

◇ 研究报告 ◇

不同浓度的尾砂胶结充填体破坏过程 声发射特性试验研究*

赵奎^{1,2} 谢文健^{1,2} 曾鹏^{1,2†} 龚鹵^{1,2} 卓毓龙^{1,2} 於鑫佳^{1,2}
杨泽元^{1,2} 刘周超^{1,2}

(1 江西理工大学资源与环境工程学院 赣州 341000)

(2 江西理工大学 江西省矿业工程重点实验室 赣州 341000)

摘要: 制备了 3 种不同质量浓度的充填体试件,进行了单轴压缩声发射试验,分析了不同浓度的充填体力学特性,重点研究了试件破坏过程中的声发射振铃计数、声发射累计撞击数与声发射累计能量的比值(r 值)、主频及其相对高频信号激增响应系数特征。研究表明:随着浓度的增加,充填体的峰值强度与弹性模量呈增大趋势,充填体中出现的声发射累计振铃计数越多; r 值先升高再持续减小到一个较低值,随着外载荷的增加,进入缓慢升高阶段,峰值前均保持在该阶段。充填体破裂前兆信息在声发射信号主频分布中呈现主频段增多现象,表现为由加载初期的 1~2 个主频段,在临界主破裂时增多到 3~5 个主频段;且随着浓度的增加,声发射信号主频频段分布越宽,声发射相对高频信号(160~180 kHz)的激增响应系数呈递减趋势。以上特征可为不同浓度的尾砂胶结充填体稳定性监测、预测提供依据。

关键词: 尾砂胶结充填体;浓度;声发射;主频;前兆

中图分类号: TD315 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2020)04-0543-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2020.04.007

Experimental study on AE characteristics of cemented tailings backfill failure process with different concentration

ZHAO Kui^{1,2} XIE Wenjian^{1,2} ZENG Peng^{1,2} GONG Cong^{1,2} ZHUO Yulong^{1,2} YU Xinjia^{1,2}
YANG Zeyuan^{1,2} LIU Zhouchao^{1,2}

(1 College of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology,
Ganzhou 341000, China)

(2 Key Laboratory of Mining Engineering of Jiangxi Province, Jiangxi University of Science and Technology,
Ganzhou 341000, China)

Abstract: Three kinds of backfill samples with different mass concentrations were prepared, and the uniaxial compression acoustic emission (AE) test was carried out. The mechanical properties of backfill with different mass concentrations were analyzed, focusing on the characteristics of the AE ring count, the ratio of AE cumulative hit number to AE cumulative energy (r value), the main frequency and its relative high frequency signal surge response coefficient. The results show that: with the increase of the concentration, the peak strength and modulus of elasticity of the backfill increase, and the more the cumulative AE ring count appear in the backfill; the r value increases first and then continuously decreases to a lower value, and with the increase

2020-01-08 收稿; 2020-04-16 定稿

*国家重点研发计划项目(2017YFC0804601),国家自然科学基金项目(51664018),江西省教育厅科学技术青年基金项目(GJJ150622)
作者简介:赵奎(1969-),男,安徽六安人,博士,教授,博导,研究方向:岩石力学与工程稳定性、声发射检测技术。

†通信作者 E-mail: zengpeng@jxust.edu.cn

of the external load, it enters a slowly increasing stage, and which remains at this stage before the peak value. In the distribution of the main frequency of AE signal, the precursory information of backfill fracture appears the phenomenon of increasing the main frequency segment, which is represented by 1~2 main frequency segments in the initial loading stage and 3~5 main frequency segments in the critical main fracture stage. With the increase of concentration, the main frequency segment of AE signal is wider, and the surge response coefficient of AE relative high frequency signal (160~180 kHz) is decreasing. The above characteristics can provide a basis for the stability monitoring and early predicting of different concentrations of cemented tailings backfill.

Keywords: Cemented tailings backfill; Concentrations; Acoustic emission; Main frequency; Precursor

0 引言

尾砂胶结充填体常作为矿山地下开采的重要承载体,对维护矿山采场的稳定、预防大规模的地压活动具有重要作用,而对其进行稳定性的监测,也成为矿山的重点工作之一。声发射(Acoustic emission, AE)作为无损监测的一种重要手段,可为尾砂胶结充填体的破坏失稳监测提供重要的判别依据。

有关于尾砂胶结充填体方面的研究,近几年,国内外学者主要集中在力学特性^[1]、强度确定^[2]、损伤模型^[3]及充填材料选择^[4]等方面。随着声发射技术的发展,越来越多学者开始对充填体的声发射特性进行研究^[5-6]。程爱平等^[7]对灰砂比为1:4的胶结充填体进行单轴压缩声发射试验,研究了其受压破坏过程的时空演化规律,进而对充填体破裂进行预测。龚函等^[8]对灰砂比为1:4的胶结充填体进行单轴循环加卸载试验,研究了其加-卸载过程中声发射 b 值特征及破裂响应特征。谢勇等^[9]对灰砂比1:8的胶结充填体进行单轴抗压声发射试验,研究充填体受压破坏过程中的声发射能率、 b 值、能率分形维数与时间的关系特征。孙光华等^[10]对灰砂比为1:6的充填体进行单轴抗压声发射试验,建立了以声发射参数为损伤变量的损伤演化方程。这些研究成果,增进了人们对充填体受压破坏过程声发射特性的认识,同时建立了一定的损伤演化及失稳预测判别模型^[11-12],但大都集中在配比、养护龄期方面的研究,很少涉及对充填体浓度方面的研究。

实际充填采矿过程中,矿山地面充填站以一定浓度的料浆输送至地下采空区,但在采空区里经常出现料浆析水沉降现象,水的析出导致采空区上下部分料浆浓度不同,浓度越高其胶结性能越好,相应的充填体强度越高,从而也表现在不同浓度下的充

填体受损产生的声发射信号不同^[13-14]。因此,有必要对不同浓度的充填体力学特性与声发射特性进行研究。有鉴于此,本文对灰砂比1:4、质量浓度分别为68%、70%、72%的3种尾砂胶结充填体进行单轴压缩声发射试验,分析充填体破坏过程的声发射累计振铃计数、 r 值、声发射信号主频及相对高频信号激增响应系数特征,探究不同浓度的充填体损伤演化机制及破坏前兆声发射特征,为充填体稳定性声发射监测、预测提供理论依据。

1 试验简介

1.1 试件制备

尾砂骨料取自安徽某矿尾矿库,以P.O42.5硅酸盐水泥为胶结材料,制备灰砂比为1:4、质量浓度分别为68%、70%、72%的充填体试件。试件在模具中浇筑完成后进行脱模养护,在标准恒温、恒湿条件下养护14天,得到3组浓度试件。其中,A1~A3浓度为68%;B1~B3浓度为70%;C1~C3浓度为72%;试件规格为70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm。图1为制备好的充填体试件。



图1 充填体试件

Fig. 1 Test pieces of backfill

1.2 试验系统及设置

试验力学系统为中国科学院武汉岩土力学研究所研制的RMT-150C岩石力学加载系统,采用位移加载模式,加载速率为0.002 mm/s。声发射系统采用美国物理声学公司(PAC)研制的PCI-II型声发射仪,声发射传感器为UT-1000型,前置放大器增益为40 dB,门槛值为40 dB,采样率为1 MSPS,采样长度为1000。

2 力学特性

单轴压缩下不同浓度充填体典型的应力-应变曲线见图2。以试件C3为例,充填体受压破坏过程可分为4个阶段:OA段为压密阶段,充填体处于加载初期,曲线呈下凹状,此时充填体内部微孔隙和微裂纹逐步被压实;AB段为弹性阶段,此阶段应力-应变曲线近似线性增长,随着充填体浓度的增加,弹性阶段表现更为明显;BC段为屈服阶段,曲线段呈上凸状,曲线斜率随应力增加逐渐减小为零,此阶段充填体发生塑性变形,并且充填体的浓度越大,屈服应力也越大;CD段为峰后破坏阶段,该曲线段斜率变为负值并持续减小,充填体承载能力逐

渐减小,但仍具有一定的承载能力。

3种不同浓度的充填体试件力学参数见表1。A、B、C三组试件平均峰值强度分别为1.654 MPa、1.890 MPa、2.680 MPa,平均弹性模量分别为0.152 GPa、0.180 GPa、0.274 GPa。说明质量浓度越大,充填体胶结性越好,微孔隙和微裂纹数量越少,峰值强度越大,弹性模量也越大。各试件峰值应变在0.014~0.020之间。浓度越大,峰值应变整体呈减小趋势。

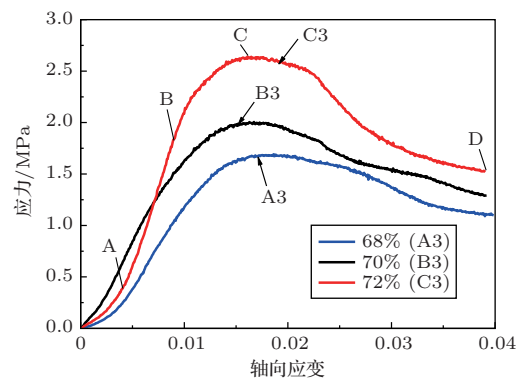


图2 不同浓度充填体典型的应力-应变曲线

Fig. 2 Typical stress-strain curve of backfill with different concentrations

表1 不同浓度充填体力学参数试验结果

Table 1 Test results of mechanical parameters of backfill with different concentrations

试件编号	A组-68%浓度			B组-70%浓度			C组-72%浓度		
	峰值强度/MPa	峰值应变	弹性模量/GPa	峰值强度/MPa	峰值应变	弹性模量/GPa	峰值强度/MPa	峰值应变	弹性模量/GPa
1	1.627	0.017	0.154	1.799	0.015	0.177	2.782	0.014	0.286
2	1.598	0.018	0.151	1.866	0.015	0.209	2.617	0.020	0.231
3	1.692	0.019	0.151	2.006	0.017	0.155	2.641	0.016	0.306
平均值	1.654	0.018	0.152	1.890	0.016	0.180	2.680	0.017	0.274

3 声发射基本参数特征

3.1 声发射振铃计数

声发射振铃计数反映信号强度与频度,用于破裂源的活动性评价^[15]。以A3、B3与C3为例,得到试件峰值强度及峰值累计振铃计数随浓度关系,具体见图3。由图3可知,随着浓度的增加,充填体峰值强度及声发射累计振铃计数都呈增大趋势,说明质量浓度越大,骨料沉降速度降低,使其内部颗粒分

布更均匀,结构更加致密,其峰值强度也越大;同时充填料浆离析减少,使试件内部颗粒组成数量相对更多,其颗粒胶结链接总数也越多,导致其破坏产生的微裂纹数量也越多,声发射峰值累计振铃计数也越多。

分析不同浓度试件在各阶段的声发射累计振铃计数变化关系,具体见图4。不同浓度充填体在压密、弹性与屈服阶段的声发射累计振铃计数的变化趋势基本一致。由于声发射振铃计数与加载过程中

产生的微裂纹数量密切相关,在压密、弹性与屈服阶段,随着浓度增大,其累计振铃计数也越多,其中72%浓度试件的累计振铃计数最多,表明浓度越大的充填体受压破坏产生的微裂纹数量也越多。

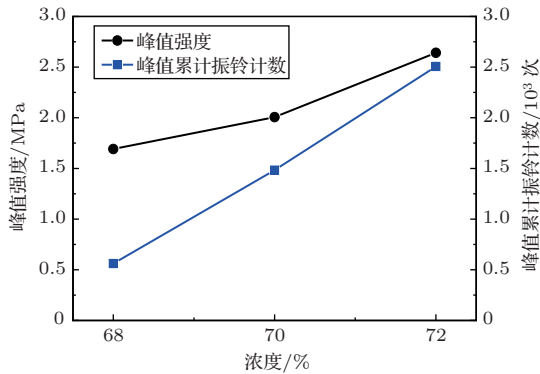


图3 峰值强度、峰值累计振铃计数与浓度关系

Fig. 3 Relationship between peak intensity, peak cumulative ringing count and concentration

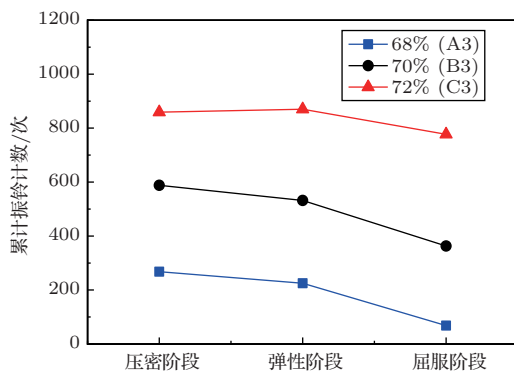


图4 不同浓度试件在各阶段的累计振铃计数

Fig. 4 Cumulative ringing count of different concentration samples in each stage

3.2 r 值特征

声发射累计撞击数与累计能量的比值,记作: $r = \sum N / \sum E$,用来反映试件破坏过程中的能量集中度及内部裂纹扩展情况^[16-17], r 值持续减小并保持较低的数值,表明声发射数量少且能量高,处于大破裂孕育阶段。

图5为充填体典型试件 r 值、应力与时间关系曲线。分析可知,试件加载初期, r 值曲线均呈上升趋势,并达到一个较大值,这表明各试件加载初期内部颗粒之间摩擦、滑移,损伤程度较小,产生了大量低能摩擦型的声发射信号;随着加载继续, r 值快速下降到一个较低值;进入屈服阶段, r 值持续减小并

保持在变化较小的相对稳定阶段,此阶段微裂纹萌生、扩展贯通,损伤程度急剧增加,因此产生大量高能声发射信号,意味着破裂的开始。随着外载荷的增加,进入缓慢升高阶段,峰值前均保持在该阶段。这一特征可为充填体的破裂失稳判别提供一定的依据。

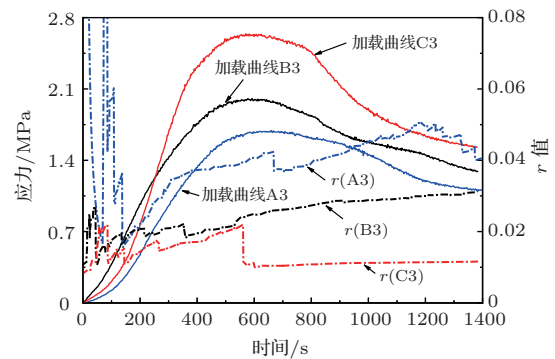


图5 充填体典型试件应力、 r 值随时间变化曲线

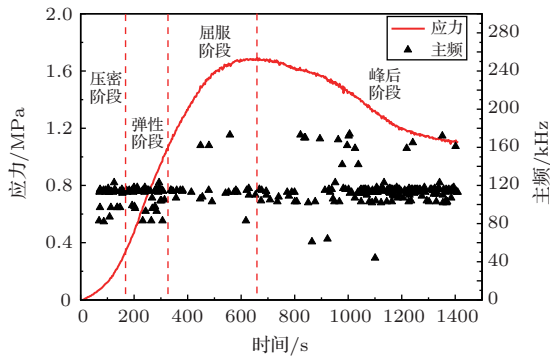
Fig. 5 Stress and r value curve with time of typical backfill samples

4 声发射信号频率特征

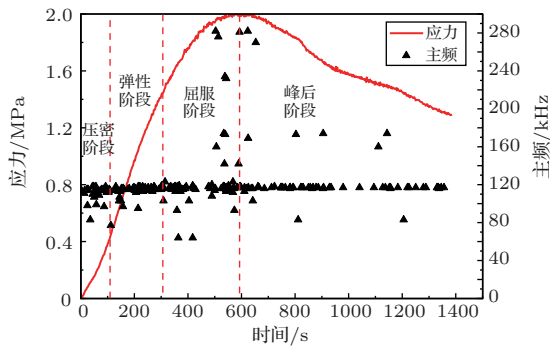
4.1 声发射信号主频特征

主频为二维频谱图中最大幅值所对应的频率^[18-19]。利用Matlab进行快速傅里叶变换(Fast Fourier transformation, FFT)得到声发射信号主频。图6为尾砂胶结充填体典型试件(A3、B3、C3)破坏过程声发射信号主频和应力随时间变化规律。由图6可知,不同浓度充填体破坏过程声发射信号的主频分布在40~280 kHz范围,且主要集中在100~120 kHz频段。

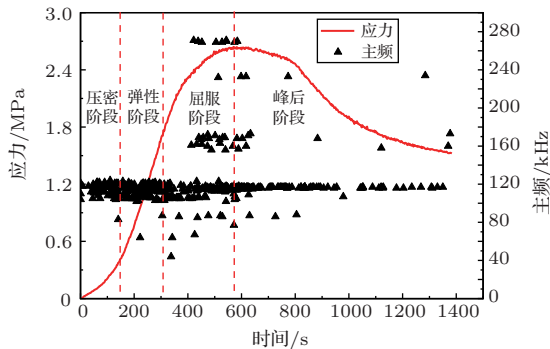
初始压密阶段,试件声发射信号主频分布在80~100 kHz、100~120 kHz两个频段内,而72%浓度试件基本不出现100 kHz以下的声发射信号主频;弹性阶段,70%浓度试件声发射信号主频分布范围减小至90~120 kHz,而68%与72%浓度试件声发射信号主频分布范围不变;屈服阶段,3种浓度试件均开始出现160~180 kHz频段的声发射信号主频,即相对高频信号激增现象。表明各试件内部损伤以裂纹扩展、贯通成宏观主破裂带为主,预示主破裂即将发生。在主频段数量特征方面,68%浓度试件在屈服阶段的声发射信号主频呈2个频段分布,70%与72%浓度试件呈3个以上频段分布。从声发



(a) 68%浓度试件(A3)



(b) 70%浓度试件(B3)



(c) 72%浓度试件(C3)

图 6 不同浓度试件应力、主频与时间关系
Fig. 6 Relationship between stress, dominant frequency and time of samples with different concentrations

射信号数量上看,72%浓度试件比70%浓度试件有更多相对高频信号(160~180 kHz、260~280 kHz)出现,并且在屈服阶段出现低于60 kHz的声发射信号主频现象。

综合分析可知,充填体破坏过程中声发射信号的主频,由加载初期的1~2个主频段(80~100 kHz、100~120 kHz),在临界主破裂时增多到3~5个主频段(60~80 kHz、80~100 kHz、100~120 kHz、160~180 kHz与260~280 kHz)。随着浓度的增加,声发射信号主频频段分布越宽,主要原因是由于浓度与强度有直接关系,试件的浓度越大,则强度也越大,内部所积聚的能量也越大。

4.2 声发射相对高频信号激增响应系数特征

不同浓度充填体试件主破裂前均出现频段为160~180 kHz的相对高频信号激增现象,分别统计各试件相对高频信号激增的前兆响应系数 β ^[20]。其中, β 值越大,代表相对高频信号激增响应时间越早,前兆识别能力更强,其计算公式为

$$\beta = (t_j - t_i) / t_j, \quad (1)$$

式(1)中: t_i 为声发射相对高频信号激增出现时间; t_j 为充填体主破裂时间(峰值应力)。

各试件声发射相对高频信号激增响应系数与平均响应时间见表2。 $\bar{\beta}$ 为充填体声发射相对高频信号激增平均响应系数。分析可知,对于峰值应力处破裂时间 t_j ,68%浓度试件 t_j 最大,70%浓度试件 t_j 次之,72%浓度试件 t_j 最小。表明浓度越大,充填体延性越小,达到主破裂(峰值应力)时间越短。对于声发射相对高频信号激增平均响应系数 $\bar{\beta}$ 值来说,68%浓度试件 $\bar{\beta}_A$ 最大,70%浓度试件 $\bar{\beta}_B$ 次之,72%浓度试件 $\bar{\beta}_C$ 平均值最小,呈递减趋势。充填体浓度越大,声发射相对高频信号(160~180 kHz)激增响应能力越弱。

表 2 声发射相对高频信号激增响应系数

Table 2 Surge response coefficient of acoustic emission relative high frequency signal

试件编号	A组-68%浓度			B组-70%浓度			C组-72%浓度		
	前兆 t_i/s	峰值 t_j/s	响应系数 β_A	前兆 t_i/s	峰值 t_j/s	响应系数 β_B	前兆 t_i/s	峰值 t_j/s	响应系数 β_C
1	476.4	597.6	0.203	361.9	545.1	0.336	428.6	505.1	0.151
2	477.8	620.1	0.229	409.5	547.5	0.252	438.1	570.3	0.232
3	448.2	660.0	0.321	503.4	592.6	0.151	412.8	570.1	0.276
平均值 $\bar{\beta}$	467.5	625.9	0.251	424.9	561.7	0.246	426.5	548.4	0.220

5 结论

(1) 随着尾砂胶结充填体质量浓度的增大, 充填体试件峰值强度与弹性模量呈增大趋势, 峰值应变整体呈减小趋势。

(2) 不同浓度充填体试件在压密、弹性与屈服阶段的声发射累计振铃计数变化趋势基本一致。随着浓度增加, 产生的声发射振铃计数越多。

(3) 声发射累计撞击数与声发射累计能量的比值 r 值均先升高再持续减小到一个较低值, 随着外载荷的增加, 进入缓慢升高阶段, 峰值前均保持在该阶段。

(4) 充填体破裂前兆信息在声发射信号主频分布中呈现主频段增多的现象, 主要表现为由加载初期的1~2个主频段, 在临界主破裂时增多到3~5个主频段。并且随着试件质量浓度的增加, 声发射信号主频频段分布越宽, 声发射相对高频信号(160~180 kHz)的激增响应系数呈递减趋势。

上述特征为不同浓度的尾砂胶结充填体的破坏失稳监测预测提供了基础依据。

参 考 文 献

- [1] 王明旭. 胶结充填体与围岩复合体的力学特性[J]. 煤炭学报, 2019, 44(2): 445-453.
Wang Mingxu. Mechanics characteristics of cemented filling and surrounding rock[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(2): 445-453.
- [2] 曹帅, 宋卫东, 薛改利, 等. 考虑分层特性的尾砂胶结充填体强度折减试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2869-2876.
Cao Shuai, Song Weidong, Xue Gaili, et al. Tests of strength reduction of cemented tailings filling considering layering character[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(10): 2869-2876.
- [3] 赵康, 朱胜唐, 周科平, 等. 钽铌矿尾砂胶结充填体力学特性及损伤规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(2): 413-419.
Zhao Kang, Zhu Shengtang, Zhou Keping, et al. Research on mechanical properties and damage law of tantalum-niobium ore cemented tailings backfill[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(2): 413-419.
- [4] 李茂辉, 杨志强, 王有团, 等. 粉煤灰复合胶凝材料充填体强度与水化机理研究[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(4): 650-655, 695.
Li Maohui, Yang Zhiqiang, Wang Youtuan, et al. Experiment study of compressive strength and mechanical property of filling body for fly ash composite cementitious materials[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(4): 650-655, 695.
- [5] 陈育志, 陈师节. BFRP 筋混凝土粘结-滑移声发射特性研究[J]. 应用声学, 2019, 38(5): 824-829.
Chen Yuzhi, Chen Shijie. Experimental study on AE characteristics of bond-slip for the BFRP reinforced concrete[J]. Journal of Applied Acoustics, 2019, 38(5): 824-829.
- [6] 耿荣生, 景鹏. 基于声发射监测的综合无损检测技术与飞机疲劳试验定寿[J]. 应用声学, 2012, 31(1): 28-34.
Geng Rongsheng, Jing Peng. Acoustic emission based integrated NDT and full scale aircraft fatigue test[J]. Journal of Applied Acoustics, 2012, 31(1): 28-34.
- [7] 程爱平, 张玉山, 戴顺意, 等. 单轴压缩胶结充填体声发射参数时空演化规律及破裂预测[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 2965-2974.
Cheng Aiping, Zhang Yushan, Dai Shunyi, et al. Space-time evolution of acoustic emission parameters of cemented backfill and its fracture prediction under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(8): 2965-2974.
- [8] 龚凶, 李长洪, 赵奎. 加卸荷条件下胶结充填体声发射 b 值特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(5): 788-794.
Gong Cong, Li Changhong, Zhao Kui. Experimental study on b -value characteristics of acoustic emission of cemented filling body under loading and unloading test[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(5): 788-794.
- [9] 谢勇, 何文, 朱志成, 等. 单轴压缩下充填体声发射特性及损伤演化研究[J]. 应用力学学报, 2015, 32(4): 670-676, 710.
Xie Yong, He Wen, Zhu Zhicheng, et al. Study on backfill acoustic emission characteristic and damage evolution under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2015, 32(4): 670-676, 710.
- [10] 孙光华, 魏莎莎, 刘祥鑫. 基于声发射特征的充填体损伤演化研究[J]. 实验力学, 2017, 32(1): 137-144.
Sun Guanghua, Wei Shasha, Liu Xiangxin. On the damage evolution of fillings based on acoustic emission characteristics[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(1): 137-144.
- [11] 曾鹏, 纪洪广, 孙利辉, 等. 不同围压下岩石声发射不可逆性及其主破裂前特征信息试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(7): 1333-1340.
Zeng Peng, Ji Hongguang, Sun Lihui, et al. Experimental study of characteristics of irreversibility and fracture precursors of acoustic emission in rock under different confining pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(7): 1333-1340.
- [12] 张艳博, 梁鹏, 刘祥鑫, 等. 基于声发射信号主频和熵值的岩石破裂前兆试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1): 2959-2967.
Zhang Yanbo, Liang Peng, Liu Xiangxin, et al. Experimental study on precursor of rock burst based on acoustic emission signal dominant-frequency and entropy[J]. Chi-

- nese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 2959-2967.
- [13] 纪洪广, 侯昭飞, 张磊, 等. 混凝土材料声发射信号的频率特征及其与强度参量的相关性试验研究[J]. 应用声学, 2011, 30(2): 112-117.
Ji Hongguang, Hou Zhaofei, Zhang Lei, et al. Experimental studies on the frequency characteristics of acoustic emissions in concrete material and its dependences on strength parameters[J]. Journal of Applied Acoustics, 2011, 30(2): 112-117.
- [14] 纪洪广, 刘翔宇, 曾鹏, 等. 高强混凝土单轴压缩声发射频率特征试验研究[J]. 应用声学, 2016, 35(3): 248-254.
Ji Hongguang, Liu Xiangyu, Zeng Peng, et al. Experimental studies of frequency characteristics of the acoustic emission of the high-strength concrete under the uniaxial compression process[J]. Journal of Applied Acoustics, 2016, 35(3): 248-254.
- [15] 沈功田. 声发射检测技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [16] Zhao K, Zhu Z, Zeng P, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of phyllite specimens under uniaxial compression[J]. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2015, 8(3): 53-60.
- [17] 赵奎, 周永涛, 曾鹏, 等. 三点弯曲作用下不同粒径组成的类岩石材料声发射特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(11): 3107-3114.
Zhao Kui, Zhou Yongtao, Zeng Peng, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of rock-like materials with different particle sizes under three-point bending[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11): 3107-3114.
- [18] 贾雪娜. 应变岩爆实验的声发射本征频谱特征[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.
- [19] Cai M, Kaiser P K, Morioka H, et al. FLAC/PFC coupled numerical simulation of AE in large-scale underground excavations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(4): 550-564.
- [20] 张艳博, 梁鹏, 田宝柱, 等. 花岗岩灾变声发射信号多参量耦合分析及主破裂前兆特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(11): 2248-2258.
Zhang Yanbo, Liang Peng, Tian Baozhu, et al. Multi parameter coupling analysis of acoustic emission signals of granite disaster and the precursor characteristics of the main rupture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(11): 2248-2258.