

小浪底细砂岩单轴压缩声发射特征研究

张钟毓¹, 席伟², 于怀昌¹, 牛睿¹, 程广利¹

(1. 华北水利水电大学 地球科学与工程学院, 河南 郑州 450011;

2. 廊坊市中铁物探勘察有限公司 工勘部, 河北 廊坊 065000)

摘要: 采用岩石伺服试验机 and 声发射仪, 对小浪底三叠系细砂岩进行单轴压缩声发射试验。基于试验结果, 将试样变形过程划分为压密、弹性、塑性和破坏四个阶段, 分析了不同阶段试样声发射幅值、峰值频率、振铃计数和能量的变化特征, 在此基础上对比分析了试样声发射 b 值以及累计振铃计数的演化规律, 得出了岩石的破坏时间前兆特征。研究结果表明: 压密和弹性阶段试样声发射幅值、振铃计数和能量处于较低水平、峰值频率频带数量依次增多; 塑性阶段试样幅值增大、振铃计数与能量上升且整体处于较高水平、峰值频率数值增大且呈现多频带化, 临近破坏阶段试样产生大量 100 dB 的高幅值信号, 振铃计数与能量持续急增, 峰值频率降低, 频带减少; 声发射 b 值的变化规律可以间接反映岩体内部微裂隙萌生、扩展的演化特征。

关键词: 细砂岩; 单轴压缩; 变形破坏阶段; 声发射参数

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2021)02—0071—06

Uniaxial Compression Acoustic Emission Characteristics of Fine Sandstone at Xiaolangdi

ZHANG Zhongyu¹, XI Wei², YU Huaichang¹, NIU Rui¹, CHENG Guangli¹

(1. School of Earth Science and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, He'nan 450011, China;

2. Langfang Zhongtie Geophysical Prospecting Co., Ltd., Engineering Survey Department, Langfang, Hebei 065000, China)

Abstract: Uniaxial compression acoustic emission test of Triassic fine sandstone at Xiaolangdi was carried out by using rock servo testing machine and acoustic emission instrument. Based on test results from the samples, the deformation process is divided into pressure, elasticity, plasticity and damage four phases. The different stages of acoustic emission peak amplitude, frequency, sample ringing counts and energy characteristics was analyzed based on the analysis of the acoustic emission sample b value and the cumulative ringing count the evolution law of the damage time precursory characteristics of the rock are proposed. The results are as follows. Acoustic emission amplitude, ringing count and energy are at a low level, and the number of peak frequency bands increases successively at the compaction and elastic stage. In the plastic stage, the sample amplitude increases, the ringing count and energy rise and the whole is at a high level, the peak frequency value increases and presents multi-frequency band. Near the failure stage, the sample generates a large number of 100 dB high-amplitude signals, the ringing count and energy continue to increase sharply, the peak frequency decreases and the frequency band decreases. The variation law of AE b value can indirectly reflect the evolution characteristics of the initiation and expansion of micro-fractures in rock mass.

Keywords: fine sandstone; uniaxial compression; deformation and failure stage; acoustic emission parameters

声发射是指岩石在受力变形过程中,其内部储存的能量以弹性波的形式向外释放的一种现象^[1-2]。声发射技术是一种无损的监测方法,可以对岩石变形破坏过程进行预测,因此得到了广泛的运用。

国内外学者对于单轴压缩下岩石声发射特性已经取得了大量的研究成果。赵奎等^[3]采用高低频声发射通道对不同含水率红砂岩进行单轴压缩声发射实验,分析了含水率不同对声发射特性的影响。张茹等^[4]对花岗岩进行单轴多级加载声发射试验主要对 AE 事件数进行了分析。董志凯等^[5]对大理岩进行了单轴压缩试验,分析了岩石破裂过程中时空演化特征。丁鑫等^[6]对煤岩进行单轴压缩试验,分析了破裂过程中声发射频域特征。李浩然等^[7]对盐岩进行单轴加载以及循环荷载试验,对其变形破坏过程中声发射特性进行了研究。索彧等^[8]开展了页岩单轴压缩破坏过程中声发射特性,分析了声发射事件数,能率与应力和时间的关系。李元辉等^[9]对岩石破裂过程中的声发射 b 值随不同应力水平的变化趋势进行了研究。刘希灵等^[10]研究了单轴压缩与劈裂荷载下灰岩声发射 b 值特征,探讨了加载方式对 b 值特性的影响。赵建军等^[11]对不同应力路径下英安岩声发射 b 值特征及破坏前兆进行了研究,探讨了不同应力路径下 b 值的差异性。龚鹓等^[12]研究了胶结充填体在加-卸载过程中声发射 b 值特征。然而,已有的成果对岩石不同变形阶段声发射特征的对比研究还较少,还有待于进一步深入开展此方面的工作。

鉴于此,本文对小浪底三叠系细砂岩进行单轴压缩声发射试验研究,分析了不同阶段试样声发射幅值、峰值频率、振铃计数和能量的变化特征,在此基础上对比分析了声发射 b 值以及累计振铃计数的演化特征,得出了岩石的破坏时间前兆特征,从而为岩石的变形破坏判别提供科学依据。

1 岩石单轴压缩声发射试验

1.1 试验设备

试验加载系统采用 TAWA - 2000 微机控制岩石伺服试验机,声发射系统采用美国物理声学公司 PCI - II 声发射试验仪。声发射仪前置放大器增益设定为 40 dB,门槛值 45 dB,模拟滤波器 1 KHz ~ 1 MHz,采样率 100 万次/秒,试验中探头布设方式如图 1 所示。试验过程中,保持应力加载和声发射信号采集同步进行。

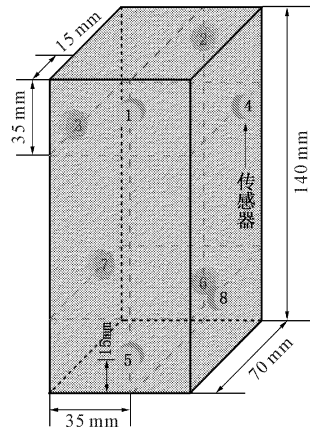


图 1 试样声发射探头布设

1.2 试样制备

试验所用岩石取自小浪底库区三叠系细砂岩,将采集到的岩块运抵实验室后,采用数控机床对岩块进行加工,制成长、宽、高分别为 70 mm × 70 mm × 140 mm 的长方体岩石试样。试样密度 2.64 g/cm³。制备 4 个试样进行常规单轴压缩试验,可得试样单轴抗压强度平均值为 173.5 MPa,试样切线模量为 37.50 GPa。采用力控加载方式进行常规单轴压缩试验,应力加载速率为 200 N/s。试样见图 2。

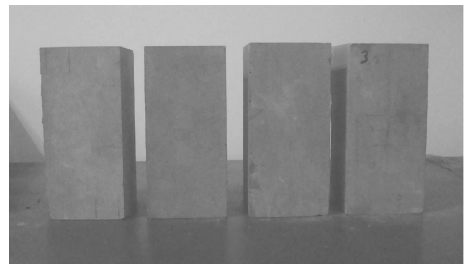


图 2 细砂岩试样

2 岩石应力 - 应变曲线特征分析

细砂岩试样的单轴压缩应力 - 应变曲线见图 3。

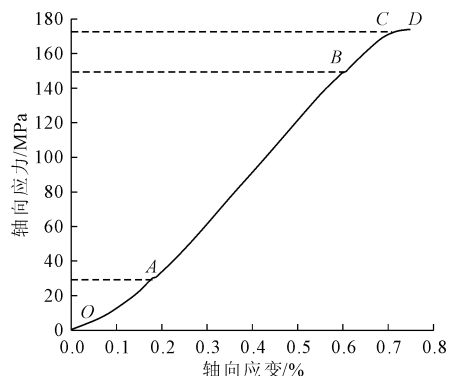


图 3 试样应力 - 应变曲线

从图 3 中可以看出,试样的变形破坏过程可分为以下 4 个阶段:

(1) 压密阶段(*OA* 段)。应力加载初期,试样内部微孔隙、裂隙压密闭合,随着应力的持续增加,试样变形逐渐增大,应力-应变曲线向上弯曲呈上凹状,曲线斜率也逐渐增大。

(2) 弹性阶段(*AB* 段)。随着应力的持续增加,试样应变增大,曲线斜率近似恒定,应力-应变曲线呈线性关系,表明这一阶段试样内部微裂隙稳定扩展。

(3) 塑性阶段(*BC* 段)。当应力超过 *B* 点应力值,应力-应变曲线开始向下弯曲呈下凹状,曲线斜率逐渐降低,表明试样内微裂隙不稳定扩展。*B* 点即为试样从弹性转变为塑性的转折点,即屈服点。

(4) 临界破坏阶段(*CD* 段)。随应力的增加,当应力超过 *C* 点应力值,应力-应变曲线的切线斜率几乎为零,表明试样内部微裂隙即将相互贯通,形成宏观裂纹,在 *D* 处试样产生宏观断裂面,发生脆性破坏。

3 声发射参数变化特征

3.1 幅值特征

单轴压缩下试样声发射幅值-应变-时间关系,如图 4 所示。

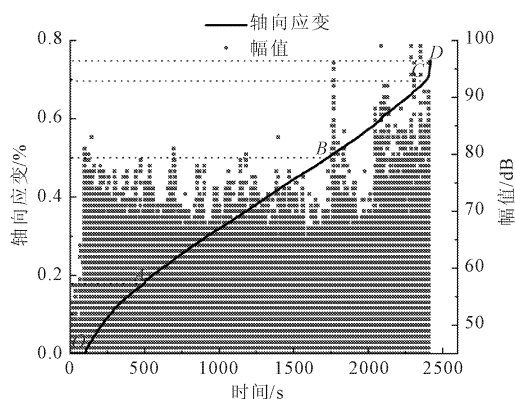


图 4 试样声发射幅值-应变-时间关系

依据图 4,分析不同阶段试样声发射幅值的变化特征。

(1) 压密阶段(*OA* 段)。试样加载初期,内部微裂纹活动较少,声发射幅值低且数量少,主要分布于 45 dB ~ 55 dB。随着荷载的增加,试样内部微裂纹压密闭合,应变增大,幅值增大且数量增多,主要分布于 45 dB ~ 70 dB,少量分布于 80 dB。

(2) 弹性阶段(*AB* 段)。试样内部裂纹稳定扩

展,幅值主要分布于 45 dB ~ 70 dB。随着荷载的增加,试样内部萌生较大尺度的微破裂,幅值突然上升至 95 dB,随着裂纹的稳定扩展,幅值逐渐下降至 70 dB 左右。

(3) 塑性阶段(*BC* 段)。试样内部裂纹不稳定扩展,幅值迅速上升,产生大量 70 dB 以上信号,少量幅值可达 100 dB;表明试样内部产生较多微破裂。

(4) 破坏阶段(*CD* 段)。试样临近破坏,幅值保持较高水平,产生大量 100 dB 幅值信号,随后幅值小范围下降,表明试样内部裂纹相互贯通形成破裂面,产生破坏失稳。

从以上分析可以看出,压密和弹性阶段试样声发射幅值相对较低^[13],塑性阶段试样幅值增大,破坏阶段试样产生大量 100 dB 的高幅值信号,预示着岩石即将发生失稳破坏。

3.2 峰值频率

单轴压缩下试样声发射峰值频率-应变-时间关系,如图 5 所示。

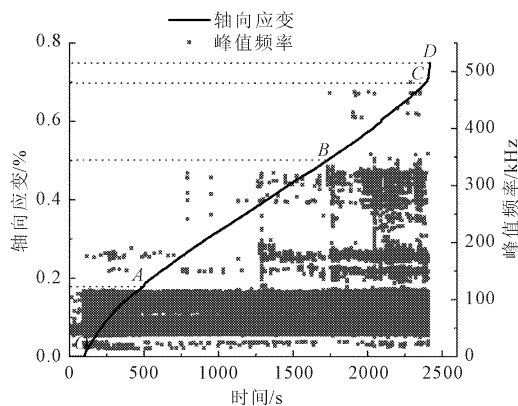


图 5 试样峰值频率-应变-时间关系

依据图 5,分析不同阶段试样声发射峰值频率的变化特征。

(1) 压密阶段(*OA* 段)。试样在荷载初期(0 ~ 200 s),峰值频率主要集中在 40 kHz ~ 60 kHz;随着荷载的增加试样内部内部微裂隙压密闭合,峰值频率主要集中在 20 kHz ~ 30 kHz、40 kHz ~ 60 kHz、70 kHz ~ 110 kHz、140 kHz ~ 200 kHz 频段。

(2) 弹性阶段(*AB* 段)。试样在弹性阶段初期,峰值频率主要集中在 20 kHz ~ 30 kHz、40 kHz ~ 60 kHz、70 kHz ~ 110 kHz;且有少量信号分布于 140 kHz ~ 325 kHz;随着荷载的增加,试样进入在弹性阶段后期,分布于 140 kHz ~ 325 kHz 的峰值频率呈现多频带化,分别为 140 kHz ~ 200 kHz、260 kHz ~ 325

kHz。即弹性阶段峰值频率主要集中在 20 kHz ~ 30 kHz、40 kHz ~ 60 kHz、70 kHz ~ 110 kHz、140 kHz ~ 200 kHz、260 kHz ~ 325 kHz 频段。

(3) 塑性阶段(BC 段)。试样进入塑性阶段,内部裂纹非稳定扩展,声发射高频信号骤增,处于 140 kHz ~ 200 kHz 峰值频率呈现多频带化,分别为 140 kHz ~ 150 kHz、170 kHz ~ 200 kHz;且产生新的频带 420 kHz ~ 500 kHz。则试样在塑性阶段峰值频率主要集中在 20 kHz ~ 30 kHz、40 kHz ~ 110 kHz、140 kHz ~ 150 kHz、170 kHz ~ 200 kHz、260 kHz ~ 325 kHz、420 kHz ~ 500 kHz 频段。

(4) 破坏阶段(CD 段)。试样进入破坏阶段,声发射峰值频率降低,频带减少,峰值频率主要集中在 30 kHz ~ 120 kHz、140 kHz ~ 190 kHz、250 kHz ~ 340 kHz,如图 6 所示,表明试样内部微裂纹即将贯通形成宏观破裂面,产生失稳破坏。

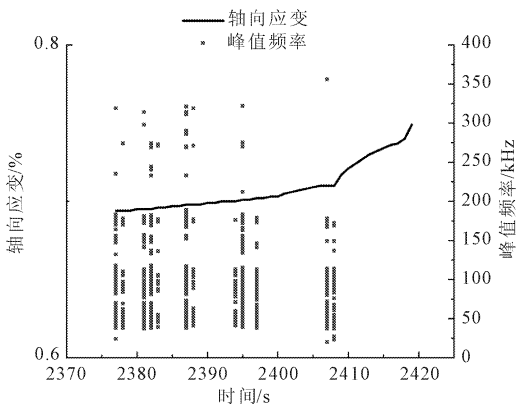


图 6 试样破坏阶段峰值频率 - 应变 - 时间关系

从以上分析可以看出,单轴压缩下试样压密阶段、弹性阶段和塑性阶段峰值频率频带数量依次增多,分别为 4、5、6 个;随试样变形的增加,峰值频率数值增大且呈现多频带化^[14],破坏阶段,试样峰值频率降低,频带减少,表明试样即将发生失稳破坏。

3.3 振铃计数与能量

单轴压缩下试样声发射振铃计数 - 应变 - 时间关系如图 7 所示,试样声发射能量 - 应变 - 时间关系如图 8 所示。

依据图 7 与图 8,分析不同阶段试样声发射振铃计数和能量的变化特征。

(1) 压密阶段(OA 段)。试样刚开始受载,振铃计数与能量数值较低,振铃计数主要分布于 0 ~ 100 次,能量主要分布于 0 ~ 500 mV · us。随着荷载的增加,试样内部微裂隙开始压密闭合,振铃计数与能量信号增多,数值增大,振铃计数达 0 ~ 1 000 次,

能量达 0 ~ 1 000 mV · us。

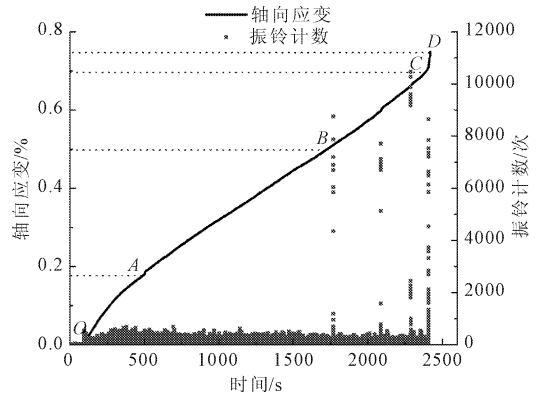


图 7 试样声发射振铃计数 - 应变 - 时间关系

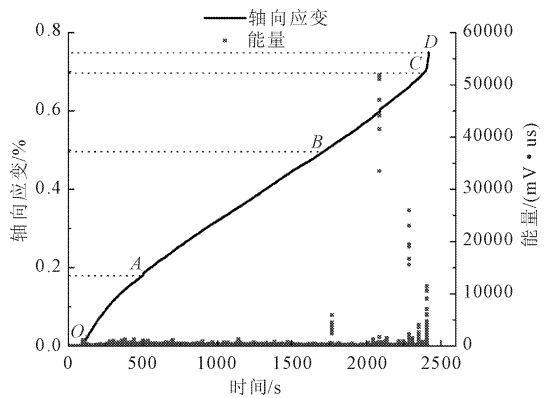


图 8 试样声发射能量 - 应变 - 时间关系

(2) 弹性阶段(AB 段)。试样内部裂纹稳定扩展,振铃计数与能量数值相对稳定,振铃计数主要分布于 0 ~ 1 000 次,能量主要分布于 0 ~ 1 000 mV · us。随着荷载的增加,试样内部微破裂活动尺度增大且产生新裂纹,振铃计数和能量数值剧增,振铃计数可达 9 000 次,能量可达 6 000 mV · us。随着裂纹的再次稳定扩展,振铃计数下降到 0 ~ 1 000 次,能量下降到 0 ~ 1 000 mV · us。

(3) 塑性阶段(BC 段)。试样内部裂纹不稳定扩展,振铃计数和能量数值增高。振铃计数主要分布于 0 ~ 10 000 次,能量主要分布于 0 ~ 50 000 mV · us,表明试样内部产生较多微破裂。

(4) 破坏阶段(CD 段)。试样进入破坏阶段,振铃计数与能量持续急增,表明试样内部发生剧烈变化,大尺度裂纹相互贯通形成破裂面;且试样失稳破坏前,振铃计数与能量数值持续增大。

从以上分析可以看出,压密和弹性阶段,试样声发射振铃计数和能量处于较低水平;进入塑性阶段后试样振铃计数与能量上升,整体处于较高水平,临近破坏阶段试样振铃计数与能量持续急增,预示试

样即将失稳破坏。

4 岩石声发射 b 值演化特征研究

1954 年古登堡和里克特提出的震级 - 频度关系(简称 G-R 关系)^[15], 表达为:

$$\lg N = a - bM \quad (1)$$

式中: M 为地震震级; N 为震级不小于 M 的累积地震数; a 为地震活动常数; b 为地震学中的 b 值。

在声发射 b 值计算中, 一般将声发射的幅值(A)除以 20 得到等价的地震震级, 即:

$$M_L = A/20 \quad (2)$$

式中: M_L 为声发射震级; A 为声发射震幅, 单位为 dB。

式(1)中 N 所代表的含义即为大于等于 M_L 声发射发生事件的累积频次。采用最小二乘法对 b 值进行计算, 样本容量设为 1 000 进行计算。为避免震级上限对 b 值计算误差影响, 将各组样本震级上限剔除, 即 N 取大于 M_L 声发射事件的累积频次^[16], 然后计算得出压密、弹性、塑性和破坏各阶段试样声发射 b 值随时间的变化曲线, 如图 9 所示。为对比分析, 图 9 中也显示了不同变形破坏阶段试样声发射累计振铃计数曲线。

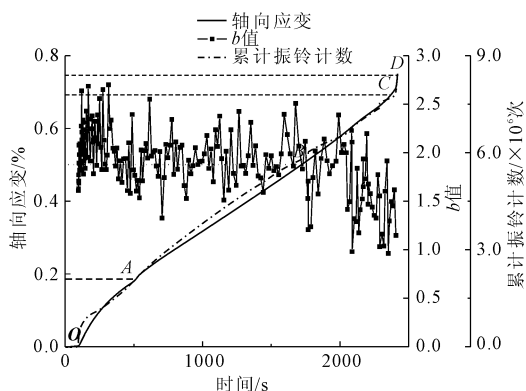


图 9 试样声发射 b 值 - 累计振铃计数 - 应变曲线

依据图 9, 分析压密、弹性、塑性和破坏各阶段试样声发射 b 值、累计振铃计数的变化特征。

(1) 压密阶段(OA 段)。在压密阶段初期, 试样声发射 b 值密集出现, 累计振铃计数曲线增长速率较大, 表明试样内部孔隙、裂隙被快速压密、闭合, 产生较多声发射信号。随应力的持续增加, 在该阶段后期, 声发射 b 值整体呈下降趋势, 累计振铃计数曲线增速放缓, 表明试样内部微孔隙、裂隙闭合趋于稳定, 即将进入弹性阶段。

(2) 弹性阶段(AB 段)。试样声发射 b 值在一定范围内呈波动变化, 变化范围整体趋于稳定, 与压

密阶段相比, b 值点数量变稀疏。累计振铃计数曲线以稳定速率增长。表明该阶段试样内部微孔隙、裂隙在应力作用下稳定扩展。

(3) 塑性阶段(BC 段)。试样声发射 b 值整体呈明显的下降趋势, 累计振铃计数曲线发生阶梯状增大, 表明试样内部微裂隙快速扩展, 并发生相互贯通, 与压密、弹性阶段相比, 塑性阶段试样内部微破裂以大尺度破坏为主。

(4) 破坏阶段(CD 段)。随应力的持续施加, 声发射 b 值呈急剧下降至最小值, 然后略微上升的变化趋势。累计振铃计数曲线发生突然上升跃迁, 然后停止增加, 表明试样内部微裂隙急剧汇集、相互贯通, 形成宏观破裂面, 从而导致试样突然失稳破坏。

综合试样压密、弹性、塑性和破坏各阶段声发射 b 值以及微裂隙变化特征, 可以看出声发射 b 值的变化规律可以间接反映岩体内部微裂隙萌生、扩展的演化特征。 b 值逐步增大, 表明试样内部微破裂以小尺度破坏为主; b 值逐渐减小, 表明试样内部微破裂以大尺度破坏为主。同时, 各阶段声发射 b 值的变化趋势不同, 试样压缩破坏全过程声发射 b 值呈上升-下降-平稳-下降-上升的变化趋势。

如第 3 节所述, 与压密、弹性、塑性阶段相比, 破坏阶段试样的声发射幅值、峰值频率、振铃计数和能量虽然发生显著变化, 可以预示岩石即将发生失稳破坏, 然而却不能得出岩石失稳破坏的具体时间前兆点。而依据试样破坏前声发射 b 值的急剧降低以及累计振铃计数的突然上升跃迁, 可以得出具体的岩石失稳破坏的时间前兆点。声发射 b 值、累积振铃计数以及应变对应的时间前兆点分别如表 1 所示。

表 1 声发射 b 值、累计振铃计数以及应变预示破坏时间前兆点

应变时间前兆点 /s	b 值时间前兆点/s	b 值较应变提前时间/s	累计振铃计数时间前兆点/s	累计振铃计数较应变提前时间/s
2570	2351	219	2407	163

从表 1 中可以看出, 声发射 b 值与累计振铃计数预示的试样破坏前兆时间均早于应变预示的前兆时间, 而声发射 b 值预示的试样破坏前兆时间较累计振铃计数提前了 56 s。因此, 声发射 b 值能够比累计振铃计数提前预示岩石的失稳破坏。

5 结 论

(1) 压密和弹性阶段试样声发射幅值相对较低、振铃计数和能量处于较低水平、峰值频率频带数

量依次增多;塑性阶段试样幅值增大、振铃计数与能量上升,整体处于较高水平,峰值频率数值增大且呈现多频带化;破坏阶段试样产生大量 100 dB 的高幅值信号、振铃计数与能量持续急增、峰值频率降低,频带减少,预示着岩石即将发生失稳破坏。

(2)声发射 b 值的变化规律可以间接反映岩体内部微裂隙萌生、扩展的演化特征。 b 值逐步增大,表明试样内部微破裂以小尺度破坏为主; b 值逐渐减小,表明试样内部微破裂以大尺度破坏为主。试验中声发射 b 值整体呈上升-下降-平稳-下降-上升的变化趋势。

(3)临近破坏阶段试样的声发射幅值、峰值频率、振铃计数与能量的变化特征与声发射 b 值的急剧降低以及累计振铃计数的突然上升跃迁,可以预示岩石即将发生失稳破坏,与前四者相比声发射 b 值与累计振铃计数能够得出岩石失稳破坏的具体时间前兆点,且声发射 b 值比累计振铃计数提前预示了岩石试样的失稳破坏。

参考文献:

- [1] 耿荣生,沈功田,刘时风. 声发射信号处理和分析技术[J]. 无损检测,2002,24(1):23-28.
- [2] 缪长青,梅明星,田洪金,等. 声发射技术在金属结构疲劳损伤中的应用研究进展[J]. 水利与建筑工程学报,2015,13(4):23-27.
- [3] 赵奎,滕天野,曾鹏,等. 单轴压缩下不同含水率红砂岩声发射特性试验研究[J]. 江西理工大学学报,2019,40(5):1-7.
- [4] 张茹,谢和平,刘建锋,等. 单轴多级加载岩石破坏声发射特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(12):2584-2588.
- [5] 董志凯,李浩然,欧阳作林,等. 单轴荷载下大理岩声

发射时空演化特征研究[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(S2):609-615.

- [6] 丁鑫,肖晓春,吕祥锋,等. 煤岩破裂过程声发射时-频信号特征与演化机制[J]. 煤炭学报,2019,44(10):2999-3011.
- [7] 李浩然,杨春和,刘玉刚,等. 单轴荷载作用下盐岩声波与声发射特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(10):2017-2116.
- [8] 索 颢,汪道兵,左乾坤,等. 单轴加载页岩破坏全过程的声发射特征[J]. 大庆石油地质与开发,2016,35(2):159-164.
- [9] 李元辉,刘建坡,赵兴东,等. 岩石破裂过程中的声发射 b 值及分形特征研究[J]. 岩土力学,2009,30(9):2559-2563.
- [10] 刘希灵,刘周,李夕兵,等. 单轴压缩与劈裂荷载下灰岩声发射 b 值特性研究[J]. 岩石力学,2019,40(S1):267-274.
- [11] 赵建军,樊奇,李鹏飞,等. 不同应力路径下英安岩声发射 b 值特征及破坏前兆[J]. 工程地质学报,2009,27(3):487-496.
- [12] 龚 鹵,李长洪,赵奎. 红砂岩短时蠕变声发射 b 值特征[J]. 煤炭学报,2015,40(S1):85-92.
- [13] 刘妙燕,陆俊,明攀,等. 静载和疲劳荷载作用下橡胶混凝土声发射特性研究[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(5):149-155.
- [14] 纪洪广,卢翔. 常规三轴压缩下花岗岩声发射特征及其主破裂前兆信息研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(4):694-702.
- [15] 曾正文,马瑾,刘力强,等. 岩石破裂扩展过程中的声发射 b 值动态特征及意义[J]. 地震地质,1995,17(1):7-11.
- [16] 董陇军,张凌云. 岩石破坏声发射 b 值的误差分析[J]. 长江科学院院报,2020,37(8):75-81.