

宋晓艳,李忠辉,王恩元. 岩石受载破坏裂纹扩展带电特性[J]. 煤炭学报, 2016, 41(8): 1941–1945. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0044

Song Xiaoyan, Li Zhonghui, Wang Enyuan. Charging characteristics of the crack propagation of rock under load[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(8): 1941–1945. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0044

## 岩石受载破坏裂纹扩展带电特性

宋晓艳<sup>1</sup> 李忠辉<sup>2,3</sup> 王恩元<sup>3</sup>

(1. 中国矿业大学 应用技术学院, 江苏 徐州 221008; 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 221116; 3. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘 要:** 为了研究岩石破裂过程电位分布特征及其产生机理, 利用预制裂纹岩石试样实验测试了裂纹扩展途径的电位信号变化规律及裂纹两侧电位分布特征。结果表明, 扩展裂纹的尖端和新形成的裂纹壁面是产生自由电荷的主要位置, 在裂纹扩展路径上距离裂纹尖端近处产生的电位信号强度较高, 距离远处产生的电位强度较低, 裂纹扩展产生的最大电场强度为 0.42 V/m; 在裂纹扩展过程中裂纹两侧产生的电位信号极性呈正负对应变化, 表明裂纹两侧产生的自由电荷性质相反, 并交替变化; 在裂纹扩展中新生裂纹两侧壁面电荷分离是自由电荷及电位的主导产生机制。裂纹壁面电荷的正负交替及裂纹扩展中两侧壁张翕运动引起的电场变化是煤岩产生电磁辐射的原因。

**关键词:** 岩石; 破坏; 裂纹扩展; 电位; 带电特征

中图分类号: TD311 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2016)08-1941-05

## Charging characteristics of the crack propagation of rock under load

SONG Xiao-yan<sup>1</sup>, LI Zhong-hui<sup>2,3</sup>, WANG En-yuan<sup>3</sup>

(1. College of Applied Science and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Mine Safety, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** In order to study the electric potential (EP) distribution characteristics and generation mechanism during rock fracture, the change law and distribution characteristics of electric potential of the crack propagation path were tested with the pre-cracked rock samples. The results show that the tip of the crack and the newly formed crack surface are the dominant positions that the free charges are produced. The strength of electric potential is higher near the crack tip in the propagation path of the crack and lower far from the crack tip; the maximum electric field strength resulted from crack propagation is 0.42 V/m. In the process of crack propagation, the EP signal polarity was positive and negative alternation, which showed that the property of free charges generated by cracks is opposite and change alternatively. The dominant mechanism of free charges and electric potential is the charge separation at two sides of the crack surface of the crack growth. The alternation of charges between positive and negative in the crack surface and the open and close of two crack surfaces during crack propagation resulting in the change of electric field are served as the reasons for electromagnetic radiation.

**Key words:** rock; fracture; crack propagation; electric potential; charge characteristics

收稿日期: 2016-01-08 修回日期: 2016-05-11 责任编辑: 毕永华

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51574231); 教育部科学技术研究资助项目(113031A); 中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室自主研究课题资助项目(SKLCRSM15X03)

作者简介: 宋晓艳(1981—), 女, 山西太原人, 讲师, 博士。Tel: 0516-83885844, E-mail: angiesong@126.com。通讯作者: 李忠辉(1978—), 男, 河北石家庄人, 教授, 博士。Tel: 0516-83884695, E-mail: leezhonghui@163.com

煤岩材料的断裂与其内部裂纹的扩展密切相关<sup>[1]</sup>。煤岩动力灾害的发生是煤岩体受载裂纹扩展演化导致岩体失稳破坏的过程<sup>[2]</sup>。煤岩破坏的电磁辐射效应已经得到了较为深入的研究,并用于矿山煤岩动力灾害的观测<sup>[3-5]</sup>。煤岩破裂过程中产生电磁辐射的基础是自由电荷的产生,自由电荷积累会在煤岩表面引起电位的变化,文献[6-7]对煤岩破坏的表面电位特征规律进行了实验研究,发现煤岩在破坏过程中有表面电位信号产生,并且电位信号强度与煤岩受到的压力之间具有高度相关性,电位信号与煤岩破裂之间有良好的耦合关系。文献[8-9]实验研究了煤岩破坏产生的电荷感应信号,分析了感应电荷与煤岩受力破坏的关系。研究煤岩断裂过程的电荷分布规律与自由电荷产生机制是深入认识电磁辐射和表面电位机理的关键。煤岩断裂破坏是其内部裂纹演化、发展的结果,关于这方面的研究经常通过在试样上加工人工缺陷(或预制裂纹)的方法来研究裂纹的起裂、扩展和破裂过程。Nolen-Hoeksema等<sup>[10]</sup>研究了大理岩受载倾斜裂纹尖端的扩展破坏形式,指出裂纹的扩展过程具有非对称的特性,并且裂纹在试样表面的扩展情况能准确代表其内部的破坏情况。Reyes等<sup>[11]</sup>测试了含两个预制张性裂纹石膏试样单轴压缩下的裂隙贯通过程。Shen等<sup>[12]</sup>研究了含单个和两个预制张开型和闭合型裂隙缺陷试样的断裂问题。唐春安等<sup>[13]</sup>研究了含不同摩擦系数、不同程度微裂隙的岩石及类砂岩模拟材料,及不同倾角的预制裂纹试样的贯通机制,并进行了相关的数值模拟研究。

在材料断裂带电现象方面,Finkel等<sup>[14]</sup>提出晶体材料断裂时能够在新形成的两个裂纹表面产生正负极性的电荷束。龙海丽<sup>[15]</sup>利用电位层析成像方法,研究发现岩石的破裂区与正电荷分布基本一致。前人对材料破坏的力学特征、带电异常等做了大量研究,得到了有益的研究成果。对于煤岩裂纹扩展过程及裂纹两侧产生的电位的极性特征及其变化规律尚缺乏深入研究,关于煤岩破坏过程电位信号及自由电荷产生过程的研究对深入理解岩石材料破坏过程以及煤岩电磁辐射、地震电磁等具有重要的理论意义。在此基础上,本文利用预制裂隙岩样单轴压缩实验,研究了岩石破坏时裂纹生成、扩展过程的表面电位变化规律及裂纹两侧电荷分布特征,这对深入理解煤岩破坏电位信号规律及电磁辐射机理具有重要意义。

## 1 实 验

本文设计了预制裂纹岩板试样单轴压缩实验,沿裂纹预期扩展路径布置了测点,研究了裂纹扩展过程

中裂纹两侧的电位分布特征及带电性质。

### 1.1 实验系统

岩石表面电位实验系统由加载系统、电位数据采集系统、电极及电磁屏蔽系统等组成(图1)。载荷控制系统为新三板(SANS)微机控制电液伺服压力试验机;煤岩电位数据采集系统采用LB-IV型电位数据采集仪,该系统具有16个信号通道,其模数转换分辨率为16 bit,采样频率1~100 Hz;电磁屏蔽空间为GP6电磁屏蔽室,屏蔽效果85 dB以上,可以避免外界电磁干扰。实验用电极为直径5 mm的铜质电极。

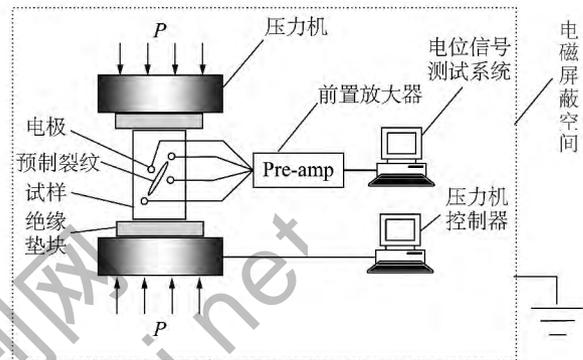


图1 实验系统

Fig. 1 Experimental system

### 1.2 试样制备

试样为大理石岩板,大理石样品主要由方解石、石灰石、蛇纹石和白云石组成,其主要成分以碳酸钙为主,约占50%以上。大理石是由石灰岩在高温高压下所含矿物质发生重新结晶形成的,具有明显的纹理,矿物颗粒很多。试样内部颗粒间的胶结稳定,具有较好的刚性和较高的硬度。试样尺寸为150 mm×100 mm×15 mm。利用切割系统在试样上切割出长度为50 mm、宽度为1 mm的贯穿裂纹。割制的裂纹类型为单裂纹和共线裂纹两种,预制单裂纹的倾角选择较为典型的45°和30°,用以考察裂纹扩展路径上的电位信号;预制的共线双裂纹长度50 mm、宽度1 mm且为贯穿裂纹,裂纹倾角为45°,用以考察扩展裂纹两边电位信号。实验前用导电胶将电极粘贴在裂纹预期走向及其两侧相应位置上,裂纹的预期走向根据不同角度预制裂纹试样破坏的预期走向统计规律确定。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 预制裂纹试样的破坏形式

由于预制裂纹的影响,含预制裂纹试样破坏的力学过程与不含裂纹试样不同。破坏过程中在试样预制裂纹的周围将会出现应力集中,特别是裂纹尖端区域。因此,含裂纹试样单轴压缩的破坏形式是在裂纹

尖端的张应力集中区起裂, 新生裂纹产生折向轴压主方向的张破裂扩张<sup>[16]</sup>, 也即, 以预制裂纹尖端为起裂点, 并逐渐向试样两端面扩展, 最终导致含裂纹试样的失稳破坏, 如图 2 所示。

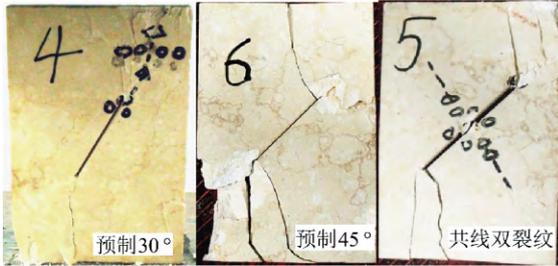


图 2 预制裂纹试样受载破坏照片

Fig. 2 Photograph of fractured samples with pre-crack

由图 3 可看出, 实验中试样的破裂起始于预制裂纹的尖端, 预制裂纹角度不同新生裂隙的扩展走向也不同。应力作用下, 在预制裂纹两端形成应力集中, 试样破裂产生翼型裂纹, 30° 预制裂纹尖端产生的翼型裂纹与已有裂纹成约 120° 夹角, 并且沿预制裂纹走向产生了贯通裂纹; 45° 预制裂纹尖端产生的翼型裂纹与已有裂纹成约 90° 夹角, 在预制裂纹尖端还产生了近似水平的剪切型裂纹及次级翼型裂纹。预制共线双裂纹两端产生的翼型裂纹与预制裂纹夹角为 90° ~ 120°, 此外两端还产生了次级翼型裂纹, 这些裂纹的交汇、贯通导致试样的最终破坏。同时, 根据新生裂纹的扩展走向为电位测点布置提供了参考。

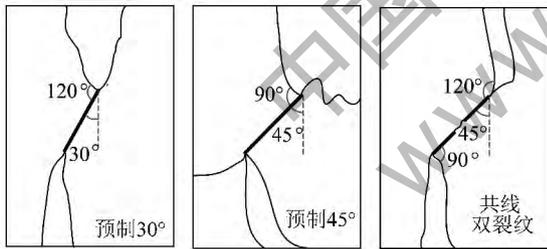


图 3 预制裂纹岩板破坏的裂纹

Fig. 3 Schematic of cracks in fractured rock samples with pre-cracked

### 2.2 裂纹扩展路径的电位分布特征

在裂纹扩展路径上由近及远布置了 3 个测点测试裂纹扩展过程的电位信号, 电极布置如图 4 所示, 沿扩展方向依次为 9 号, 距裂纹尖端 0 mm; 8 号, 距离裂纹尖端 20 mm; 2 号, 距离裂纹尖端 40 mm。图 5 为 45° 和 30° 预制裂纹试样受压的应力和电位曲线, 可以看出, 在试样破裂时应力和电位同时产生波动。随着加载进行, 应力曲线出现两个峰值, 试样发生两次破裂, 新生裂纹两次向前扩展, 岩石新生断面电荷分离形成自由电荷累积, 引起了电位幅值的相应增大。在同一时刻, 距离裂纹尖端较远处测试的电位强

度较高, 较远处测试的电位强度较低。如图 5 所示, 45° 预制裂纹试样第 1 次破裂时 (43 s) 载荷最大约 90 kN, 在 9 号测点处的电位约 9.5 mV, 8 号测点电位幅值约为 1.3 mV, 2 号测点约为 0.8 mV 左右, 破裂产生的电场强度为 0.42 V/m; 试样第 2 次破裂时 (57 s), 在 2 号测点处测得的电位约为 5.0 mV, 9 号测点的电位约为 3.6 mV, 8 号测点电位约为 3 mV, 产生的电场强度最大为 0.1 V/m。

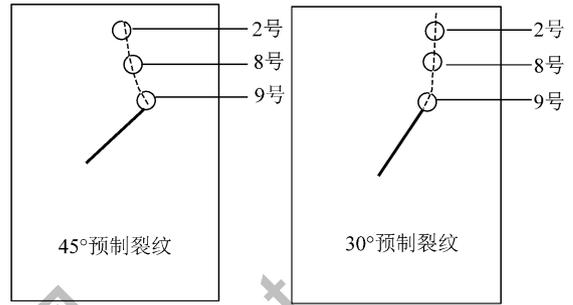


图 4 试样裂纹扩展路径上电极布置方式

Fig. 4 Electrodes displacement along the crack propagation path of pre-cracked samples

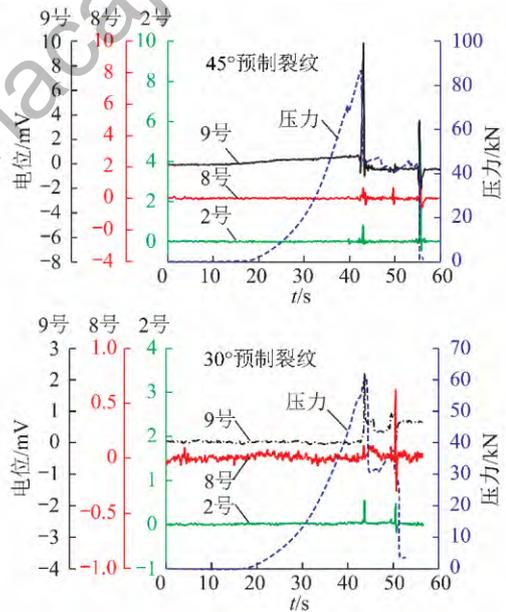


图 5 预制裂纹大理石试样裂纹扩展路径上的电位信号

Fig. 5 Electric potential results along the crack propagation path of marble sample with pre-crack

由图 5 中 30° 预制裂纹实验结果可知, 受裂纹角度的影响, 试样强度为 62 kN 左右, 比 45° 裂纹试样降低了约 1/3。该试样发生的两次破裂中, 第 1 次破裂 (44 s), 9 号测点的电位约为 2.2 mV, 8 号测点约为 0.2 mV, 2 号测点电位约为 0.6 mV, 产生的电场强度为 0.04 V/m; 由于裂纹倾角较小, 裂纹断面间易发生滑动摩擦, 第 2 次破裂 (52 s) 时, 9 号测点处已有裂纹面摩擦产生电位为 1.08 mV, 裂纹扩展经过 8

号、2 号测点产生的电位为 0.62 mV 和 0.48 mV。根据不同测点电位信号变化特征与破裂位置对应关系及裂纹附近应力分布状态,可以推断,在裂纹起裂前,自由电荷(电位)主要由石英成分的压电效应产生,在裂纹扩展阶段由裂纹两壁电荷分离或裂纹壁面摩擦起电产生的自由电荷引起电位变化。

### 2.3 裂纹两侧电位分布特征

利用预制共线双裂纹试样的压缩实验,考察了裂纹扩展时两侧电位的分布特征。在裂纹扩展路径上及两侧分别布置电极,如图 6 所示。压缩过程中各电极测试到了正、负不同的电位信号,如图 7 所示。在应力作用下沿预制裂纹连线生成新裂纹,在试样破坏过程中出现 2 个应力峰值,第 1 个峰值(38.5 s 时)为新裂纹生成,试样发生弹塑性破坏引起的,第 2 个峰值(47.1 s 时)为试样峰后阶段完全破坏时的载荷突降引起的。由于处在相邻预制裂纹之间,该裂纹兼具了 I 型和 II 型裂纹的特征,在其生成过程中,裂纹扩展在两壁产生异性电荷,在裂纹形成后的裂纹壁面的摩擦也会产生相异的电荷。在该过程中裂纹路径上的 7 号测点及裂纹两边 8 号、12 号测点的电位信号也出现 2 次对应波动。从加载开始到应力峰值(I),裂纹两侧电位分别以相反的趋势变化,如图 8(b) 所示,12 号向正电位方向增大,8 号向负方向增大,7 号受两侧电位叠加作用出现负向波动。试样在第 1 个应力峰值产生破裂时,12 号测点电位向正方向突增至 0.73 mV,8 号测点电位幅值向负方向突增至 -0.2 mV,说明破坏过程中裂纹两侧产生了不同性质的电荷。如图 7(c) 所示当加载到应力峰值(II)时,试样瞬间发生破坏。由实验结果可以看出从 47.1 s 到 47.5 s 裂纹扩展途径 3 个测点时产生的电位信号发生了正、负交错的变化。在 47.2 s 时 8 号测点达到负电位最大值,裂纹路径上的 7 号测点电位为正值;在 47.3 s 时 7 号和 8 号同时达到正电位最大值,与 8 号测点对称的 12 号通道降到负电位最大值。47.3~47.4 s 时 7 号和 8 号电位开始向负值转变,12 号电位开始向正电位转变,裂纹扩展经过该测点后(47.5 s 后),电位信号强度逐渐下降至 0 附近。实验结果显示,在扩展裂纹两侧产生的电位具有正负对称性,即裂纹两侧产生的自由电荷具有正负对称性。

### 3 裂纹两壁带电性质的讨论及分析

前述实验结果表明,在裂纹扩展路径上,距离裂纹尖端不同位置测试到的电位强度不同,距离裂纹尖端越近产生的电位信号强度越高,越远则越低,说明裂纹扩展时的新生断裂面是产生自由电荷的位置。

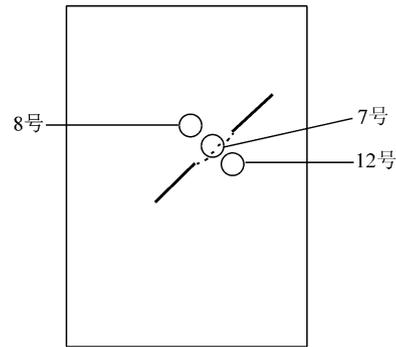
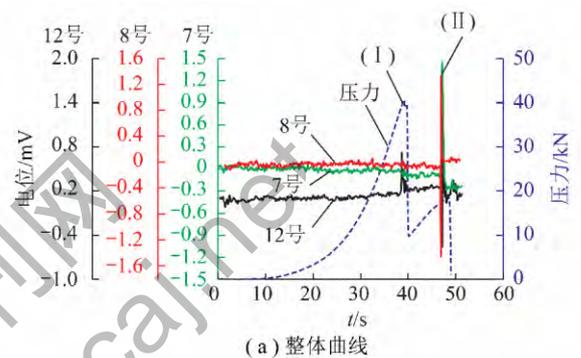
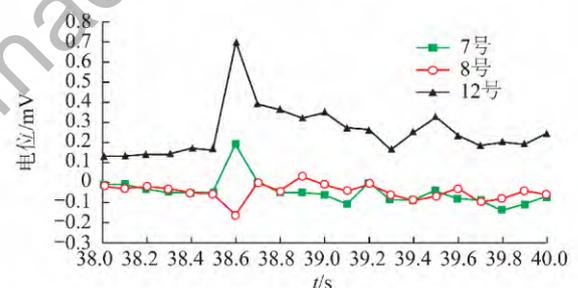


图 6 扩展裂纹两侧电极布置

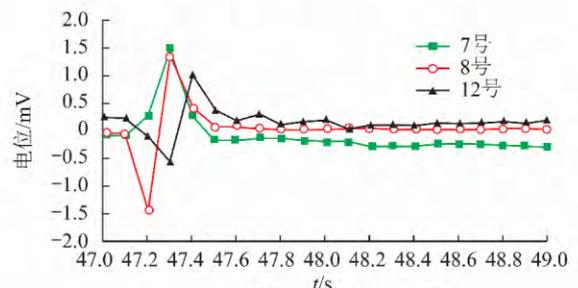
Fig. 6 Displacement of electrodes on both sides of crack propagation



(a) 整体曲线



(b) 局部放大图(对应应力峰值 I)



(c) 局部放大图(对应应力峰值 II)

图 7 裂纹两侧电位信号

Fig. 7 Electric potential signal on both sides of the crack

根据不同位置电位信号出现的时序特征,可以推断,在裂纹起裂前自由电荷主要是由压电效应产生<sup>[17]</sup>,在裂纹扩展阶段主要是由新生裂纹两侧壁面电荷分离,积聚极性相反的电荷引起<sup>[18]</sup>;破坏结束后,新生电荷不再产生,积累电荷逐渐消散,电位强度降低。

试样破裂过程中裂纹两侧所测试到的电位信号

呈正负交替变化,表明裂纹扩展过程中裂纹两侧带有性质相反的自由电荷。分析认为,在试样破裂中,裂纹两壁的新鲜断面上发生了电键的断裂和电荷分离,在两侧壁面产生了性质相反的积累电荷,导致电位的交替变化。这种电荷分离现象在 Dickinson 和 Rabinovitch 的研究中也得到了证实<sup>[19-20]</sup>。这一结论也进一步证实了煤岩破坏产生电磁辐射的机理,裂纹壁面带电性质的正负交替变化类似于交变电场,裂纹扩展中带电壁面的张翥使壁面间电场强度交替变化,从而产生电磁辐射。同时,裂纹扩展速度决定了裂纹壁面的分离速度,由此引起壁面附着自由电荷产生不同频率的正负交替,从而产生不同频率的电磁辐射信号。

#### 4 结 论

(1) 在试样破坏裂纹扩展过程中,距离裂纹尖端近处产生的电位信号强度较高,距离裂纹尖端远处电位强度较低,说明裂纹扩展的尖端是自由电荷的产生源头。

(2) 根据试样不同位置电位出现的时序特征及裂纹尖端应力分布,可以得到在裂纹起裂前,裂纹尖端岩体受到压应力作用,岩样成分的压电效应是自由电荷及电位的主导产生机制;在裂纹扩展阶段由于新生裂纹两侧壁面电荷分离是自由电荷及电位的主导产生机制。

(3) 裂纹两侧产生的电位信号极性在裂纹扩展过程中呈正负交替变化,说明裂纹两侧电荷分离产生的自由电荷性质相反。试样破坏裂纹带电特征的研究,从机理上描述了岩石电磁辐射产生过程,裂纹壁面带电性质的正负交替类似于交变电场,裂纹扩展中两侧壁面的张翥使壁面间电场强度交替变化,这两种作用产生电磁辐射信号。而裂纹的扩展速度则决定着产生电磁辐射信号的频率。

#### 参考文献:

- [1] 杨卫. 宏微观断裂力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [2] 窦林名, 何学秋. 冲击矿压防治理论与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001.
- [3] 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.
- [4] 王恩元, 何学秋, 聂百胜, 等. 电磁辐射法预测煤与瓦斯突出原理[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(3): 225-229.  
Wang Enyuan, He Xueqiu, Nie Baisheng, et al. Principle of predicting coal and gas outburst using electromagnetic emission[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(3): 225-229.
- [5] Frid V. Rockburst hazard forecast by electromagnetic radiation excited by rock fracture[J]. Rock Mech. Rock Eng., 1997, 30(4): 229-236.
- [6] 王恩元, 李忠辉, 刘贞堂, 等. 受载煤体表面电位效应的实验研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(5): 1318-1325.  
Wang Enyuan, Li Zhonghui, Liu Zhentang, et al. Experimental study on surface potential effect of coal under load[J]. Chinese J. Geophys., 2009, 52(5): 1318-1325.
- [7] 李忠辉, 王恩元, 何学秋. 煤岩破坏表面电位效应理论与机制研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2013.
- [8] 潘一山, 唐治, 李忠华, 等. 不同加载速率下煤岩单轴压缩电荷感应规律研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(3): 1043-1048.  
Pan Yishan, Tang Zhi, Li Zhonghua, et al. Research on the charge inducing regularity of coal rock at different loading rate in uniaxial compression tests[J]. Chinese J. Geophys., 2013, 56(3): 1043-1048.
- [9] 潘一山, 唐治, 李国臻, 等. 不同温度下岩石电荷感应试验[J]. 煤炭学报, 2012, 37(10): 1654-1657.  
Pan Yishan, Tang Zhi, Li Guozhen, et al. Experimental research of rock's charge induction under different temperature[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(10): 1654-1657.
- [10] Nolen-Hoeksema R C, Gordon R B. Optical detection of crack patterns in the opening-mode fracture of marble[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 1987, 24(4): 135-144.
- [11] Reyes O, Einstein H H. Fracture mechanism of fractured rock-a fracture coalescence model[A]. Proc. 7<sup>th</sup> Int. Conf. on Rock Mech. [C]. 1991: 333-340.
- [12] Shen B. The mechanism of fracture coalescence in compression experimental study and numerical simulation[J]. Eng. Frac. Mech., 1995, 51(1): 73-85.
- [13] Tang C A, Lin P, Wong R H C, et al. Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws-Part II: Numerical approach[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2001, 38(7): 925-936.
- [14] Finkel V M, Golovin Y I, Sletkov A A. Disintegration of a crack tip with a strong electromagnetic field[J]. Sov. Phys. Doklady, 1977, 22(11): 683-685.
- [15] 龙海丽, 郝锦旗. 自电位层析成像的理论及实验研究[J]. 地球物理学报, 2005, 48(6): 1343-1349.  
Long Haili, Hao Jinqi. The theoretical and experimental research on self-potential tomography[J]. Chinese J. Geophys., 2005, 48(6): 1343-1349.
- [16] Brace W F, Bombolakis E G. A note on brittle crack growth in compression[J]. J. Geophys. Res., 1963, 68(6): 3709-3713.
- [17] Nitsan U. Electromagnetic emission accompanying fracture of quartz-bearing rocks[J]. Geophysics Res. Lett., 1977(4): 333-336.
- [18] Ogawa T, Oike K. Electromagnetic radiation from rocks[J]. J. Geophys. Res., 1985, 90(D4): 6245-6249.
- [19] Dickinson J T, Donaldson E E, Park M K. The emission of electrons and positive ions from fracture of materials[J]. J. Mater. Sci., 1981, 16(10): 2897-2908.
- [20] Rabinovitch A, Frid V, Bahat D. Surface oscillations—a possible source of fracture induced electromagnetic radiation[J]. Tectonophysics, 2007, 431(1): 15-21.