

文章编号:0253-9993(2010)09-1481-05

煤体瓦斯运移诱发电位信号的实验研究

李忠辉^{1,2},王恩元^{1,2},谢绍东^{1,2},许晓阳^{1,2}

(1. 中国矿业大学 安全工程学院,江苏 徐州 221116;2. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室,江苏 徐州 221008)

摘 要:为了研究瓦斯在煤体中运移引起的电位信号,设计了煤体充放瓦斯电位信号实验系统,测试了不同压力下瓦斯在煤体运移产生的电位信号。实验结果表明,瓦斯在煤体中的流动会引起煤体电位变化,在煤样进气口处产生的电位信号强度高于煤样中部电位信号强度,而在放气口处未测到显著的电位变化,随着瓦斯压力的衰减,煤样的电位信号强度减小;瓦斯流动电位与充气压力之间不存在显著线性关系,充气过程电位强度高时,相应放气过程产生的电位强度较低,而充气过程产生的电位强度低时,对应放气过程产生的电位信号强度较高;煤体瓦斯流动电位信号的产生主要为瓦斯气体对煤体微结构的冲击破坏而产生自由电荷,以及气体在煤体孔隙内流动的流动电势及瓦斯与煤体气固两相摩擦起电等。

关键词:煤体;瓦斯;运移;电位信号

中图分类号:TD713.2 **文献标志码:**A

Experimental research on electric potential signals induced by gas flowing in coal

LI Zhong-hui^{1,2}, WANG En-yuan^{1,2}, XIE Shao-dong^{1,2}, XU Xiao-yang^{1,2}

(1. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Mine Safety, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: In order to study the electric potential signal induced by gas flow in coal, designed the experiment system of gas inflation and deflation, and tested the electric potential signal generated during the gas flowing in coal under different gas pressure. Experiment results show that the gas flow can cause the changes of electric potential on coal samples; the intensity of electric potential at air intake is higher than that at the middle of the coal samples, moreover, there is no obvious change at the gas outlet, and the intensity of electric potential decreases along with the attenuation of gas pressure. There is no notably linear relationship between electric potential and gas pressure, if the electric potential is higher in inflation process, the corresponding potential will be lower in the deflation process, and that, if the electric potential is lower in the inflation process, and the corresponding potential will be higher in the deflation process. The mechanism of electric potential during gas flow is due to the impacting destroy of microstructure of coal, stream potential of gas & electrification by friction between gas and coal, that can produce free charges.

Key words: coal; gas; flow; electric potential signal

煤岩瓦斯动力灾害发生过程中瓦斯的异常运移具有决定性的作用。含瓦斯煤层在进行采掘作业时,瓦斯的大量涌出(突出)是威胁煤矿安全生产的主要因素^[1-2]。一般情况下,煤层内的瓦斯均匀释放出来

是一种正常现象,而大量瓦斯的异常涌出,如打钻时喷煤、喷瓦斯等则预示着有煤与瓦斯突出危险。研究表明,通过对采掘空间瓦斯涌出规律及特征的研究分析,可以为煤与瓦斯突出预测提供一些技术手

收稿日期:2010-03-31 责任编辑:毕永华

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(40904028);国家自然科学基金资助项目(40874070);教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0477);国际科技合作项目(2008DFB70100);中国矿业大学青年教师“启航计划”项目;中国矿业大学青年科研基金资助项目(2007A002)

作者简介:李忠辉(1978—),男,河北石家庄人,副教授,博士。Tel:0516-83884695, E-mail:leezhonghui@163.com

段^[3-4]。瓦斯在煤体内的流动(涌出)除表现为采掘空间瓦斯浓度的变化外,还会引起煤体本身地球物理场,如应力场、温度场等的变化^[5-6],这些物理场的变化可能为煤与瓦斯突出预测提供一些前兆信息。也有研究表明,高压瓦斯在煤体中的充气、放气、流动过程均测试到了电磁辐射信号的产生^[7]。文献[8-10]研究了含瓦斯煤受载破坏的电磁辐射规律,利用电磁辐射可以监测煤与瓦斯突出灾害。文献[11-12]的研究发现,吸附瓦斯对煤体电磁辐射强度有明显的影响,瓦斯在煤体流动产生低频电磁信号,随瓦斯压力梯度的增加,电磁辐射主频段增大。文献[13-14]研究了不含瓦斯煤体破坏的表面电位特征,发现煤体的破坏可以引起表面电位的变化,并且表面电位与煤体所受的载荷具有较高的相关性。本文在前人研究的基础上,对瓦斯在煤体内流动产生的电位信号规律进行了初步的探索研究,分析了瓦斯在煤体内流动产生电位信号的特征规律及其机理。

1 实验研究

为了研究瓦斯在煤体内运移产生的电位信号,搭建了相应的实验系统。本实验系统由电位信号采集系统、高压瓦斯气源、减压阀、管路系统、压力表、密封缸体、阀门等组成,如图1所示。在密封缸体的上端盖中心安装一个兼作进气和电极功能的空心铜螺栓,缸体中部及底部也分别安装铜螺栓做电极,其中底部的电极兼作放气口,端盖和缸体以螺纹接合。实验用煤样取自焦作矿区,筛分出50目及以上的粉煤加工成 $\phi 50\text{ mm}\times 49\text{ mm}$ 的圆柱形样品。实验用气体为99.9%的高纯瓦斯气体。

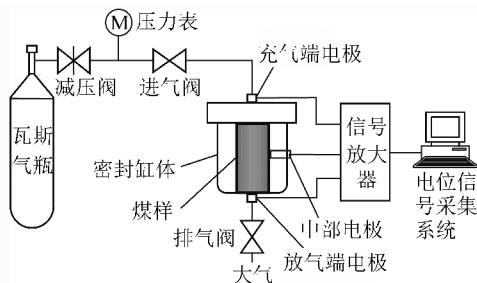


图1 实验系统

Fig. 1 Experiment system

实验时,首先装配密封缸体,在缸体底部放置密封胶圈,放气口垫2~3层细铜网,以避免煤粒进入管路发生堵塞,同时增大了测点电极的接触面积;然后把加工好的煤样放入缸体,在上端盖内放置密封胶圈,进气口处也垫细铜网,在端盖及缸体的螺纹上涂抹适量真空脂装配好缸体,并测试系统气密性。最

后,将电位信号采集系统的信号线连接在缸体的进气口、出气口及中部3个测点处。分别进行以下两种情况的煤体电位信号实验:

(1) 充入瓦斯。首先关闭进气阀和排气阀,打开减压阀,记录压力,调试好电位信号采集仪,开始采集,然后打开进气阀充入气体,待压力表示数平稳后停止采集。

(2) 排放瓦斯。打开进气阀,关闭排气阀,打开减压阀充入瓦斯,待压力表稳定后记录压力;然后关闭减压阀,调试好电位信号采集仪,开始采集,打开排气阀,排出缸体中瓦斯,待压力表的读数平稳后,关闭排气阀。

2 实验结果及分析

在搭建的煤样瓦斯流动电位信号实验系统上进行了最高压力为0.5 MPa的煤样充放瓦斯实验。共进行了8组型煤实验,下面以典型实验结果进行分析。在实验开始前对未装入煤样的缸体进行充放瓦斯实验,结果如图2所示。空缸内瓦斯流动不会产生电位信号,表明实验中测试到的电位信号确实为瓦斯在煤体内流动所产生,保证了实验结果真实性。

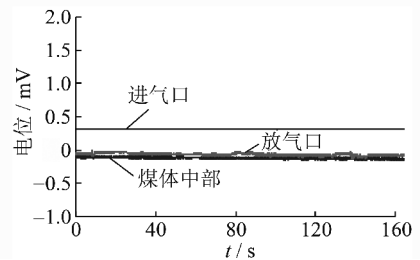


图2 空缸内瓦斯流动电位信号

Fig. 2 Electric potential of gas flowing in empty cylinder

图3为煤样在不同瓦斯压力下充放瓦斯的电位实验结果,在缸体进气口和煤样中部测试到了明显的电位信号,在放气口未测到显著的电位信号变化。图3(a)、(b)为0~0.2 MPa条件下充放瓦斯产生的煤体电位信号,如图3(a)所示,在充入压力为0.2 MPa的瓦斯时出现若干电位信号峰值,进气口电位峰值达20 mV左右,煤样中部电位峰值约为5 mV,待缸体内瓦斯压力稳定后,打开排气阀放气,此时测试到排放瓦斯的煤样电位幅值也比较强,强度甚至大于充气过程的煤体电位信号,进气口处电位峰值约为40 mV,煤样中部电位峰值约为17 mV,如图3(b)所示。

图3(c)~(h)为缸体初始压力0.2 MPa条件下,以0.1 MPa为步距逐步增加充气压力到0.5 MPa,然后再以相反顺序逐步放气的实验结果。可以看出,在不同压力下瓦斯流过煤体都会产生电位信号,在相同

充气压力下进气口处煤样产生的电位强度高于煤样中部电位强度,也高于放气口电位强度,但电位信号强度不随充入气体压力的增大而增大,就实验结果而言,在0.3~0.4 MPa充气过程中产生多个连续电位峰值,其强度比较高,最大可达39.9 mV;在0.2~0.3 MPa和0.4~0.5 MPa充气过程中产生了两个连

续波峰,但其信号峰值较小,强度分别为3.4和17.5 mV。相反,对于放气过程而言,0.3~0.2 MPa放气过程和0.5~0.4 MPa放气过程产生的电位信号强度较高,强度分别为39.7和39.9 mV;0.4~0.3 MPa放气过程产生的电位信号强度较低,强度约为1.3 mV。

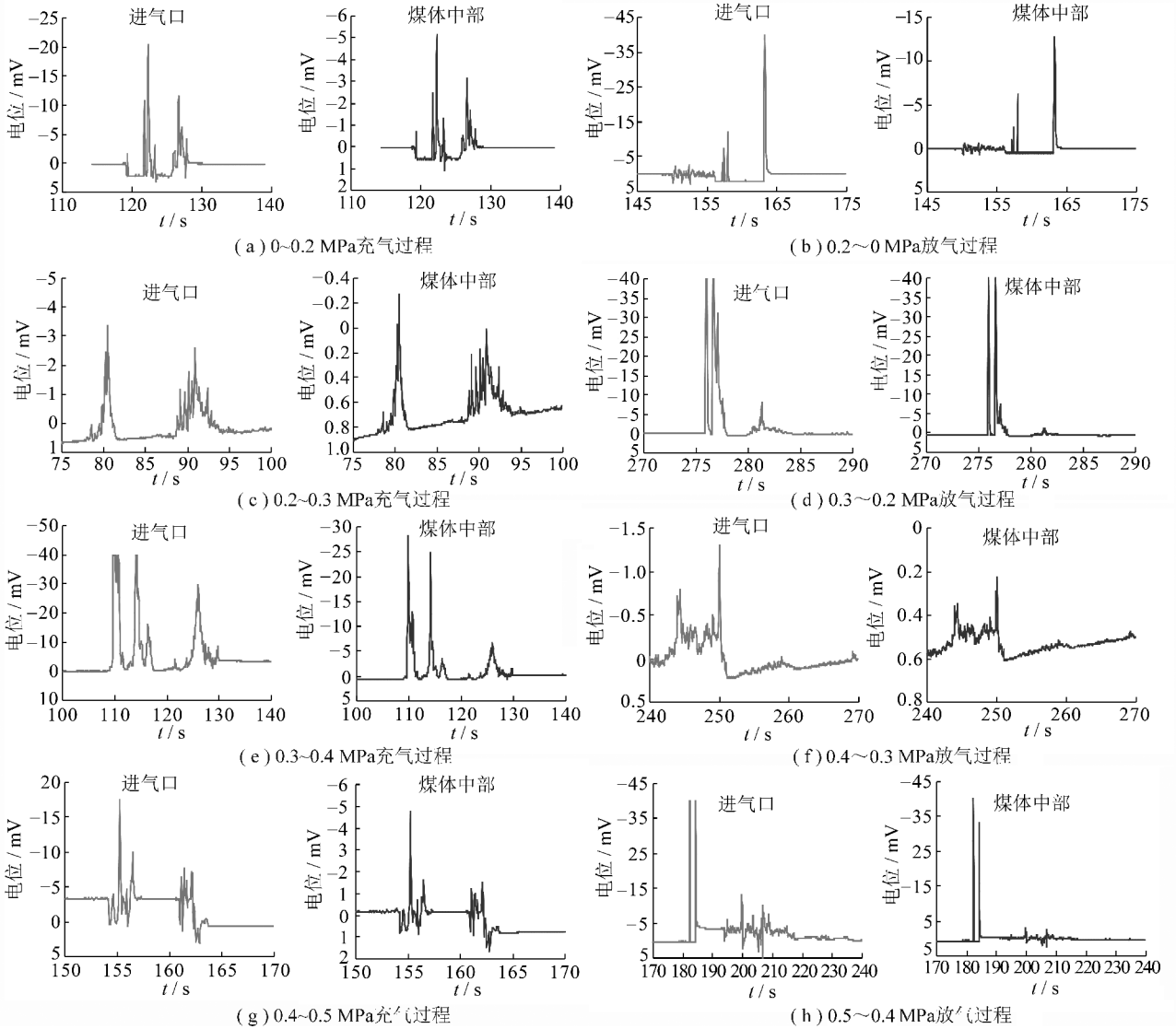


图3 不同压力下瓦斯充放实验

Fig. 3 Gas inflation and deflation experiment at different pressure

对比实验结果可以发现,充气过程电位信号强度高时,放气过程产生的电位强度较低;而充气过程产生电位信号低时,对应放气过程产生的电位信号强度较高。出现这一实验结果的原因可以从瓦斯流对煤体微结构的破坏进行分析,对于前一种情况,充气过程煤体被高压瓦斯蚀损破坏^[7],产生大量自由电荷,引起较强的电位信号;对应的放气过程,在煤体微结构已被破坏的条件下,煤体的新蚀损量必定会减少,产生的电位信号较低。对于后一种情况,充气过程煤

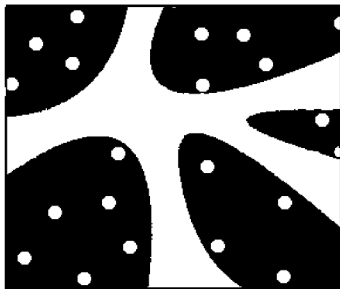
体微结构被高压瓦斯蚀损较少,产生的电位信号较低;对应放气过程煤体微结构被瓦斯内能大量破坏剥离,产生较高的电位信号。

3 煤体瓦斯流动电位信号机理初探

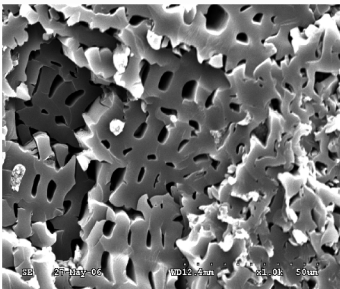
前文实验结果表明,瓦斯在煤体内流动会导致煤体电位发生变化。引起煤体电位变化的原因可以从瓦斯气体对煤体微结构的破坏产生自由电荷,瓦斯在煤体孔隙中的流动电势及气固两相摩擦起电³方面

来进行分析。

煤中含有大量孔隙、裂隙,如图4所示,开启阀门充气的瞬间高压瓦斯快速冲入煤体孔隙,在煤体内部产生瓦斯压力不平衡分布,这使得煤体内部产生瓦斯压力梯度,导致煤体瓦斯渗流,在煤体内产生拉伸和剪切破坏^[7,15-16]。同时,高压瓦斯还会像楔子一样撑开并扩展煤体原生裂纹,降低煤体强度,在煤体断裂及裂纹扩展形成的新断裂面上发生电荷分离而产生自由电荷。



(a)煤体孔隙



(b)煤体孔隙电镜照片($\times 1\ 000$ 倍)

图4 煤体微观孔隙

Fig.4 Microscopic pore of coal

瓦斯在煤体中的吸附是一个对煤体微结构损伤的过程,会在煤体内部产生附加应力,使煤体发生膨胀变形,当瓦斯放气时,由于原本有高压瓦斯支撑的煤体微观结构突然失去了支撑而发生较大破坏产生自由电荷;同时,吸附在煤体内部的高压瓦斯,在放气时会迅速解吸向外释放,具有较高的内能,在瓦斯压力梯度作用下煤体表层结构断裂剥离,发生进一步破坏产生自由电荷,这也是煤与瓦斯突出过程中瓦斯破坏煤体的重要机理,如前文实验结果图3(d)和图3(h)放气时电位强度突然增大,甚至大于充气过程电位强度,表明此时煤体受到较大损伤。

煤体是一种多孔介质,内部具有大量的毛细管道,如图4所示,在充气 and 放气时瓦斯气体在这些毛细管中流动与毛细管壁面的悬键相互作用,在气体和壁面形成的气固两相界面上产生流动电势^[7],流动电势随瓦斯压力梯度的增加而增大,气体的流动电势与水在煤岩孔隙中产生的流动电势相似,煤岩壁面上电荷密度越大,气体压力梯度越大,黏度越低,产生的

流动电势越强。瓦斯气体流经煤体及其内部孔隙时,由于瓦斯气体与煤体壁面的摩擦而产生自由电荷,也会引起煤体电位的变化。

4 结 论

(1)瓦斯在煤体中的流动会产生电位信号,在煤样进气口处产生的电位信号强度高于煤样中部电位信号强度,在放气口处未测到显著的电位变化,随着煤样中瓦斯压力梯度的衰减电位信号强度减小。

(2)不同压力下瓦斯流动实验结果表明,电位强度不随充入气体压力的增大而增大;充气过程电位强度高时,相应放气过程产生的电位强度较低;而充气过程产生电位强度低时,对应放气过程产生的电位信号强度较高。这是由于在不同充、放气过程中高压瓦斯对煤体的破坏程度不同引起的。

(3)煤体瓦斯流动电位信号的产生主要为瓦斯气体对煤体微结构的损伤破坏而产生自由电荷,以及气体在煤体孔隙内流动的流动电势以及瓦斯气体与煤体孔隙壁面间气固两相摩擦起电等。

对瓦斯在煤体内流动产生的电位信号特征进行了初步的探索,关于这个领域,还有很多问题需要深入研究。

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,1997.
Zhou Shining, Lin Baiquan. The theory of gas flow and storage in coal seams [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1997.
- [2] 高建良,候三中. 掘进工作面动态瓦斯压力分布及涌出规律[J]. 煤炭学报,2007,32(11):1 127-1 131.
Gao Jianliang, Hou Sanzhong. Dynamic distribution of gas pressure and emission around a diving roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(11): 1 127-1 131.
- [3] 秦汝祥,张国枢,杨应迪. 瓦斯涌出异常预报煤与瓦斯突出[J]. 煤炭学报,2006,31(5):599-602.
Qin Ruxiang, Zhang Guoshu, Yang Yingdi. Predicting coal and gas outburst with monitored gas consistence[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(5): 599-602.
- [4] 龚大银,赵新华,徐小波,等. 掘进工作面突出前瓦斯涌出规律研究[J]. 矿业安全与环保,2009,36(S1):115-117.
Gong Dayin, Zhao Xinhua, Xu Xiaobo, et al. Study on the gas emission law before coal and gas outburst in drivage face[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2009, 36(S1): 115-117.
- [5] 郭立稳,俞启香,蒋承林,等. 煤与瓦斯突出过程中温度变化的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(3):366-368.
Guo Liwen, Yu Qixiang, Jiang Chenglin, et al. Testing study on the variation of coal temperature during the process of coal and gas outburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,

- 2000,19(3):366-368.
- [6] 孔凡正,潘友富,孙重旭. 预抽煤层瓦斯防突效果的评价方法[J]. 矿业安全与环保,1999,26(1):28-29.
Kong Fanzheng, Pan Youfu, Sun Chongxu. Evaluation method of coal and gas outburst prevention with gas pre-drainage[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 1999, 26(1): 28-29.
- [7] 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.
- [8] 王恩元,何学秋,窦林名,等. 煤矿采掘过程中煤岩体电磁辐射特征及应用[J]. 地球物理学报,2005,48(1):216-221.
Wang Enyuan, He Xueqiu, Dou Linming, et al. Electromagnetic radiation characteristics of coal and rocks during excavation in coal mine and their application[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(1): 216-221.
- [9] 何学秋,聂百胜,王恩元,等. 矿井煤岩动力灾害电磁辐射预警技术[J]. 煤炭学报,2007,32(1):56-59.
He Xueqiu, Nie Baisheng, Wang Enyuan, et al. Electromagnetic emission forecasting technology of coal or rock dynamic disasters in mine[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1): 56-59.
- [10] 王恩元,何学秋,李忠辉,等. 煤岩电磁辐射技术及其应用[M]. 北京:科学出版社,2009.
Wang Enyuan, He Xueqiu, Li Zhonghui, et al. Electromagnetic radiation technology of coal or rock and its application[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [11] 刘明举,何学秋,许考. 孔隙气体对断裂电磁辐射的影响及其机理[J]. 煤炭学报,2002,27(5):483-487.
Liu Mingju, He Xueqiu, Xu Kao. Influence of porous gas on ruptured electromagnetic radiation and its mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(5): 483-487.
- [12] 聂百胜,何学秋,孙继平,等. 瓦斯流动对电磁辐射频谱的影响[J]. 北京科技大学学报,2003,25(6):510-514.
Nie Baisheng, He Xueqiu, Sun Jiping, et al. Effect of gas flow on the spectrum of electromagnetic radiation[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2003, 25(6): 510-514.
- [13] 李忠辉. 受载煤体变形破裂表面电位效应及其机理的研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2007.
Li Zhonghui. Study on surface potential effect and its mechanism of coal during deformation and fracture under load[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2007.
- [14] 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.
- [15] 胡千庭,周世宁,周心权. 煤与瓦斯突出过程的力学作用机理[J]. 煤炭学报,2008,33(12):1368-1372.
Hu Qianting, Zhou Shining, Zhou Xinquan. Mechanical mechanism of coal and gas outburst process[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(12): 1368-1372.
- [16] 景国勋,张强. 煤与瓦斯突出过程中瓦斯作用的研究[J]. 煤炭学报,2005,30(2):169-171.
Jing Guoxun, Zhang Qiang. Study on the role of gas in the coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(2): 169-171.

关于本刊收取稿件审理费的通知

承蒙广大作者的厚爱,近年来《煤炭学报》收稿量急剧增加,由于本刊采取严格的审稿制度,外审工作量很大,因此本刊的稿件审理费从2010年1月1日起由原来100元/篇提高到200元/篇,以补充办刊经费的不足,敬请广大作者理解与支持。

本刊编辑部