

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.006



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 混凝土及其组成材料单轴破坏的声发射特征

王立柱, 赵云峰, 郭嘉豪, 张嘉乐

(长江大学 城市建设学院, 湖北 荆州 434023)

**摘要:**为探究混凝土及其组成材料损伤破坏的声发射特征之间的关系,开展了混凝土、水泥砂浆和石灰岩单轴压缩试验,并同步采集三者破坏过程中的声发射信号,统计分析三者力学特性与声发射能量谱、幅值与频率、峰值频率以及声发射 $b$ 值等参数。结果表明:在濒临破坏时,三者产生的声发射信号峰值频率与幅度均会上升;三者的频率分布近似呈正态分布,均在90~120 kHz区间占比最多;水泥砂浆与混凝土声发射动态 $b$ 值趋势平缓,维持在相对较高数值区间,石灰岩动态 $b$ 值呈先增后减趋势,在临近应力峰值时快速下降,预示着主破裂的来临;混凝土的整体 $b$ 值与峰值频率分布均介于石灰岩和水泥砂浆之间,水泥砂浆与石灰岩混合之后的声发射整体 $b$ 值与混凝土接近,体现了混凝土与其组成材料破坏声发射特征的叠加效应。

**关键词:**混凝土; 损伤破坏; 声发射; 峰值频率; 动态 $b$ 值; 叠加效应

中图分类号:TU528 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2025)02-0174-08

## Acoustic emission characteristics of concrete and its constituent materials under uniaxial failure

WANG Lizhu, ZHAO Yunfeng, GUO Jiahao, ZHANG Jiale

(School of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou 434023, Hubei, P. R. China)

**Abstract:** To investigate the relationship between concrete and its constituent materials in the acoustic emission characteristics of the damage, uniaxial compression tests of concrete, cement mortar and limestone were carried out, and the acoustic emission signals during the failure process of the three were collected simultaneously. The mechanical properties, acoustic emission energy spectrum, amplitude, frequency, peak frequency and acoustic emission  $b$ -value of the three materials were statistically analyzed. The results show that the peak frequency and amplitude of the acoustic emission signals from all three specimens increase at the time of imminent damage. The frequency distribution of all three shows a normal distribution, with the largest proportion in the 90-120 kHz range. The dynamic  $b$ -value trends for cement mortar and concrete do not fluctuate much and remain in a relatively high value range, the dynamic  $b$ -value of limestone shows a trend of increasing first and then decreasing, and decreases rapidly near the peak stress, indicating the coming of main fracture. The overall  $b$ -value and peak frequency distribution of concrete are between limestone and cement mortar, the overall  $b$ -value of cement mortar mixed with limestone is close to that of concrete, this reflects the superposition effect of

收稿日期:2022-11-01

基金项目:国家自然科学基金(52204201, 52178313)

作者简介:王立柱(1998-),男,主要从事结构损伤研究,E-mail: wanglizhu.st@yangtzeu.edu.cn。

赵云峰(通信作者),男,博士,E-mail: zhaoyf@yangtzeu.edu.cn。

Received: 2022-11-01

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 52204201, 52178313)

Author brief: WANG Lizhu (1998-), main research interest: structural damage, E-mail: wanglizhu.st@yangtzeu.edu.cn.

ZHAO Yunfeng (corresponding author), PhD, E-mail: zhaoyf@yangtzeu.edu.cn.

acoustic emission characteristics of the failure of concrete and its constituent materials.

**Keywords:** concrete; damage; acoustic emission; peak frequency; dynamic *b*-value; superimposed effect

随着无损检测技术的进步,具有高灵敏度的声发射技术(Acoustic Emission,简称AE)已广泛应用于材料损伤破坏的研究<sup>[1-3]</sup>,如岩石<sup>[4]</sup>、木材<sup>[5]</sup>、玻璃<sup>[6]</sup>、牙齿<sup>[7]</sup>、金属<sup>[8]</sup>、煤<sup>[9]</sup>等。混凝土作为重要的土木工程材料,被大量应用于道桥、房建等各类工程结构中。混凝土结构与人类的生产生活密切相关,其内部破坏过程亦较为复杂,研究混凝土内部损伤具有十分重要的意义,因此,其损伤破坏的声发射特征研究也得到广泛关注。目前,利用声发射技术对混凝土损伤破坏的研究主要集中于利用声发射参数变化分析混凝土各损伤阶段的特征。其中,杨康等<sup>[10]</sup>发现,高频率声发射信号所占比例的突增可以作为监控混凝土结构的重要参考指标,混凝土破坏过程中随时间变化的动态*b*值亦可反映混凝土内部裂纹的演化特征。邱继生等<sup>[11]</sup>发现,煤矸石混凝土声发射特性与其损伤发展情况有较强关联并据此建立了声发射与损伤的本构模型。曾志伟等<sup>[12]</sup>研究表明,振铃计数、持续时间、幅值等声发射特征参数均可以较好地表征混凝土损伤的演化规律。

而岩石作为混凝土常用粗骨料,其破坏的声发射特征也得到了大量研究<sup>[13-16]</sup>。其中,Jiang等<sup>[17]</sup>研究了单轴循环荷载下砂岩声发射绝对能量概率密度分布和声发射等待时间的演化规律。Niu等<sup>[18]</sup>对裂隙砂岩试样进行单轴压缩试验发现,当裂隙砂岩达到最终失效时,所有3种类型的*b*值都达到最小值。Chen等<sup>[19]</sup>进一步研究发现,砂岩声发射*b*值对裂纹扩展高度敏感。

与单一岩石材料不同,混凝土为典型的复合型材料,其损伤破坏与其组成材料即水泥砂浆、内部碎石的破坏以及界面错动密切相关。而目前关于混凝土及其组成材料损伤破坏的声发射特征之间的关系研究较少。混凝土破坏的声发射特征与其组成材料破坏的声发射特征是否存在叠加效应有待研究。本文开展混凝土与其组成材料即水泥砂浆、石灰岩的压缩破坏声发射监测试验,探究三者破坏的声发射特征,为进一步认识混凝土的物理破坏机制,研究混凝土的损伤破坏理论提供参考。

## 1 试验

### 1.1 试验材料

试验材料包括混凝土、水泥砂浆和石灰岩,其中混凝土与水泥砂浆强度类似,二者的配比如表1

所示。水泥采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥。将搅拌均匀的混凝土与水泥砂浆置于尺寸为150 mm×150 mm×300 mm模具中,成型后脱模,放置于标准养护室中养护28 d,温度与相对湿度分别控制在(20±2)℃、≥95%。将标准养护后的混凝土试块与水泥砂浆试块进行取芯、切割和打磨,制成50 mm×100 mm的圆柱体试样,保证试件端面的平行度偏差不大于0.1 mm,如图1(a)所示。混凝土中的碎石为取自山东济宁矿山的石灰岩,粒径为5~22.5 mm。石灰岩试样为50 mm×100 mm的圆柱体。依据蜡封法测得水泥砂浆、混凝土与石灰岩的密度分别为1.9、2.3、2.6 g/cm<sup>3</sup>。

表1 混凝土与水泥砂浆配比

Table 1 Mix proportion per cubic meter

| 材料   | 配比/(kg/m <sup>3</sup> ) |       |       |     |
|------|-------------------------|-------|-------|-----|
|      | 水泥                      | 砂     | 石子    | 水   |
| 混凝土  | 483                     | 527   | 1 174 | 198 |
| 水泥砂浆 | 264                     | 1 550 | 0     | 480 |

### 1.2 试验方法

采用HYAS-1000C型岩石三轴试验系统(图1(b))分别对混凝土、水泥砂浆和石灰岩试样进行单轴压缩试验。采用位移加载方式,加载速率为0.003 mm/s。试样表面布置4个声发射传感器,通过DS5型声发射监测系统(图1(c))采集试样压缩破坏过程中的声发射信号。声发射监测系统的前置增益为40 dB,采样频率为3 MHz。试验开始前,测得环境噪声约为40 dB,故声发射阈值为45 dB。根据声发射检测规程定时参数选择(推荐值),对于试验所用材料,声发射系统的峰值鉴别时间(PDT)、撞击鉴别时间(HDT)以及撞击闭锁时间(HLT)分别设置为35、150、300 μs。为保证传感器与圆柱形试样表面贴合紧密,将传感器置于特制构件内,接触面涂抹耦合剂(凡士林)。特制构件与试样表面的贴合采用胶水固定,布置方式如图1(d)。

材料的损伤破坏与其内部细观孔隙结构相关。通过扫描电镜(左:0~200 μm;右:0~50 μm)观测3种试样的细观结构,如图2所示。试样内部分布孔隙为典型的多孔材料。其中,水泥砂浆内部遍布孔隙,孔径小、数量多;混凝土内部孔隙表现为孔径大、数量相对较少;石灰岩内部较为密实,表面分布碎屑,未见明显孔隙。

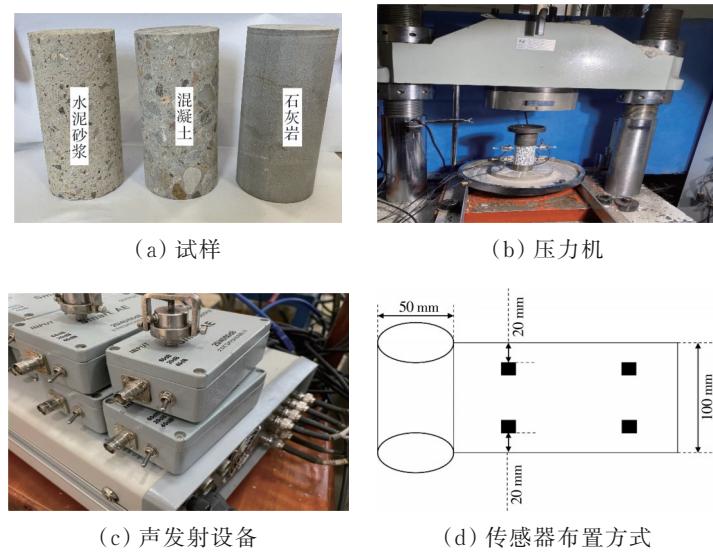


图 1 实验材料与设备

Fig.1 Experimental materials and equipment

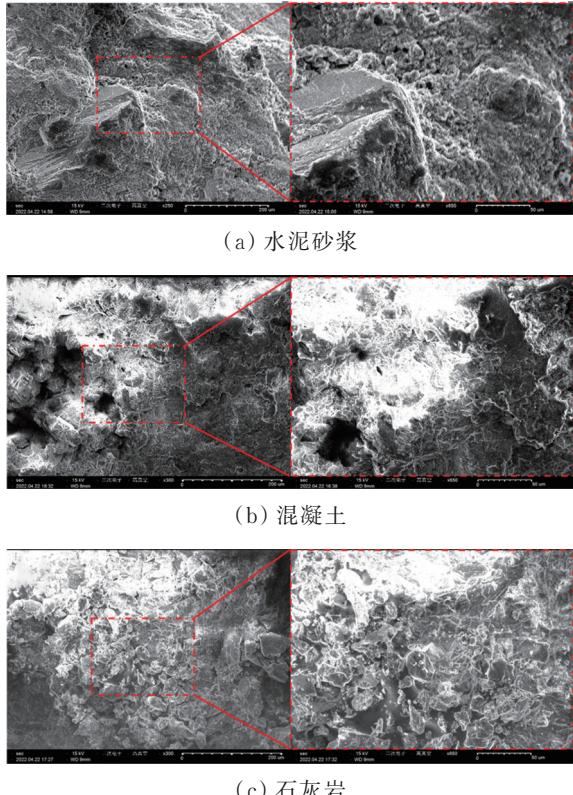


图 2 试样扫描电镜观测

Fig. 2 The mesoporous structure of the three materials

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 力学特性与声发射能量谱

3 种材料的应力-应变与声发射能量关系如图 3 所示。由图 3(a)可知, 混凝土的抗压强度较水泥砂浆提高了 58%, 较石灰岩降低了 83%。从曲线变化特征来看, 在单轴条件下, 石灰岩和水泥砂浆的应力-应变曲线出现明显的应力跌落, 残余强度几乎为

0, 均表现为脆性破坏特征, 而混凝土则表现出明显的延性特征, 在应力达到峰值时仍具有一定强度。3 种试样的应力-应变曲线可被划分为 3 个阶段, 分别是前期压密阶段、线弹性阶段、完全破坏阶段。

图 3(b)、(c)、(d)为单轴压缩条件下 3 种材料的声发射能量谱及应力与时间的变化曲线。杂乱无章的声发射信号能量跨越多个数量级。与应力-应变曲线类似, 整个压缩过程主要分为 3 个阶段: 1) 初始压密阶段, 三者都有声发射信号产生。此阶段混凝土能量值相对偏高, 原因在于混凝土孔隙率较大, 而此阶段声发射信号来源为自身孔隙坍塌, 因此该阶段混凝土产生了大量高能量值声发射信号; 相比之下, 水泥砂浆产生的能量值则偏小, 砂浆声发射信号来源为自身大量较小孔隙的微破裂以及沙粒之间的摩擦, 产生了大量低能量值信号。这与图 2 电镜下的微观结构一致; 石灰岩内部结构密实, 尽管在初始压密阶段仅产生了少量微小的声发射信号, 但内部实际上已经出现损伤事件。2) 弹性变形阶段, 三者应力线性增加, 试样内部裂隙开始稳定扩展, 释放的信号能量值开始逐渐增大。3) 完全破坏阶段, 裂纹快速延伸, 产生大量声发射信号, 能量与应力均达到峰值, 试样完全破坏。

3 种试样的声发射信号数分别为 20 918、20 677、7 503, 对应的能量峰值分别为 4 701.09、4 327.01、164 839.82 mV·ms。从图 3 中可以看出, 三者的抗压强度逐渐增强, 内部密实的石灰岩抗压强度远高于混凝土和水泥砂浆, 含石灰岩碎石骨料的混凝土略高于水泥砂浆。三者的峰值能量信号产生时间与达到应力峰值时间接近, 且石灰岩试样应力峰值和能量峰值远高于混凝土与砂浆试样。同时, 由于

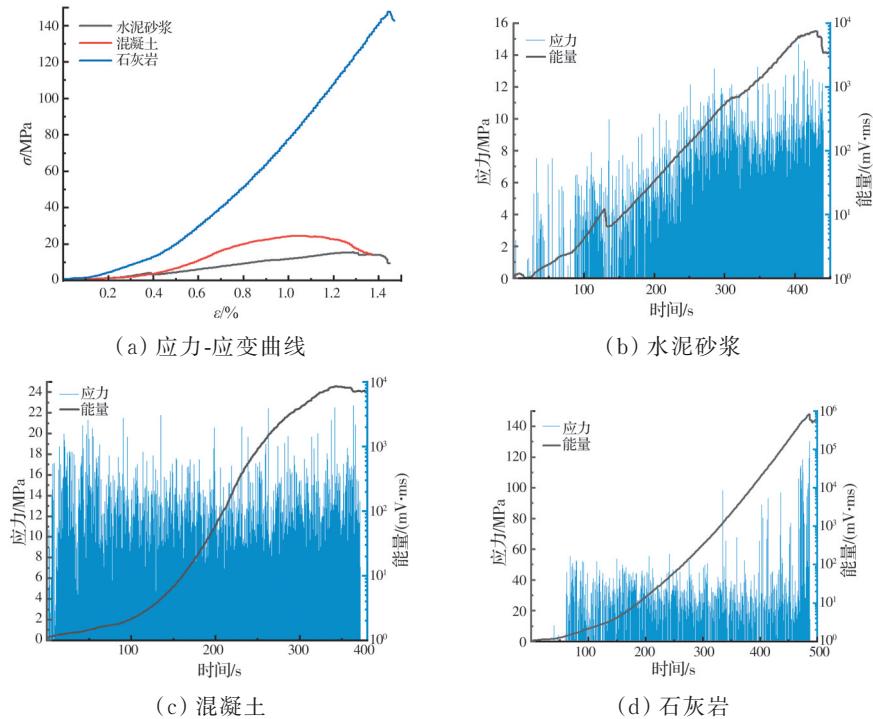


图3 3种材料应力-应变与声发射能量关系

Fig. 3 Stress-strain and acoustic emission energy relationships for three materials

混凝土与水泥砂浆孔隙率较高,导致二者受压时大量孔隙坍塌,产生了远多于石灰岩的声发射信号。

## 2.2 幅值-频率

分析受压全过程三者声发射信号峰值频率及幅值,结果如图4所示。在初始压密阶段,水泥砂浆和石灰岩试样幅值和峰值频率普遍不高,这是由于此阶段内部进行着原始裂隙压实,发生的均为小破裂事件。而混凝土在初始压密阶段就出现了较高

幅值,这与图3混凝土能量分布一致。在线弹性变形阶段,应力线性增大使3种试样内部原始裂隙不断被压紧,并使原有裂隙扩展延伸出新裂隙,因此,此阶段高幅值信号密集连续出现且信号总量呈增加趋势;在临近破坏阶段,试样峰值频率和幅值会短暂出现降低后迅速增加,完全破坏时峰值频率和幅值达到最大值,此时,各频段信号均显著增加,频域范围增大。

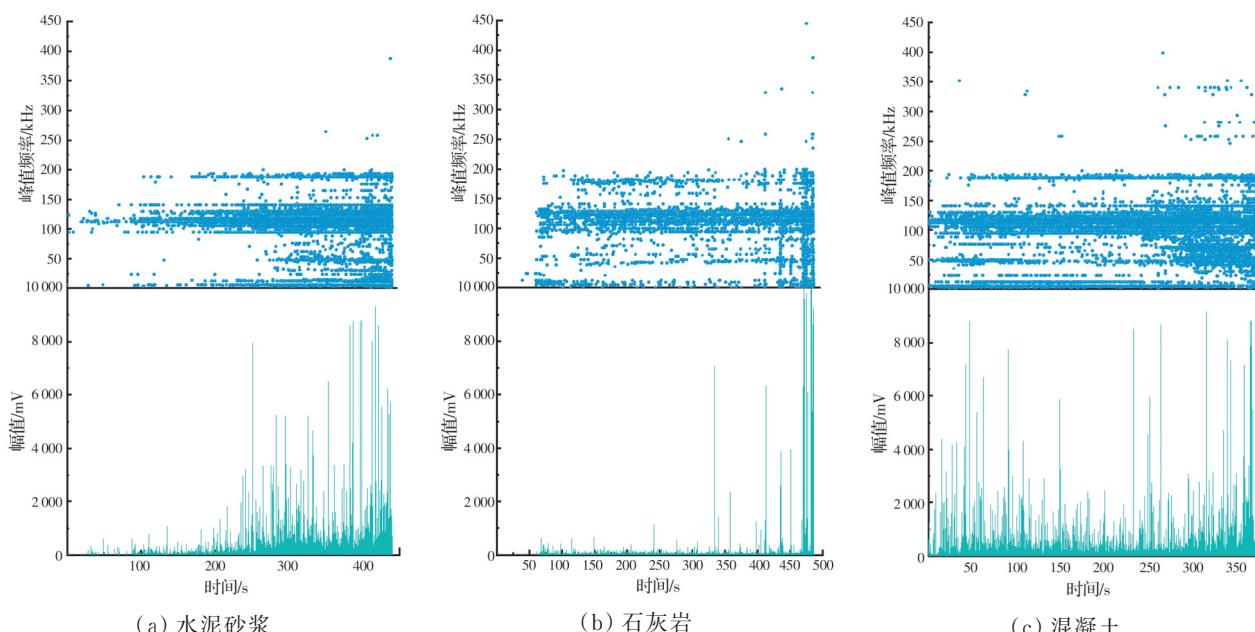


图4 声学频域响应特征

Fig. 4 Time-domain response characteristics of concrete AE

相比混凝土、水泥砂浆试样,石灰岩试样主频和幅值普遍较大,表明强度大、密实的材料会加剧试样的破裂以及增强声发射活动,且材料的强度越大,其声发射峰值频率和幅值普遍越高。相对于其组成材料水泥砂浆及石灰岩,混凝土试样前期就产生了较多的高幅值和高频率信号,这与图3声发射能量谱一致,主要为初始压密阶段内部大量孔隙破裂,产生了较高的幅值、能量与峰值频率。从图4中也可以看出,高幅值往往伴随着高峰值频率,同时,峰频往往集中在特定的数值和区间。

### 2.3 峰值频率分布

为探究单轴压缩过程中峰值频率分布规律,以30 kHz为区间间隔,将声发射信号划分为8个区段。同时将极少量大于240 kHz的声信号划归到210~240 kHz区段。分析各个区段声发射信号占比,得到3组试件的峰值频率分布特征图,如图5所示。

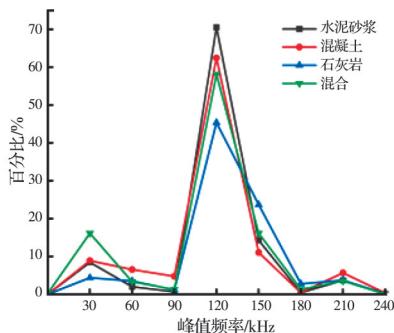


图5 声发射峰频频段分布特征

Fig. 5 Band distribution characteristics of acoustic emission peak frequency

由图5可知,3组试样声发射信号峰值频率分布近似呈正态分布且分布区间完全一致。三者在压缩条件下产生的声信号峰频主要集中在0~30 kHz、90~120 kHz、120~150 kHz、180~210 kHz四个频段。其中90~120 kHz频段占比最大,3组试件在此区间的峰值频率占比均超过40%(水泥砂浆与混凝土超过了60%),这与图4频率分布图一致。在材料压缩破坏发展演变中,该频率的主要损伤模型对应了3种试件损伤发展演变中的最主要损伤模型。通常,声发射信号高幅值对应材料内部小尺寸裂缝的形成,而低幅值则对应于大裂缝的产生。在90~120 kHz分布区间内,水泥砂浆占比最高,石灰岩最低,而二者组成的混凝土则介于二者之间。这是由三者不同的内部空间结构所导致的破坏形式决定的。为了探究混凝土破坏时与其内部组成成分的关系,将水泥砂浆与石灰岩试样压缩过程中产生的声发射信号峰值频率混合后,其峰值频率频段分布特征与混凝土近似一致。表明混凝土破坏过程中产生的声发射信号由其组成成分水泥砂浆与石灰

岩叠加而成。

### 2.4 声发射b值总体分析

b值的概念源于地震学的研究,Gutenberg等<sup>[20]</sup>率先提出地震频度与震级之间满足公式

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

式中:M为地震震级;N为相应的地震次数;a为常数。研究发现,岩石压缩过程中的声发射事件分布特征与地震演化机制具有一定的相似性,声发射b值参数由此引出,计算公式为

$$\lg N = a - b(A_{\text{dB}}/20) \quad (2)$$

式中: $A_{\text{dB}}$ 为声发射事件的最大振幅。为保证统计精度并使得到的结果更加直观,用最小二乘法计算b值,步距设为5 dB。

声发射b值被用于分析岩石内部裂纹萌生、扩展过程<sup>[13]</sup>,此后亦有大量学者将其用于反映混凝土内部微裂纹的演化特征<sup>[10,21]</sup>,本文将b值应用到混凝土及其组成材料内部损伤分析。3种材料压缩全过程声发射振幅-频度分布特征如图6所示,受限于试验设备精度及门限值设定,小幅值信号数未得到完整采集,故不参与拟合。对应的声发射整体b值如表2所示。b值较大时对应大量弱声发射事件产生,b值较小时表明材料内部有大型裂纹产生或裂纹扩展速度突增。

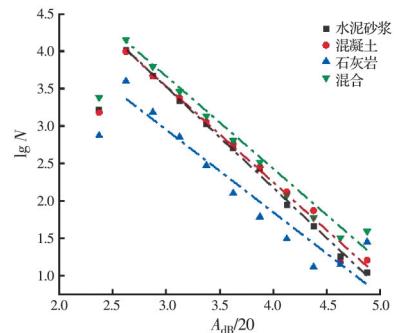


图6 声发射幅值-频度分布特征

Fig. 6 Amplitude frequency distribution of acoustic emission

表2 单轴荷载下声发射b值

Table 2 Acoustic emission b-value under uniaxial loading

| 材料种类 | 声发射b值 | 拟合系数R <sup>2</sup> |
|------|-------|--------------------|
| 水泥砂浆 | 1.35  | 0.9978             |
| 混凝土  | 1.29  | 0.9892             |
| 石灰岩  | 1.10  | 0.9124             |
| 混合   | 1.24  | 0.9816             |

随着内部密实度增加,三者整体b值逐渐减小。水泥砂浆声发射整体b值最大,为1.35,其声发射来源多为内部大量孔隙发生小尺度微破裂,产生了大量的小幅值信号(图3(b)、图4(a)),导致小幅值区

间信号占比较多,表现在图6中为前端上翘,因而计算的**b**值较大。石灰岩的整体**b**值为较小的1.10,接近岩石破坏的理论值<sup>[14]</sup>。对于石灰岩,往往产生大尺度破裂,释放的声发射信号往往具有较高幅值,高幅值区间信号数量较多,导致其整体**b**值较小<sup>[16]</sup>。混凝土的整体**b**值为1.29,介于水泥砂浆与石灰岩之间。这是由于混凝土破坏既有自身小孔隙坍塌和界面摩擦产生的大量低幅值信号,又伴随内部岩石破裂以及濒临完全破坏时自身产生的高幅值信号,因此,其声发射整体**b**值介于二者之间。与峰值频率类似,本文将水泥砂浆试样与石灰岩试样的声发射信号进行混合,统计其幅值-频度分布特征,拟合对应的整体**b**值为1.24,接近混凝土的1.29,体现了混凝土与其组成材料破坏声发射特征的叠加效应。

## 2.5 声发射动态**b**值特征

整体**b**值反映材料整个破坏过程的内部破裂情况。事实上,在破坏过程中,不同阶段材料内部损伤情况不同,对应的**b**值也不同。**b**值的变化是材料破裂的重要前兆之一。将压缩过程分为不同阶段并求出对应阶段的**b**值,得到**b**值的变化曲线。一般来说,在压缩过程中,**b**值减小意味着高幅值信号数量增加,表明材料内部出现了大尺度损伤或者损伤速度突然加快;相反地,**b**值增大表示内部发生微破裂,仅产生了大量低幅值信号,此时的声发射活动性往往较强。**b**值起伏不明显时,表明材料内部失效均衡。将单轴压缩全程按应力大小划分为10个阶段,划分方法为:各阶段均从应力为0开始,依次增加峰值应力的10%。利用Matlab编制程序,用最小二乘法计算出各个阶段的动态声发射**b**值,如图7所示。依据声发射动态**b**值的变化特征,分析各个阶段下3种试件内部的损伤情况。其中水泥砂浆前期声发射信号较少,导致前期**b**值计算误差较大,因此,水泥砂浆从应力前30%开始计算,故只有8个阶段。

从图7可以看出,混凝土与水泥砂浆动态**b**值趋势起伏不大,全程维持在较高水平,说明二者内部大小尺度破裂均衡且全程存在较强的声发射活动。这一点从二者的声发射信号数量与能量图中也可以看出。对于石灰岩,**b**值在前期呈上升趋势且维持在较高水平,这是因为其前期发生的也是小尺度的微破裂,这一点从图3(d)中也可以看出,其前期多为能量值极小的声发射信号。在压缩后期,出现能量值极高的声发射信号,同时伴随着**b**值的急剧减小。说明此时石灰岩内部开始出现大尺度裂纹,产生高数值的能量值与幅值,在趋势上体现

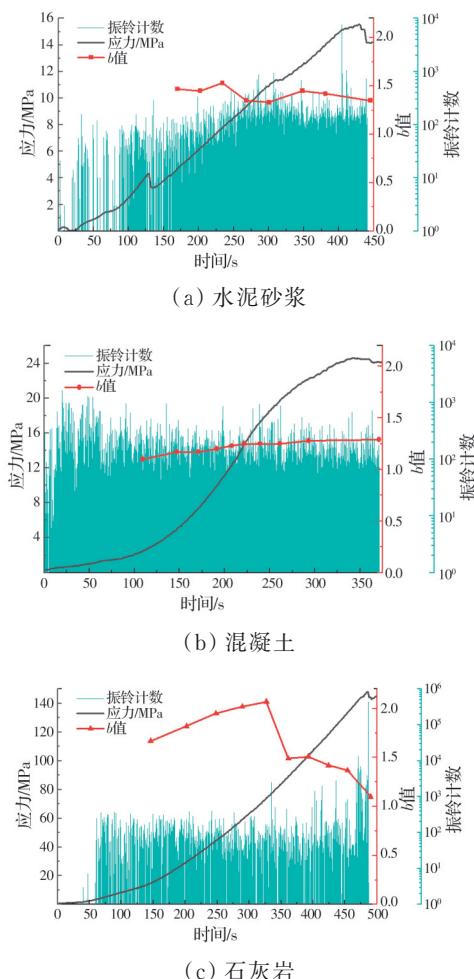


图7 声发射全应力-**b**值-振铃计数-时间曲线

Fig. 7 Time dependent curves of ringing count and dynamic b-value

为**b**值减小。在振铃计数达到峰值时,**b**值降到接近1左右,此时石灰岩完全破坏。

## 3 结论

通过对混凝土及其组成材料(水泥砂浆与石灰岩)进行单轴压缩声发射监测试验,重点分析能量、峰值频率、幅度及**b**值等声发射参数的变化规律,主要结论如下:

1)水泥砂浆、混凝土及石灰岩的能量变化趋势一致,应力峰值均与能量峰值近似重合。抗压强度最大的石灰岩应力值与能量值均远远高于混凝土与水泥砂浆。水泥砂浆与石灰岩的物理性能表现出脆性特征,混凝土表现出一定的延性。

2)在濒临破坏时,混凝土及其组成材料会释放高频率与高幅值信号,高频率与高幅值往往同时出现。孔隙率大的混凝土在压缩前期也会释放高频率、高幅值信号。

3)单轴压缩条件下3种材料的声发射峰频呈正态分布,主要集中在0~30 kHz、90~120 kHz、120~

150 kHz、180~210 kHz 四个频段。其中 90~120 kHz 为三者破坏时释放的主要频率。在该区间, 混凝土的占比介于水泥砂浆与石灰岩之间, 且水泥砂浆与石灰岩混合之后的峰值频率分布接近混凝土。

4) 水泥砂浆、混凝土及石灰岩的声发射整体  $b$  值分别为 1.35、1.29、1.10, 水泥砂浆与石灰岩混合后的声发射整体  $b$  值为 1.24, 与混凝土接近, 体现了混凝土与其组成材料破坏的声发射特征的叠加效应。混凝土与水泥砂浆动态  $b$  值趋势平稳, 其中混凝土呈略微上升状态。石灰岩呈先升后降的趋势, 其完全破坏时的  $b$  值接近 1。

## 参考文献

- [1] 张长江, 徐佰顺, 赵志蒙, 等. 基于声发射技术的早龄期扰动对混凝土力学性能影响分析[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(12): 3964-3975.  
ZHANG C J, XU B S, ZHAO Z M, et al. Influence of early age disturbance on mechanical properties of concrete based on acoustic emission technology [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(12): 3964-3975. (in Chinese)
- [2] 郑晓娟, 王云飞. 不同围压黄砂岩强度与峰值频率特征[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(7): 2241-2247.  
ZHENG X J, WANG Y F. Characteristics of strength and peak frequency of yellow sandstone under different confining pressures [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(7): 2241-2247. (in Chinese)
- [3] 姜德义, 郭朋煜, 范金洋, 等. 升温速率对高温作用后砂岩的宏细观性质影响[J]. 岩土力学, 2022, 43(10): 2675-2688.  
JIANG D Y, GUO P Y, FAN J Y, et al. Effect of heating rate on macro and mesoscopic properties of sandstone after high temperature [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(10): 2675-2688. (in Chinese)
- [4] 任松, 王乐, 谢凯楠, 等. 基于声发射计数信息熵的页岩拉压破坏临界特征试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(8): 101-107.  
REN S, WANG L, XIE K N, et al. Experimental study on critical characteristics of shale tension compression failure based on acoustic emission counting information entropy [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2020, 39(8): 101-107. (in Chinese)
- [5] 李猛, 陈迪, 田康, 等. 不同含水率下木构件起裂荷载试验研究[J]. 森林工程, 2022, 38(4): 69-81.  
LI M, CHEN D, TIAN K, et al. Experimental study on cracking load of wood members under different moisture content [J]. Forest Engineering, 2022, 38(4): 69-81. (in Chinese)
- [6] BARÓ J, CORRAL Á, ILLA X, et al. Statistical similarity between the compression of a porous material and earthquakes [J]. Physical Review Letters, 2013, 110(8): 088702.
- [7] WANG L, CAO S T, JIANG X, et al. Cracking of human teeth: An avalanche and acoustic emission study [J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2021, 122: 104666.
- [8] 艾轶博, 耿梦影, 吕涛, 等. 基于声发射的高铁齿轮箱金属材料疲劳损伤分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(2): 423-431.  
AI Y B, GENG M Y, LV T, et al. Fatigue damage analysis of high-speed railway gearbox materials based on acoustic emission [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(2): 423-431. (in Chinese)
- [9] 任松, 赵云峰, 张军伟, 等. 煤样巴西劈裂试验声发射能量幂律分布规律[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017, 38(4): 581-585.  
REN S, ZHAO Y F, ZHANG J W, et al. Power-law distribution of acoustic emission energy of coal samples in Brazilian test [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2017, 38(4): 581-585. (in Chinese)
- [10] 杨康, 李冬雪, 何兆益, 等. 基于声发射的混凝土全时域损伤试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(12): 110-116.  
YANG K, LI D X, HE Z Y, et al. Experimental study on full time domain damage of concrete based on acoustic emission [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2021, 40(12): 110-116. (in Chinese)
- [11] 邱继生, 周云仙, 王民煌, 等. 冻融循环作用下煤矸石混凝土的损伤特性及本构关系[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(5): 149-157.  
QIU J S, ZHOU Y X, WANG M H, et al. Damage characteristics and constitutive relationship of coal gangue concrete under freeze-thaw cycles [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(5): 149-157.
- [12] 曾志伟, 梁剑, 曾宇鑫, 等. 轴压与偏压状态下混凝土损伤全过程声发射特征参数分析[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(5): 1599-1608.  
ZENG Z W, LIANG J, ZENG Y X, et al. Analysis of acoustic emission characteristic parameters during whole damage process of concrete under uniaxial and eccentric compressions [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(5): 1599-1608. (in Chinese)
- [13] 王磊, 蒋翔, 肖杨, 等. 钙质砂颗粒的尺寸效应及雪崩动力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(6): 1029-1038.  
WANG L, JIANG X, XIAO Y, et al. Experimental research on size effect and avalanche dynamics characteristics of calcareous sand particles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(6): 1029-1038. (in Chinese)

- Chinese)
- [14] 董陆军, 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.  
DONG L J, ZHANG L Y. Error analysis of  $b$ -value of acoustic emission for rock fracture [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(8): 75-81. (in Chinese)
- [15] 杨振, 亓宪寅, 冯梦瑶, 等. 基于声发射和DIC特征的层状复合岩石力学损伤试验及模型研究 [J]. 长江科学院院报, 2023, 40(4): 119-126, 133.  
YANG Z, QI X Y, FENG M Y, et al. Research on mechanical damage test and model of layered composite rock based on acoustic emission and DIC characteristics [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023, 40(4): 119-126, 133. (in Chinese)
- [16] 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]. 岩土力学, 2019, 40(Sup1): 267-274.  
LIU X L, LIU Z, LI X B, et al. Acoustic emission  $b$ -values of limestone under uniaxial compression and Brazilian splitting loads [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(Sup1): 267-274. (in Chinese)
- [17] JIANG D Y, XIE K N, CHEN J, et al. Experimental analysis of sandstone under uniaxial cyclic loading through acoustic emission statistics [J]. Pure and Applied Geophysics, 2019, 176(1): 265-277.
- [18] NIU Y, ZHOU X P, ZHOU L S. Fracture damage prediction in fissured red sandstone under uniaxial compression: Acoustic emission  $b$ -value analysis [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2020, 43(1): 175-190.
- [19] CHEN J, YE Y B, PU Y Y, et al. Experimental study on uniaxial compression failure modes and acoustic emission characteristics of fissured sandstone under water saturation [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2022, 119: 103359.
- [20] GUTENBERG B, RICHTER C F. Frequency of earthquakes in California [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1944, 34(4): 185-188.
- [21] 陈波, 陈家林, 强晟, 等. 冻融环境下蒸养混凝土声发射试验研究 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(8): 41-46.  
CHEN B, CHEN J L, QIANG S, et al. Experimental study on the acoustic emission of steam cured concrete in freeze-thaw environment [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2023, 51(8): 41-46. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)