

## 研究论文

## 我国典型特低灰煤深度脱灰影响因素

朱川<sup>1,2,3</sup>,白向飞<sup>1,3</sup>,涂华<sup>1,3</sup>,陈洪博<sup>1,3</sup>

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 煤化工分院,北京 100013;2. 中国矿业大学(北京) 化学与环境工程学院,北京 100083;

3. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室,北京 100013)

**摘要:** 优质特低灰煤(灰分 $<5.00\%$ )是超纯煤的优质原料。为获得超纯煤原料的优选指标,分析了我国典型优质特低灰煤的区域分布及质量现状,通过不同粒度的浮沉脱灰和化学脱灰试验研究了深度脱灰影响因素。结果表明,我国优质特低灰煤主要分布于西北—华北区域,多为中低变质程度煤,多属于较难~中等可磨煤。浮沉浮煤灰分和化学脱煤灰分是制备超纯煤原料的关键指标。相较于惰质组含量较高的南露天矿煤,太西无烟煤和神东煤破碎至 $<6\text{ mm}$ 以及 $<0.2\text{ mm}$ 时,浮煤灰分降低明显, $<0.2\text{ mm}$ 细煤粉浮沉浮煤灰分分别降低 $60.00\%$ 和 $70.09\%$ 。化学脱灰法降灰后,灰分由低到高为:太西无烟煤 $<$ 神东煤 $<$ 南露天矿煤,太西无烟煤灰分降低至 $0.48\%$ 。

**关键词:** 特低灰煤;超纯煤;可选性;化学脱灰;煤岩显微组分

中图分类号:TQ53

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2018)06-0027-05

## Deep de-ashing influencing factors of typical ultra-low ash coal in China

ZHU Chuan<sup>1,2,3</sup>, BAI Xiangfei<sup>1,3</sup>, TU Hua<sup>1,3</sup>, CHEN Hongbo<sup>1,3</sup>

(1. Coal Chemistry Branch of China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 3. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China)

**Abstract:** Ultra-low ash coal(ash content  $<5.00\%$ ) is high quality raw material for ultra-pure coal. To obtain the optimum indices of raw coal for ultra-pure coal, the regional distribution and quality features of typical high-quality ultra-low ash coal in China was introduced in this paper. The washability and corresponding factors of typical low ash coals were studied using flotation de-ashing method under different granularity and chemical de-ashing method. The results show that most of the high-quality ultra-low ash coals, which mainly distributes in the northwest region in China, are low to middle metamorphic grade and difficult to medium grind coals. Compared with the inertinite-rich Nanlutian coal, the ash reduction of float coal from Taixi anthracite coal and Shendong coal are significant when they are grinded to size less than  $6\text{ mm}$  or  $0.2\text{ mm}$ . The flotation coal ash reduces  $60.00\%$  and  $70.09\%$  for the Taixi and Shendong coal with size less than  $0.2\text{ mm}$ , respectively. After chemical de-ashing, the ash content is in order of Taixi coal  $<$  Shendong coal  $<$  Nanlutian coal, and the Taixi anthracite ash content reduces to  $0.48\%$ .

**Key words:** ultra-low ash coal; ultra-pure coal; washability; chemical de-ashing; coal maceral

## 0 引言

超纯煤是一种高附加值/高能量密度的煤炭产

品,在代油(油水煤浆)、制备高档活性炭、炭黑、精密铸造、IGCC等技术中优势明显<sup>[1-2]</sup>。为了减少泵、活塞、喷嘴及涡轮片的磨损和排渣困难,均要求

收稿日期:2018-01-23;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.18012304

基金项目:北京市科委重大研发计划资助项目(Z161100002616038)

作者简介:朱川(1986—),男,四川广安人,助理研究员,博士,从事煤炭清洁转化与高效利用方向。E-mail: zhuchuan@bricc.cn

引用格式:朱川,白向飞,涂华,等.我国典型特低灰煤深度脱灰影响因素[J].洁净煤技术,2018,24(6):27-31.

ZHU Chuan, BAI Xiangfei, TU Hua, et al. Deep de-ashing influencing factors of typical ultra-low ash coal in China[J].

Clean Coal Technology, 2018, 24(6): 27-31.



移动阅读

使用超纯超,如精细水煤浆要求煤灰分 $<1\%$ ;内燃机燃料要求煤灰分 $<0.5\%$ 甚至 $<0.1\%$ <sup>[3]</sup>。近年来,国内外在制备超纯煤方面开展了大量研究,形成了化学净化和物理分离两大类技术。尽管煤中矿物可选性主要取决于分布状态,与其含量无必然联系,但为保证产品品质和理想收率,上述分离方法均要求原料煤灰分尽可能低<sup>[4]</sup>。我国煤炭成煤环境多样、地质背景复杂,煤中灰分普遍较高,集中在 $15\% \sim 25\%$ ,小于 $10\%$ 的特低灰煤占资源总量 $15\%$ <sup>[5]</sup>。针对特低灰煤的煤质与分选特性,许多学者进行了相关研究。王婕<sup>[6]</sup>研究不同煤种分选影响因素,认为影响产率的显著指标为含氧官能团和接触角,影响灰分的显著指标有变质程度、解离度和表面电位。王绍清等<sup>[7]</sup>分析典型特殊煤种利用途径后认为太西煤是生产超纯煤的优质原料。粒度是影响超纯煤制备的主要因素之一,为获得特低灰一般要求分选前进行超细粉碎。付晓恒等<sup>[8]</sup>认为只有煤粒度粉碎到 $<10 \mu\text{m}$ 时,无机矿物才能得到较充分的解离,黏土矿物含量小的煤可分选出超净煤。另外,煤的超细粉碎方式也会影响超纯煤的分选效果<sup>[2]</sup>。但目前针对灰分 $<5.00\%$ 的优质特低煤资源煤质特征

认识不足,其不同分选方法效果研究较少,本文在分析我国优质特低灰煤( $<5.00\%$ )分布及煤质特性的基础上,选择太西无烟煤、新疆南露天矿煤和神东煤等典型特低灰煤进行不同方法的脱灰评价,并对分选降灰的影响因素进行分析比较,有利于指导超纯煤原料及其分选技术的优选和评价。

## 1 试验

### 1.1 煤质数据来源

GB/T 15224.1—2010《煤炭质量分级 第1部分:灰分》定义灰分 $<10.00\%$ 的煤为特低灰煤,本文定义灰分 $<5.00\%$ 的特低灰煤为优质特低灰煤。根据《中国煤种资源数据库》检索结果,获得我国不同区域特低灰煤的灰分、挥发分、发热量和可磨指数等煤质指标数据。

### 1.2 煤样及煤质分析

采集了太西无烟煤、榆林神东煤和新疆南露天矿煤等不同变质程度的典型优质特低灰煤样品。根据国家标准进行了工业分析、元素分析、全硫、发热量、哈氏可磨性指数、真密度和煤灰成分等分析,结果见表1、表2。

表1 工业分析和元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of coal samples

样品	工业分析/%				元素分析/%					$Q_{gr,d}/$ ( $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	哈氏可磨性 指数 HIG	真密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )
	$M_{ad}$	$A_d$	$V_{daf}$	$FC_d$	$C_{daf}$	$H_{daf}$	$N_{daf}$	$O_{daf}$	$S_{t,d}$			
太西无烟煤	2.19	2.60	8.27	89.35	93.92	3.53	0.95	1.32	0.27	35.43	51	1.41
南露天矿煤	9.78	3.38	31.30	66.38	78.17	3.51	1.06	16.77	0.47	29.07	101	1.51
神东煤	4.13	4.38	36.13	63.87	76.94	5.36	0.92	16.73	0.75	32.05	58	1.38

表2 煤灰成分分析

Table 2 Ash composition of coal samples

样品	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{MnO}_2$	$\text{SO}_3$	$\text{P}_2\text{O}_5$
太西无烟煤	33.60	24.38	11.91	1.24	9.98	3.68	0.57	2.58	0.13	8.50	0.70
南露天矿煤	6.53	6.90	5.34	0.34	30.37	3.69	0.42	6.12	0.10	26.62	0
神东煤	25.30	8.65	16.12	0.61	25.44	1.52	0.34	0.56	0.39	17.56	0.16

### 1.3 浮沉脱灰试验

原料煤破碎至 $<6 \text{mm}$ ,筛分出 $0.5 \sim 6.0 \text{mm}$ 粒级。采用氯化锌配制密度 $1.30 \text{g/cm}^3$ 比重液对上述粒级样品进行浮沉试验,经多次热水清洗并收集上浮物,在 $80 \text{℃}$ 下干燥 $4 \text{h}$ 待用。具体操作方法见GB/T 478—2008《煤炭浮沉试验方法》。

### 1.4 煤粉浮沉-离心脱灰试验

原料煤粉碎至 $<0.2 \text{mm}$ ,采用苯和四氯化碳配制成密度 $1.30$ 和 $1.40 \text{g/cm}^3$ 比重液对上述样品进行离心-浮沉(液固比 $5:1$ 、转速 $3000 \text{r/min}$ 、时间 $10 \text{min}$ ),过滤并收集上浮物,在 $80 \text{℃}$ 条件下干燥 $4 \text{h}$ 待用。

## 1.5 化学脱灰试验

试验样品(原煤及部分手选煤岩组分富集样)破碎至粒度 $<0.2\text{ mm}$ ,称取 $20\text{ g}$ 置于 $300\text{ mL}$ 聚四氟乙烯瓶中,加入 $200\text{ mL}$ 脱灰溶液(按蒸馏水:37% HCl:40% HF=50:30:20配制), $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水浴加热 $4\text{ h}$ ,过滤的同时用热水充分洗涤,直至 $\text{AgNO}_3$ 检测滤液无沉淀。样品在 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下干燥 $4\text{ h}$ 待用。

## 2 结果与讨论

### 2.1 优质特低灰煤资源分布

我国优质特低灰煤主要分布于西北—华北区域,包括山西、陕西、内蒙古、宁夏、新疆等。山西吕梁、大同、朔州以炼焦煤~弱黏煤为主;陕西府谷、神木,内蒙古鄂尔多斯、东胜以及新疆乌鲁木齐、哈密等地以长焰煤为主;宁夏石嘴山为无烟煤,灵武地区为烟煤。

### 2.2 优质特低灰煤分选相关的煤质特性

干燥无灰基挥发分与煤变质程度呈现较好的负相关性。因此,干燥无灰基挥发分与灰分、发热量和哈氏可磨性指数等关系可反映我国不同变质程度的优质特低灰煤质量现状。优质特低灰煤灰分与挥发分的关系如图1所示。由图1可知,除太西无烟煤、吕梁焦煤等少数样品,我国优质特低灰煤资源主要集中于中低变质程度区间。

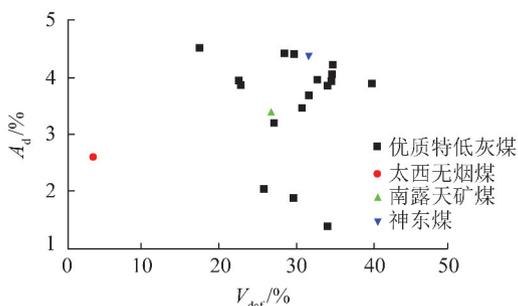


图1 优质特低灰煤灰分与挥发分的关系

Fig. 1 Relationship between ash and volatile matter in ultra-low ash coal

超纯煤灰分小于 $1.00\%$ 甚至 $0.10\%$ , $Q_{gr,d}$ 与其原料煤 $Q_{gr,daf}$ 基本相等,因此选用原料煤 $Q_{gr,daf}$ 作为比较基准。优质特低灰煤 $Q_{gr,daf}$ 与挥发分的关系如图2所示。由图2可知,除太西无烟煤、吕梁焦煤、大同弱黏煤发热量较高,接近或超过 $35\text{ MJ/kg}$ 。其他优质特低灰煤由于变质程度较低,具有较低的发热量。值得注意的是吕梁焦煤、大同弱黏煤具黏结性,不宜作动力用超纯煤的原料。典型优质特低灰

煤发热量从低到高分别为:南露天矿煤 $<$ 神东煤 $<$ 太西无烟煤。神东煤变质程度与南露天矿煤相当,但其镜质组和氢含量显著高于南露天矿煤,具有更高的发热量。

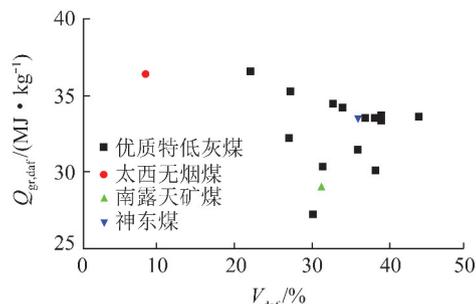


图2 优质特低灰煤发热量与挥发分的关系

Fig. 2 Relationship between calorific value and volatile matter in ultra-low ash coal

制备超纯煤的第1步是通过粉碎实现矿物充分解离,哈氏可磨性指数高的煤在消耗同等能源情况下,磨煤细粒度煤占比更高,有利于包裹矿物的解离。优质特低灰煤哈氏可磨性指数与挥发分的关系如图3所示。由图3可知,我国优质特低煤资源除吕梁焦煤、新疆富惰质组煤等极易磨煤外,大部分优质特低灰煤哈氏可磨性指数集中于较难~中等可磨煤。煤可磨性与变质程度有关。一般而言,焦煤和肥煤具有较高的哈氏可磨性指数,易细磨;无烟煤和褐煤哈氏可磨性指数较低,不易细磨<sup>[9]</sup>。吕梁焦煤哈氏可磨性指数显著高于太西无烟煤和低阶烟煤。煤哈氏可磨性指数还与煤岩显微组分有关<sup>[10]</sup>,惰质组哈氏可磨性指数高于镜质组和壳质组。南露天矿煤属于长焰煤,但其哈氏可磨性指数与吕梁焦煤相当,原因是其主要煤岩显微组分为惰质组,占比 $80\%$ 以上。典型优质特低灰煤资源哈氏可磨性指数从低到高为:太西无烟煤 $<$ 神东煤 $<$ 南露天矿煤。

除灰分、发热量和哈氏可磨性指数外,优质特低灰煤分选制备超纯煤还需考虑真密度、显微组分、黏结指数和煤灰成分等影响分选或影响超纯煤产品利用的煤质指标。

## 2.3 优质特低灰煤可选性

### 2.3.1 原煤灰分对浮煤灰分的影响

煤的可选性受变质程度、煤岩显微类型、密度、矿物特性及其分布等影响,煤中呈浸染状、细分散状或充填于植物胞腔中的矿物是煤可选性优劣的关键。浮煤与原煤灰分关系可较好地反映原煤矿物脱除的难易程度,即煤可选性的优劣<sup>[11]</sup>。

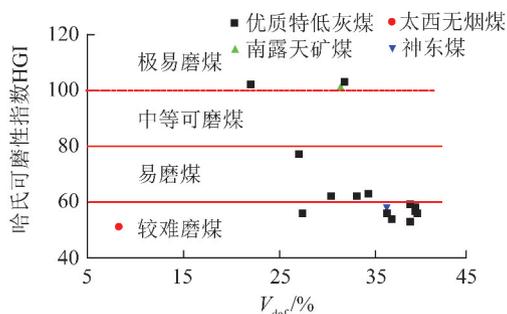
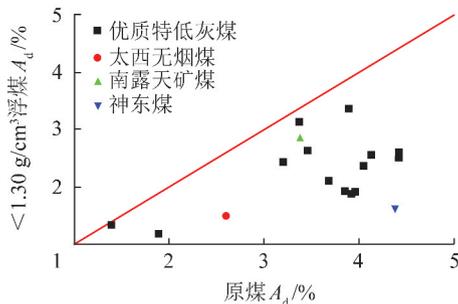


图3 优质特低灰煤哈氏可磨性指数与挥发分的关系

Fig. 3 Relationship between grindability index and volatile matter in ultra-low ash coal

$<1.30 \text{ g/cm}^3$  浮煤灰分与原煤灰分关系如图4所示。图4中样品坐标点与对角线之间的垂线距离反映其降灰难易程度,距对角线距离越远的煤具有更好的浮升降灰效果。

图4  $<1.30 \text{ g/cm}^3$  浮煤灰分与原煤灰分的关系Fig. 4 Relationship between flotation coal (below  $1.30 \text{ g/cm}^3$ ) and raw coal ash

煤中矿物可选性优劣不在于矿物含量,主要取决于煤中矿物分布状态及其破碎解离效果。由图4可知,部分灰分较高的原煤经浮沉后,浮煤灰分显著降低,具有较好的可选性,如神东煤。典型优质特低灰煤可选性从高到低为:神东煤>太西无烟煤>南露天矿煤。

### 2.3.2 颗粒变化对浮煤灰分的影响

通过粉碎使煤中有机质与无机矿物质充分解离是超纯煤制备的必要前提条件<sup>[4]</sup>。破碎粒度越细,矿物解离越充分,分选获得的浮煤灰分越低。太西无烟煤、南露天矿煤和神东煤分选浮煤灰分随粒度的变化如图5所示,相应浮煤收率及其降灰比例见表3。

由图5和表3可知,太西无烟煤和神东煤破碎至 $<0.2 \text{ mm}$  细煤粉时,浮煤灰分降低明显,且收率较高, $<6 \text{ mm}$  浮煤收率分别为50.71%和40.53%; $<0.2 \text{ mm}$  细煤粉浮煤收率分别为42.54%和

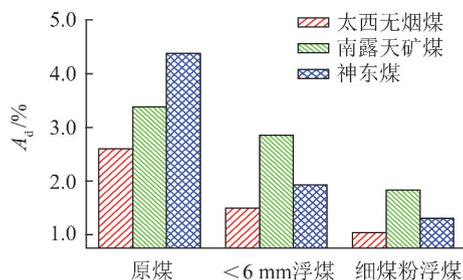


图5 分选浮煤灰分随粒度的变化

Fig. 5 Change of flotation coal ash with particle size

35.28%。而南露天矿煤在2种粒度下浮煤收率均较低,且灰分降低不如太西无烟煤和神东煤显著。太西无烟煤、南露天矿煤和神东煤在 $<0.2 \text{ mm}$  浮沉浮煤灰分较原煤分别降低60.00%、45.86%和70.09%。

表3 浮煤收率及其降灰比例

样品	收率/%		较原煤降灰比例/%	
	$<6 \text{ mm}$ 浮煤	$<0.2 \text{ mm}$ 细煤粉浮煤	$<6 \text{ mm}$ 浮煤	$<0.2 \text{ mm}$ 细煤粉浮煤
太西无烟煤	50.71	42.54	42.31	60.00
南露天矿煤	10.45	5.04	15.68	45.86
神东煤	40.53	35.28	62.79	70.09

### 2.3.3 化学脱灰效果

相较于浮选脱灰和水热处理脱灰<sup>[12]</sup>,化学脱灰是一种更为深度的脱灰方法,可脱除大部分包裹状、细分散及浸染状矿物<sup>[13-14]</sup>。采用HCl和HF混合溶液对太西无烟煤、南露天矿煤和神东煤进行化学脱灰试验。同时为了比较煤岩显微组分对化学脱灰程度的影响,对手选神东煤(SD-R)的富镜质组煤(SD-V)和富惰质组煤(SD-I)进行化学脱灰。化学脱灰煤灰分与原煤灰分的关系如图6所示。

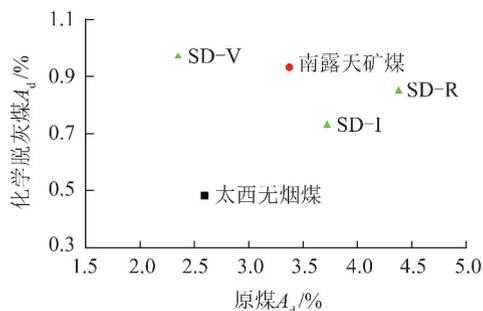


图6 化学脱灰煤灰分与原煤灰分的关系

Fig. 6 Relationship between ash of chemical deashing coal and raw coal

由图6可知,化学脱灰可显著降低太西无烟煤、南露天矿煤和神东煤的灰分,特别是太西无烟煤由原煤灰分2.60%降低至0.48%。化学脱灰煤灰分由低到高为:太西无烟煤<神东煤<南露天矿煤,南露天矿煤矿物主要以包裹状和浸染状为主,浮选脱灰和化学脱灰效果均不及其他2种煤。手选的神东煤富镜质组煤和富惰质组灰分均低于原煤,化学脱灰后的灰分顺序为:SD-I<SD-R<SD-V。

### 3 结 论

1)我国灰分<5.00%的优质特低灰煤分布在山西、陕西、内蒙古、宁夏、新疆等西北—华北区域,煤种包括长焰煤、不黏煤、弱黏煤、炼焦煤和无烟煤等,主要集中于中低变质程度煤。吕梁焦煤和大同弱黏煤发热量较高的特低灰煤因其具有较高黏结性,不宜作动力用超纯煤的原料。哈氏可磨性指数主要受变质程度、煤岩显微组分等影响。除吕梁焦煤和新疆富惰质组煤的哈氏可磨性指数较高,属极易磨煤外,其他低灰煤集中于较难~中等可磨煤。

2)相较于惰质组含量较高的南露天矿煤,太西无烟煤和神东煤破碎至<6 mm和<0.2 mm细煤粉时,浮煤灰分降低明显,且收率较高。太西无烟煤、南露天矿煤和神东煤<0.2 mm浮沉浮煤较原煤灰分分别降低60.00%、45.86%和70.09%。

3)化学脱灰煤灰分由低到高为:太西无烟煤<神东煤<南露天矿煤,太西无烟煤由原煤灰分2.60%降低至0.48%。神东原煤及其手选富镜质组煤和富惰质组煤经化学脱灰后的灰分顺序为:SD-I<SD-R<SD-V。

#### 参考文献 (References):

[1] 王羽玲. 太西无烟煤超纯制备工艺与装备研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2009.

[2] 赵静,付晓恒,王婕,等. 超细粉碎方式对超净煤分选效果的影响[J]. 煤炭学报,2016,41(12):3108-3114.

ZHAO Jing, FU Xiaoheng, WANG Jie, et al. Influence of ultra-fine grinding mode on ultra-clean coal separation effect[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(12):3108-3114.

[3] 吴燕. 超低灰太西无烟煤的选择性粉碎及分选研究[D]. 西安:西安科技大学,2012.

[4] 叶庆春,李新军. 生产超低灰纯煤的原料煤煤质特性分析[J]. 神华科技,2010,8(3):33-35.

YE Qingchun, LI Xinjun. The character analysis of the production of low-ash ultra pure coal of super quality[J]. Shenhua Technolo-

gy, 2010, 8(3):33-35.

[5] 陈双全. 中国选煤技术发展现状及对煤炭清洁利用的影响[J]. 低碳世界, 2017(24):11-12.

CHEN Shuangquan. Development status of coal preparation technology in China and its influence on coal cleaning and utilization [J]. Low Carbon World, 2017(24):11-12.

[6] 王婕. 超细粉碎颗粒性质对超净煤分选的影响[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2016.

[7] 王绍清,唐跃刚,李正越,等. 我国典型特殊煤种特性及利用研究[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(1):32-36.

WANG Shaoqing, TANG Yuegang, LI Zhengyue, et al. Properties and utilization of typical coal types in China[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(1):32-36.

[8] 付晓恒,李萍,刘虎,等. 煤的超细粉碎与超净煤的分选[J]. 煤炭学报, 2005, 30(2):219-223.

FU Xiaoheng, LI Ping, LIU Hu, et al. Ultra-fine coal grinding and ultra-clean coal preparation[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(2):219-223.

[9] 吴任超,何亚群,谢卫宁,等. 低变质煤的密度与粒度对可磨性和能耗的影响[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(8):118-120.

WU Renchao, HE Yaqun, XIE Weining, et al. Density and particle size of low metamorphic coal affected to grindability and energy consumption[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(8):118-120.

[10] 张宇宏,白向飞,丁华,等. 准东煤田煤岩特征与煤质及其工艺性能的关系研究[J]. 煤质技术, 2016(6):1-6.

ZHANG Yuhong, BAI Xiangfei, DING Hua, et al. The study on the relationship between the coal petrographic characteristics of Zhundong coal field and the coal quality or the process performance[J]. Coal Quality Technology, 2016(6):1-6.

[11] 王婕,付晓恒,赵静,等. 超细粉碎对煤表面性质及超净煤分选的影响[J]. 煤炭学报, 2016, 41(6):1524-1532.

WANG Jie, FU Xiaoheng, ZHAO Jing, et al. Effect of ultra-fine grinding on coal surface properties and ultra-clean coal separation[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(6):1524-1532.

[12] NIKEN Wijaya, TECK Kwang Choo, ZHANG Lian. Generation of ultra-clean coal from victorian brown coal: Effect of hydrothermal treatment and particle size on coal demineralization and the extraction kinetic of individual metals[J]. Energy Fuels, 2012, 26, 5028-5035.

[13] JORJANI E, GHASEMI CHAPI H, TAYEBI KHORAMI M. Ultra clean coal production by microwave irradiation pretreatment and sequential leaching with HF followed by HNO<sub>3</sub> [J]. Fuel Processing Technology, 2011, 92:1898-1904.

[14] 赵海铭,付晓恒,王婕,等. 炼焦煤中煤化学脱灰技术的研究[J]. 煤炭技术, 2015, 34(10):292-295.

ZHAO Haiming, FU Xiaoheng, WANG Jie, et al. Study of de-ashing technology of coking middlings[J]. Coal Technology, 2015, 34(10):292-295.