

# 褐煤改性与级配成浆特性研究

梁 兴<sup>1 2 3</sup> 段清兵<sup>1 2 3</sup> 闫黎黎<sup>1 2 3</sup>

- (1. 煤炭科学研究总院 节能工程技术研究分院 北京 100013;  
2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室 北京 100013;  
3. 国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室 北京 100013)

**摘要:**以邵通褐煤和呼伦贝尔褐煤为研究对象,在进行工业分析和元素分析的基础上,研究褐煤改性前后物理化学性质的变化。确定了褐煤的最佳改性条件:原煤粒度<1 mm,加热停留时间为0.5 h,加热温度为250 ℃。进行了改性褐煤级配成浆特性试验研究。结果表明:合适的改性温度为250~300 ℃,最佳煤样粗细粉的质量比为60:40,经过改性后的邵通褐煤和呼伦贝尔褐煤级配成浆浓度分别比改性前提高了5.4%以上和3.6%以上。

**关键词:**褐煤;改性;级配;成浆性

中图分类号:TQ536;TD849

文献标识码:A

文章编号:1006-6772(2013)04-0045-05

## Influence of modification and grain-size gradation on slurryability of lignite

LIANG Xing<sup>1 2 3</sup>, DUAN Qingbing<sup>1 2 3</sup>, YAN Lili<sup>1 2 3</sup>

- (1. Energy Conservation and Engineering Technology Research Institute, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;  
2. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization (China Coal Research Institute), Beijing 100013, China;  
3. National Energy Technology & Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control (China Coal Research Institute), Beijing 100013, China)

**Abstract:** Taking Shaotong lignite and Hulun Buir lignite as research objects, the proximate analysis and elemental analysis were done for these two kinds of lignites. Investigated the change of physical and chemical properties after modification. The optimal modification condition is that the coal granularity is less than 1 mm, heating time is 0.5 h, heating temperature is 250 ℃. Study the influence of gradation on the slurryability of modified lignite. The results show that the appropriate modification temperature ranges from 250 ℃ to 300 ℃, the optimum mass ratio of grain-size gradation is 40:60, the slurry concentration of modified Shaotong lignite and Hulun Buir lignite improves by more than 5.4 percent and 3.6 percent respectively.

**Key words:** lignite; modification; grain-size gradation; slurryability

收稿日期:2013-06-06 责任编辑:宫在芹

基金项目:科技部科研院所专项(2011EG222214, 2012EG222205)

作者简介:梁 兴(1979—),男,湖北孝感人,工程师,2005年毕业于西安交通大学能源与动力工程学院,主要从事洁净煤技术方面的研究。E-mail:13488669279@126.com。

引用格式:梁 兴,段清兵,闫黎黎.褐煤改性与级配成浆特性研究[J].洁净煤技术,2013,19(4):45-49,54.

中国拥有丰富的褐煤资源,已探明褐煤储量达1300多亿t,占全国煤炭储量的13%左右。中国的褐煤资源主要分布在华北地区,约占全国褐煤地质储量的77.8%以上,其中以内蒙古东部地区赋存最多。其次为西南地区,约占全国褐煤储量的12.5%,其中大部分分布在云南境内。由于褐煤水分高、热值低、活性强、长距离输送经济性差,目前应用受到一定的限制<sup>[1-3]</sup>。

褐煤改性提质方法除了洗选外,主要以热力改性为主。目前国内外对褐煤的热力改性提质主要有2种方法:一种是以脱水提高发热量为目标的改性提质方法,这种方法基本不改变煤的化学性质,主要在较低的温度下进行,一般在煤的燃点以下,其产品主要是低灰、低水、较高发热量的煤炭;另一种是采用热解(干馏或加氢)的改性提质方法,褐煤热解一般在低中温(500~800℃)条件下进行,经历一系列化学变化,生成与原煤性质完全不同的半焦或焦炭、煤气和焦油<sup>[4-9]</sup>。

水煤浆作燃料或气化原料是适合中国国情的洁净煤技术,但在产业化发展的过程中存在制浆煤种局限、水煤浆价格偏高等问题。国内目前已建成的水煤浆厂大多利用成浆性和燃烧性能好的中等挥发分的气煤、1/3焦煤(山东兖州煤和枣庄煤)等煤种制浆。这类煤种既是中国短缺煤种,也是炼焦用煤的优质煤种。采用这类煤制浆,不仅造成煤炭资源的不合理利用,加剧了优质炼焦煤的供应紧张,也提高了制浆成本,降低了水煤浆产品的市场竞争力。因此必须结合中国煤炭资源分布及储量

情况,拓宽制浆用煤品种和水煤浆用户。

据不完全统计,截至到2011年底,中国燃烧浆的设计生产能力已达到3000万t/a左右,生产和使用量达2000万t/a以上,气化水煤浆设计生产能力达到5000万t/a,生产和使用量超过3000万t/a。随着水煤浆应用规模的不断扩大,价廉量大的褐煤已成为制浆煤种的必然选择。但褐煤表面含氧官能团较多(多为羧基、羟基等)、内水含量高、密度小、可磨性差,使直接制取高浓度水煤浆十分困难<sup>[10]</sup>。

本文以中国2种典型褐煤——云南邵通褐煤和内蒙古呼伦贝尔褐煤为原料进行热力改性及级配制浆实验研究,考察了煤样经热力改性后的物理化学变化,并用改性后的煤样进行级配制浆实验,考察了成浆浓度、黏度、流动性和稳定性的变化。

## 1 褐煤性质

对2种煤样进行了工业分析、全硫、发热量、可磨性分析和元素分析。表1为2种褐煤的基本性质和元素分析。

由表1可知,邵通褐煤的内水、挥发分含量都很高,分别为25.57%和51.14%;呼伦贝尔褐煤的内水、挥发分也较高,但比邵通褐煤的相应指标低,其中内水低5.85%,挥发分低5.6%;2种褐煤的干基高位热值基本相同,可磨性较低且相差不大。由表1可知2种褐煤碳含量较低,为70%左右,其中呼伦贝尔褐煤碳含量略高;2种褐煤的氧、氢、氮含量均较高,这是由于褐煤变质程度低所致,其中邵通褐煤的相应指标较呼伦贝尔褐煤更低。

表1 褐煤的基本性质及元素分析

煤样	$M_{ad}/\%$	$A_{d1}/\%$	$V_{daf}/\%$	$S_{t,d1}/\%$	热值 $Q_{gr,ad}/(MJ \cdot kg^{-1})$	可磨性 HGI	元素分析/ $\%$				
							$\omega(C_{daf})$	$\omega(H_{daf})$	$\omega(S_{daf})$	$\omega(N_{daf})$	$\omega(O_{daf})$
邵通褐煤	25.57	7.33	51.14	1.42	15.36	49	67.87	4.09	1.53	1.96	24.55
呼伦贝尔褐煤	19.72	17.63	45.54	0.57	17.70	55	73.77	2.88	0.73	0.92	21.70

通过以上分析可知,邵通褐煤属于较典型的年轻褐煤,而呼伦贝尔褐煤属于较典型的年老褐煤,实践证明这些褐煤成浆性差,直接制备水煤浆浓度低<sup>[11-12]</sup>。

## 2 褐煤改性实验

### 2.1 主要仪器

全密封锤式破碎缩分机;棒磨机;超细研磨机;

电动振筛机;电子天平(DT500A 0.01g;MD110-2,0.0001g);电热鼓风干燥箱;多功能红外水分测定仪;水煤浆黏度计;激光粒度分布仪和定时电动搅拌器等。

### 2.2 改性方法及条件

采用热力改性(隔绝空气)的方法对2种褐煤进行改性提质加工。取容量为300mL的坩埚,称取一定量原料煤装入坩埚,放在坩埚架上后置于事先

升温至预定温度的小型热力改性炉内。为了尽可能保留煤的有用成分,采用快速加热的办法,即加热停留时间固定为 0.5 h。加热结束取出坩埚并在空气中冷却至室温,取样分析不同改性条件下改性产品的性质。具体改性条件:①原煤粒度: <6 mm, <3 mm, <1 mm; ②加热温度: 150, 200, 250, 300, 350 °C。

## 2.3 褐煤改性产品性质影响因素

### 2.3.1 粒度

为了保留煤的有用成分,选择最低加热温度为 150 °C、加热停留时间 0.5 h,进行不同粒度褐煤的热力改性实验。

表 2 为不同粒度低温热改性煤样的工业分析和元素分析。

表 2 不同粒度低温热改性煤样的工业分析和元素分析

煤样	粒度/ mm	$M_{ad}/$ %	$A_d/$ %	$V_{daf}/$ %	$Q_{gr,ad}/$ (MJ·kg <sup>-1</sup> )	元素分析/%				
						$\omega(C_{daf})$	$\omega(H_{daf})$	$\omega(S_{daf})$	$\omega(N_{daf})$	$\omega(O_{daf})$
邵通褐煤	<6	2.99	11.75	51.25	19.98	67.91	4.38	1.40	1.90	24.41
	<3	2.78	11.41	51.21	19.93	67.95	4.37	1.39	1.89	24.41
	<1	2.77	11.89	51.06	19.95	68.01	4.35	1.38	1.87	24.39
呼伦贝尔褐煤	<6	1.72	19.02	45.57	19.95	74.04	2.85	0.67	0.91	21.53
	<3	1.69	18.95	45.46	20.05	74.13	2.87	0.67	0.91	21.42
	<1	1.65	18.61	45.35	20.20	74.25	2.91	0.66	0.90	21.28

由表 2 可知,在设定实验条件下,煤样粒度对改性褐煤的水分有明显影响,煤样粒度越小,相同的改性条件下,水分失去的越多。2 个 <1 mm 的煤样改性后水分分别降低了 22.80% 和 19.07%。这是因为粒度越细,煤样的比表面积越大,停留时间一定时,水分蒸发越快,水分越低。挥发分、碳、氧等含量变化不大,主要是因为 150 °C 的改性条件下,只

有水分蒸发出来,尚未有小分子侧链及含氧官能团等挥发分析出。综合以上分析可知,褐煤热力改性的原煤粒度控制在 <1 mm 最佳。

### 2.3.2 加热温度

在原煤粒度 <1 mm、加热停留时间为 0.5 h 时,对褐煤进行了不同加热温度的热力改性实验,结果见表 3。

表 3 不同加热温度下煤样的工业分析和元素分析

煤样	加热温 度/°C	$M_{ad}/$ %	$A_d/$ %	$V_{daf}/$ %	$Q_{gr,ad}/$ (MJ·kg <sup>-1</sup> )	元素分析/%				
						$\omega(C_{daf})$	$\omega(H_{daf})$	$\omega(S_{daf})$	$\omega(N_{daf})$	$\omega(O_{daf})$
邵通褐煤	室温	25.57	7.33	51.14	15.36	67.87	4.09	1.53	1.96	24.55
	150	2.77	11.69	51.06	19.95	68.01	4.35	1.38	1.87	24.39
	200	1.93	11.55	50.82	20.80	69.73	4.37	1.40	1.88	22.62
	250	1.78	11.81	50.00	21.81	70.41	4.28	1.37	1.86	22.08
	300	1.71	12.08	48.94	22.93	70.93	4.25	1.55	1.83	21.44
	350	1.59	12.03	45.56	23.91	72.99	4.11	1.42	1.85	19.63
呼伦贝尔褐煤	室温	19.72	17.63	45.54	17.70	73.77	2.88	0.73	0.92	21.70
	150	1.85	20.30	45.26	19.91	73.81	2.89	0.70	0.91	21.69
	200	1.46	20.80	45.22	21.71	75.21	2.87	0.67	0.90	20.35
	250	1.42	20.92	44.25	22.91	75.70	2.85	0.65	0.88	19.92
	300	1.28	22.05	43.74	22.98	76.39	2.86	0.63	0.87	19.25
	350	1.21	22.94	41.86	23.10	77.16	2.83	0.61	0.88	18.52

由表 3 可知,当煤样粒度 <1 mm、加热停留时间为 0.5 h 时,加热温度对褐煤性质有很大影响,主要表现在:

1) 水分: 随加热温度的升高而降低,当加热温度从室温升到 150 °C 时,褐煤水分降低幅度较大,达到 90% 左右,说明加热温度在 150 °C 时,褐煤内水

基本被脱除。之后随着加热温度的升高水分略有降低,说明在 150~350 °C 主要脱除的是与煤分子结合的化合水。

2) 挥发分: 随加热温度的升高而降低,在加热温度小于 250 °C 时,降低幅度不大,但超过 250 °C 后,挥发分明显降低。为了不损失或少损失褐煤的

挥发分,同时降低温度升高而增加的改性成本,将改性制浆的加热温度设定为250℃左右。

3) 元素组成:随着加热温度的升高,碳含量明显升高,氧含量明显下降,氮、氢、硫含量变化不大。说明升高温度能较好地脱除含氧官能团,可有效提高褐煤的成浆性。

为进一步了解改性温度对含氧官能团的脱除影响,针对煤中含量最多的羧基和羟基这2类含氧官能团在不同加热温度下的变化规律进行研究。选取邵通褐煤为研究对象,原煤粒度<1 mm、加热停留时间为0.5 h,实验结果如图1所示。

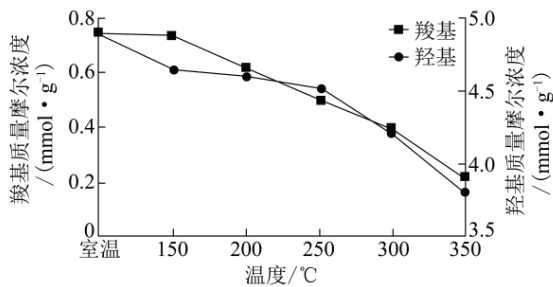


图1 不同加热温度下羧基、羟基变化规律

由图1可以看出,加热温度对褐煤含氧官能团的脱除作用非常明显。随着温度的升高,褐煤的羧基和羟基含量明显降低,尤其是羧基,当温度超过250℃时发生剧烈分解,在相同的改性温度下,羧基的脱出率也明显高于羟基。由此可以认为,褐煤低温改性的化学实质主要在于脱除活性含氧官能团,特别是羧基,使煤的组成结构发生轻度变化,也可

认为这种改性作用为脱氧改性。

## 2.4 褐煤改性条件的确定

综上所述,为了尽可能保留煤的可燃成分,同时最大限度地降低褐煤的水分,脱除含氧官能团以提高褐煤的成浆性,褐煤的最佳改性条件应选择为原煤粒度<1 mm,加热停留时间为0.5 h,加热温度为250℃。

## 3 改性褐煤级配成浆实验

### 3.1 粒度级配的选择

级配制浆是提高煤炭成浆性能的有效手段<sup>[13-16]</sup>。首先对2种褐煤的粒度级配进行相关实验,确定褐煤成浆实验最佳的粒度级配方案。

#### 3.1.1 煤粉的制备

选取2种各5 kg左右的煤样,先用破碎机将煤样破碎到1 mm以下。破碎后的煤样放在空气中晾干,取其中的3 kg煤样放在棒磨机中磨制粗粉,粒度要控制在合理范围内;剩下的2 kg煤样先放在棒磨机中磨制一段时间,然后放在超细研磨机中磨制成细粉,控制平均粒径在11 μm左右。煤样制备好后,各自放在密封袋中保存。

#### 3.1.2 粒度级配实验

将制备好的粗粉、细粉按照质量比为40:60,50:50,60:40的比例混合制浆,并对其黏度、流动性、稳定性、粒度分布等进行测试。表4为粒度级配的确定。

表4 粒度级配的确定

煤样	$m(\text{粗粉}):m(\text{细粉})$	浓度/ %	表观黏度/ (mPa · s)	流动性	24 h后 稳定性	粒度分布(累积含量) / %		
						<1.000 mm	<0.450 mm	<0.075 mm
邵通褐煤	40:60	46.29	1371	B-	C	98.69	91.23	95.87
	50:50	47.16	1283	B	B	98.05	90.86	89.59
	60:40	48.50	1110	A	B	97.32	90.33	86.36
呼伦贝尔褐煤	40:60	49.25	1320	B-	C	98.98	91.26	96.39
	50:50	50.61	1250	B	B	98.37	90.77	90.20
	60:40	52.29	1131	A	B	97.60	90.09	85.21

注:1. 流动性——A为连续流动;B为间断流动;C为不流动

2. 稳定性——A为浆体保持其初始状态,无析水和沉淀产生;B为存在少量的析水或少许软沉淀产生;C为有沉淀产生,密度分布不均,但经搅拌后可再生;D为产生部分沉淀或全部硬沉淀

由表4数据可以看出,随着细粉添加比例的降低,2个煤样的浓度提高、表观黏度下降、流动性及稳定性变好。当粗粉、细粉质量比为60:40,即<0.075 mm粒级含量大于85%时,煤浆浓度最高,与粗粉、细粉

质量比为40:60相比,其中呼伦贝尔褐煤制浆浓度提高了3%左右,邵通褐煤浓度提高了2%左右。煤浆浓度提高的原因主要是煤粉达到了合理的粒度级配,堆积效率提高,从而提高了煤浆的浓度。因

此,确定本实验最佳的煤样粗粉、细粉的质量比为60:40。

### 3.2 改性褐煤级配成浆性实验

#### 3.2.1 改性前褐煤的成浆性实验

2种煤样的粒度级配确定后,采用合理的粒度级配制浆来测定煤样的定黏最高成浆浓度。定黏最高成浆浓度:当浆体表观黏度为1200 mPa·s时,水煤浆所能达到的浓度最大值。将实验用煤制成一系列不同浓度的水煤浆,观察其黏度、流动性、稳定性的变化规律。表5为最高成浆浓度的确定。

表5 最高成浆浓度的确定

煤样	实际浓度/ %	表观黏度/ (mPa·s)	流动性	24 h后 稳定性
邵通褐煤	48.50	1110	B	B
	51.51	1250	B	B
	52.49	1342	C	C
呼伦贝尔褐煤	51.30	1131	B	B
	53.70	1242	B	B
	54.38	1310	C	C

由表5可以看出,2种煤样随着成浆浓度的提高,黏度也逐渐增大,流动性及稳定性逐渐变差。在表观黏度小于1200 mPa·s的前提下,邵通褐煤、呼伦贝尔褐煤2个煤样的定黏最高成浆浓度分别为48.50%和51.30%。

#### 3.2.2 改性褐煤的成浆性实验

在前述粒度和加热时间的改性条件下对褐煤在不同温度改性后进行级配制浆,并测定煤样的定黏最高成浆浓度,煤样粗粉、细粉的质量比为60:40,实验结果如图2所示。

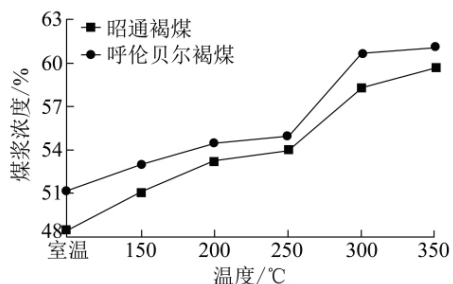


图2 温度对改性褐煤成浆性的影响

由图2可以看出,随改性温度的提高,2种褐煤的成浆浓度较原煤有较大幅度提高,其中改性温度由250℃升至300℃时,煤浆浓度提高幅度最大,邵通褐煤浓度增加了4.4%,呼伦贝尔褐煤浓度增加

了5.8%,改性温度超过300℃时,褐煤成浆浓度变化趋缓。

经300℃改性后的邵通褐煤成浆浓度比改性前提高了9.8%,呼伦贝尔褐煤成浆浓度比改性前提高了9.4%。考虑到改性温度高导致成本增加,同时更易造成挥发分等有用成分损失,可在250~300℃区间对褐煤进行改性。与改性前褐煤成浆浓度相比,邵通褐煤的成浆浓度提高了5.4%以上,呼伦贝尔褐煤的成浆浓度提高了3.6%以上。

## 4 结 论

1) 经过煤的基本性质分析和元素分析可知,邵通褐煤为年轻褐煤,呼伦贝尔褐煤为年老褐煤,由于内水高,2种褐煤的成浆浓度低。

2) 粒度越细越有利于水分的脱除,改性温度越高,内水和含氧官能团脱除得越多,但考虑到热力改性成本以及尽可能保留煤的可燃成分,褐煤的最佳改性条件确定为原煤粒度<1 mm,加热停留时间为0.5 h,加热温度为250℃。

3) 褐煤合适的改性温度范围为250~300℃,最佳煤样粗粉的质量比为60:40,经过改性后的邵通褐煤和呼伦贝尔褐煤级配成浆浓度分别比改性前提高了5.4%以上和3.6%以上。

#### 参考文献:

- [1] 赵振新,朱书全,马明杰,等.中国褐煤的综合优化利用[J].洁净煤技术,2008,14(1):28-31.
- [2] 崔义,周鹏.褐煤干燥成型技术的研究[J].洁净煤技术,2012,18(1):42-44.
- [3] 李仲模.褐煤有广泛用途[J].化工矿物与加工,1999(1):32.
- [4] 高俊荣,陶秀祥,侯彤,等.褐煤干燥脱水技术的研究进展[J].洁净煤技术,2008,14(6):73-76.
- [5] 万永周,高俊荣,肖雷,等.褐煤的脱水提质研究[J].煤炭工程,2010(4):75-77.
- [6] 高俊荣,陶秀祥,万永周,等.褐煤热压脱水成型试验[J].煤炭科学技术,2009,37(6):126-128.
- [7] 王纪华,马艳梅,赵宏宇,等.宝日希勒褐煤的压提质试验研究[J].洁净煤技术,2012,18(3):33-36.
- [8] 方雪平,赵坚宇,孙利美,等.K-燃料褐煤提质工艺技术[J].煤炭加工与综合利用,2011(2):52-54.
- [9] 穆静静,张旭辉,苗文华,等.褐煤干燥特性及产品特性研究[J].洁净煤技术,2012,18(4):30-32.

(下转第54页)

加到 66.3% 时,转化率由 95.19% 减少至 82.73%,油产率由 63.85% 下降至 48.49%。由图 4 还可以看出,惰质组体积分数大于 55.0% 时,煤液化油产率变化较为敏感,油产率和转化率出现较大幅度下降;沥青质含量随着惰质组含量增加而增加。说明在相同温度和压力下,惰质组含量越高,煤的转化率和油产率越低,惰质组含量不同对液化性能影响较大,镜质组液化性能优于惰质组。

### 3 结 论

1) 当反应温度为 440~465 °C 时,随着温度的升高,1 号~4 号煤样转化率和油收率均随着温度的升高而增加,沥青产率减小,气产率增加,氢耗增加;5 号样品在 465 °C 后转化率出现下降趋势,裂解反应加剧造成气产率增加,油产率开始降低。

2) 通过提高反应温度可提高惰质组的转化率和油产率,但过高惰质组含量的煤,提高反应温度,煤的转化率略有提高,由于温度过裂解反应加剧导致气体产率增加,油产率减少。

4) 在 7~11 MPa 氢初压范围内,不同显微组分煤的转化率和油产率均随氢初压升高而上升,沥青质产率均随氢初压升高而减小;氢初压提高更有利于惰质组分液化转化。

5) 在反应温度为 460 °C,压力为 10 MPa 下,不同惰质显微组分样品液化性能比较发现,随着惰质组含量升高,煤样的转化率和油产率逐渐减少。显微组分变化对神东煤的液化转化率和油产率影响较大,在相同反应温度条件下,镜质组液化性能优于惰质组。

#### 参考文献:

- [1] 何平. 煤炭直接液化在中国能源战略中的作用[J]. 洁净煤技术, 2004, 10(2): 1-3.
- [2] 李刚, 凌开成. 煤直接液化初始阶段反应特性的研究[J]. 洁净煤技术, 2010, 16(6): 16-19.
- [3] 毛学锋, 胡发亭, 史士东, 等. 煤炭直接液化体系高温高压气液相平衡研究进展及模型选择[J]. 洁净煤技术, 2009, 15(5): 40-43.
- [4] 马嫚, 曹敏, 谷小虎. 煤直接液化用溶剂的研究现状[J]. 洁净煤技术, 2008, 14(6): 36-38.
- [5] 张晓静. 煤炭直接液化溶剂的研究[J]. 洁净煤技术, 2011, 17(4): 26-29.
- [6] 杜淑凤, 舒歌平. 日本褐煤直接液化工艺[J]. 洁净煤技术, 2001, 7(3): 34-37.
- [7] 张伟, 金俊杰, 俞虹, 等. 煤的直接加氢液化工艺[J]. 洁净煤技术, 2001, 7(3): 31-33.
- [8] 李丽, 李克健, 吴秀章. 煤与石油重油共处理协同效应的初步分析[J]. 神华科技, 2009, 7(6): 64-67.
- [9] 吴秀章, 舒歌平. 煤直接液化工业化示范装置操作预案的试验研究[J]. 洁净煤技术, 2009, 15(5): 33-36.
- [10] 舒歌平, 史士东, 李克健. 煤炭液化技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001.
- [11] Li Wenhua, Huo Weidong, Shu Geping, et al. Hydroliquefaction Characteristics of Majiata Coal and its Macerals Components[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2001, 29(2): 104-107.
- [12] 艾军, 郭治, 李克健. 神东煤富惰质组加氢液化反应动力学的研究[J]. 煤炭转化, 2008, 31(2): 25-27.
- [13] 马凤云, 郭靖, 玛·伊·拜克诺夫, 等. 高惰质组分五彩湾煤直接液化性能研究[J]. 煤炭转化, 2011, 33(2): 36-39.
- [14] 高晋生, 张德祥. 煤液化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [15] 盛清涛, 凌开成, 杜晋安. 氢气在煤液化反应中的作用[J]. 煤化工, 2003, 31(6): 29-32.
- [16] 王顺华, 凌开成, 罗化峰, 等. 氢气在煤液化初始高活性阶段的作用机理[J]. 煤炭转化, 2011, 34(3): 36-39.
- [17] 贾风军. 煤质特性与煤直接液化关系分析[J]. 洁净煤技术, 2008, 14(6): 49-50.
- [18] 段清兵, 梁兴, 张胜局, 等. 提高神华煤气化水煤浆浓度的可行性研究[J]. 洁净煤技术, 2010, 16(2): 49-52.
- [19] 陈怀珍. 神华煤制水煤浆特性及工业试验研究[J]. 洁净煤技术, 2007, 13(5): 38-40.
- [20] 段清兵, 何国锋. 改造传统高浓度制浆工艺的生产实践[J]. 洁净煤技术, 2009, 15(1): 32-34.

(上接第 49 页)

- [10] 贾凯. 褐煤的综合利用[J]. 北方环境, 2011(8): 87.
- [11] 王志光, 饶志雄, 张德祥. 云南褐煤水煤浆成浆性分析[J]. 山东冶金, 2007(4): 41-43.
- [12] 周德悟, 李军, 王柏春. 大雁褐煤制水煤浆的研究[J]. 煤气与热力, 1990(2): 8-9.
- [13] 高宇龙. 中国水煤浆制备技术的发展[J]. 洁净煤技术, 2012, 18(5): 56-59.