



您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)



移动扫码阅读

赵扬锋,荆刚,李兵,等.花岗岩单轴压缩下电荷信号时频特征研究[J].煤炭科学技术,2021,49(9):47-53. doi:10.13199/j.cnki.est.2021.09.007

ZHAO Yangfeng, JING Gang, LI Bing, et al. Charge signal time-frequency characteristics of granite under uniaxial compression [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9): 47-53. doi:10.13199/j.cnki.est.2021.09.007

# 花岗岩单轴压缩下电荷信号时频特征研究

赵扬锋,荆刚,李兵,程传杰

(辽宁工程技术大学 力学与工程学院,辽宁 阜新 123000)

**摘要:**为进一步研究花岗岩变形破坏的前兆特征,采用自主研发的电荷感应监测系统,获得了花岗岩变形破坏全过程时-频域信息,并设计数字滤波器降噪。研究结果表明:岩石在变形破坏过程中伴随着电荷信号产生,随着加载速率的增大,能量积聚加快,岩石破裂所需积累能量时间越短,产生高幅值电荷信号越提前,应力调整次数增多,高幅值脉冲数量增多。对信号傅里叶变换并进行频谱分析,发现信号主频分布在0~100 Hz。岩石变形破坏频域特征总体表现为主频幅值在岩石产生应力降时急剧增加,且在岩石完全破坏时主频幅值增幅最大,主频幅值与电荷感应幅值增高具有同步性,可将电荷信号与主频幅值急剧提高作为岩石失稳破坏前兆特征之一。设计了数字滤波器,较好地滤除了工频干扰信号和高频噪声信号,提高了频谱分析准确性。

**关键词:**岩石力学;电荷感应;时频特征;数字滤波

中图分类号:TD315 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2021)09-0047-07

## Charge signal time-frequency characteristics of granite under uniaxial compression

ZHAO Yangfeng, JING Gang, LI Bing, CHENG Chuanjie

(School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** In order to further study the precursory characteristics of deformation and failure of granite, the time-frequency domain information of the whole process of deformation and failure of granite is obtained by using the self-developed charge induction monitoring system, and the digital filter is designed to reduce the noise. The results show that the charge signal is generated in the process of rock deformation and failure. With the increase of loading rate, the energy accumulation accelerates. The shorter the time of energy accumulation for rock fracture, the earlier the high amplitude charge signal is generated, the more the number of stress adjustments, the higher the number of high amplitude pulse increase. Fourier transform and spectrum analysis of the signal show that the main frequency of the signal is in the range of 0~100 Hz. The frequency domain characteristics of rock deformation and failure generally show that the amplitude of the main frequency increases sharply when the stress drop occurs, and the amplitude of the main frequency increases most when the rock is completely destroyed. The increase of the amplitude of the main frequency and the amplitude of charge induction is synchronous. The sharp increase of the amplitude of the charge signal and the main frequency can be regarded as one of the precursors of rock instability and failure. A digital filter is designed to filter power frequency interference signal and high frequency noise signal, that could improves the accuracy of spectrum analysis.

**Key words:** rock mechanics; charge induction; time-frequency characteristics; digital filtering

## 0 引言

随着我国重大岩土工程的大量建设,冲击地压和地震等岩体动力灾害研究显得尤为重要<sup>[1]</sup>。地震和冲击地压发生机理复杂,开展动力灾害防治预

报具有重要意义。

研究表明<sup>[2-5]</sup>,岩石材料变形破坏过程中会产生电荷,且电荷产生与岩石应力状态和破坏过程密切相关,因此可以采用电荷感应技术对岩石破坏过程进行监测,以获得岩石失稳破坏的前兆信息。国

收稿日期:2021-02-25;责任编辑:朱恩光

基金项目:辽宁省高校创新人才支持计划资助项目(LR2019032);国家自然科学基金面上资助项目(51274114)

作者简介:赵扬锋(1979—),男,河南三门峡人,教授,博士。E-mail:zhyf\_20010284@sina.com

内外学者对电荷信号进行了大量研究, KUSENKO V S 等<sup>[6-7]</sup>用静电计测量大理岩加载时有电荷感应产生,发现电荷感应信号随着加卸载变化。NITSAN<sup>[8]</sup>通过试验研究了岩石的压电效应,得出岩石内部含有石英和其他压电材料发生破裂时,有无线频段的电荷信号产生。赵扬锋等<sup>[9-11]</sup>建立了单轴压缩条件下多参量测试系统,得出当频繁出现同步且幅值较大的各参量信号时,表明岩石即将进入失稳破坏阶段,断层倾角变化也对各参量信号有较大影响。潘一山等<sup>[12-14]</sup>研究了温度对煤样电荷感应信号的影响,研究了在三轴压缩条件下不同围压和孔隙率对含瓦斯煤样电荷感应规律,分析了煤岩体拉伸破坏过程中不同应力突变时电荷迁移规律。唐治等<sup>[15]</sup>研究了煤岩摩擦条件下电荷信号规律,说明摩擦只是产生电荷感应信号的一种方式,不同材料在相同条件下产生电荷信号不同。郑文红等<sup>[16]</sup>通过水力压裂试验对比不同壁厚电荷信号规律,结果表明电荷释放与壁厚和起裂压力存在必然关系。丁鑫等<sup>[17]</sup>通过开展不同应力路径下煤岩变形破坏过程电荷信号特性研究,提出一种基于幅值和信号变化的煤岩破坏预测方法。王岗等<sup>[18-19]</sup>理论分析了水对煤样物理力学性质和电荷信号产生的影响规律,分析了注水前后电荷信号特征,研究了预制大尺度裂纹倾角变化电荷信号变化规律。肖晓春等<sup>[20]</sup>考虑颗粒间摩擦和黏聚力作用,建立了基于颗粒物质力链失稳的煤岩体破裂判据。何学秋等<sup>[21]</sup>通过原子力显微镜研究了不同变质程度煤岩表面电势及电荷密度等电性参数变化规律,将煤岩表面电荷研究推进到纳米尺度。但上述众多成果对于岩石破坏各阶段电荷信号和频谱特征研究不够深入,研究过程也缺少对信号的降噪分析。笔者认为对岩石变形破坏过程产生的电荷感应信号波形、频谱传播特征及信号进行精细化研究,可对信号自动识别奠定基础,提高岩石失稳破坏前兆信息的准确性。

## 1 试样制备与试验系统

试验所用花岗岩均取自北京,切割成尺寸为 $\phi 75 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 的试样,试样两边打磨光滑,试样如图1所示。选取其中6个试样,分为3组待用。

试验系统包括加载系统、电荷信号采集系统和屏蔽系统(图2)。加载系统采用中国地震局液压万能试验机,电荷采集系统采用自主研制的多通道数据采集系统,通道采样频率最高为100 kHz,实验室采样频率设置为每通道12.5 kHz。电荷传感器1和2均布置在距试样底部100 mm处且关于试样轴对称。



图1 花岗岩试样

Fig.1 Granite samples

称,传感器3布置在距试样底面40 mm且与传感器1、2距离相等,各传感器正对试样表面且距试样表面5 mm。试验时数据采集器和压力机通过网络时间保持同步。压力机与试验系统采用致密的铜网包围,并将压力机和铜网接地以减小外界电磁干扰。对3组岩样进行单轴压缩试验,加载速率分别为0.5、1.0、1.5 kN/s。

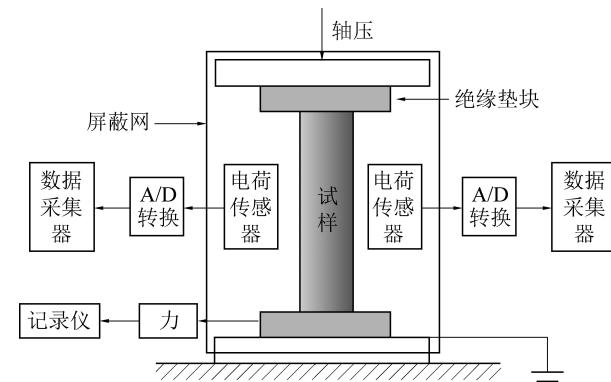


图2 试验装置

Fig.2 Experimental setup

## 2 电荷感应干扰信号特征及降噪

### 2.1 带阻滤波器对信号滤波

岩石变形破坏过程中电荷信号比较微弱,易受外界干扰影响。在分析岩石变形破坏过程信号特征前,需要对试验过程中干扰信号特征进行分析。研究发现,所有的试验背景噪声都呈现相同特征,截取其中6 s并进行时频变换。图3为对原始信号傅里叶变换(FFT)得到的频谱。

由图3可知,实验室背景干扰信号频率主要为50 Hz的工频干扰。利用带阻滤波器滤波可实现50 Hz工频信号的滤除。笔者设计递归型Ⅱ R 切比雪夫Ⅰ型带阻滤波器,该滤波器在通带中具有等幅波动的特性,在阻带内单调递减,精度均匀分布在整个阻带内,更好的满足滤波要求。

切比雪夫Ⅰ型幅度平方函数  $|H_a(j\omega)|^2$  为

$$|H_a(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 C_N^{-2}(f/f_p)} \quad (1)$$

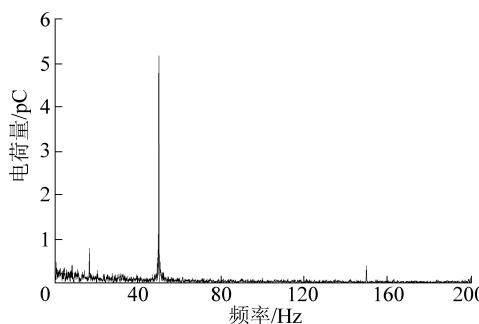


图3 实验室背景信号频谱

Fig.3 Spectrogram of laboratory background signal

其中: $\varepsilon$ 为通带波纹参数;N为滤波器阶数;f为信号频率; $f_p$ 为通带截止频率; $C_N$ 为N阶切比雪夫I型多项式,定义为

$$C_N(x) = \begin{cases} \cos[N \arccos x], & |x| \leq 1 \\ \operatorname{ch}[N \operatorname{arch} x], & |x| > 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $x$ 为频率归一化结果。

由式(1)可知未知数 $\varepsilon$ 为

$$\varepsilon = \sqrt{10^{0.1r_p} - 1} \quad (3)$$

式中: $r_p$ 为通带截止频率。

利用MATLAB软件编写带阻滤波器程序,滤波器设计指标:通带上限频率60 Hz,通带下限频率40 Hz,阻带上限频率51 Hz,阻带下限频率49 Hz,边带区衰减幅度0.5 dB,截止区衰减幅度20 dB。所涉及的带阻滤波器通带曲线如图4所示。

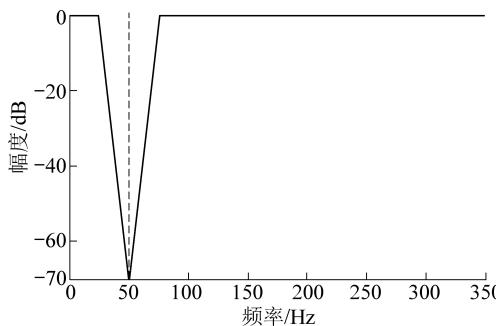


图4 带阻滤波器通带曲线

Fig.4 Band stop filter passband curve

图4中通带曲线水平部分表示频率通过良好,曲线“V”形部分为衰减区,当频率在50 Hz附近幅值衰减到-68 dB,滤波后的信号频谱如图5所示,可以发现频率50 Hz干扰信号被过滤,因此滤波器成功抑制了频率50 Hz工频干扰。

## 2.2 低通滤波器对信号滤波

由上文可知,花岗岩在加载初期噪声主要为频率50 Hz的工频干扰,选取局部电荷信号做傅里叶变换,结果如图6a所示。由图6a可知,岩石在变形破坏全过程频率主要集中在1~100 Hz,100 Hz之后的频率幅值较小且无显著变化。根据上节切比雪夫

原理,设计切比雪夫I型低通滤波器滤除100 Hz后的频率。滤波器设计参数为:通带截止频率100 Hz,阻带截止频率150 Hz,边带区衰减幅度0.5 dB,截止区衰减幅度30 dB。用设计的低通滤波器对电荷信号处理,滤波后频率在频率100 Hz之后幅值急剧衰减,在150 Hz之后趋近于零。滤波前后信号波形对比如图6b所示,可以看出滤波后时域波形波动减小,说明达到了很好的滤波效果。

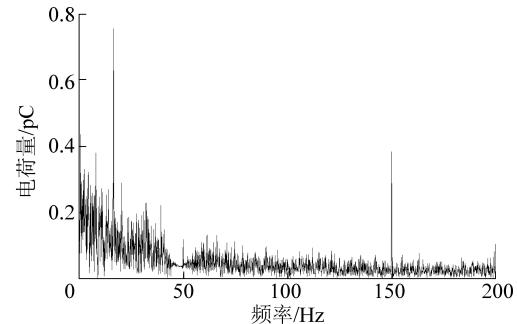


图5 滤波后背景信号频谱

Fig.5 Frequency spectrum of background signal after filtering

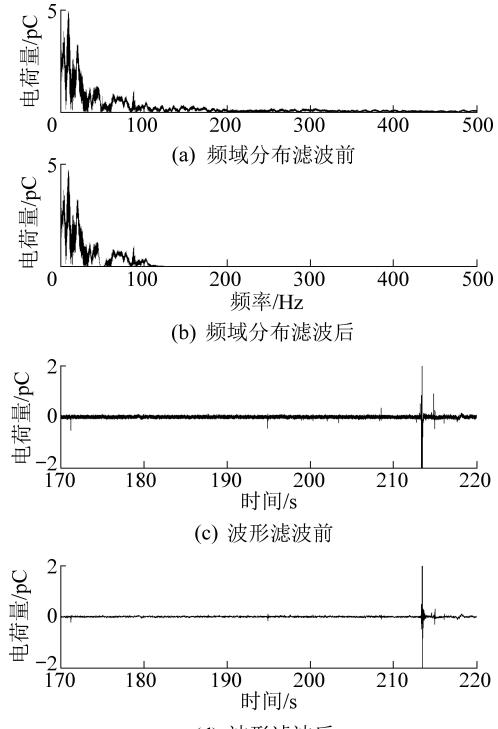


图6 电荷信号滤波前后对比

Fig.6 Contrast charge signal before and after filtering

## 3 电荷感应信号时域特征分析

电荷信号进行滤波降噪后,对花岗岩在不同加载速率下信号特征做对比分析。不同加载速率下各通道监测结果如图7—图9所示,通过MATLAB处理后得到的不同加载速率下电荷感应幅值-应力-时间关系曲线。

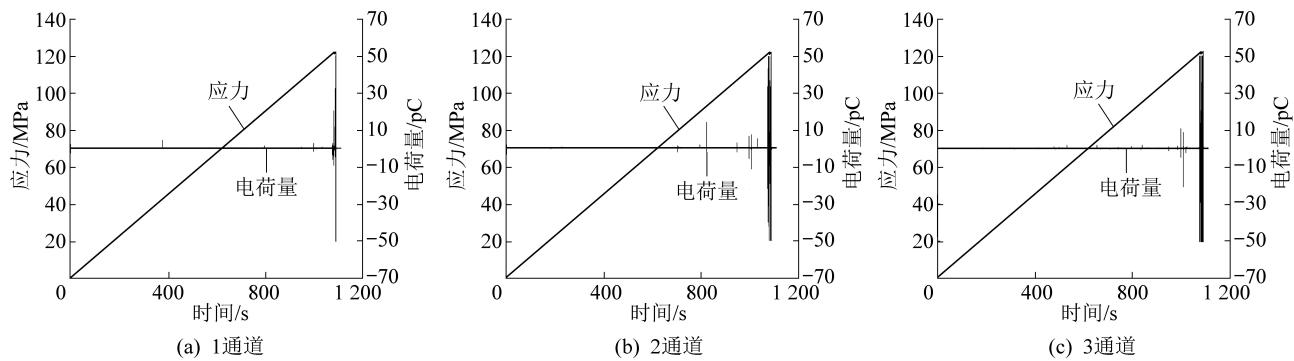


图7 加载速率为0.5 kN/s时各通道应力-电荷量

Fig.7 Stress-charge amplitude of channels at loading rate of 0.5 kN/s

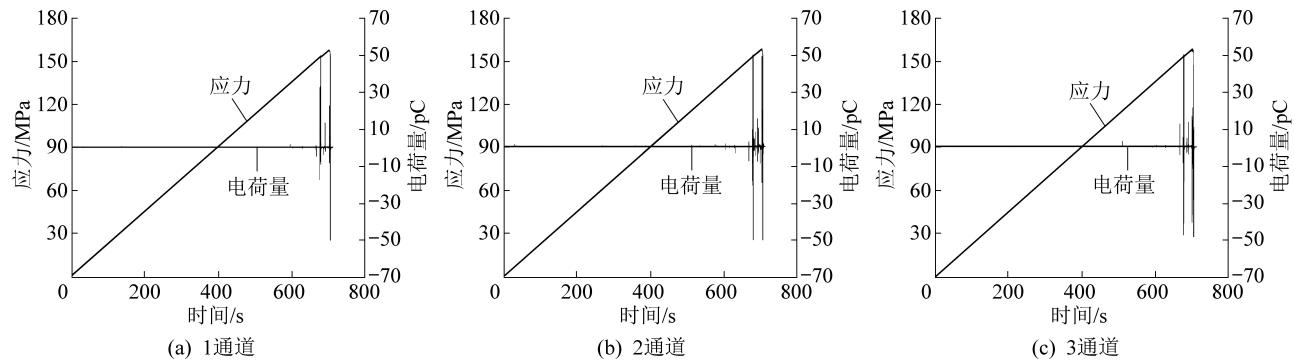


图8 加载速率为1.0 kN/s时各通道应力-电荷量

Fig.8 Stress-charge amplitude of channels at loading rate of 1.0 kN/s

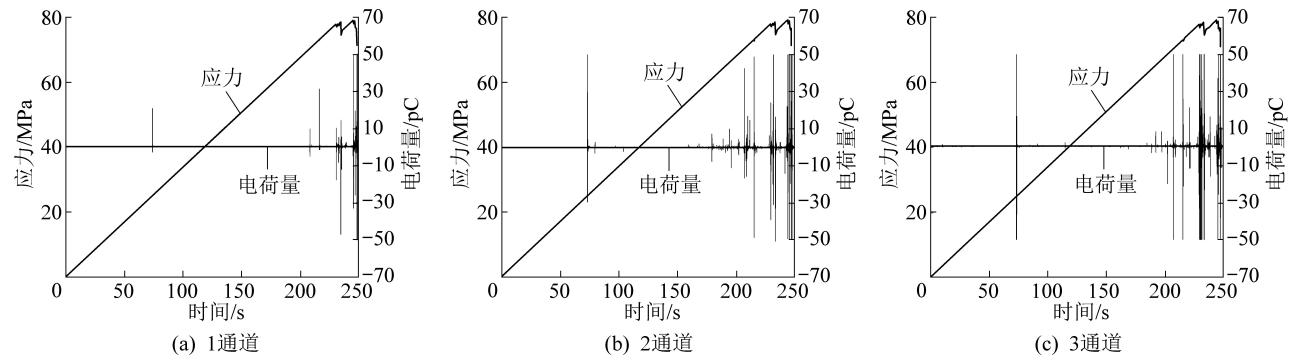


图9 加载速率为1.5 kN/s时各通道应力-电荷量

Fig.9 Stress-charge amplitude of channels at loading rate of 1.5 kN/s

由图7—图9可知,电荷信号在岩石空隙压密阶段和弹性变形阶段出现明显的平静期,且平静期电荷信号幅值主要在±0.5 pC以内,电荷量较小。随着应力的不断增加,当岩石处于峰值应力附近时,电荷信号幅值突然增大,信号较为密集,表现为间断的高幅值脉冲信号。这是因为当岩石在压密阶段,原生裂隙在压力下错动摩擦会产生微量电荷。随着应力不断增大,岩石在受载过程中裂隙不断发育,当裂隙尖端再次破裂时,其破裂面两端会产生等量异号电荷,表现为电荷量的增加。在破坏阶段,岩石在强烈的挤压下促使宏观裂纹非稳定性扩展,岩石在短时间内发生破坏,破坏面的突然错动会产生大量

电荷。在峰后阶段,电荷量突然降低为平静期并迅速衰减为零,这是由于岩石是一种电介质,在受载过程中没有产生稳定的电势差,则电荷产生后会迅速衰减,这也解释了电荷信号在岩石受载全过程是间断的脉冲信号。电荷信号在岩石不同的加载速率下有所差异。在加载速率为0.5 kN/s时,电荷信号在1 074~1 089 s幅值较大,脉冲数量急剧增多,在1 089 s附近(峰值应力附近)应力突降,信号幅值达到最大。加载速率为1 kN/s,在677.2 s时首次发生应力突降,信号达到较大值,之后不断有电荷信号产生,且幅值较大。在691.9 s时再次发生应力突降,电荷量相应增加,在706.4 s(峰值应力附近)时,单

位时间电荷信号脉冲数量增加,幅值达到信号峰值。加载速率为1.5 kN/s时,电荷信号在73 s首次接收到高幅值信号,此时岩石有应力降产生,之后在216 s就有较大幅值的电荷信号,在峰值应力附近发生多次应力调整,电荷信号也随着应力突降幅值增大且达到峰值。由此可知加载速率越大,岩石产生幅值较高电荷信号越提前,岩石破坏阶段超前演化,能量耗散过程加剧,产生高幅值电荷脉冲数量显著增多。

不同加载速率的电荷量累计曲线如图10所示。不同加载速率下电荷量累计曲线大致相同,总体表现为在加载初期电荷量增加较少,在弹性后期(有应力降)时跳跃式增加,在破坏时刻电荷量在极短的时间达到最大值。这是因为在加载初期电荷信号处于平静期,岩石内部孔隙裂隙闭合,产生轻微的电荷信号,弹性后期岩石在高应力作用下原生裂隙的再次破裂和新裂隙的发育摩擦产生较大电荷信号,在岩石破坏时破裂面剧烈错动产生大量高幅值电荷信号,表现为电荷量急剧增加。由图10可知,随着加载速率的增加,电荷累计曲线突变点增加,且突变时间提前,说明加载速率增加时高幅值脉冲数量增多,应力调整次数增多,越提早出现高幅值电荷信号。

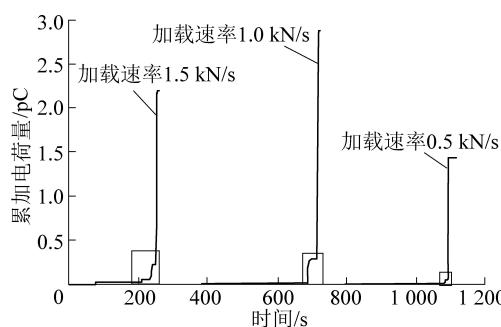


图10 不同加载速率电荷累计幅值关系

Fig.10 Charge cumulative curves at different loading rates

#### 4 电荷感应信号频域特征分析

对不同加载速率电荷信号开展傅里叶变换得到频谱信息,对比3种加载速度下频谱图发现花岗岩在不同的加载速度下频谱特征基本一致,选取加载速率为1.5 kN/s的信号进行分析。

由上节分析可知,当岩石只有发生应力降时产生高幅值电荷信号,应力降多发生在弹性后期和破坏阶段。从弹性阶段、破坏阶段拾取4组应力降时的电荷时域信号,拾取长度为1 s。为比较应力降时频谱变化,拾取各组电荷信号之前1 s的信号作为对比,通过对各时间段信号做傅里叶变换和滤波后

得到频域分布如图11所示。

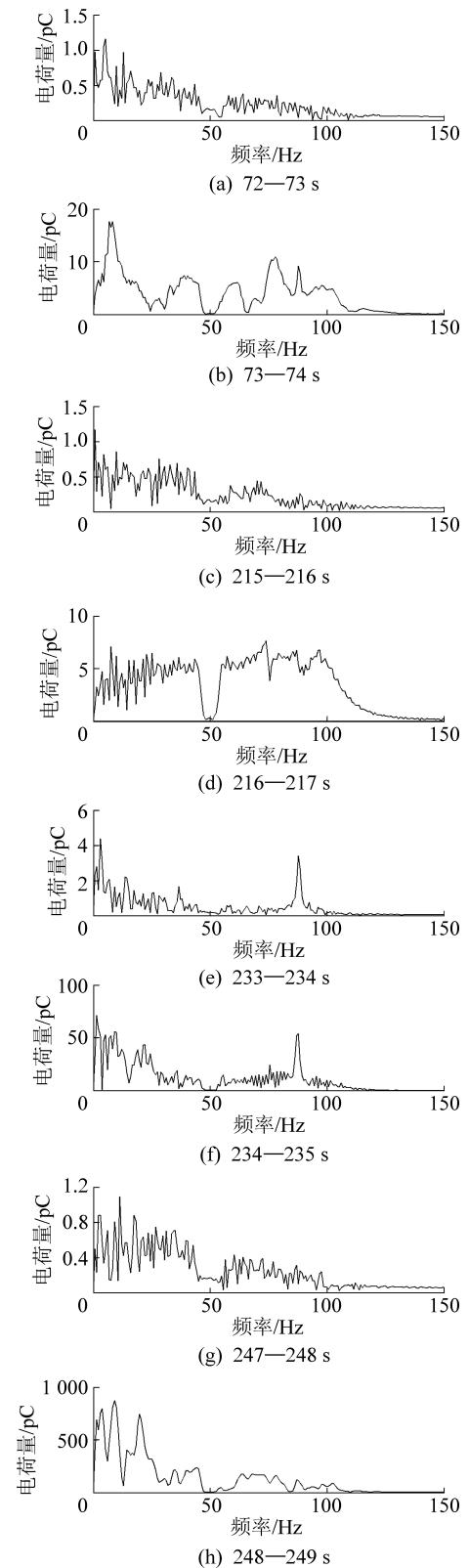


图11 不同时间段电荷感应信号频域分布

Fig.11 Frequency domain distribution in different time periods

其中图11a、图11b、图11c处于弹性阶段,图11d处于破坏阶段。其中73—74 s、216—217 s、234—235 s、248—249 s时间段电荷感应信号频域分

布为试件产生应力降且产生高幅值电荷感应信号时的电荷感应信号频域分布,对应的时域波形如图12所示。

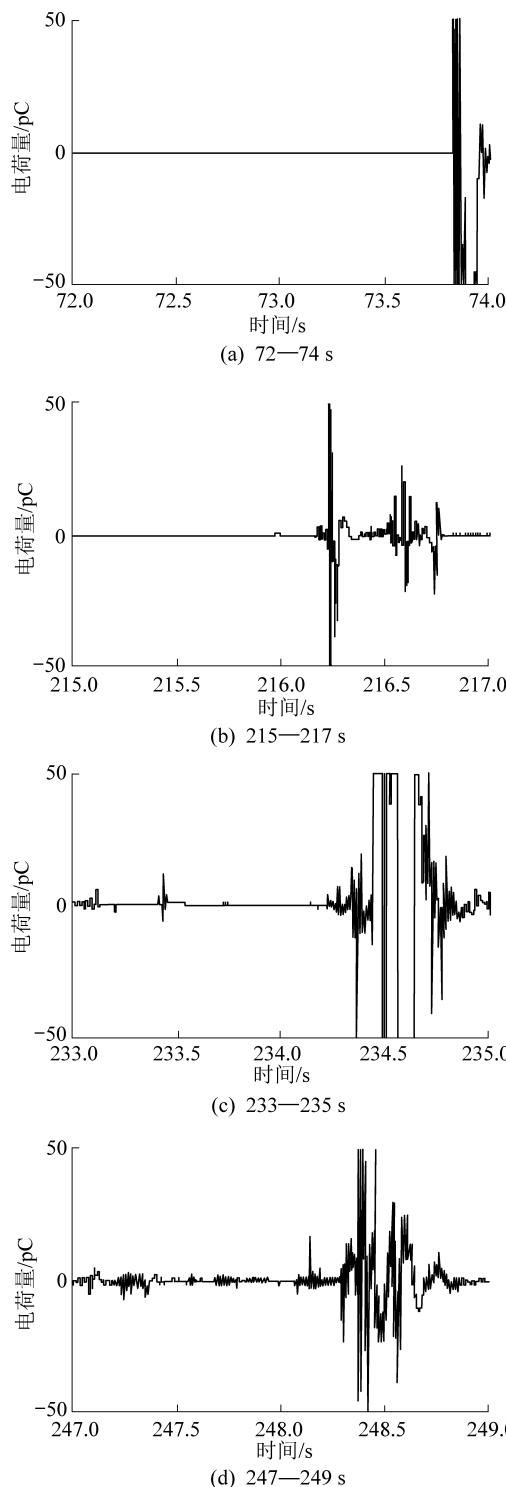


图 12 时域波形

Fig.12 Time domain wavefore

根据变换结果可知,岩石变形破坏过程中信号频率分布是连续的,在平静期主频幅值较低,有应力降时主频幅值急剧增加。图11中有应力降时主频幅值分别增加到原来的15、9、16、795倍,岩石在峰

值附近(248~249 s)主频幅值增幅最大。综合上节分析可知,主频幅值的增高与电荷信号的增高具有同步性,可将主频幅值大幅增高作为岩石破坏前兆信息之一。

实验室拾取的电荷信号是离散脉冲信号。由傅里叶变换原理可知,原始信号可看成多个正弦波信号累加而成,而正弦波频率从低到高排列组成频域图。当原始信号突然出现高幅值脉冲信号时,组成信号的多个正弦波就出现低频高幅值分量,在频域图上表现为低频分量幅值增大,主频向低频转移。随着应力的不断提高,岩石内部裂隙不断发育破裂。应力水平越高,岩石裂隙摩擦错动越剧烈,产生电荷量越大,电荷信号则为高幅值脉冲信号,主频幅值显著提高。

## 5 结 论

1)设计了切比雪夫带阻滤波器和低通滤波器对原信号滤波,滤波器能达到较好的降噪效果,为频谱分析奠定了基础。实验室干扰信号主要为50 Hz的工频干扰,信号主频主要分布在0~100 Hz。

2)在岩石变形破坏过程中,加载速率越大,能量积聚越快,岩石破裂所需积聚能量时间缩短,产生高幅值电荷信号越提前,应力调整次数增多,高幅值脉冲数量增多。

3)岩石变形破坏频域特征总体表现为主频幅值在岩石产生应力降时急剧增加,且在岩石完全破坏时主频幅值增幅最大。主频幅值与电荷信号幅值的增高具有同步性,因此可以将电荷信号与主频幅值急剧提高作为岩石失稳破坏前兆特征之一。

## 参考文献(References) :

- [1] 吕爱钟.试论我国岩石力学的研究状况及其进展[J].岩土力学,2004,29(S1):1~9.  
LYU Aizhong. Some situation and progress in rock mechanics study in China [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 29 (S1): 1~9.
- [2] 郭自强,郭子祺,钱书清,等.岩石破裂中的电声效应[J].地球物理学报,1999,42(1):74~83.  
GUO Ziqiang, GUO Ziqi, QIAN Shuqing, et al. Electro-acoustic effect in rock fracturing [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1999, 42(1): 74~83.
- [3] 郭自强,周大庄,施行觉,等.岩石破裂中的电子发射[J].地球物理学报,1988,31(5):566~571.  
GUO Ziqiang, ZHOU Dazhuang, SHI Xingjue, et al. Electron emission during rock fracture [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1988, 31(5): 566~571.
- [4] 孙正江,王丽华,高 宏.岩石标本破裂时的电磁辐射和光发射[J].地球物理学报,1986,29(5):491~495.

- SUN Zhengjiang, WANG Lihua, GAO Hong. Electromagnetic emission and light radiation during fracture of rock samples [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1986, 29(5): 491–495.
- [5] 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.
- WU Xiaoping, SHI Xingjue, GUO Ziqiang. Study of the electrification of granite samples under compression [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1990, 33(2): 208–211.
- [6] KUKSENKO V S ,MAKHMUDOV K F . Mechanically-induced electrical effects in natural dielectrics [J]. *Technical Physics Letters*, 1997, 23(2): 126–127.
- [7] KUKSENKO V S ,MAKHMUDOV K F ,Ponomarev A V . Relaxation of electric fields induced by mechanical loading in natural dielectrics [J]. *Physics of the Solid State*, 1997, 39(7): 1065–1066.
- [8] NITSAN U. Electromagnetic emission accompanying fracture of quartz-bearing rocks [J]. *Geophysical Research Letters*, 1977, 83(4): 333–336.
- [9] 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.
- ZHAO Yangfeng, LIU Liqiang, PAN Yishan, et al. Experiment study on microseismic, charge induction, self-potential and acoustic emission during fracture process of rocks [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36 (1): 107–123.
- [10] 赵扬锋,刘力强,潘一山.单轴压缩下含断层带花岗岩声发射、微震和电荷感应实验[J].*地震地质*,2017,39(5):964–980.
- ZHAO Yangfeng, LIU Liqiang, PAN Yishan, Experiment study on acoustic emission, microseism and charge induction during fracture process of granite with fault zone under uniaxial compression [J]. *Seismology and Geology*, 2017, 39(5): 964–980.
- [11] 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.
- ZHAO Yangfeng, PAN Yishan, LIU Yuchun, et al. Experimental study of charge induction of coal samples under uniaxial compression [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(2): 306–312.
- [12] 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.
- [13] 潘一山,罗浩,肖晓春,等.三轴条件下含瓦斯煤电力感应规律的试验研究[J].*煤炭学报*,2012,37(6):918–922.
- PAN Yishan, LUO Hao, XIAO Xiaochun, et al. Experimental study on mechanical-charge induction law of coal containing gas under triaxial compression [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(6): 918–922.
- [14] 潘一山,罗浩,唐治,等.煤岩体拉伸失稳破坏电荷感应规律研究[J].*岩石力学与工程学报*,2013,32(7):1297–1303.
- PAN Yishan, LUO Hao, TANG Zhi, et al. Study of charge induction law of coal and rock mass during tensile instability and failure [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(7): 1297–1303.
- [15] 唐治,潘一山,李国臻,等.煤岩摩擦电荷感应规律分析[J].*地球物理学进展*,2013,28(2):975–979.
- TANG Zhi, PAN Yisan, LI Guozhen, et al. The analysis of induced charge of electric friction in coal rock [J]. *Progress in Geophysics*, 2013, 28(2): 975–979.
- [16] 郑文红,陈广阳,罗浩,等.矿井底板突水过程电荷感应规律试验研究[J].*中国安全科学学报*,2017,27(10):105–110.
- ZHENG WenHong, CHEN GuangYang, LUO Hao, et al. Experimental study on charge induction law of water inrush in mine floor [J]. *China Safety Science Journal*, 2017, 27 (10): 105–110.
- [17] 丁鑫,肖晓春,吴迪,等.不同加载路径煤岩破裂过程声-电荷复合信号特性[J].*煤炭学报*,2016,41(S2):359–368.
- DING Xin, XIAO Xiaochun, WU Di, et al. Study on compound signal characteristic of acoustic emission and charge induction in coal rock failure under different loading paths [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(S2): 359–368.
- [18] 王岗,潘一山,肖晓春.电荷感应法检测煤层注水防冲效果研究[J].*岩土工程学报*,2019,41(2):311–319.
- WANG Gang, PAN Yishan, XIAO Xiaochun. Detection of effects of rock burst prevention by water injection into coal seam using charge induction method [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(2): 311–319.
- [19] 王岗,潘一山,肖晓春.预制大尺度单裂纹煤样破坏特征及电荷规律试验研究[J].*煤炭学报*,2018,43(8):2187–2195.
- WANG Gang, PAN Yishan, XIAO Xiaochun. Experimental study on the failure characteristics and charge law of coal samples with large scale single pre-crack [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(8): 2187–2195.
- [20] 肖晓春,丁鑫,潘一山,等.颗粒煤岩破裂过程声发射与电荷感应试验[J].*煤炭学报*,2015,40(8):1796–1804.
- XIAO Xiaochun, DING Xin, PAN Yishan, et al. Experiment of acoustic emission and charge induction in granular coal rock failure [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(8): 1796–1804.
- [21] 何学秋,宋大钊,柳先锋,等.不同变质程度煤岩微表面电性特征[J].*煤炭学报*,2018,43(9):2367–2375.
- HE Xueqiu, SONG Dazhao, LIU Xianfeng, et al. Micro-electrical characteristics of coals with different metamorphic grade [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(9): 2367–2375.