

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.088



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 预制孔洞凝灰岩破坏声发射响应特性及预警

郑蕾<sup>1</sup>, 许晓静<sup>2,3</sup>, 许王亮<sup>1</sup>, 宋战平<sup>2,3</sup>, 张泽坤<sup>4</sup>

(1. 中铁北京工程局集团第一工程有限公司, 西安 714000; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055; 3. 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 西安 710055; 4. 长安大学 公路学院, 西安 710054)

**摘要:**岩石的裂隙孔洞等缺陷极易引发其局部破坏,对施工安全与运营维护产生不利影响。利用岩石力学测试系统对不同岩桥长度的双圆孔洞凝灰岩进行单轴压缩试验,配合声发射(acoustic emission, 简称 AE)监测系统对试验全过程进行声发射监测,进行岩石变形破坏过程的声发射特征研究。基于声发射能量、振铃计数、上升时间与幅值的比值(RA)/振铃计数与持续时间的比值(AF)、*b* 值等特征参数,分析不同岩桥长度对岩石破坏的影响,并对其损伤演化特征的前兆信息进行探索。结果表明:声发射参数随时间呈阶段性变化,岩石失稳破坏前有明显异常响应特征;随着岩桥长度的增加,AE 能量由群震型向孤震型转变,AE 振铃计数经历了平静期、活跃期和突增区,AE RA/AF 值对局部细小裂纹扩展较敏感,AE *b* 值随时间经历了上升期、波动期及下降期,总体呈减小趋势;声发射各参数均存在岩石破坏前兆,将 AE 累计能量、AE 累计振铃计数、AE 累计 RA/AF 值的突增点和 AE *b* 值的最低点作为“临界破坏前兆点”*D*,预警时效序列为:AE 累计 RA/AF 值>AE 累计振铃计数>AE 累计能量>AE *b* 值。

**关键词:**岩石力学;预制孔洞;声发射响应;破裂特征;预警前兆

中图分类号:TU452 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2025)05-0135-10

## Acoustic emission response characteristics and early warning of prefabricated hole tuff failure

ZHENG Lei<sup>1</sup>, XU Xiaojing<sup>2,3</sup>, XU Wangliang<sup>1</sup>, SONG Zhanping<sup>2,3</sup>, ZHANG Zekun<sup>4</sup>

(1. China Railway Beijing Engineering Bureau Group First Engineering Co., Ltd., Xi'an 714000, P. R. China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China;

3. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an 710055, P. R. China;

4. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710054, P. R. China)

**Abstract:** Defects such as cracks and holes in rocks can easily lead to local damage, which has adverse effects on construction safety and maintenance. The rock mechanics testing system was used to carry out uniaxial compression tests on tuff with double-hole holes of different rock bridge lengths. The acoustic emission (AE)

收稿日期:2023-04-10

基金项目:国家自然科学基金(52178393);陕西省创新能力支撑计划-创新团队(2020TD-005)

作者简介:郑蕾(1978-),女,高级工程师,主要从事隧道、桥梁、路基工程施工研究,E-mail:344561808@qq.com。

许晓静(通信作者),女,博士生,E-mail:xuxiaojing\_789@163.com。

Received: 2023-04-10

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 52178393); Shaanxi Province Innovation Ability Support Plan-Innovation Team (No. 2020TD-005)

**Author brief:** ZHENG Lei (1978-), senior engineer, main research interests: construction technology for tunnels, bridges and roadbed engineering, E-mail: 344561808@qq.com.

XU Xiaojing (corresponding author), PhD candidate, E-mail: xuxiaojing\_789@163.com.

monitoring system was used to monitor the whole process. The AE characteristics of rock deformation and failure process were studied. Based on AE energy, ring count, RA / AF value,  $b$  value and other characteristic parameters, the influence of different rock bridge lengths on rock failure was analyzed, and the precursor information of damage evolution characteristics was explored. The results show that the AE parameters change periodically with time, and there are obvious abnormal response characteristics before rock failure. AE energy changes from group earthquake type to solitary earthquake type with the increase of rock bridge length. AE ringing count has experienced quiet period, active period and sudden increase area. AE RA/AF value is sensitive to local small crack propagation. AE  $b$  value has experienced rising period, fluctuation period and falling period with time, and the overall trend is decreasing. Each parameter of AE has the precursor of rock failure. The AE cumulative energy, AE cumulative ring count, AE cumulative RA/AF value sudden increase point and the lowest point of AE  $b$  value are taken as the “critical failure precursor point”  $D$ . The early warning time series follows: AE cumulative RA/AF value > AE cumulative ring count > AE cumulative energy > AE  $b$  value.

**Keywords:** rock mechanics; prefabricated holes; acoustic emission response; rupture characteristics; early warning precursors

岩体作为一种天然地质体,经历漫长的沉积、变形和破坏等构造运动作用后,形成了特定的岩石结构和构造<sup>[1]</sup>。岩体内部普遍存在大量节理、裂隙和软弱夹层等缺陷,形成了岩体的不连续性、不均匀性和多孔隙特征<sup>[2-3]</sup>。岩体裂隙的随机性分布会改变岩石的力学性能,此种缺陷并非简单的线性叠加,而是组成了复杂的非线性耦合场,致使岩体变形过程异常复杂,从而表现出非线性分布的力学性能劣化现象<sup>[4-5]</sup>。众多学者通过人工预制条形裂隙或圆形小孔的方式,利用岩石模型试验、理论分析、数值模拟等方法对预制裂隙岩体的裂隙分布、裂纹生长规律、力学特性及破坏机理进行研究<sup>[6-11]</sup>。张黎明等<sup>[12]</sup>分析了大理岩变形破坏过程各阶段声发射参数及  $b$  值的变化特征,探索不同围岩下岩石破坏前兆信息。刘希灵等<sup>[13]</sup>通过对动静加载条件下花岗岩声发射  $b$  值特征的分析表明,  $b$  值可作为冲击荷载下岩石破碎程度的评价指标。基于声发射参数 RA 和 AF 值,甘一雄等<sup>[14]</sup>研究了其描述岩石破坏剧烈程度的可行性与优势。通过不同高温处理砂岩破坏过程中声发射参数 RA 及 AF 值的变化,葛振龙等<sup>[15]</sup>研究了高温后砂岩内部不同裂纹的发展演化规律。Tian 等<sup>[16]</sup>对含有双 V 形倾角的预制缺陷岩石进行了单轴压缩试验,研究不同倾角对试样力学参数和断裂过程的影响,并归纳裂纹失效模型。王苏生等<sup>[17]</sup>基于传统的相场断裂模型,通过拉、拉剪和压剪应变能密度分解,提出一种新的相场模型,进而模拟了裂隙岩石裂纹起裂及后续扩展的动态演化过程。Lei 等<sup>[18]</sup>利用和三维数字图像相关的声发射技术对不同几何形状缺陷性砂岩的全场应变的渐进开裂过程进行了定量监测,确定了 5 种裂纹类型和 6

种裂纹聚结模式。Liu 等<sup>[19]</sup>对含有椭圆孔和裂缝的砂岩试样进行了单轴压缩试验,认为韧带角度是影响预制缺陷砂岩试件强度和变形的重要因素,并分析了岩桥的最终破坏模式。李正一等<sup>[20]</sup>通过开展真三轴加载试验,研究了不同孔径、孔洞变化对砂岩试件强度、变形和破坏模式的影响规律。在岩石破裂前兆研究方面,胡英等<sup>[21]</sup>基于声发射时频特征研究了岩石破裂前兆识别,将时频由多峰高幅转向单峰低幅时刻作为破裂前兆信息。针对冲击矿压的有效监测预警难题,窦林名等<sup>[22]</sup>利用实验室声发射和采场微震监测手段,提出了一种基于微震前兆指标体系的冲击矿压综合预警模型。基于花岗岩变形破裂全过程中的声发射时频域信号信息,王创业等<sup>[23]</sup>结合频谱分析理论,分析了岩石变化特征和破裂信息前兆信息。

实际工程中,岩块尺度上的裂隙缺陷更为复杂,岩体孔洞分布的随机性、形态的多样性及空间组合的复杂性使得工程岩体失稳风险升高<sup>[24]</sup>。虽然学者们对岩石破裂前的声发射信号前兆特征进行了大量的试验研究<sup>[25]</sup>,但对于缺陷性岩石破坏的前兆信息研究相对较少。因此,为探究缺陷性凝灰岩破裂的声发射响应规律及前兆信息,笔者基于选取的标准岩样为试验材料进行单轴压缩试验,分析双孔洞缺陷凝灰岩的声发射参数特征和预警前兆,以期为隧道工程围岩体开挖过程中的围岩稳定分析提供参考。

## 1 试验概述

### 1.1 试验设备

单轴压缩试验设备为西安力创仪器设备有限

公司研发的微机控制电液伺服岩石力学试验机,最大加载能力为600 kN,扰动频率为0~3 Hz,加载方式为应力控制式。声发射监测设备为SAEU2S-1061-4型声发射检测系统,采集门槛值为40 dB,采样间隔为400  $\mu$ s。试验设备如图1所示。



图1 试验设备

Fig. 1 Test equipment

## 1.2 凝灰岩岩样

试验岩样为凝灰岩,岩样呈深灰色、致密坚硬,属典型的硬质沉积岩。为探究凝灰岩力学及声发射响应特征,在隧道现场切割围岩体,密封保存后运回实验室;按照国际岩石力学学会标准试验规范,利用水刀切割机加工成50 mm×50 mm×100 mm的立方体岩块,端面不平行度和不垂直度均小于0.02 mm,以降低应力集中现象。XRD衍射试验表明,凝灰岩矿物成分主要包括石英(51%)、绿泥石(12%)、伊利石(11%)、斜长石(9%)和方解石(8%)等,如图2(a)所示。

为研究预制孔洞间距对凝灰岩破坏特征的影响规律,试验考虑了岩桥长度L为0、2、4、6、8 cm的5种工况。预制孔洞设置如图2(b)所示,孔洞岩样的岩桥位于45°对角线上,孔径为6 mm,岩桥长度L为双圆孔孔心间距, $L_1$ 为孔心至加载端面距离, $L_2$ 为孔心至岩样侧边距离;孔洞预制采用人工钻孔形式,得到的不同岩桥长度试样如图2(c)所示。

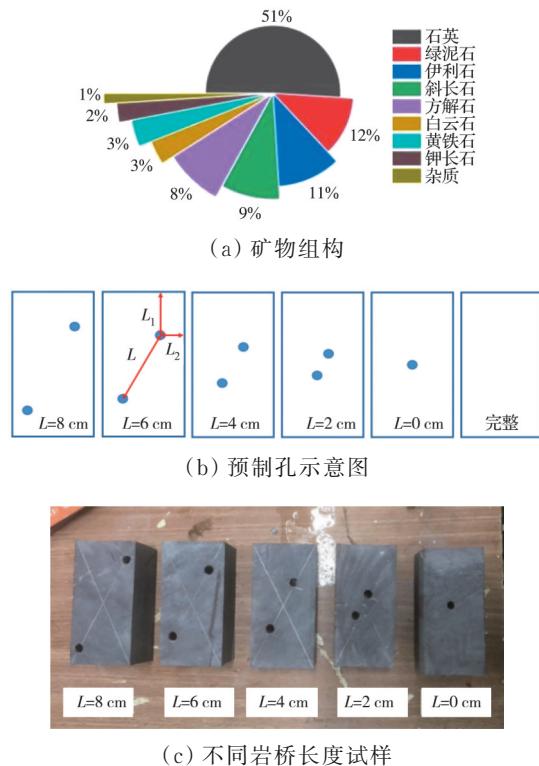


图2 试验岩样

Fig. 2 Test rock samples

## 1.3 试验方案

按照试验方案加工13个立方体岩样,对岩样尺寸、质量、密度等物理参数进行测定。根据纵波波速测试结果,剔除差异性较大的岩样,以减小试验误差。选取符合试验要求的预制孔洞凝灰岩,物理参数见表1。为测试岩样破裂过程中的声发射信号,使用凡士林为耦合剂,将声发射探头固定于岩样中间部位。为使试样与试验机压头紧密接触,实际预加载应力为0.20 kN;考虑凝灰岩的脆性特征,加载速率设置为0.30 kN/s,直至岩样破坏。

表1 凝灰岩物理参数

Tab.1 Physical parameters of tuff

编号	尺寸	质量/g	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	波速/(km/s)	分组
00-1	49 mm×48 mm×100 mm	688.40	2.92	3.78	
00-2	49 mm×46 mm×101 mm	672.10	3.09	3.96	完整
00-3	50 mm×49 mm×97 mm	673.40	2.83	3.75	
0-1	49 mm×46 mm×100 mm	683.80	3.03	3.92	$L=0$ cm
0-2	47 mm×48 mm×100 mm	671.80	2.95	3.81	
2-1	49 mm×48 mm×98.5 mm	679.30	2.93	2.74	$L=2$ cm
2-2	48 mm×48 mm×99 mm	690.30	3.02	3.95	
4-1	48 mm×48 mm×100 mm	707.10	3.03	3.94	$L=4$ cm
4-2	49 mm×48 mm×100 mm	700.50	2.89	3.74	
6-1	49 mm×49 mm×101 mm	710.40	2.93	3.83	$L=6$ cm
6-2	48 mm×48 mm×99 mm	676.60	2.97	3.92	
8-1	49 mm×48 mm×100 mm	700.50	2.98	3.98	$L=8$ cm
8-2	49 mm×47.5 mm×102 mm	688.40	2.90	3.88	

## 2 试验结果与分析

### 2.1 应力-应变曲线特征

图 3 为完整试样及不同岩桥长度缺陷岩样的应力-应变曲线, 对比发现, 岩桥长度对凝灰岩力学特性及应力-应变曲线存在不同程度、阶段性的影响。各试样应力-应变曲线大致分为 4 个阶段: 压密、弹性变形、塑性变形及破坏阶段。

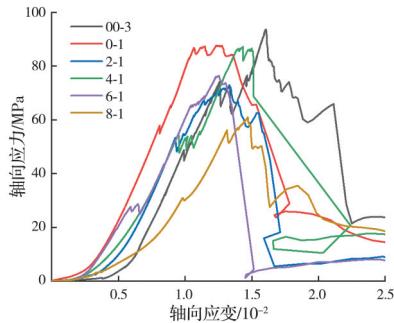


图 3 不同岩桥长度缺陷岩样的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of defective rock samples with different rock bridge lengths

**压密阶段:** 加载初期, 内部赋存垂直于加载方向的天然裂隙不断被压缩密实, 曲线呈明显上凹形态。具有孔洞的试样与完整试样不同在于, 初始压缩阶段应变较大; 随着岩桥长度的增加, 压密阶段应变具有阶段性增大特征。**弹性变形阶段:** 经过压密阶段后, 内部裂隙基本被压缩密实, 岩样呈线弹性变形, 应力-应变曲线近似呈线性上升。**压密阶段和弹性变形阶段**, 与加载方向平行的裂隙处于稳定状态。

状态。

随着应力的不断增大, 岩样平行裂隙开始扩展、贯通, 弹性变形后期出现不同程度的局部应力下降并伴有清脆爆裂声, 预示着内部裂纹的贯通汇集。塑性变形阶段: 较高应力条件下, 岩样内部存在的大量裂隙、孔隙扩展发育、交汇活动频繁, 由微观破裂汇集成宏观破裂, 表现为应力-应变曲线的波动上升。由于  $L=2$  cm 岩样中夹岩柱, 承载能力较弱, 塑性变形阶段岩样在孔洞周边形成应力集中, 裂纹扩展, 直至上下端面贯通, 导致塑性波动较其他岩样明显。随着岩桥长度的增加( $4\sim 8$  cm), 塑性变形阶段应力波动减弱。分析认为, 随着岩桥长度的增加, 在较高应力增量影响下, 岩样裂纹起裂于孔洞周边, 沿双孔岩桥薄弱区域贯通, 导致孔洞变形、坍塌甚至破裂。破坏阶段: 孔洞缺陷导致岩样承载结构迅速变形, 破裂块体错动滑移, 形成新的结构, 表现为峰后曲线波动明显, 随加载应力增大, 直至完全丧失承载能力。岩样破坏瞬间, 完整试样及不同岩桥长度岩样均发出清脆爆裂声并伴有碎块弹射, 表现出典型的脆性破坏特征, 破坏后鼓胀变形明显、变形程度增大。

### 2.2 岩样声发射响应特性

为分析岩样破坏过程中声发射特征, 图 4~图 7 分别给出了具有代表性的完整岩样及不同岩桥长度条件下的 AE 能量、AE 振铃计数、AE RA/AF、AE  $b$  值与应力及时间的对应关系。

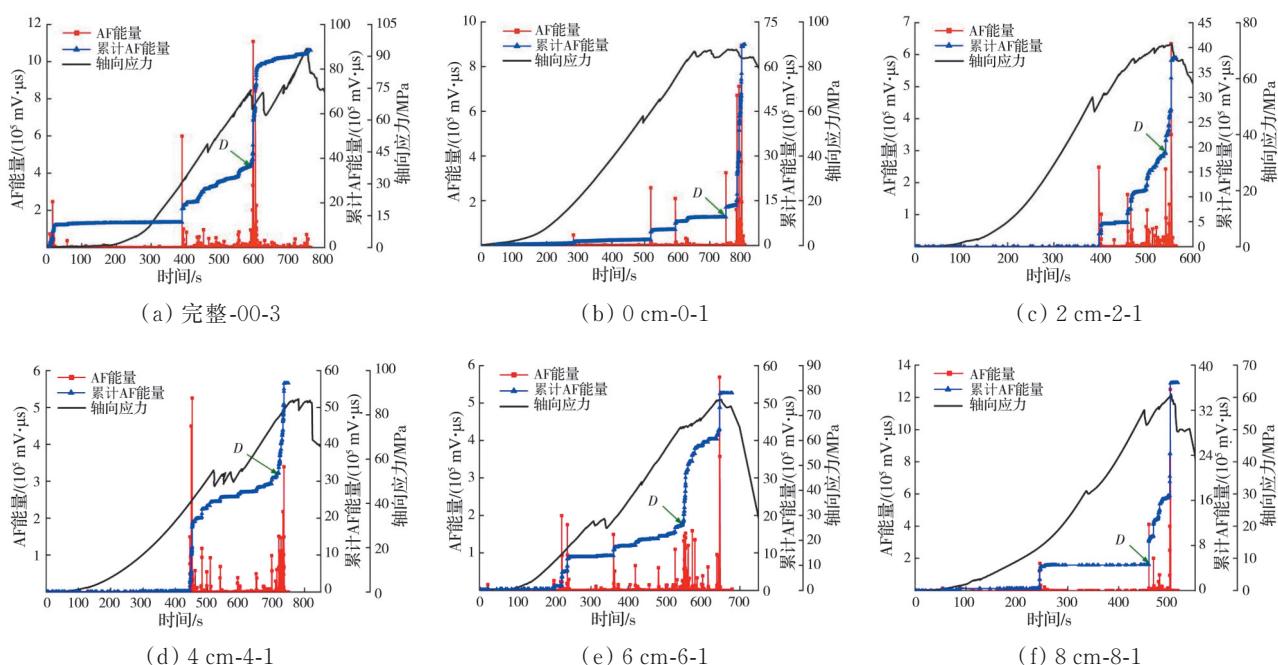


图 4 应力-AE 能量-时间关系

Fig. 4 Stress-AE energy-time relationship

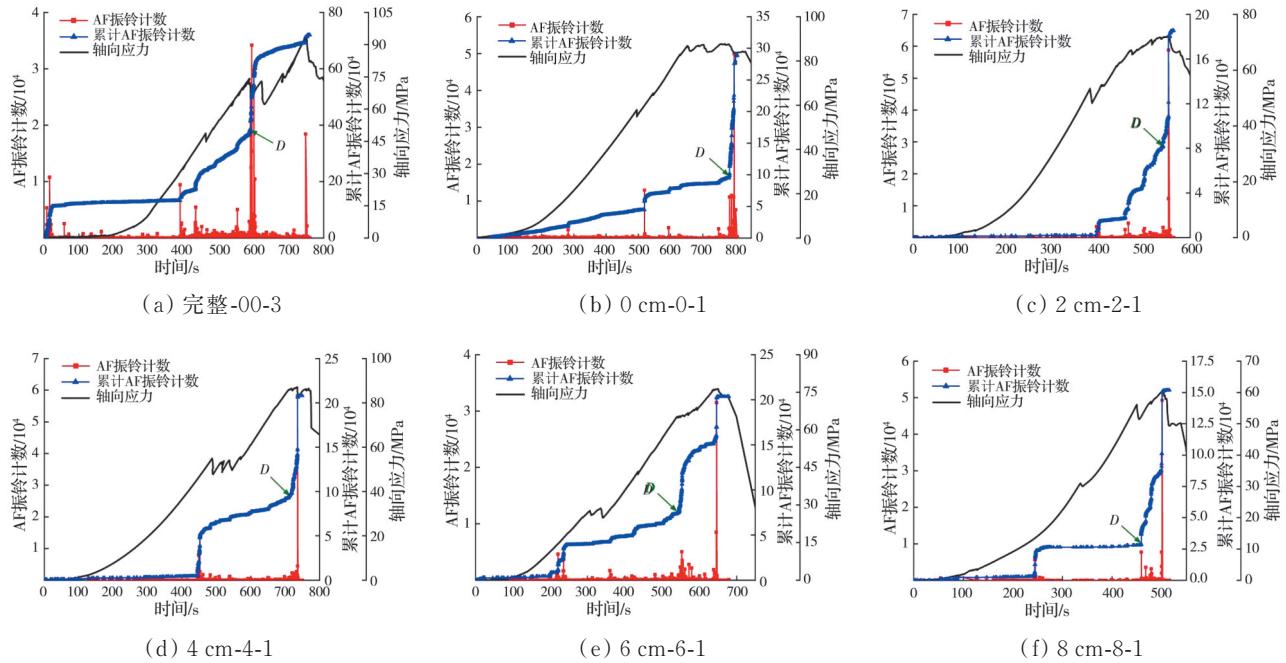


图5 应力-AE振铃计数-时间关系  
Fig. 5 Stress-AE ring count-time relationship

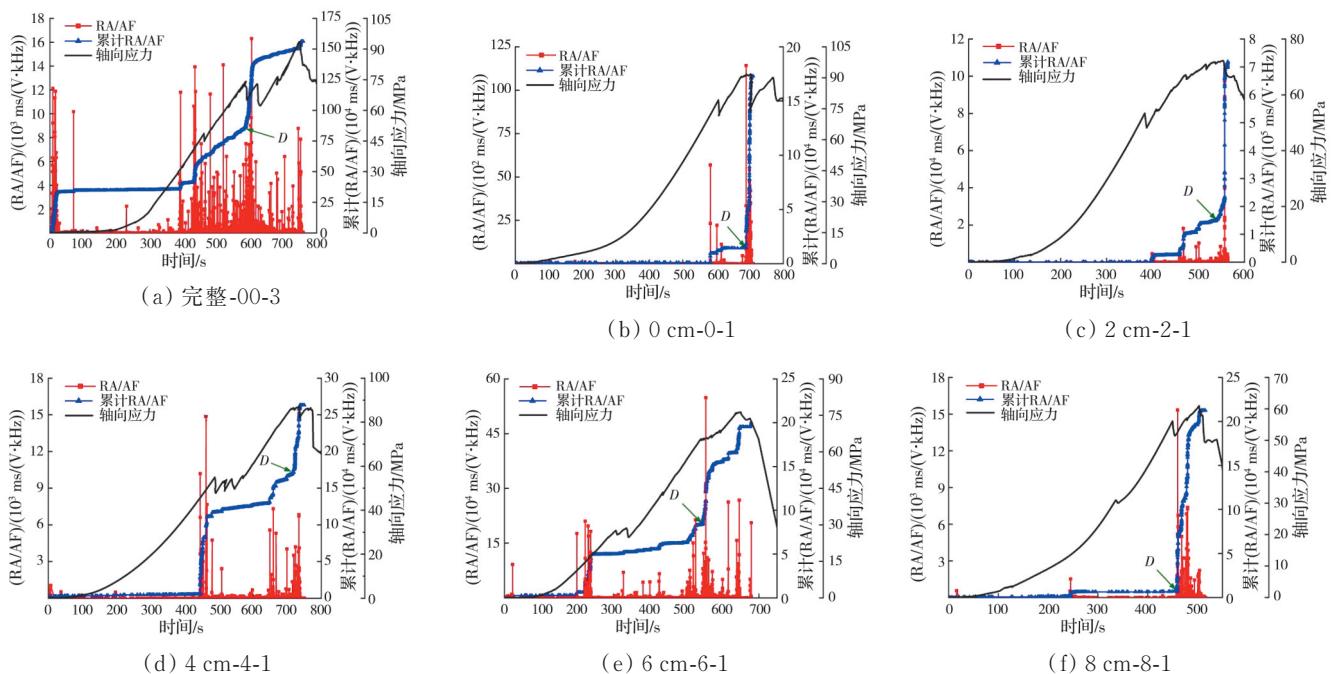
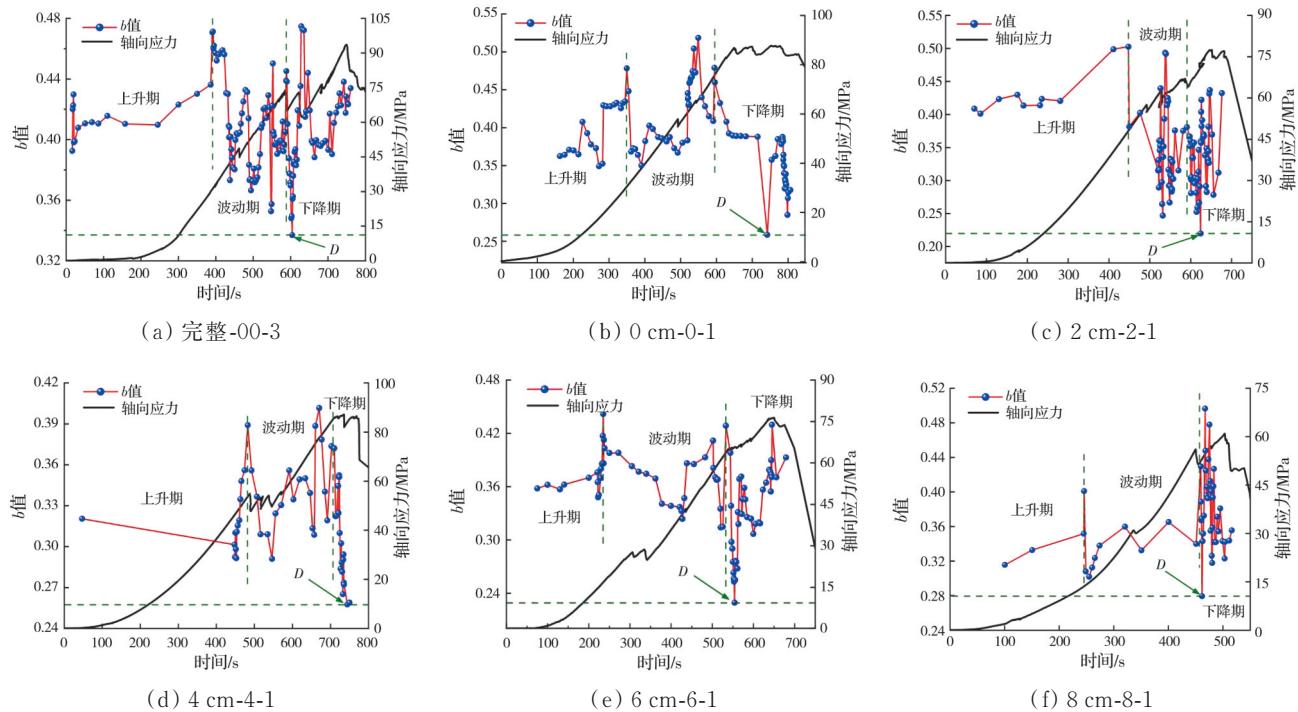


图6 应力-AE(累计)RA/AF-时间分布特征  
Fig. 6 Stress-AE (commulation) RA/AF-time distribution characteristics

### 2.2.1 AE能量

图4为试样应力-AE(累计)能量-时间分布特征,可以看出,AE能量和累计AE能量反映了声发射特征参数间较强的关联性。借助地震波能量分析方法,AE能量释放特征存在主震型、群震型和孤震型。在加载初期,除完整试样外,不同岩桥长度试样AE能量均很小,经历一定阶段的平静期后,累计AE能量开始缓慢上升,平静期时间随岩桥长度

的增加不断减小,由0 cm的520 s减小至8 cm的245 s,说明岩桥长度的增加导致试样大尺度裂纹扩展提前,也预示着试样较快进入裂纹扩展活跃期;随着应力的持续增大,当试样因大尺度裂纹扩展出现应力波动时,前期累积的应变能随试样开裂而释放,此时AE能量出现突增点。随后试样进入声发射活跃期,频繁的裂纹扩展使AE能量表现为群震型,在试样达到峰值强度时,AE能量最大。说明宏

图 7 应力-AE  $b$  值-时间分布特征Fig.7 Stress-AE  $b$ -value-time distribution characteristics

观主裂纹形成过程中释放大量能量,并伴随较大爆裂声,具有典型的脆性破坏特征。同时,完整试样 AE 能量分布表现为群震型,而随着岩桥长度的增加,不同岩桥试样 AE 能量由群震型向孤震型转变,这与试样表面宏观裂纹数目呈减少趋势有关,较少的大尺度裂纹扩展导致高峰值 AE 能量释放次数减少,因而呈孤震型。

## 2.2.2 AE 振铃计数

图 5 为不同类型岩样的 AE(累计)振铃计数与应力-时间的变化曲线。由图 5 可知,完整试样在加载初期声发射较活跃,AE 振铃计数值较大,累计 AE 振铃计数值出现突增现象。随着加载应力的增大,在压密阶段和弹性变形阶段初期,试样累计 AE 振铃计数几乎呈直线增长,说明该阶段试样内部主要以初始微裂纹的压密和新裂纹的萌生为主。随着岩桥长度的增加,累计 AE 振铃计数平台期持续时间不断减少,由 2、4 cm 的 400~440 s 减小到 6、8 cm 的 200~240 s,预示着较大尺度裂纹的扩展贯通相对提前;随着试样内部裂纹的萌生、扩展和贯通,试样损伤不断累积,累计振铃计数不断增大,当临近试样破坏失稳时,振铃计数值均在  $3 \times 10^4$  次以上,累计振铃计数曲线斜率均出现突增点,几乎呈斜直线增长趋势,预示着试样内部剧烈的裂纹扩展活动,最终累计 AE 振铃计数达到最大。其中完整试样最大,大于  $7.0 \times 10^5$  次,而不同岩桥长度试样的最终累计 AE 振铃计数相对较小,介于  $1.5 \times 10^5$ ~

$3.0 \times 10^5$  之间。

## 2.2.3 AE RA/AF 值演化规律

引起声发射事件的裂纹扩展源包括张拉裂纹、剪切裂纹、拉-剪复合裂纹。传统意义上,一般通过 RA 值和 AF 值的相对大小关系来定性反映裂纹的类型。当 RA 值较大,AF 值较小时,试样破坏主要以剪切裂纹为主,当 AF 值较大,RA 值较小时,试样破坏主要以拉伸裂纹为主。

图 6 所示为试样应力-AE(累计)RA/AF 值-时间分布特征,RA/AF 值及累计 RA/AF 值的分布、变化特征与 AE 能量、振铃计数具有相似性,也具有差异性,体现了声发射各参数间较强的关联性。相似性主要表现在:在加载初期,完整试样 RA/AF 值较大,而不同岩桥长度试样声发射活动较弱,出现了一定时期的平静期;因裂纹扩展、贯通出现应力波动时,不同试样 RA/AF 幅值突然增大,预示着试样进入剧烈破坏阶段。其中,完整试样从弹性阶段中期开始进入剧烈破坏阶段,RA/AF 整体幅值和分布密度升高,而不同岩桥长度试样从塑性阶段中期进入破坏阶段,此时累计 RA/AF 值出现突增点,且优先于峰值强度出现,表现出一定的预警前兆信息。差异性主要表现在:不同试样的 RA/AF 值分布密度和幅值较 AE 能量和 AE 振铃计数大,其典型特征具有相似性,但在局部 AE 振铃计数和能量幅值及密度较小时,RA/AF 的幅值和密度较大,说明该特征参数对试样局部破裂特征具有较高敏感性,

可以将AE振铃计数和能量不能充分体现的破坏特征放大,提高了声发射特征参数的响应表现。如4 cm-4-1试样,在400~500 s的应力波动阶段,AE振铃计数和能量分布的幅值和密度较小,而此时RA/AF的分布幅值和密度却较大,且具有一定的预警时效性。因此,利用RA/AF特征参数可很好地弥补经典声发射参数的不足,提高其对岩石破裂响应的敏感性。

#### 2.2.4 AE *b*值演化特征

声发射*b*值是基于AE能量的分布函数,同时也是裂纹扩展尺度分布函数,可以反映声发射活动的强弱和破坏裂纹尺度的大小。AE *b*值增大代表试样破坏过程中小事件比例的增加,以小尺度微裂纹破坏为主;AE *b*值减小代表试样中大事件比例增加,大尺度宏观裂纹增多。同时,AE *b*值的变化剧烈程度也能反映试样裂纹扩展的演化状态。

图7所示为试样应力-AE *b*值-时间分布特征,观察可知,完整试样及不同岩桥长度试样声发射*b*值的时间序列变化特征大致可分为上升期、波动期及下降期,反映了试样加载破坏过程中裂纹萌生、扩展直至贯通的过程。加载初期,不同类型试样声发射*b*值均表现出渐进上升趋势,表明在压密阶段及弹性变形初期试样内部以小尺度微裂纹压密、萌生为主,试样整体受力变形特征稳定。随着应力的增加,声发射*b*值进入波动期,表现为*b*值上下波动,表明在较大应力作用下弹性变形阶段后期及塑性变形初期试样内部大小尺度裂纹扩展频繁,并且开始呈减小趋势。随应力继续增加,声发射*b*值开始呈突降特征,表明该过程中试样内部大量微破裂聚集贯通,形成大尺度宏观破裂面。在试样达到峰值抗压强度之前,较大宏观主控裂纹导致声发射*b*值降到最低,从时间序列可知,声发射*b*值的最低值优先于应力峰值出现,具有一定的预警信息。不同试样声发射*b*值最低点分别对应峰值强度的80.05%、98.44%、95.82%、99.92%、84.86%和91.73%,平均值为91.80%。

### 3 声发射预警前兆信息分析

#### 3.1 声发射特征参数预警响应机制

在监测整体性、抗辐射干扰性、特征点形态显著性及预警信息稳定性上,声发射具有一定优势。临近破坏前,试样声发射参数存在明显异常响应特征,较好地反映了不同预制缺陷试样的破裂演化特征。声发射参数的突变预示着岩石的失稳破坏,因此,可将声发射参数的突变点作为“临界破坏前兆点”,表示为“D”点,见图4~图7。

AE累计能量具有较好的时间演化特征,在临近试样失稳破坏时,其累计曲线斜率突增,呈垂直上升趋势;在试样形成宏观主破裂面时,AE累计振铃计数突然增大,几乎呈垂直增长;以RA/AF值在岩石失稳破坏前剧烈变化的程度来进行工程现场围岩地质体的监测预警;AE *b*值在大幅度范围内突然跃迁式变化时,反映了试样裂纹扩展活动活跃、裂纹尺度变化剧烈,预示着突发式的失稳破坏,当大尺度主控裂纹贯通形成时,AE *b*值急速减小。因此,可将AE累计能量、AE累计振铃计数、AE累计RA/AF值突增点作为“临界破坏前兆点”*D*,将声发射*b*值的最低点作为“临界破坏前兆点”*D*。

#### 3.2 声发射预警前兆信息

观察不同缺陷试样声发射特征参数的前兆点可知,声发射特征参数均在岩石失稳破坏前产生较大幅度突变,其中AE累计振铃计数、AE累计能量、AE累计RA/AF值表现为斜率突增,AE *b*值表现为大幅降低至最低点。表2所示为声发射各参数临界点破坏信息,其中主要包括*D*点距离岩样失稳破坏的时间*t<sub>b</sub>*及应力水平 $\gamma = \sigma_a / \sigma_b$ , $\sigma_a / \sigma_b$ 表示临界破坏前兆点对应的应力与峰值应力的百分比值。

表2 声发射临界破坏前兆点信息

Table 2 Acoustic emission critical damage precursor information

试样 编号	AE 累计能量		AE 累计振铃 计数		AE 累计 RA/ AF 值		AE <i>b</i> 值	
	<i>t<sub>b</sub></i> /s	$\gamma$ /%						
00-1	92	88.08	88	88.58	92	88.08	78	89.83
00-2	36	95.53	36	95.53	36	95.53	22	97.36
00-3	166	78.86	161	79.14	169	76.17	145	80.05
0-1	10	98.87	14	62.63	15	98.37	14	98.44
0-2	13	98.42	17	97.9	20	86.92	9	98.57
2-1	13	97.97	14	97.8	16	97.44	7	98.94
2-2	134	79.16	134	79.16	136	78.84	27	95.82
4-1	25	96.74	22	97.12	24	96.88	0	99.92
4-2	26	96.55	20	97.41	164	76.62	83	88.36
6-1	104	84.45	106	81.49	106	81.49	96	84.86
6-2	80	87.29	80	87.29	80	87.29	77	87.74
8-1	48	90.78	45	91.37	48	90.78	43	91.73
8-2	3	99.28	3	99.28	5	98.75	3	99.28
平均值	57	91.69	57	88.82	70	88.70	46	93.15

不同声发射特征参数的预警时效具有相似性,表明各声发射参数具有较强的关联性,预警时间均大于496 s,应力水平均低于93.15%。其中,AE累计RA/AF值的临界破坏前兆点*D*距离岩石失稳破坏的平均时间最长(70 s),对应平均应力水平最低(88.70%),说明AE累计RA/AF值的预警时效性

最好。原因在于:与 AE 振铃计数和能量相比,AE RA/AF 对裂纹扩展更加敏感,可将局部细小声发射信号放大,因此更能反映岩石内部裂纹扩展演化特征,累计 RA/AF 值积累了大量声学损伤信息,进而导致其预警时效性较好。AE 累计振铃计数和 AE 累计能量距离岩石失稳破坏的平均时间一样(57 s),但 AE 累计振铃计数的平均应力水平较 AE 累计能量低,说明 AE 累计振铃计数预警准确性相对较高。AE  $b$  值距离岩石失稳破坏的平均时间较短(46 s)、应力水平较高(93.15%),预警时效性较低。

综上所述,通过临界破坏前兆点 D 距离岩石失稳的时间及应力水平对比发现,不同特征参数的预警时效序列为:AE 累计 RA/AF 值>AE 累计振铃计数>AE 累计能量>AE  $b$  值。以上预警信息的时效性不是绝对的,受现场实际的围岩状况、监测条件等影响,需对其预警优先级适时进行评价和调整。

## 4 结论

对预制孔洞缺陷凝灰岩在受力破坏过程中的多个声发射参数变化特征进行试验研究,得到如下主要结论:

1) 随着岩石的加载破坏,不同声发射特征参数均表现出阶段性的响应特征。随着岩桥长度的增大,AE 能量由群震型向孤震型转变;AE 振铃计数经历了平静期、活跃期和突增区,与应力-应变曲线的变化特征一致;AE RA/AF 值对细小裂纹扩展较敏感,可将岩石破裂失稳的细节信息放大,具有较好的预警时效性;AE  $b$  值随加载时间均可分为上升期、波动期及下降期,在大尺度裂纹扩展贯通时发生突降,总体呈减小趋势。

2) 在监测整体性、抗辐射干扰性、特征点形态显著性及预警信息稳定性上,声发射具有一定的优势。将 AE 累计能量、AE 累计振铃计数、AE 累计 RA/AF 值突增点和 AE  $b$  值的最低点作为“临界破坏前兆点”D,以期能够有效提高硬质沉积岩隧道失稳破坏前兆信息的有效性和准确性。

3) 不同特征参数的预警时间均大于 46 s,应力水平均低于 93.15%,其预警时效序列为:AE 累计 RA/AF 值>AE 累计振铃计数>AE 累计能量>AE  $b$  值。

由于现场会受到隧道开挖扰动、热量流动、噪声污染等因素的影响,导致在受荷破坏时的响应特征不稳定。因此,基于室内试验的监测体系在实际

应用时应结合具体地质条件、应力条件,综合调整和选择适合的监测预警方式,其预警的准确性和时效性仍需大量工程实践来验证与优化。

**致谢:**本文研究工作受四川乐西高速公路有限责任公司资助,在此表示衷心感谢!

## 参考文献

- [1] YANG S Q, NI H M, WEN S. Spatial acoustic emission evolution of red sandstone during multi-stage triaxial deformation [J]. Journal of Central South University, 2014, 21(8): 3316-3326.
- [2] WONG L N Y, EINSTEIN H H. Systematic evaluation of cracking behavior in specimens containing single flaws under uniaxial compression [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(2): 239-249.
- [3] 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]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(7): 925-939.
- [4] WADLEY H N G, SCRUBY C B, SPEAKE J H. Acoustic emission for physical examination of metals [J]. International Metals Reviews, 1980, 25(1): 41-64.
- [5] 宋战平,程昀,杨腾添,等.渗透压作用对灰岩孔隙结构演化规律影响的试验研究[J].岩土力学,2019,40(12):4607-4619,4643.  
SONG Z P, CHENG Y, YANG T T, et al. Experimental study of the influence of osmotic pressure on pore structure evolution in limestone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(12): 4607-4619, 4643. (in Chinese)
- [6] ZHANG X P, ZHANG Q, WU S C. Acoustic emission characteristics of the rock-like material containing a single flaw under different compressive loading rates [J]. Computers and Geotechnics, 2017, 83: 83-97.
- [7] CHENG Y, SONG Z P, YANG T T, et al. Investigating the aging damage evolution characteristics of layered hard sandstone using digital image correlation [J]. Construction and Building Materials, 2022, 353: 128838.
- [8] 宋战平,程昀,杨腾添,等.渗透-应力耦合作用下灰岩压缩破坏及声发射特性分析[J].煤炭学报,2019,44(9):2751-2759.  
SONG Z P, CHENG Y, YANG T T, et al. Analysis of compression failure and acoustic emission characteristics of limestone under permeability-stress coupling [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(9): 2751-2759. (in Chinese)
- [9] ZHOU X P, BI J, QIAN Q H. Numerical simulation of

- crack growth and coalescence in rock-like materials containing multiple pre-existing flaws [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(3): 1097-1114.
- [10] CHENG Y, SONG Z P, SONG W X, et al. Strain performance and fracture response characteristics of hard rock under cyclic loading [J]. *Geomechanics and Engineering*, 2021, 26(6): 551-563.
- [11] 张泽坤, 宋战平, 程昀, 等. 加载速率影响下类硬岩声发射及破裂响应特征[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(2): 115-124.
- ZHANG Z K, SONG Z P, CHENG Y, et al. Acoustic emission characteristics and fracture response behavior of hard rock-like material under influence of loading rate [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(2): 115-124. (in Chinese)
- [12] 张黎明, 马绍琼, 任明远, 等. 不同围压下岩石破坏过程的声发射频率及 $b$ 值特征[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(10): 2057-2063.
- ZHANG L M, MA S Q, REN M Y, et al. Acoustic emission frequency and  $b$  value characteristics in rock failure process under various confining pressures [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(10): 2057-2063. (in Chinese)
- [13] 刘希灵, 潘梦成, 李夕兵, 等. 动静加载条件下花岗岩声发射 $b$ 值特征的研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(增刊1): 3148-3155.
- LIU X L, PAN M C, LI X B, et al. Acoustic emission  $b$ -value characteristics of granite under dynamic loading and static loading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(Sup 1): 3148-3155. (in Chinese)
- [14] 甘一雄, 吴顺川, 任义, 等. 基于声发射上升时间/振幅与平均频率值的花岗岩劈裂破坏评价指标研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(7): 2324-2332.
- GAN Y X, WU S C, REN Y, et al. Evaluation indexes of granite splitting failure based on RA and AF of AE parameters [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(7): 2324-2332. (in Chinese)
- [15] 葛振龙, 孙强, 王苗苗, 等. 基于RA/AF的高温后砂岩破裂特征识别研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(2): 176-183.
- GE Z L, SUN Q, WANG M M, et al. Fracture feature recognition of sandstone after high temperature based on RA/AF [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(2): 176-183. (in Chinese)
- [16] TIAN J J, XU D J, LIU T H. An experimental investigation of the fracturing behaviour of rock-like materials containing two V-shaped parallelogram flaws [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2020, 30(6): 777-783.
- [17] 王苏生, 杨圣奇, 田文岭, 等. 预制裂隙岩石裂纹扩展相场模拟方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(2): 365-377.
- WANG S S, YANG S Q, TIAN W L, et al. Study on phase field simulation method of crack propagation in prefabricated fractured rock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(2): 365-377. (in Chinese)
- [18] LEI R D, ZHANG Z Y, GE Z L, et al. Deformation localization and cracking processes of sandstone containing two flaws of different geometric arrangements [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2020, 43(9): 1959-1977.
- [19] LIU X R, YANG S Q, HUANG Y H, et al. Experimental study on the strength and fracture mechanism of sandstone containing elliptical holes and fissures under uniaxial compression [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, 205: 205-217.
- [20] 李正一, 吴斐, 姜德义, 等. 含孔洞型缺陷砂岩真三轴力学特性研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2022, 18(1): 120-128.
- LI Z Y, WU F, JIANG D Y, et al. Study on true triaxial mechanical characteristics with hole defects of sandstone [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2022, 18(1): 120-128. (in Chinese)
- [21] 胡英, 肖瑶, 刘汉香, 等. 基于声发射时频特征的岩石破裂前兆识别方法[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(34): 15259-15268.
- HU Y, XIAO Y, LIU H X, et al. Identification method of rock fracture precursors based on acoustic emission time-frequency characteristics [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(34): 15259-15268. (in Chinese)
- [22] 窦林名, 冯龙飞, 蔡武, 等. 煤岩灾变破坏过程的声震前兆识别与综合预警模型研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2020, 37(5): 960-968, 976.
- DOU L M, FENG L F, CAI W, et al. Seismo-acoustic precursor identification and comprehensive warning model for the catastrophic failure process of coal and rock [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(5): 960-968, 976. (in Chinese)
- [23] 王创业, 常新科, 刘沂琳. 花岗岩破裂全过程声发射时频域信号特征及前兆识别信息[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(3): 82-89.
- WANG C Y, CHANG X K, LIU Y L. Time and frequency domain characteristics and damage precursor identification information of acoustic emission signals

- during granite loading [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(3): 82-89. (in Chinese)
- [24] LIU J P, LI Y H, XU S D, et al. Moment tensor analysis of acoustic emission for cracking mechanisms in rock with a pre-cut circular hole under uniaxial compression [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2015, 135: 206-218.
- [25] 杨正仓, 纪刘一舒, 郭卫, 等. 岩巷岩体失稳破坏的红外和声发射联合监测预警技术研究[J]. 金属矿山, 2021(11): 33-40.
- YANG Z C, JI L, GUO W, et al. Study on the joint monitoring and early warning technology of instability and failure in roadway rock mass based on infrared and acoustic emission [J]. Metal Mine, 2021(11): 33-40. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)