

# 微粉煤旋转摩擦电选降灰试验研究

张卫驰<sup>1,2</sup> 陶有俊<sup>1,2</sup> 宋 傲<sup>1,2</sup> 羨宇帅<sup>1,2</sup> 满忠沛<sup>1,2</sup> 薛雅文<sup>1,2</sup>

(1. 中国矿业大学 煤炭加工与高效洁净利用教育部重点实验室 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 化工学院 江苏 徐州 221116)

**摘 要:** 为了确定微粉煤旋转摩擦电选降灰试验的最佳操作参数,在分析微粉煤试样密度组成、矿物组成及煤和矿物的摩擦荷电性质的基础上,研究了充电器转速、分选电压以及气流速度等关键操作参数对微粉煤旋转摩擦电选降灰效果的影响,并采用 Design-Expert 软件中的 Box-Behnken 试验设计模块对试验参数进行了优化。结果表明:随着充电器转速的增加,精煤产率不断下降,灰分先降低后增加,分选效率先增加后降低。随着分选电压的增加,精煤产率和灰分都呈下降趋势,分选效率不断增加。随着气流速度的增加,精煤产率和灰分先降低后增加,分选效率则不断降低。当充电器转速为 5 000 r/min,分选电压为 40 kV,气流速度为 1.5 m/s 时,微粉煤旋转摩擦电选降灰效果最佳,分选效率最高为 21.34%。

**关键词:** 微粉煤; 旋转摩擦电选; 降灰; 分选效率

中图分类号: TD94 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2017)03-0196-05

## Experimental study on ash reduction of fine coal by rotary triboelectric separation

Zhang Weichi<sup>1,2</sup>, Tao Youjun<sup>1,2</sup>, Song Ao<sup>1,2</sup>, Xian Yushuai<sup>1,2</sup>, Man Zhongpei<sup>1,2</sup>, Xue Yawen<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Coal Processing and Efficient Utilization of Ministry of Education, Xuzhou 221116, China;

2. School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** In order to obtain the optimum operating parameters of fine coal rotary triboelectrostatic separation, the fine coal characteristics of density composition, mineral composition and tribocharged between coal and mineral were analyzed. The influences of key parameters including charger speed, separation voltage and airflow velocity on the ash reduction of fine coal was studied. A Box-Behnken experimental design module in Design-Expert software was used to optimize the experimental conditions. The results showed that with the increase of charger speed, the concentrate yield decreased constantly, the concentrate ash decreased first and then increased, separation efficiency was opposite; with the increase of separation voltage, the concentrate yield and concentrate ash decreased constantly, the separation efficiency increased constantly; with the increase of airflow velocity, the concentrate yield and concentrate ash decreased first and then increased, the separation efficiency decreased constantly. The optimal ash reduction effect was achieved with charger speed of 5 000 r/min, separation voltage of 40 kV and airflow velocity of 1.5 m/s, the separation efficiency was 21.34%.

**Key words:** fine coal; rotary triboelectric separation; ash reduction; separation efficiency

## 0 引 言

我国有近 50% 的原煤是直接利用的,原煤直接利用不仅会造成煤炭资源的浪费,还会带来严重的环境问题<sup>[1-3]</sup>。目前煤炭燃前脱硫降灰技术包括:重力分选法、浮选法、摩擦电选、微波脱硫等技

术<sup>[4-5]</sup>。其中摩擦电选能够节省昂贵的煤泥水处理及产品干燥系统,可大幅节约能耗,降低成本,并减少选煤带来的环境污染,因此摩擦电选降灰工艺成为煤炭清洁发电技术的最佳选择之一<sup>[6-8]</sup>。摩擦电选是利用矿物电性的差异,颗粒互相接触、碰撞和摩擦或使之与某种材料做成的给料槽摩擦,产生大小

收稿日期: 2016-10-19; 责任编辑: 代艳玲 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2017.03.035

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51274200); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20130095110010)

作者简介: 张卫驰(1993—) 男,河南周口人,硕士研究生。Tel: 18252439997 E-mail: 1143194683@qq.com

引用格式: 张卫驰,陶有俊,宋傲,等. 微粉煤旋转摩擦电选降灰试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(3): 196-200, 110.

Zhang Weichi, Tao Youjun, Song Ao et al. Experimental study on ash reduction of fine coal by rotary triboelectric separation[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(3): 196-200, 110.

不同而符号相反的电荷,这些矿物在电场中受到不同的电场力,从而在高压电场中产生不同的运动轨迹从而得以分开<sup>[9-10]</sup>。近年来国内外学者做了大量的研究,Kelvin Jiang 等<sup>[11]</sup>发现摩擦电选系统中,颗粒所带电荷越多,分选效果愈好。Dwari R K 等<sup>[12]</sup>对印度高灰动力煤进行了摩擦电选试验研究,发现铜摩擦器效果最佳。Captain J 等<sup>[13]</sup>和高孟华等<sup>[14]</sup>发现物料的荷电量取决于摩擦材料与矿物颗粒之间功函数的差异。郭健等<sup>[15]</sup>研究了煤和伴生矿物的摩擦荷电特性,发现石英、高岭土、方解石与铜管摩擦均带负电且方解石荷质比最大,高岭土次之,石英最小。Song Y 等<sup>[16]</sup>将各粒级粉煤灰利用百叶窗式电极摩擦电选机进行摩擦电选试验,根据粉煤灰矿物成分的不同,产品中的碳含量最低到 1.5%。黄国涛<sup>[17]</sup>进行了微粉煤的摩擦电选试验,研究发现风量、电压对分选效果存在显著影响。传统的摩擦电选机其充电器是不动的,目前针对可旋转的充电器的研究尚不系统和全面,基于此,笔者采用创新的旋转摩擦电选机<sup>[18]</sup>对微粉煤的分选进行了试验研究,研究了充电器转速、电场电压、气流速度对分选效果的影响,以期开发低成本、高效的微粉煤摩擦电选技术提供技术支撑。

## 1 试验系统与样品

### 1.1 旋转摩擦电选系统

旋转摩擦电选机以旋转充电器作为静电发生装置,其主要优点是:为颗粒与颗粒及颗粒与器壁提供

充足的碰撞,大幅提高了颗粒与静电发生装置金属表面的接触机会,分选效率最大可提高 70%。颗粒在分选腔中的停留时间仅约 0.3 s,所有的颗粒与充电器都有均等的接触充电机会,从而得到更高的产品回收率<sup>[19-20]</sup>。

旋转摩擦电选系统主要由给料装置、旋转充电装置、分选区以及产品收集装置 4 部分组成,其结构如图 1 所示。

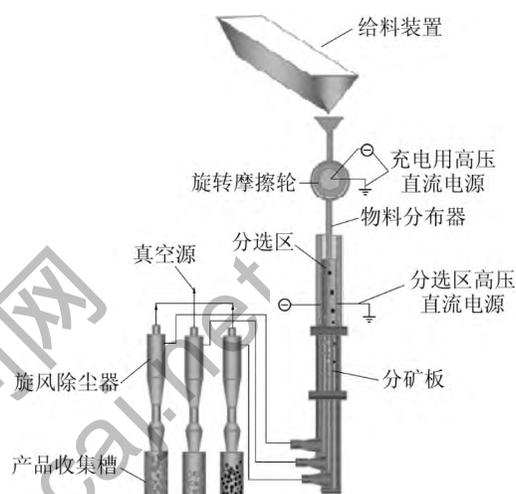


图 1 旋转摩擦电选机结构

Fig. 1 Structural diagram of rotary triboelectrostatic separator

### 1.2 煤样及性质

试验煤样采自山东新汶矿务局汶南煤矿,煤种为贫瘦煤,煤样经粉碎细磨至 0.074 mm 以下,混合均匀后得到试验所需微粉煤样。微粉煤小浮沉试验结果见表 1。

表 1 微粉煤小浮沉试验结果

Table 1 Results of float and sink test of fine coal

密度级/(g·cm <sup>-3</sup> )	产率/%	灰分/%	硫分/%	浮物累计			沉物累计		
				产率/%	灰分/%	硫分/%	产率/%	灰分/%	硫分/%
-1.40	34.19	5.68	1.68	34.19	5.68	1.68	100	44.56	3.63
1.40~1.50	8.41	12.97	1.79	42.60	7.12	1.70	65.81	64.76	4.64
1.50~1.60	3.80	21.86	1.92	46.40	8.33	1.72	57.40	72.35	5.06
1.60~1.80	4.17	32.67	3.09	50.57	10.33	1.83	53.60	75.92	5.28
+1.80	49.43	79.57	5.47	100	44.56	3.63	49.43	79.57	5.47

由表 1 可知:微粉煤试样总灰分为 44.56%,总硫分为 3.63%,属于高灰高硫煤。随着密度级的升高,微粉煤的灰分和硫分逐渐增大,小浮沉各密度级的产率呈现出高、低密度级产率大,中间密度级产率小的规律,+1.80 g/cm<sup>3</sup>密度级含量所占比例较大,灰分较高,达到 79.57%。

采用微电容测量仪和微电荷测量仪分别测定净煤(密度 1.40 g/cm<sup>3</sup> 以下的精煤)和矿物颗粒的介电常数和荷质比,结果见表 2。介电常数越大,导电性越强,摩擦荷电量就越小。净煤摩擦过程中荷正电,黄铁矿、高岭土和石英荷负电,在分选过程中,净煤偏向负极板,矿物颗粒偏向正极板,从而实现分

选,旋转摩擦可强化煤和矿物荷电的差异性。

表2 煤与矿物的摩擦荷电特征

项目	净煤	黄铁矿	高岭土	石英
介电常数	1.14	135.88	1.93	1.74
荷质比/(nC·g <sup>-1</sup> )	7.79	-1.46	-6.27	-4.36

采用D8 ADVANC型X射线衍射仪测定微粉煤X-射线衍射图谱,结果如图2所示。由图2可知,微粉煤中无机矿物成分主要是高岭石、石英,另外包含少量的黄铁矿、伊蒙混层和方解石。其中石英属于亲水性矿物,高岭石和蒙脱石在水中易泥化,传统的湿法分选工艺受其影响较大。相较于湿法分选,采用旋转摩擦电选方法对其分选有很大优势。

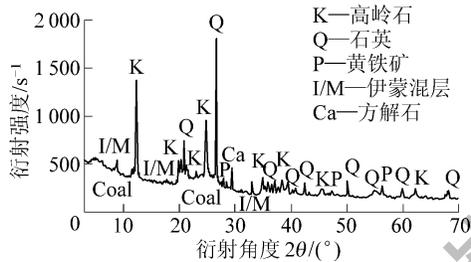


图2 微粉煤X-射线衍射图谱

Fig. 2 X-Ray diffraction spectrum of fine coal

## 2 旋转摩擦电选单因素试验

为确定旋转摩擦电选的最佳分选参数,研究了充电器转速、分选电压和气流速度3个参数对分选效果的影响,采用精煤产率、精煤灰分、分选效率作为评价指标。

$$\text{分选效率 } \eta = \gamma_j \times \left( \frac{1-A_j}{1-A_y} - \frac{A_j}{A_y} \right) \times 100\%$$

式中:  $\gamma_j$  为精煤产率  $A_j$  为精煤灰分  $A_y$  为原煤灰分。

### 2.1 充电器转速

在旋转摩擦电选中,充电器转速是影响分选效果的重要因素,充电器转速的大小直接影响颗粒的荷电。分选电压为30 kV,气流速度为6.0 m/s,充电器转速对分选效果的影响如图3所示。

由图3可知,随着充电器转速的增加,精煤产率呈现降低趋势,精煤灰分先降低后升高。在充电器转速为4 000 r/min时,精煤的灰分最低为34.32%,产率为29.81%,分选效率13.70%。充电器的转速越大,使得摩擦带电效应增强,将增加低密度级微粉煤与高密度级的摩擦荷电量,有利于分选。当充电

器转速过大,摩擦轮表面气流速度变大,颗粒与其摩擦碰撞概率降低,不利于分选。

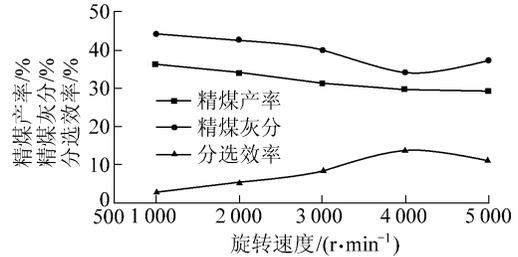


图3 充电器转速对分选效果的影响

Fig. 3 Effect of charger rotation speed on separation effect

### 2.2 分选电压

在微粉煤摩擦电选过程中,摩擦带电颗粒要在分选室分离,电场强度的大小直接影响分选效果。充电器转速4 000 r/min,气流速度6.0 m/s时,分选电压对分选效果的影响如图4所示。

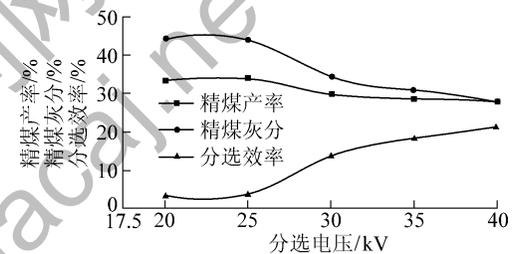


图4 分选电压对分选效果的影响

Fig. 4 Effect of separation voltage on separation effect

由图4可知,随着分选电压的增大,精煤产率和灰分都呈降低趋势,分选效率不断升高。在分选电压为40 kV时,精煤灰分为27.94%,产率为27.98%,分选效率21.23%。随着分选电压的增加,分选室的电场强度越大,微粉煤颗粒在分选室中所受的横向电场力越强,微粉煤在摩擦电选过程中降灰效果越明显。但分选电压不能无限制地增加,应当在不击穿分选室中间空气层的前提下,适当增加分选电压。

### 2.3 气流速度

充电器转速4 000 r/min,分选电压40 kV,气流速度对分选效果的影响如图5所示。

由图5可知,随着气流速度的增大,精煤产率和灰分先降低后升高,分选效率不断下降。气流速度的大小直接影响到微粉煤带电颗粒在分选室中的停留时间,气流速度过低时,微粉煤的输送将受到影响,气流速度过高时,会导致微粉煤在分选室中的停留时间过短,微粉煤还没有被完全分选已经落到分矿板内,这将会影响分选效果,因此随着气流速度的增加,微粉煤摩擦电选的分选效率在逐渐降低。气

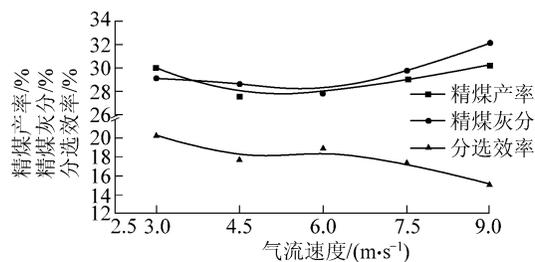


图 5 气流速度对分选效果的影响

Fig. 5 Effect of airflow rate on separation effect

流速度为 3.0 m/s 左右时分选效率最大 微粉煤摩

表 3 微粉煤旋转摩擦电选 Box-Behnken 试验条件与结果

Table 3 Box-Behnken experimental results of rotary triboelectrostatic separating fine coal

序号	充电器转速/(r·min <sup>-1</sup> )	分选电压/kV	气流速度/(m·s <sup>-1</sup> )	精煤		尾煤		分选效率/%
				产率/%	灰分/%	产率/%	灰分/%	
1	3 000	30	3.0	28.45	33.62	71.55	51.40	14.56
2	5 000	30	3.0	29.35	33.34	70.65	51.11	14.84
3	3 000	40	3.0	29.87	30.67	70.13	51.02	17.23
4	5 000	40	3.0	28.14	26.25	71.86	52.38	21.35
5	3 000	35	1.5	29.39	30.85	70.61	53.19	18.63
6	5 000	35	1.5	29.19	29.54	70.81	52.55	19.16
7	3 000	35	4.5	28.38	35.46	71.62	51.19	12.84
8	5 000	35	4.5	30.31	32.83	69.69	51.62	15.98
9	4 000	30	1.5	26.81	29.71	73.19	49.50	15.75
10	4 000	40	1.5	27.89	28.78	72.10	52.46	19.18
11	4 000	30	4.5	29.66	36.48	70.35	51.00	12.17
12	4 000	40	4.5	28.90	34.39	71.11	53.33	15.60
13	4 000	35	3.0	29.37	33.54	70.63	52.59	15.86
14	4 000	35	3.0	27.44	31.04	72.57	53.52	17.95
15	4 000	35	3.0	29.15	31.70	70.85	52.23	17.06
16	4 000	35	3.0	27.77	34.90	72.23	50.72	12.76
17	4 000	35	3.0	27.58	30.14	72.42	50.32	16.30

由表 3 分析可知: 第 4 组试验结果最好, 即充电器转速 5 000 r/min, 分选电压 40 kV, 气流速度 3.0 m/s 时, 分选效率最高为 21.35%。根据表 3 的 17 组试验数据, 利用 Design-expert 软件对试验参数优化, 即在获得最佳降灰指标的情况下, 各参数取值最优, 微粉煤旋转摩擦电选降灰试验方案优化结果见表 4。对试验结果做响应面分析, 其中当气流速度为 1.5 m/s 时, 充电器转速和分选电压与可信度的关系如图 6 所示。

由表 4 可以看出, 利用 Design-Expert 对试验结果优化后得到 10 种优化方案。方案 1 中当充电器转速为 5 000 r/min、分选电压 40 kV 以及气流速度为 1.5 m/s 时, 可信度最高。从图 6 可知, 当气流速度为 1.5 m/s 时, 充电器转速一定时, 可信度随着分选电压的增加而增加, 当分选电压一定时, 可信度随

擦电选效果最好。

### 3 旋转摩擦电选最佳操作参数确定

根据单因素试验结果, 确定了充电器转速、分选电压、气流速度 3 个操作参数的大致范围, 考虑到各因素间可能存在交互作用, 运用 Design-Expert 软件中的 Box-Behnken 模块对三因素三水平的微粉煤摩擦电选试验结果进行分析, 从而确定充电器转速、分选电压、气流速度的最佳取值, 试验条件及结果见表 3。

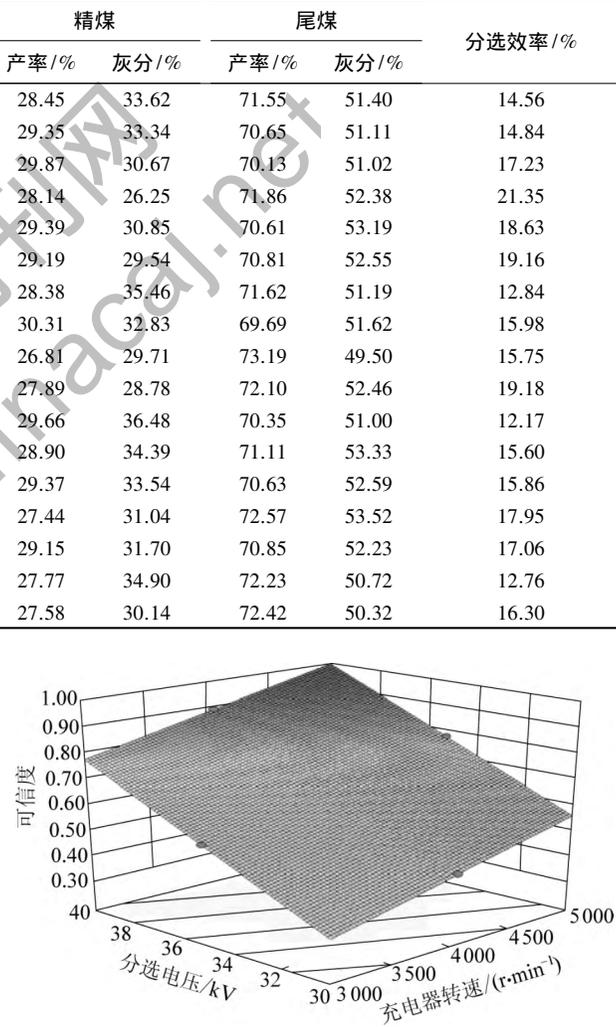


图 6 气流速度 1.5 m/s 时, 充电器转速和分选电压与可信度的三维关系

Fig. 6 Three-dimensional relationship of desirability with charger rotation speed and separation voltage when airflow rate is 1.5 m/s

着充电器转速的增大而升高, 当充电器转速为 5 000

r/min、分选电压 40 kV 时,可信度最高,因此微粉煤作参数的取值。  
摩擦电选降灰的最佳操作参数应为可信度最高时操

表4 微粉煤旋转摩擦电选降灰试验方案优化

Table 4 Optimal solutions with rotary triboelectrostatic separating fine coal

序号	充电器转速/( $r \cdot \min^{-1}$ )	分选电压/kV	气流速度/( $m \cdot s^{-1}$ )	分选效率/%	可信度
1	5 000.00	40.00	1.50	21.34	1.00
2	4 999.99	40.00	1.51	21.32	1.00
3	4 981.48	40.00	1.50	21.32	1.00
4	5 000.00	39.90	1.50	21.30	0.99
5	5 000.00	40.00	1.54	21.29	0.99
6	4 932.84	40.00	1.50	21.27	0.99
7	4 999.97	40.00	1.58	21.22	0.99
8	4 882.78	40.00	1.50	21.22	0.99
9	5 000.00	40.00	1.63	21.16	0.98
10	5 000.00	39.50	1.50	21.14	0.98

## 4 结 论

1) 充电器转速对旋转摩擦电选分选效果有显著影响,通过试验结果可以看出,随着充电器转速的增加,分选效率先增加后降低,存在最佳转速点。

2) 分选电压的增加有利于旋转摩擦电选的分选,主要通过影响颗粒所受的电场力与空气拖曳力的相对大小,从而影响颗粒在分选腔内的横向运动速度及位移,进而影响试验分选效果。不击穿分选室中间空气层的前提下,分选电压在 40 kV 时,分选效果最好。

3) 气流速度主要通过影响颗粒在分选腔的停留时间和分散程度,从而影响微粉煤旋转摩擦电选的分选效果,气流速度过大过小都不利于分选,存在最佳值。

4) 通过 Design-Expert 软件对试验参数优化,得出了微粉煤旋转摩擦电选的最佳操作参数,即在充电器转速为 5 000 r/min、分选电压 40 kV、气流速度 1.5 m/s 时,分选效果最好,达到 21.34%。

### 参考文献(References):

[1] 张惠林. 浅谈煤炭洗选加工现状及发展[J]. 化工设计通讯, 2016, 42(3): 9-10.  
Zhang Huilin. Present situation and development of coal washing and processing[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2016, 42(3): 9-10.

[2] 邹威, 赵树果, 张亚伦, 等. 我国洗选煤现状及节能对策[J]. 现代矿业, 2016(8): 91-93.  
Zou Wei, Zhao Shuguo, Zhang Yalun, et al. Washing and separation coal present situation and energy saving measures in our country

[J]. Modern Mining, 2016(8): 91-93.

[3] 张海洋. 我国煤炭工业现状及可持续发展战略[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(S1): 281-284.

Zhang Haiyang. China coal industry status and sustainable development strategy [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(S1): 281-284.

[4] 袁鉴. 煤炭脱硫技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(4): 99-103.

Yuan Jian. Research progress of coal desulfurization [J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(4): 99-103.

[5] 宋傲, 陶有俊, 袁宇帅, 等. 微粉煤表面改性强化旋转摩擦电选脱硫降灰试验研究[J]. 中国煤炭, 2015, 41(12): 79-85.

Song Ao, Tao Youjun, Xian Yushuai, et al. Experimental research on surface modification of fine coal strengthening desulfurization and ash reduction through rotation friction electric separation [J]. China Coal, 2015, 41(12): 79-85.

[6] 焦有宙, 武卫政, 孙育峰, 等. 干排粉煤灰摩擦高压静电炭技术试验研究[J]. 华北水利水电学院学报, 2005, 26(4): 72-75.

Jiao Youzhou, Wu Weizheng, Sun Yufeng, et al. Experimental study on frictional high-voltage electrostatic decarbon technology of dry discharge fly ash [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2005, 26(4): 72-75.

[7] 孙振华. 神东长焰煤煤岩显微组分电选富集研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.

[8] 梅雄, 章新喜, 陈锋, 等. 微粉煤的摩擦电选脱灰试验研究[J]. 煤炭技术, 2012, 31(1): 140-142.

Mei Xiong, Zhang Xinxi, Chen Feng, et al. Research on triboelectrostatic deslime test of fine coal [J]. Coal Technology, 2012, 31(1): 140-142.

[9] 于慧敏, 戴慧新, 陈晓鸣, 等. 国外摩擦电选的研究与发展[J]. 矿产保护与利用, 2015(4): 67-72.

Yu Huimin, Dai Huixin, Chen Xiaoming, et al. Research and development

(下转第 110 页)

- 2015, 34(7): 862-865.
- Li Xiaohuo, Wang Jinxing, Guo Na *et al.* Simulation of arm and hydraulic cylinder hinge point forces for impacting-crushing rock-roadheader working mechanism [J]. Journal of Liaoning Technical University: Nature Science, 2015, 34(7): 862-865.
- [10] Xin D Z, Chen S L, Wang Q F. Technology of load-sensitivity used in the hydraulic system of an all-hydraulic core rig [J]. Journal of Coal Science & Engineering, 2009(3): 318-323.
- [11] Mansour A E, Wirsching P H. Sensitivity factors and their application to marine structures [J]. Marine Structures, 1995, 8(3): 229-255.
- [12] 张春辉, 赵静一, 布丹等. 基于 AMESim 的负载敏感充液系统研究 [J]. 液压与气动, 2014(11): 6-9.
- Zhang Chunhui, Zhao Jingyi, Bu Dan, *et al.* Research of load-sensing charging system based on AMESim [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2014(11): 6-9.
- [13] 赵斌. 履带行走式液压支架液压系统仿真分析 [J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(4): 101-105.
- Zhao Bin. Simulation analysis on hydraulic system of crawler walking type hydraulic powered support [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(4): 101-105.
- [14] Ma Zeyu, Wu Jinglai, Zhang Yunqing, *et al.* Recursive parameter estimation for load sensing proportional valve based on polynomial chaos expansion [J]. Engineering Computations, 2015, 32(5): 1343-1371.
- [15] Yu Jingguo. Simulation analysis of pump control constant pressure variable technology hydraulic drilling system based on AMESim [J]. Coal Engineering, 2011(12): 80-81.
- [16] Gawthrop Peter J, Bevan Geraint P. Bond-graph modeling [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2007, 27(2): 24-45.
- [17] 黄虎, 陈光柱, 蒋成林. 全液压钻机负载敏感液压系统设计与仿真分 [J]. 液压与气动, 2015(3): 71-74.
- Huang Hu, Chen Guangzhu, Jiang Chenglin. The design and simulation of load sensing hydraulic system in fully hydraulic driver drill [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2015(3): 71-74.
- [18] 陈博, 杨国平, 高军浩. 基于 AMESim 气液联合式液压冲击器的建模与仿真 [J]. 上海工程技术大学学报, 2011, 25(4): 292-295.
- Chen Bo, Yang Guoping, Gao Junhao. Modeling and simulation of gas-liquid united hydraulic impactor based on AMESim [J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2011, 25(4): 292-295.
- [19] 秦贞超, 周志鸿, 周梓荣等. 基于 AMESim 的水压凿岩机冲击机构建模与仿真 [J]. 液压气动与密封, 2010, 30(12): 32-34.
- Qin Zhenchao, Zhou Zhihong, Zhou Zirong, *et al.* Modeling and simulation of the impact of institutions of hydraulic rock drill based on AMESim [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2010, 30(12): 32-34.
- [20] 杨林. 钻装机凿岩系统仿真分析及试验研究 [J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(S1): 293-296.
- Yang Lin. Simulation analysis and experimental study of rock drilling system in drill loader [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(S1): 293-296.
- [21] 文泽军, 王进, 杨书仪等. 水压式打桩机冲击器液压系统建模与仿真分析 [J]. 中国机械工程, 2013, 24(13): 1809-1816.
- Wen Zejun, Wang Jin, Yang Shuyi, *et al.* Modeling and simulation analysis on impactor hydraulic system of water-powered pile driver [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(13): 1809-1816.
- Coal Science and Technology, 2007, 35(8): 68-71.
- [15] 郭健, 董克增, 黄正梁等. 煤中伴生矿物的摩擦荷电特性 [J]. 化工学报, 2014, 65(10): 3776-3782.
- Guo Jian, Dong Kezeng, Huang Zhengliang, *et al.* Triboelectrification characteristics of associated minerals in coal [J]. CIESC Journal, 2014, 65(10): 3776-3782.
- [16] Song Y, Irdi G A, McLendon T R, *et al.* Triboelectrostatic beneficiation of fly ash with different charging materials [J]. Chemical Engineering & Technology, 2007, 30(2): 214-219.
- [17] 黄国涛. 微粉煤的摩擦电选试验研究 [J]. 煤炭技术, 2015, 34(5): 315-317.
- Huang Guotao. Research on triboelectrostatic test of fine coal [J]. Coal Technology, 2015, 34(5): 315-317.
- [18] 陶东平. 静电颗粒带电分选装置: 中国, ZL200420079562.1 [P]. 2005-12-14.
- [19] Tao Daniel, Fan Maoming, Jiang Xinkai. Dry coal fly ash cleaning using rotary triboelectrostatic separator [J]. Mining Science and Technology, 2009, 19(5): 642-647.
- [20] Tao Daniel, Al-Hwaiti Mohammad. Beneficiation study of eshidiya phosphorites using a rotary triboelectrostatic separator [J]. Mining Science and Technology, 2010, 20(3): 357-364.
- status of triboelectrostatic beneficiation abroad [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2015(4): 67-72.
- [10] 何鑫, 章新喜, 李超永等. 摩擦电选技术的现状与进展 [J]. 煤炭技术, 2015, 34(2): 334-336.
- He Xin, Zhang Xinxi, Li Chaoyong, *et al.* Present situation and development of triboelectrostatic separation technology [J]. Coal Technology, 2015, 34(2): 334-336.
- [11] Kelvin Jiang, Daniel Tao, John M Stencil. Enhancement of dry triboelectric separation of fly ash using seed particles [J]. Coal Preparation, 2003, 23(1/2): 67-76.
- [12] Dwari R K, Hanumantha Rao K. Tribo-electrostatic behaviour of high ash non-coking indian thermal coal [J]. International Journal of Mineral Processing, 2006, 81(2): 93-104.
- [13] Captain J, Trigwell S, Arens E, *et al.* Tribocharging lunar simulant in vacuum for electrostatic beneficiation [J]. Aip Conference Proceedings, 2007, 880(1): 951-956.
- [14] 高孟华, 章新喜, 陈清如等. 中梁山煤摩擦电选可选性研究 [J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(8): 68-71.
- Gao Menghua, Zhang Xinxi, Chen Qingru, *et al.* Research on triboelectrostatic coal preparation ability of Zhongliangshan Coal [J].