭光学组织热强度的影响

将不黏煤和预处理煤按不同配比进行小焦炉试验,测定焦炭的光学组织,并计算光学组织指数各项异性指数,结果见表5。

表5 焦炭的光学组织结构

Table 5 Optical texture of coke

煤样	配比/ %	体积分数/%							各项异性指数
		各项同性	细粒镶嵌	中粒镶嵌	粗粒镶嵌	纤维状	片状	丝质及破片	
基准	0	0.7	26.6	15.5	14.9	1.4	0.7	0	93.7
预处理煤	3	1.5	28.3	17.6	6.4	0	0.7	0	78.4
不黏煤	3	0	30.0	14.2	4.5	0	1.1	0	70.7
预处理煤	5	0	20.8	24.4	7.8	1.2	0	1.2	93.6
不黏煤	5	1.1	25.0	12.6	13.8	0	0	0	77.8
预处理煤	8	0	19.8	16.9	11.9	1.0	1.0	1.0	87.4
不黏煤	8	0	22.9	11.6	14.6	0	0	0	75.3

由表5可知,添加不同比例的不黏煤和预处理煤其焦炭的光学组织结构和各项异性指数有所差别。配比3%时,预处理煤的中粒镶嵌为17.6%,而不黏煤的中粒镶嵌为14.2%;配比5%时,中粒镶嵌分别为24.4%和12.6%;配比8%时,中粒镶嵌分别为16.9%和11.6%。可见,添加预处理不

黏煤所得焦炭的中粒镶嵌明显增加。相同配比下不黏煤和预处理煤进行对比,配比3%时,预处理煤的各项异性指数为78.4%,而不黏煤的各项异性指数为70.7%,相差7.7%;配比5%时,预处理煤的各项异性指数为93.6%,而不黏煤的各项异性指数为77.8%,二者相差15.8%;配比8%相差

12.1%。可见随着添加比例增加,不黏煤和预处理煤的各项异性指数差距先增后降。由于不同焦炭光学组织结构对气孔的形成及反应性能有明显影响,因此这些光学组织结构的变化是造成焦炭宏观性质的深层次变化的原因。

3 结 论

1) 与处理前相比,预处理后不黏煤结构内部分子聚集特性发生急剧变化,分子排列更趋向石墨化、紧密化,稠环芳核层片变大,预处理不黏煤的镜质组最大反射率由0.46%上升到1.20%,变质程度增加。

2) 预处理后不黏煤仍没有黏结性,但对配煤黏结性的降低程度减小,配比3%时,预处理煤的 G 下降1,而不黏煤的 G 降低4,这是由于处理后的不黏煤与配煤的相似性提高,对配煤黏结能力的破坏较小。

3) 小焦炉炼焦试验表明,添加不黏煤使焦炭的转鼓强度和反应后强度降低,相同配比下预处理不黏煤比不黏煤的降低幅度更小,在配比3%时,预处理不黏煤转鼓强度上升0.5%,反应后强度降低1%,不黏煤转鼓强度降低1%,反应后强度降低4%。

4) 添加相同比例的预处理不黏煤和不黏煤其焦炭的光学组织结构有明显差别,其中预处理不黏煤中粒镶嵌结构增加,各项异性指数增加。

参考文献 (References):

- [1] 姚昭章,郑明东.炼焦学[M].3版.北京:冶金工业出版社,2008:57-59.
- [2] Toshimasa Takanohashi,Takahiro Shishido,Kuo Saito.Effect of coal rank on coking property of hypercoal blends[J].Journal of the Japan Institute of Energy 2011,90(9):853-858.
- [3] Fahad Mir.Washability characteristics of low volatile pakistani coking coal by crushing[J].Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering 2014,2(5):502-506.
- [4] 任学延.炼焦配煤中配入长焰煤的研究[J].煤化工,2012,40(1):31-33.
Ren Xueyan.Study on long flame coal in the coking blend[J].Coal Chemical Industry 2012,40(1):31-33.
- [5] 陈勇,孔祥宝.不粘煤在大容积焦炉中的配合应用[J].山西煤炭,2011,31(11):79-80.
Chen Yong,Kong Xiangbao.Coordination application of non-caking coal in large-volume coke oven[J].Shanxi Coal,2011,31(11):79-80.
- [6] 赵俊娥,胡娟娟.不粘煤和瘦煤捣固炼焦的试验研究[J].山西焦煤科技,2010,34(8):50-52.
Zhao June,Hu Juanjuan.Research on nonstick coal and lean coal tamping coking[J].Shanxi Coking Coal Science & Technology,2010,34(8):50-52.
- [7] 松浦慎.热态成型条件对粉煤成型的影响[J].燃料与化工,2009,40(2):64-67.
- [8] Kouichi Miura,Kenji Kato.Examination of resolidification and carbonization mechanism of coking and non-or slightly-caking coals during coke production[J].Tetsu-to-Hagane,2006,92(12):703-712.
- [9] Minkina M,Oliveira F L G,Zymly V.Coal lump devolatilization and the resulting char structure and properties[J].Fuel Processing Technology 2010,91(5):476-485.
- [10] Shui Hengfu,Zhao Wenjuan,Shan Chuanjun et al.Caking and coking properties of the thermal dissolution soluble fraction of a fat coal[J].Fuel Processing Technology 2014,118(2):64-68.
- [11] Takagi H,Maruyama K,Yoshizawa N et al.XRD analysis of carbon stacking structure in coal during heat treatment[J].Fuel,2004,83(17/18):2427-2433.
- [12] 郑明东,李正秋,单海燕,等.高挥发分不黏煤的预热改质与成焦行为研究[J].燃料与化工,2010,41(2):10-14.
Zheng Mingdong,Li Zhengqiu,Shan Haiyan.Study on preheating of high volatilenon-caking coal and its coking behavior[J].Fuel & Chemical Processes 2010,41(2):10-14.
- [13] 甘恢玉,张小勇,郑明东,等.低阶不黏炼焦煤低温氧化及动力学研究[J].煤炭科学技术,2012,40(9):121-124.
Gan Huiyu,Zhang Xiaoyong,Zheng Mingdong et al.Study on low temperature oxidation and kinetics of low rank non-caking coal[J].Coal Science and Technology 2012,40(9):121-124.

(上接第100页)

- [12] 李刚,李雪梅,王铎,等.正渗透膜技术及其应用[J].化工进展,2010,29(8):1388-1398.
Li Gang,Li Xuemei,Wang Duo et al.Forward osmosis membranes and applications[J].Chemical Industry and Engineering Progress 2010,29(8):1388-1398.
- [13] 李柄缘,刘光全,王莹,等.高盐废水的形成及其处理技术进展[J].化工进展,2014,33(2):493-497.
Li Bingyuan,Liu Guangquan,Wang Ying et al.Formation and treatment of high-salt wastewater[J].Chemical Industry and Engineering Progress 2014,33(2):493-497.
- [14] 高丽丽,张琳,杜明照.MVR蒸发与多效蒸发技术的能效对比分析研究[J].现代化工,2012,32(10):84-86.
Gao Lili,Zhang Lin,Du Mingzhao.Energy efficiency comparative analysis on MVR and multi-effect evaporation technology[J].Modern Chemical Industry 2012,32(10):84-86.
- [15] 唐娜,陈明玉,袁建军.海水淡化浓盐水真空膜蒸馏研究[J].膜科学与技术,2007,27(6):93-96.
Tang Na,Chen Mingyu,Yuan Jianjun.Vacuum membrane distillation for brine from SWRO desalination process[J].Membrane Science and Technology 2007,27(6):93-96.