

不同类型岩石加载破坏的微震和电荷感应信号特征研究

赵扬锋¹, 程传杰¹, 刘玉春², 荆刚¹

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学 理学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 根据岩石变形破坏过程中有微震信号和电荷感应信号产生, 利用岩石变形破裂过程微震和电荷感应监测系统, 对不同类型岩石在单轴压缩和加卸载下变形破裂过程进行实时同步监测以获取微震和电荷感应信号特征。试验结果表明: 不同类型岩石在变形破裂过程中有微震和电荷感应信号产生, 微震和电荷感应信号是低频信号, 信号频谱主要集中在40 Hz以下, 随着岩石强度的增大, 岩石变形破裂过程中的微震和电荷感应信号事件数增大且信号强度也增大; 岩石变形破裂过程中微震和电荷的产生机理不同, 微震信号是由于岩体裂纹扩展释放弹性应变能而引起的振动波, 而电荷主要有微破裂、摩擦作用、压电效应等综合作用产生; 对比不同类型岩石变形破裂过程的微震和电荷感应信号并对各信号进行相关性分析, 研究发现, 岩石在失稳破坏时存在着丰富的微震和电荷感应信号, 且各信号具有高相关性, 此阶段可作为最危险预警区。

关键词: 岩石; 变形破坏; 微震; 电荷感应; 信号特征

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)05-0199-05

Study on microseismic and charge induction signal characteristics of different types of rock loading failure

ZHAO Yangfeng¹, CHENG Chuanjie¹, LIU Yuchun², JING Gang¹

(1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. College of Science, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: According to the generation of microseismic signals and charge induction signals during rock deformation and failure, the monitoring system of microseismic and charge induction for rock deformation and failure process were used to simultaneous monitor the deformation and fracture process for different rock in uniaxial compression loading and unloading and to obtain the signals characteristics of microseismic and charge induction. The results showed that there were microseismic and charge induction signals in the process of deformation and fracture of different types of rocks, which are with low frequencies, and the signal spectrum are mainly lower than 40Hz. With the increase of rock strength, the signal event number and intensity of microseismic and charge induction signals during rock deformation and fracture process increased. The induced mechanism of microseismic and charge induction signals is different during rock deformation and fracture process. The microseismic signal is due to rock crack propagation release of elastic strain energy in vibration wave form; however, the charge is produced under the comprehensive effect of micro fracture, the friction effect and the piezoelectric effect. The microseismic and charge induction signals are compared during different rock deformation and fracture process, and the correlations of the signals were analyzed. We found that there are abundant microseismic and charge-induced signals with high correlations in rock failure, which can serve as the most dangerous warning zone.

Key words: rock; deformation failure; microseism; charge induction; signal feature

收稿日期: 2019-04-10; 修回日期: 2019-04-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51274114); 国家重点研发计划项目(2016YFC0801403)

作者简介: 赵扬锋(1979-), 男, 河南三门峡人, 博士, 教授, 主要从事矿山灾害力学的研究工作。

1 研究背景

在我国大型水利工程的大规模建设中,岩爆、冲击地压等动力灾害事故时有发生,往往造成重大的经济损失和人员伤亡。研究岩体失稳破坏的信号特征可以了解岩爆、冲击地压等动力灾害发生的机制,达到提前预警的目的。大量试验^[1-3]证明,岩石变形破坏过程中会产生微震和电荷感应信号,且微震和电荷感应信号特征与岩石内部裂纹产生的过程有很大关系。因此,可以通过研究岩石变形破裂过程中微震和电荷感应信号特征与岩石内部裂纹扩展过程和应力应变的变化,用来预警预测岩石的动力灾害。

岩石变形破裂微震信号试验研究基本上是根据水利和岩土工程中现场监测到的微震数据为基础来进行的。夏永学等^[3]认为通过监测和分析微震信号可以更好地了解岩石破坏机制,为岩石动力灾害预测预警提供有效信息;蒋雄等^[4]研究了两河口水电站母线洞开挖过程中微震积聚区微震信号特征,发现微震信号的高频成分先减小后增多;姜鹏等^[5]通过研究3个水电站的微震监测数据,发现了岩石破裂的大小与微震信号频率的关系;王晓南等^[6]研究了组合煤岩的微震信号和微震频谱特征,对冲击地压的监测预警具有重要意义;杨威^[7]采用不同单轴加压方式,测试了多种煤岩变形破裂过程中的微震信号;袁瑞甫等^[8]利用微震监测系统分析了微震信号的时序特征和频谱特征及分布变化规律;朱权洁等^[9]以现场微震数据为基础,对比研究了岩石破裂微震信号和矿山爆破震动信号,发现两者在频带能量分布上有很大差异;张苏等^[10]研究了水泥材料静爆过程中的微震信号特征,发现在不同强度下,水泥材料微震信号规律基本相同。关于电荷感应信号方面的研究,吴小平等^[11]用测量微电流的方法研究了单轴压缩下花岗岩表面电荷性质;朱元清等^[12]提出了岩石变形破裂时裂纹尖端电荷运动是产生电荷感应的原因;丁鑫等^[13]对煤岩受载变形破坏电荷信号进行了监测试验,发现了不同应力阶段电荷信号时-频域特征和变化规律;赵扬锋等^[14]、潘一山等^[15]研究了煤岩在不同破坏状态下

电荷感应信号特征,并在现场进行了试验;王宏伟等^[16]对花岗岩试样在单轴加载条件下的电荷感应进行研究,表明岩石变形破坏过程与电荷感应规律有良好的相关性;潘一山等^[17]对不同温度下花岗岩和砂岩电荷感应信号进行了研究,发现在相同温度下花岗岩和砂岩电荷感应幅值差别比较大;2016年赵扬锋等^[1,18]首次研究了花岗岩和大理岩在不同加载方式下变形破坏过程微震、电荷感应和声发射等各种信号变化规律。在众多研究成果中较少涉及将微震和电荷感应监测手段同时用来对不同类型岩石失稳破坏过程进行分析,因此本文对不同类型岩石进行单轴压缩和加卸载试验,监测和分析不同类型岩石变形断裂过程的微震信号和电荷感应信号特征。

2 试验系统与试样

试验系统包括加载系统、屏蔽系统、微震和电荷感应数据采集系统。微震和电荷感应信号数据采集系统采用自行研制的多通道数据采集器^[1],微震和电荷感应信号各3通道,试验时将3个电荷传感器布置在试样的两侧且分别距离试样底端为30、80和80 mm,电荷探头距试件表面5 mm。微震传感器用耦合剂粘贴于试验机试验台上,试验过程中,通过网络设置使试验机与数据采集器同时采集载荷、微震和电荷感应信号。

试验试样有花岗斑岩、花岗闪长岩、细粒砂岩和中粒砂岩共4种类型岩石,试样尺寸均为 $\phi 50 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$,试件上下两端面进行打磨,保证试件两端面平整。每种类型岩石取4个试样,其中两个试样做单轴压缩试验,加载速率为0.5 kN/s,另两个试样做加卸载试验,加卸载速率均为0.1 kN/s。

3 试验结果与分析

3.1 岩石变形破裂过程微震和电荷感应试验结果

对花岗斑岩和花岗闪长岩进行了单轴压缩试验和加卸载试验,获得了该两类花岗岩岩样变形破裂过程时间与应力、微震和电荷感应信号图及信号频谱图,如图1~3所示。

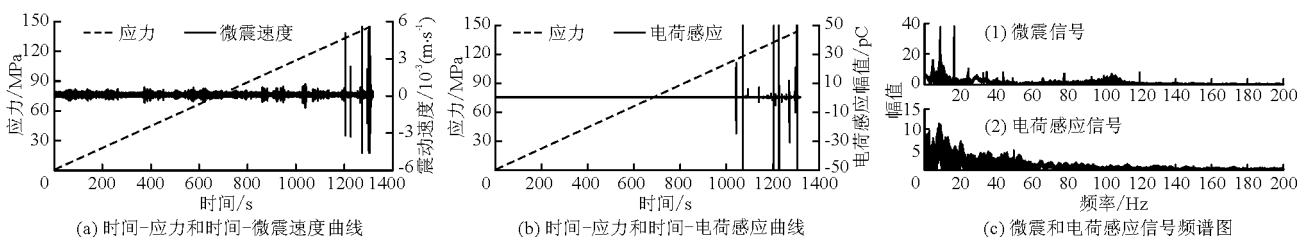


图1 花岗斑岩单轴压缩下应力、微震和电荷感应信号

对中粒和细粒砂岩进行了单轴压缩试验和单轴加卸载试验,获得了该两类砂岩岩样变形破裂过程

应力、微震和电荷感应信号图及信号的频谱图,如图 4~6 所示。

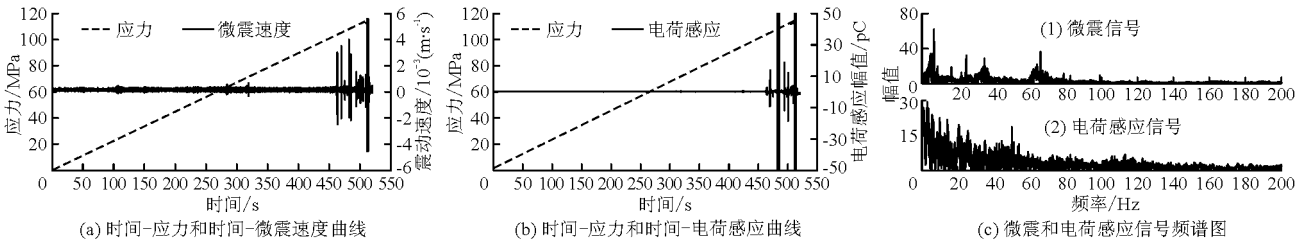


图 2 花岗闪长岩单轴压缩下应力、微震和电荷感应信号

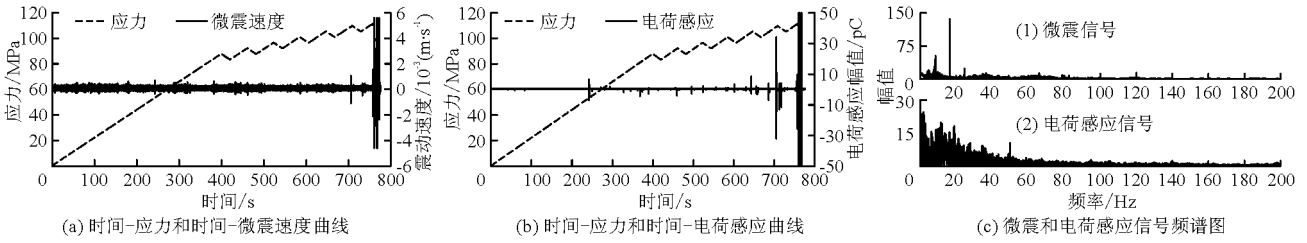


图 3 花岗闪长岩加卸载下应力、微震和电荷感应信号

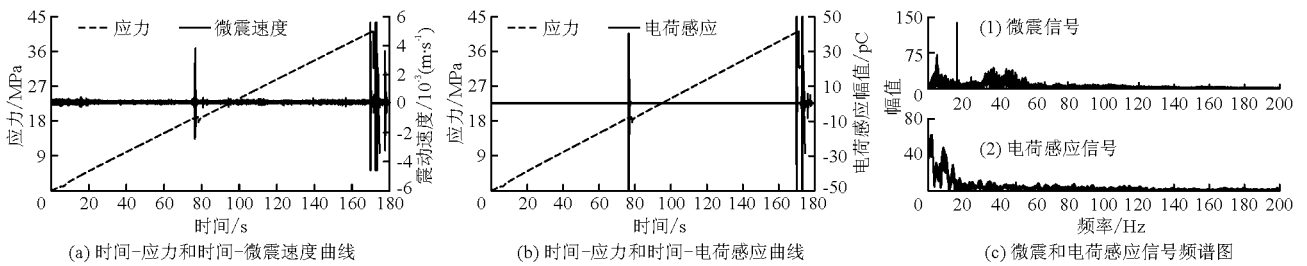


图 4 细粒砂岩单轴压缩下应力、微震和电荷感应信号

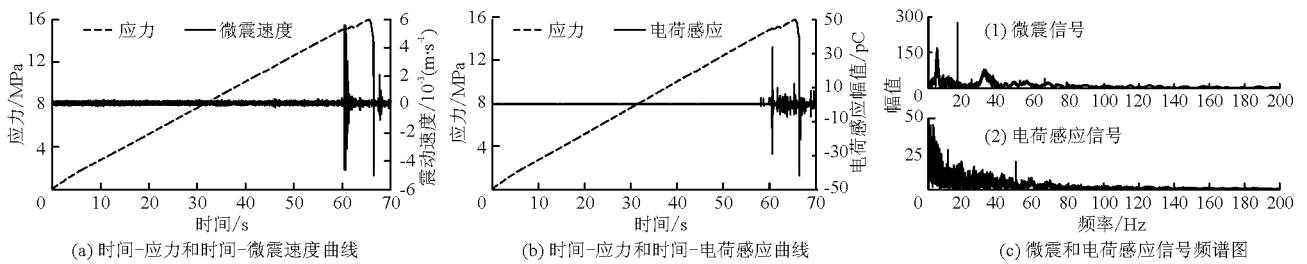


图 5 中粒砂岩单轴压缩下应力、微震和电荷感应信号

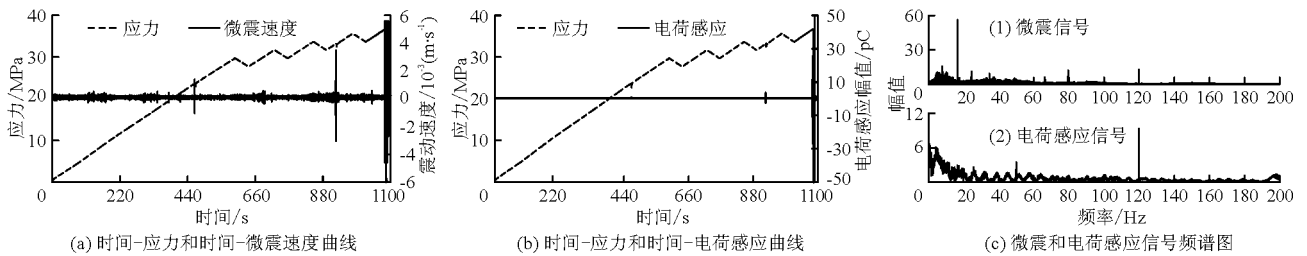


图 6 细粒砂岩加卸载下应力、微震和电荷感应信号

3.2 岩石变形破裂过程中微震和电荷感应信号的演化特征

由图 1~6 中时间-应力曲线并结合文献[18]可知:在单轴压缩和循环加卸载下花岗斑岩的极限应力分别为 143.21 和 134.86 MPa;花岗闪长岩的

极限应力分别为 112.97 和 111.49 MPa;细粒砂岩的极限应力分别为 41.20 和 38.30 MPa;中粒砂岩的极限应力分别为 15.97 和 16.20 MPa。上述 4 类岩石的极限应力从大到小依次为:花岗斑岩、花岗闪长岩、细粒砂岩和中粒砂岩,花岗岩的极限应力远大

于砂岩的极限应力,并且循环加卸载对岩石的极限应力影响较小。

将图1~6中岩石加载变形破坏的时间-应力曲线划分为4个阶段:压密闭合阶段、弹性变形阶段、弹塑性阶段和失稳破坏阶段。在弹性变形阶段,岩石应力与变形成线性关系,岩石变形过程的微震和电荷感应信号均不产生或只产生微弱的微震和电荷信号,随着应力增加岩石产生的微震和电荷感应信号没有明显增加;弹塑性阶段,岩石应力在极限强度的70%~95%,该阶段岩石应力与变形呈非线性关系,此阶段花岗岩产生的微震和电荷感应信号比砂岩产生的微震和电荷感应信号丰富,花岗岩试样在应力达到极限强度的70%时就有明显的微震和电荷感应信号,这是由于此阶段花岗岩有较多微裂纹产生且释放的能量强,花岗岩比砂岩含有较多的压电材料,花岗岩的晶体颗粒远大于砂岩的,砂岩颗粒之间因摩擦产生的电荷和振动也远小于花岗岩的,因而砂岩在此阶段的微震和电荷感应信号幅值与花岗岩比较都较小;失稳破坏阶段,岩石应力超过极限强度95%后,岩石在应力峰前阶段聚积了大量弹性能,当荷载刚超过岩石抗压强度后,岩石瞬间发生失稳破坏,释放出较大能量,此阶段花岗岩、花岗闪长岩、细粒砂岩和中粒砂岩产生的微震和电荷感应信号事件数最多且强度最大。花岗斑岩、花岗闪长岩、细粒砂岩和中粒砂岩在变形破裂过程中都有微震和电荷感应信号产生。随着岩石强度的增加,岩石变形破裂过程中的微震和电荷感应信号事件数和信号强度也增大。相同性质的岩石在破裂时产生的微震和电荷感应信号随岩石强度的增大而增强,例如花岗斑岩和花岗闪长岩,细粒砂岩和中粒砂岩都有此规律。

花岗斑岩、花岗闪长岩、细粒砂岩和中粒砂岩在变形破裂过程中的微震和电荷感应并不是同时出现的,电荷感应信号出现的时间早于微震信号,但电荷感应信号比微震信号持续的时间短,例如图1中花岗斑岩在加载时间为1 000~1 200 s时,电荷感应信号和微震信号不同步,此段有较强电荷感应信号而微震信号较弱,在1 000 s前有较弱微震信号而没有监测到电荷感应信号。这说明微震和电荷感应的产生机理不同,对于微震信号产生机理是由于岩体释放弹性能而引起的振动波,而电荷感应信号的产生机理比较复杂,有微破裂、摩擦作用、压电效应等多种原因。

对比花岗岩和砂岩的时间-应力曲线,砂岩在

弹塑性阶段就有突然的应力降产生,比如图4(a)在78.8 s、图5(a)在60.8 s、图6(a)在487.6 s和910.9 s都有较大的应力降产生,此时砂岩会有较大的裂纹产生,释放出较大的能量,在突然应力降产生之前有较大的微震和电荷感应信号产生,而花岗岩在弹塑性阶段没有此现象发生,而仅在失稳破坏阶段有较大的应力降产生,花岗岩失稳破坏释放的能量也远大于砂岩失稳破坏释放的能量。

由图3和6,并结合文献[18]中花岗岩循环加卸载的微震和电荷感应信号可知,花岗岩在加卸载下不断有幅值在5~10 pC的电荷感应信号产生,而微震信号事件数少且大多淹没在背景噪声中,砂岩在加卸载下没有电荷感应信号产生,微震信号也较弱。这是由于花岗岩含有较多的石英等压电材料,在加卸载下有一定的电荷产生,而砂岩不含石英等压电材料,在加卸载下也就没有电荷产生。

由图1~6中微震和电荷感应信号频谱图可知,花岗岩和砂岩变形破裂过程的微震和电荷感应信号频率都在200 Hz以下,花岗岩电荷感应信号主要集中在0~80 Hz,砂岩电荷感应信号主要集中在0~40 Hz,随着信号频率的增大,电荷感应信号频谱幅值呈减小趋势,可见,岩石变形破裂的电荷感应信号具有低频特点,而微震信号有几个优势频率,但各类岩石的优势频率不完全相同,微震信号频率在分布离散中有向低频集中的趋势,频谱主要集中在0~100 Hz。

3.3 岩石变形破裂过程中微震和电荷感应信号的相关性分析

对岩石变形破裂过程中的电荷感应信号和微震信号进行相关性分析,得到了不同通道电荷感应信号的相关性和微震与电荷感应信号的相关性,如图7~8所示。

由图7~8可知,不同通道的电荷感应信号相关性高于微震与电荷感应信号产生之间的相关性,岩石在失稳破坏阶段前,花岗闪长岩电荷感应信号之间的相关性在0.6~0.8之间,中粒砂岩电荷感应信号之间的相关性在0.4~0.6之间,电荷感应信号之间的相关性都是中相关,而微震和电荷感应信号之间的相关性在0.4以下,信号之间相关性较差。但在失稳破坏阶段电荷感应信号之间相关性大于0.8,微震信号与电荷感应信号之间相关性大于0.8,都有较高相关性。因此岩石变形破裂过程中当电荷感应信号和微震信号之间都有较高的相关性时岩石处于最危险阶段。

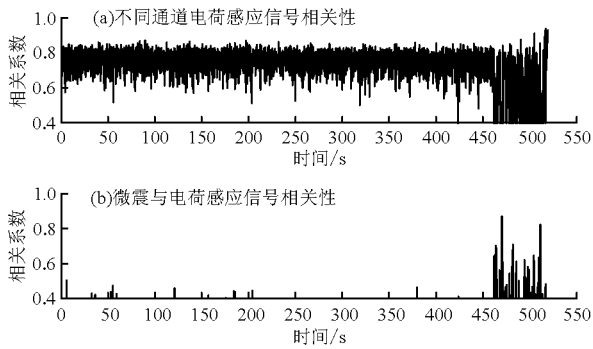


图7 花岗闪长岩微震和电荷感应信号的相关性

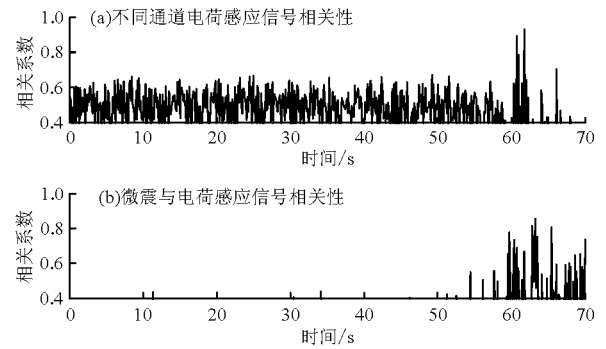


图8 中粒砂岩微震和电荷感应信号的相关性

4 结论

(1) 花岗斑岩、花岗闪长岩、细粒砂岩和中粒砂岩变形破裂过程中均有微震和电荷感应信号产生。随着岩石强度的增大,岩石变形破裂过程中的微震和电荷感应信号事件数增大且信号强度也增大。相同性质的岩石在破裂时产生的微震和电荷感应信号随岩石强度的增大而增强。岩石变形破裂过程中,电荷感应信号早于微震信号出现,且电荷感应信号的持续时间小于微震信号的持续时间。

(2) 花岗岩和砂岩变形破裂过程的微震和电荷感应信号频率在0~200 Hz,电荷感应信号频谱幅值随着信号频率增大而减小,微震信号频谱主要集中在0~100 Hz,并存在优势频率。

(3) 岩石加载变形破坏的时间-应力曲线划分为4个阶段:压密闭合阶段、弹性变形阶段、弹塑性阶段和失稳破坏阶段,各阶段的微震和电荷感应信号规律不同。在弹塑性阶段岩石变形破裂过程中有较大幅值的微震信号和电荷感应信号产生,可将此阶段作为危险预警区,此时应加强前兆信号的监测。在失稳破坏阶段,岩石变形破坏过程中微震信号和电荷感应信号较丰富,且信号强度均达到最大值,各信号之间有较高相关性,可将此阶段作为最危险预警区,此时应采取措​​施以防灾害发生。

参考文献:

[1] 赵扬锋,刘力强,潘一山等. 岩石变形破裂微震、电荷感应、自电位和声发射实验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(1):107-123.

[2] 刘英利,徐建新. 强震与微震观测系统的研究[J]. 地震工程与工程振动,2006,26(3):264-266.

[3] 夏永学,蓝航,魏向志. 基于微震和地音监测的冲击危险性综合评价技术研究[J]. 煤炭学报,2011,36(S2):358-364.

[4] 蒋雄,徐奴文,周钟,等. 两河口水电站母线洞开挖过程

围岩破坏机制[J]. 岩土力学,2019,40(1):305-314.

[5] 姜鹏,戴峰,徐奴文,等. 岩体破裂尺度与频率特征关系及其工程实证研究[J]. 岩土力学,2016,37(S2):483-492.

[6] 王晓南,陆菜平,薛俊华,等. 煤岩组合体冲击破坏的声发射及微震效应规律试验研究[J]. 岩土力学,2013,34(9):2569-2575.

[7] 杨威. 煤岩变形破裂电磁和微震信号关联响应机理及特征研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2014.

[8] 袁瑞甫,李化敏,李怀珍. 煤柱型冲击地压微震信号分布特征及前兆信息判别[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(1):80-85.

[9] 朱权洁,姜福兴,于正兴,等. 爆破震动与岩石破裂微震信号能量分布特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(4):723-730.

[10] 张苏,王金贵,艾立昊. 水泥材料静爆过程中的微震信号特征[J]. 振动. 测试与诊断,2016,36(6):1078-1084+1234-1235.

[11] 吴小平,施行觉,郭自强. 花岗岩压缩带电的实验研究[J]. 地球物理学报,1990,33(2):208-211.

[12] 朱元清,罗祥麟,郭自强,等. 岩石破裂时电磁辐射的机理研究[J]. 地球物理学报,1991,34(5):594-601.

[13] 丁鑫,肖晓春,吕祥锋,等. 煤岩破裂过程电荷信号时-频域特性及降噪研究[J]. 煤炭学报,2018,43(3):657-666.

[14] 赵扬锋,潘一山,刘玉春,等. 单轴压缩条件下煤样电荷感应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(2):306-312.

[15] 潘一山,赵扬锋,李国臻. 冲击地压预测的电荷感应技术及其应用[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(S2):3988-3993.

[16] 王宏伟,李超,赵扬锋. 岩石变形破裂状态与电荷感应信号相关性试验分析[J]. 安全与环境学报,2014,14(5):111-114.

[17] 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.

[18] 赵扬锋,张超,刘力强,等. 循环载荷作用下岩石多参量特征规律研究[J]. 中国安全科学学报,2016,26(5):105-111.