

文章编号: 0253 - 9993(2013) 11 - 1977 - 05

# 煤体吸附瓦斯过程表面电位特征实验研究

刘永杰 李忠辉 宋大钊 李学龙 苏 飞 景林波

(中国矿业大学 安全工程学院 江苏 徐州 221116)

**摘 要:** 为了研究煤体吸附瓦斯过程表面电位特征规律,设计了煤体吸附瓦斯过程的表面电位实验系统,测试了不同压力下煤体吸附瓦斯的电位信号。实验结果表明,煤体在吸附瓦斯过程中能够产生表面电位信号,且随着吸附时间的增长表面电位信号逐渐增大。对于同一个煤样,不同瓦斯压力下吸附过程中煤体产生的表面电位信号对前一次吸附瓦斯压力下煤体产生的电位信号具有记忆效应,当吸附瓦斯压力超过前一次吸附瓦斯压力值时,煤体产生的表面电位信号较大。而当吸附瓦斯压力低于前一次吸附瓦斯压力值时,煤体产生的表面电位较小。煤体吸附瓦斯产生表面电位信号的主要原因是瓦斯气体在煤体孔隙内渗流时产生流动电势,以及瓦斯气体对煤体微裂纹、裂隙的破坏产生的自由电荷等。

**关键词:** 表面电位; 吸附; 瓦斯; 记忆效应; 特征规律

**中图分类号:** TD712 **文献标志码:** A

## Experimental research on surface potential induced by gas sorption process in coal

LIU Yong-jie, LI Zhong-hui, SONG Da-zhao, LI Xue-long, SU Fei, JING Lin-bo

(School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** In order to study the surface electric potential signals during the coal adsorbing gas, designed the experiment system of the coal adsorbing gas and tested the electric potential signal generated during the coal adsorbing gas under different gas pressure. Experiment results show that surface potential signals can be generated in the process of adsorbing gas, and they increases gradually along with the growth of adsorption time. For the same coal samples, different gas pressure from the coal surface potential signal to the first adsorption gas pressure of coal potential signal has a memory effect in the process of absorption. When the adsorption gas pressure is higher than the first adsorption gas pressure, the coal induces stronger surface potential signals. And when the adsorption gas pressure is lower than the first adsorption gas pressure, the coal induce weaker surface potential signals. The main reasons why surface potential signals can be generated from coal adsorbing gas are that the gas seepage in coal pores produces flow potential and free charge is generated when the gas damages micro cracks and crack of coal.

**Key words:** surface potential; sorption; gas; memory effect; characteristics

煤炭开采过程中,孔隙气体如瓦斯、二氧化碳等对煤岩体的变形和破坏过程有比较明显的影响,瓦斯在煤体中的渗透、运移,以及吸附等与煤体之间的耦合作用异常复杂,煤体骨架的变形和瓦斯在煤体中形态的变化,以及煤与瓦斯这个固流耦合过程是含瓦斯

煤岩动力灾害的一个重要因素<sup>[1-7]</sup>。为了解瓦斯和煤岩体之间耦合作用关系,通过对煤体吸附瓦斯产生的表面电位进行研究,探讨了煤体吸附瓦斯过程中产生表面电位的特征规律及其产生机理。这将对于认识煤层瓦斯流动理论、煤与瓦斯突出机理等

收稿日期: 2012-12-14 责任编辑: 许书阁

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-10-0768); 国家“十二五”科技支撑计划资助项目(2012BAK04B07-2); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2012DXS02)

作者简介: 刘永杰(1987—),男,河南永城人,硕士研究生。Tel: 0516-83590558 E-mail: liuyongjie0203@126.com

具有十分重要的意义。

国内外学者围绕煤体瓦斯的吸附过程开展了大量的研究,易俊、姜永东等<sup>[8]</sup>分析了在交变电场声场作用下煤对瓦斯的吸附过程,发现电场的交替变化减弱了煤对瓦斯的吸附能力;何学秋和王恩元等<sup>[9-10]</sup>采用表面物理化学理论分析了煤体吸附膨胀变形机制,并研究了吸附瓦斯对煤岩体的蚀损效应;李忠辉等<sup>[11]</sup>研究了瓦斯在煤体中的运移能够产生电位信号;徐龙君等<sup>[12]</sup>研究了在外加直流电流的作用下煤的吸附特征;Farhang Sereshki、Harpalani S 等<sup>[13-14]</sup>研究了吸附过程对瓦斯渗透的影响;许江、彭守建等<sup>[15]</sup>研究了蠕变对含瓦斯煤渗透率的影响;G. X. Wang 等<sup>[16]</sup>通过实验研究提出了煤体内孔隙的变化是由于 $\text{CO}_2$ 和 $\text{CH}_4$ 的吸附解吸引起的,从而影响了煤体渗透率的变化;张晓东等<sup>[17]</sup>提出了煤体吸附性能的大小与粒径和温度有直接的关系;赵志根、唐修义等<sup>[18]</sup>根据煤吸附甲烷的Langmuir方程,结合实测吸附数据绘制出煤岩体吸附瓦斯的特性曲线;李忠辉等<sup>[19]</sup>研究了不含瓦斯煤岩体失稳破坏的表面电位特征规律,发现煤体的破坏能够产生表面电位。

综上所述,国内外关于吸附瓦斯过程煤体膨胀及其对煤层渗透率影响的研究成果比较丰富,这为笔者开展煤体吸附瓦斯产生表面电位的研究提供了有益的参考。通过对煤体吸附瓦斯产生表面电位的研究,为深入理解煤体吸附瓦斯微观过程、瓦斯在煤体内渗流及瓦斯气体对煤体的蚀损动力过程提供了一种研究手段。

## 1 实验

### 1.1 实验系统及实验方案

#### 1.1.1 实验系统及样品制备

实验系统包括LB-IV型多通道电位数据采集系统、密封缸体、高压瓦斯气源、管路系统、阀门和压力表等,如图1所示。实验中,LB-IV型多通道电位数据采集系统的采样频率为3 Hz;密封缸体采用刚性结构,缸体上部开口连接气体管路,缸体中部连接电极线路;实验所采用的气体为99.9%的高纯瓦斯气体。

进行吸附瓦斯实验的煤样采用原煤试样,采自焦作九里山煤矿,加工成外径尺寸 $\phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的圆柱体煤样,其煤质特征见表1。

#### 1.1.2 实验方案及步骤

为了分析在不同瓦斯压力下煤体吸附瓦斯过程产生电位信号的特征规律,实验中选用0.4、0.6、0.8 MPa三个瓦斯压力进行了实验,设计了2种实验方案:① 吸附瓦斯压力逐次上升,充气0.4 MPa保压

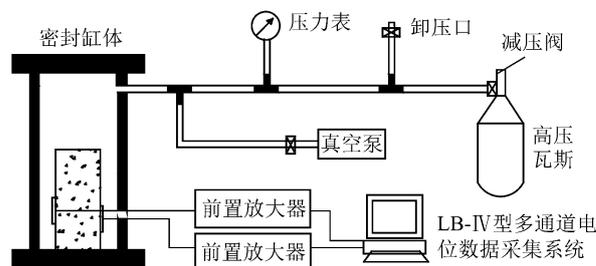


图1 实验系统结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of experimental system

表1 实验煤样的煤质分析

%		
水分	灰分	挥发分
1.31	10.52	33.50

5 h→放气→充气0.6 MPa保压5 h→放气→充气0.8 MPa保压5 h→放气;② 吸附瓦斯压力逐次下降,充气0.8 MPa保压5 h→放气→充气0.6 MPa→放气→充气0.4 MPa保压5 h→放气。

具体实验步骤如下:

(1) 把煤样装入密封缸体内,检查实验系统及密封缸体的气密性,采用真空泵对密封缸体抽真空,保持约1 h。

(2) 启动LB-IV型电位数据采集系统,设置系统实验参数,使得未开始采集数据时的均值和均方差趋近于0,然后开始进行数据采集,对未充入瓦斯时缸体内的表面电位信号进行监测,约1 000 s。

(3) 打开高压瓦斯瓶总阀门,充入瓦斯压力为0.4 MPa的瓦斯气体,保持这一瓦斯压力,并对煤体吸附瓦斯过程的表面电位信号进行监测,实验保持5 h左右。

(4) 等待第1个吸附过程结束后,打开阀门并采用真空泵对实验缸体进行抽气1 h,随后充入0.6 MPa的瓦斯气体,并实时监测煤体吸附瓦斯过程中的表面电位信号,实验保持5 h左右。

(5) 等待第2个吸附过程结束后,打开阀门并采用真空泵对实验缸体进行抽气1 h,随后充入0.8 MPa的瓦斯气体,并实时监测煤体吸附瓦斯过程中的表面电位信号,实验保持5 h左右,然后放气。

(6) 根据实验需要,当吸附瓦斯压力逐次下降时重复上述步骤(3)~(5)。

### 1.2 结果及分析

图2为原煤试样在吸附瓦斯压力逐次上升过程中产生的表面电位信号。从图2可以看出:煤体在吸附瓦斯后能够产生表面电位,且随着吸附时间的增

长, 吸附瓦斯量逐渐增大, 表面电位信号逐渐增强。另外吸附瓦斯过程的产生的表面电位信号呈现明显的 3 个阶段: 第 1 阶段在 0~4 000 s 内, 表面电位信号随着时间增加缓慢增大; 第 2 阶段在 4 000~12 000 s 内, 表面电位信号随着时间增长快速增大; 第 3 阶段在 12 000~18 000 s 内, 表面电位信号随着时间增加缓慢增到最大值并在最大值附近波动。

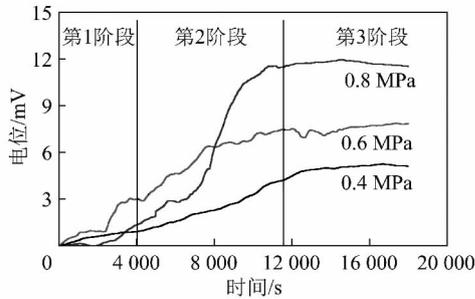


图 2 瓦斯压力逐次上升时的电位信号

Fig. 2 Potential signal during gas pressure successive rising

这表明瓦斯向煤体内部吸附渗流致使煤体内部产生微破裂, 从而产生电位信号, 且随着吸附瓦斯量的逐渐增加, 吸附应力逐步增大, 瓦斯分子能够楔开煤体内大于或等于瓦斯气体分子尺度的裂隙, 从而导致煤体内部产生较多的微变形或微破裂, 即电位信号逐渐增大。

从图 2 还可以看出: 0.6 MPa 瓦斯压力下煤体产生的表面电位信号比 0.4 MPa 瓦斯压力下煤体产生的电位信号要强, 且 0.6 MPa 瓦斯压力下煤体产生的电位信号最大值约为 8 mV, 0.4 MPa 瓦斯压力下煤体产生的电位信号最大值约为 5 mV, 即当充入瓦斯的压力超过前一次充入瓦斯的压力时, 煤体吸附过程产生的表面电位信号出现明显的增强趋势。其中当瓦斯压力为 0.8 MPa 时, 电位信号的最大值约为 12 mV, 比充入瓦斯压力为 0.4 MPa 时的电位信号最大值大了 2 倍多。

这表明, 不同瓦斯压力下吸附过程中煤体产生的表面电位信号对前一次吸附瓦斯压力下煤体产生的电位信号具有记忆效应。煤体吸附瓦斯时, 瓦斯气体在压力梯度的作用下首先进入到煤体内颗粒微元之间相互作用力较弱的孔隙中, 进而慢慢的渗透到其他的孔隙中。当煤体充入瓦斯压力较低时, 即瓦斯压力 0.4 MPa 时, 瓦斯分子进入到煤体内尺寸等于或大于瓦斯气体分子平均自由程的裂隙或孔隙内, 在瓦斯压力梯度和吸附应力的作用下, 煤体初次受到损伤而产生变形, 而产生电位信号。在第 2 次充入瓦斯压力为 0.6 MPa 的气体过程中, 煤体将会在初次损伤变形的基础上受到进一步的破坏, 而这一过程产生的电位信

号将比第 1 次 0.4 MPa 时产生的电位信号要大。最后充入的瓦斯压力为 0.8 MPa, 此时的高压瓦斯气体分子将会在前两次损伤的基础上楔开煤体内大于瓦斯气体分子尺度的孔隙或裂隙, 使得煤体内产生更多的微破裂或微变形, 从而产生更大的电位信号。

图 3 为原煤试样在吸附瓦斯压力逐次下降过程产生的表面电位信号, 从图 3 可以看出: 在吸附瓦斯压力逐次下降这一过程中, 0.6 MPa 瓦斯压力下煤体产生的表面电位信号比 0.8 MPa 瓦斯压力下煤体产生的电位信号要弱, 且 0.6 MPa 瓦斯压力下煤体产生的电位信号最大值约为 6.5 mV, 0.8 MPa 瓦斯压力下煤体产生的电位信号最大值约为 8.5 mV, 即当充入瓦斯的压力低于前一次充入瓦斯的压力时, 吸附过程煤体产生的表面电位信号出现减弱的趋势。其中当瓦斯压力减小到 0.4 MPa 时, 电位信号的最大值约为 4.5 mV, 比第 1 次充入瓦斯压力为 0.8 MPa 时的电位信号减小了 1/2 左右。

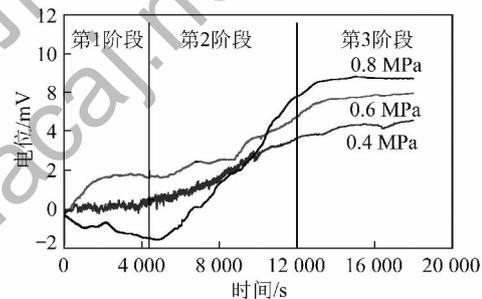


图 3 瓦斯压力逐次下降时的电位信号

Fig. 3 Potential signal during gas pressure successive dropping

以上分析表明, 当吸附瓦斯压力低于前一次吸附瓦斯压力时, 煤体产生的表面电位信号最大值比前一次小, 由于煤体破坏的记忆效应, 在低于前一次的吸附瓦斯压力下, 只能导致煤体内部少量破坏, 产生较低的表面电位。

## 2 吸附瓦斯过程产生电位机理的探讨

### 2.1 吸附瓦斯过程的表面电位规律

通过实验结果可以看出, 在煤体吸附瓦斯过程中产生了较为丰富的表面电位信号, 且具有明显的规律。在不同瓦斯压力下, 电位信号均表现出随吸附时间的增长而逐渐增大的趋势, 随着瓦斯压力的增大, 电位信号出现增大的现象。

煤体吸附瓦斯过程产生表面电位信号的机理主要有两个方面: 一是在吸附充气过程中, 瓦斯气体压力梯度对煤体造成损伤, 使煤体内部产生微变形或微破裂, 从而产生表面电位信号; 二是吸附瓦斯在煤体裂隙或孔隙内产生流动时, 气体和壁面形成的气固界

面上由于空间电荷效应、双电层效应等产生了流动电势<sup>[9]</sup>。

煤体吸附瓦斯后,降低了煤的表面张力,吸附瓦斯气体越多,煤的表面张力下降越多,导致煤体的膨胀变形也越大<sup>[11]</sup>。根据 Bangham 的理论,固体的膨胀变形与其表面能降低值成正比,如式(1)<sup>[10]</sup>所示。式(2)为由于瓦斯吸附产生的吸附应力表达式。

$$\epsilon = \lambda \Delta\gamma \quad (1)$$

$$\sigma_{sw} = \delta_i E_i K_i \frac{abp}{1 + bp} \quad (2)$$

式中  $\epsilon$  为固体相对变形量;  $\lambda$  为比例系数;  $\Delta\gamma$  为表面能降低值;  $\sigma_{sw}$  为瓦斯吸附产生的膨胀应力;  $\delta_i$  为修正系数;  $E_i$  为 Young 氏弹性模量;  $K_i$  为膨胀系数;  $a$ 、 $b$  为吸附常数;  $p$  为瓦斯压力。

当瓦斯气体向煤体内部渗流时,气体分子慢慢进入到煤体基质中,并且随着吸附时间的增加,吸附量增大。从微观分析,煤体内部的大分子之间的共价键或非化学键发生断裂,使得大分子之间的相互作用力减小;从细观分析,由于煤体吸附了瓦斯气体分子,以至于煤体表面能降低,减弱了煤体细小颗粒之间相互作用力,使得煤体发生破裂或变形的可能性增加。即吸附瓦斯使煤体产生微破裂或微变形,从而产生表面电位信号。同时,由于吸附瓦斯在煤体裂隙或孔隙内产生流动时,在气体和壁面构成的气固界面上有双电层效应、空间电荷效应等,所以会产生流动电势。

## 2.2 吸附瓦斯过程电位信号的记忆效应

瓦斯向煤体内吸附渗透过程中,由于煤体表面与内部存在瓦斯压力梯度,瓦斯压力梯度会使得煤体产生微破裂或微变形,从而产生表面电位信号。当煤体充入初始的瓦斯压力 0.4 MPa 时,由于瓦斯压力较小,瓦斯分子只能进入到煤体内尺寸等于或大于瓦斯气体分子平均自由程的裂隙或孔隙内,在瓦斯压力梯度和吸附应力的作用下,煤体初次受到损伤而产生变形,而煤体内颗粒微元之间相互作用力比较强的孔隙或裂隙则没有被破坏。在随后充入瓦斯压力为 0.6 MPa 或 0.8 MPa 的气体时,瓦斯分子会在初次损伤变形的基础上继续向煤体内部吸附渗透,楔开更多的孔隙和裂隙,从而产生更多的微裂纹或微裂隙,而这一过程将会伴随比较大的电位信号产生。所以对于同一个煤样,不同瓦斯压力下吸附过程中煤体产生的表面电位信号对前一次吸附瓦斯压力下煤体产生的电位信号具有记忆效应。

## 3 结 论

(1) 煤体在吸附瓦斯过程能产生电位信号,随着

吸附量的增大,吸附过程产生的电位信号逐渐增大。且对于同一个煤样,不同瓦斯压力下吸附过程中煤体产生的表面电位信号对前一次吸附瓦斯压力下煤体产生的电位信号具有记忆效应,即当吸附瓦斯压力超过前一次吸附瓦斯压力时,电位信号明显增强,而当吸附瓦斯压力低于前一次吸附瓦斯压力时,电位信号呈现明显减弱趋势。

(2) 煤体吸附瓦斯过程产生电位信号机理主要有两方面:一是瓦斯气体压力梯度对煤体造成损伤,高压瓦斯能够楔开煤体内孔隙或裂隙,使煤体基质内部产生微变形或微破裂;二是吸附瓦斯在煤体孔隙或裂隙内流动产生了流动电势。

## 参考文献:

- [1] 周世宁,林柏泉.煤层瓦斯赋存与流动理论[M].北京:煤炭工业出版社,1999.  
Zhou Shining, Lin Baiquan. The theory of gas flow and storage in coal seams [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1999.
- [2] 刘延保,曹树刚,李勇,等.煤体吸附瓦斯膨胀变形效应的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(12):2484-2491.  
Liu Yanbao, Cao Shugang, Li Yong, et al. Experimental study of swelling deformation effect of coal induced by gas adsorption [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(12): 2484-2491.
- [3] 梁冰,章梦涛,潘一山,等.煤和瓦斯突出的固流耦合失稳理论[J].煤炭学报,1995,20(5):492-496.  
Liang Bing, Zhang Mengtao, Pan Yishan, et al. Solid and flow coupling instability theory when coal and gas outburst [J]. Journal of China Coal Society, 1995, 20(5): 492-496.
- [4] 胡国忠,许家林,王宏图,等.低渗透煤与瓦斯的固-气动态耦合模型及数值模拟[J].中国矿业大学学报,2011,40(1):1-6.  
Hu Guozhong, Xu Jialin, Wang Hongtu, et al. Research on adynamically coupled deformation and gas flow model applied to low-permeability coal [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(1): 1-6.
- [5] Hu Guozhong, Wang Hongtu, Tan Haixiang, et al. Gas seepage equation of deep mined coal seams and its application [J]. Mining Science of Technology, 2008, 18(4): 483-487.
- [6] Huang Wei, Chen Zhanqing, Yue Jianhua, et al. Failure modes of coal containing gas and mechanism of gas outbursts [J]. Mining Science and Technology, 2010, 20(4): 504-509.
- [7] 罗欣荣.煤层瓦斯运移物理模型及理论分析[J].中国矿业大学学报,1991,20(3):55-61.  
Luo Xinrong. Physical simulation and analysis of methane transport in coal seams [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1991, 20(3): 55-61.
- [8] 易俊,姜永东,鲜学福.在交变电场声场作用下煤解吸吸附瓦斯特性分析[J].中国矿业,2005,14(5):70-73.  
Yi Jun, Jiang Yongdong, Xian Xuefu. The research on the traits of he absorption and desorption of coal to gas in alternating electric field or

- sound field [J]. Mining Industry of China 2005, 14(5): 70-73.
- [9] 何学秋, 刘明举. 含瓦斯煤岩破坏电磁动力学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995.  
He Xueqiu, Liu Mingju. Fracture electro-magnetic dynamics of coal or rock containing gas [M]. Xuzhou: China University of Mining Technology Press, 1995.
- [10] 何学秋, 王恩元, 林海燕. 孔隙气体对煤体变形及蚀损作用机理 [J]. 中国矿业大学学报, 1996, 25(1): 6-11.  
He Xueqiu, Wang Enyuan, Lin Haiyan, et al. Coal deformation and fracture mechanism under pore gas action [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1996, 25(1): 6-11.
- [11] 李忠辉, 王恩元, 谢绍东, 等. 煤体瓦斯运移诱发电位信号的实验研究 [J]. 煤炭学报, 2010, 35(9): 1481-1485.  
Li Zhonghui, Wang Enyuan, Xie Shaodong, et al. Experimental research on electric potential signals induced by gas flowing in coal [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(9): 1481-1485.
- [12] 徐龙君, 鲜学福, 刘成伦, 等. 恒电场作用下煤吸附甲烷特征的研究 [J]. 煤炭转化, 1999, 22(4): 68-70.  
Xu Longjun, Xian Xuefu, Liu Chenglun, et al. Study on adsorption characteristics of coal to methane under direct current electric field [J]. Coal Conversion, 1999, 22(4): 68-70.
- [13] Farhang Sereshki. Improving coal mine safety by identifying factors that influence the sudden release of gas in outburst prone zones [D]. Wollongong: University of Wollongong, 2005.
- [14] Harpalani S, Shraufnager R A. Shrinkage of coal matrix with release of gas and its impact on permeability of coal [J]. Fuel, 1990, 69(5): 551-556.
- [15] 许江, 彭守建, 陶云奇, 等. 蠕变对含瓦斯煤渗透率影响的实验分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2273-2280.  
Xu Jiang, Peng Shoujian, Tao Yunqi, et al. Experimental analysis of influence of creep on permeability of gas-bearing coal [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(11): 2273-2280.
- [16] Wang G X, Wei X R, Wang K, et al. Sorption-induced swelling/shrinkage and permeability of coal under stressed adsorption/desorption conditions [J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 83: 46-54.
- [17] 张晓东, 桑树勋, 秦勇. 不同粒度的煤样等温吸附研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(4): 427-432.  
Zhang Xiaodong, Sang Shuxun, Qin Yong. Isotherm adsorption of coal samples with different grain size [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(4): 427-432.
- [18] 赵志根, 唐修义. 对煤吸附甲烷的 Langmuir 方程的讨论 [J]. 焦作工学院学报(自然科学版), 2002(1): 1-4.  
Zhao Zhigen, Tang Xiuyi. Discussion about Langmuir equation concerning methane adsorption by coal [J]. Journal of Jiaozuo Engineering College (Natural Science), 2002(1): 1-4.
- [19] 李忠辉, 王恩元, 刘贞堂, 等. 煤岩破坏表面电位特征规律研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(2): 187-192.  
Li Zhonghui, Wang Enyuan, Liu Zhen tang, et al. Study on characteristics and rules of surface potential during coal fracture [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(2): 187-192.

### 《煤炭学报》综合排名挺进前十名

9月27日, 2013年中国科技期刊论文统计结果发布, 《煤炭学报》总被引频次达到了3 812, 影响因子达到了1.238, 综合评价总分为93.8分, 综合评价总分在统计的1994种科技核心期刊中名列第9位。相比2012年的各项指标(总被引频次3 191次、影响因子1.119、综合评价总分82分、综合排名第34位等), 2013年各项指标均有所突破, 又上了一个新台阶。