

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.039



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



混凝土单轴压缩与劈裂荷载下声发射信号的雪崩统计特征

曹雪鹏, 赵云峰, 王立柱, 陈铭辉, 张嘉乐
(长江大学城市建设学院, 湖北荆州 434023)

摘要: 多孔介质材料破坏失效的雪崩特征与其破坏机制密切相关。为探究基于声发射统计的混凝土拉、压破坏过程中的雪崩特征, 开展了混凝土单轴压缩和巴西劈裂试验, 并监测加载过程中的声发射信号, 对比分析声发射信号的幅值、绝对能量、持续时间、等候时间等参数的统计特征。结果表明: 拉、压破坏下声发射能量最大值均分布在峰值应力附近, 但劈裂过程中的信号数量远低于单轴压缩; b 值均呈先增大后减小趋势, 而劈裂破坏下的 b 值下降更早, 变化幅度更大, 说明大裂纹出现得更早, 更容易破坏; 拉、压破坏下的声发射绝对能量、幅值、持续时间的概率密度分布均符合幂律, 但对应的雪崩指数值不同, 这与破坏过程中的失效机制相关; 劈裂破坏的绝对能量分布接近纯幂律分布, 而单轴压缩破坏符合带阻尼的幂律分布, 所对应的绝对能量指数值更大; 不同时间段内单轴压缩和巴西劈裂破坏的能量指数值呈下降趋势, 说明随着荷载的增加试件内部大能量信号占比增大; 拉、压破坏下的等候时间概率密度分布较为接近, 表现出稳定性, 也说明统计规律的适用性。

关键词: 混凝土; 单轴压缩; 巴西劈裂; 声发射; 雪崩特征

中图分类号: TU528.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)02-0236-09

Avalanche statistical characteristics of acoustic emission signals of concrete under uniaxial compression and splitting load

CAO Xuepeng, ZHAO Yunfeng, WANG Lizhu, CHEN Minghui, ZHANG Jiale

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

Abstract: The avalanche characteristics of the destruction of porous dielectric materials are closely related to their failure mechanism. To investigate the avalanche characteristics of concrete during tensile and compressive failure based on acoustic emission statistics, concrete uniaxial compression and Brazilian splitting tests were carried out, the acoustic emission signals in the loading process were monitored, and the statistical characteristics of the acoustic emission signals such as amplitude, absolute energy, duration and waiting time were compared and analyzed. The results show that the maximum acoustic emission energy is distributed near the peak stress, but the number of signals in the splitting process is much lower than that in uniaxial

收稿日期: 2024-01-03

基金项目: 国家自然科学基金(52204201)

作者简介: 曹雪鹏(2000-), 女, 主要从事结构损伤研究, E-mail: 2022720769@yangtzeu.edu.cn.

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

Received: 2024-01-03

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 52204201)

Author brief: CAO Xuepeng (2000-), main research interest: structural damage, E-mail: 2022720769@yangtzeu.edu.cn.

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

compression. The b -value increases first and then decreases, and the b -value decreases earlier and the change range is larger under splitting failure, indicating that the large cracks appear earlier and are more easily destroyed. The probability density distributions of absolute energy, amplitude and duration of acoustic emission in response to tensile and compressive failure conform to a power law. However, the corresponding avalanche exponent values are different, which is related to the failure mechanism during the process of failure. The absolute energy distribution of the splitting failure is found to be in close proximity to the pure power law distribution, while the compressive failure is consistent with the damped power law distribution, and the corresponding absolute energy exponent value is found to be larger, indicating that the proportion of large energy signals in the specimen increases with the increase of load. The probability density distribution of waiting time under tensile and compressive failure is found to be similar, thereby demonstrating the stability and the applicability of the statistical law.

Keywords: concrete; uniaxial compression; Brazilian splitting; acoustic emission; avalanche characteristics

混凝土材料在建筑中被广泛应用,其灾变破坏对人类的生活有重要影响。混凝土内部存在微裂隙、孔隙等缺陷,其损伤演化及触发的灾变破坏是远离平衡的跨尺度非线性演化过程,具有突发性和不确定性。混凝土灾变破坏本质上是一系列小事件经过跨尺度相互作用和放大,导致灾难性的大事件,其物理触发机制与自然雪崩灾害相似。在混凝土受力破坏过程中,小事件对应小的位移或力降(微裂纹),大事件对应导致失稳破坏的大位移(断裂)。物理研究中将“雪崩”的概念进行了扩展,任何具有跨尺度特征的量都可视为雪崩事件。因此,混凝土灾变破坏的物理模型为典型的雪崩过程,其中的位移、力降或释放的能量信号均可称为雪崩信号,具有离散型、突发性和跨越多个量级的特点。与此类似的物理模型包括地震、马氏体相变^[1]等。

声发射技术(acoustic emission, AE)作为一种无损检测技术被广泛应用于木材^[2]、煤岩^[3]、玻璃钢管^[4]等材料中。混凝土作为重要的建筑材料,在其破坏失效过程中伴随着能量的释放,声发射技术在混凝土损伤评估方面得到广泛应用。刘鑫等^[5]通过高温下钢纤维混凝土声发射能量、频度及振铃计数分析发现,钢纤维混凝土释放更高强度的信号,声发射信号强弱与力学性能相对应。邱继生等^[6]通过对冻融后煤矸石混凝土单轴破坏产生的声发射能量信号建立损伤模型,得到了试件内部损伤的定性分析。范向前等^[7]通过对早龄期混凝土断裂时振铃计数和累计振铃计数与时间的关系分析发现,累计振铃计数的增速随着养护龄期的增加而减小;张恺等^[8]对不同冻融介质下再生混凝土受压破坏产生的声发射相对累积能量与应力的分析较好地反映了混凝土受压破坏的全过程。目前基于声发射多孔介质材料破坏失效的雪崩特征统计分析得到关注。其中,雪崩特征的声发射表征主要为声发射绝对能

量、幅值与持续时间等参数的概率密度分布,以及这些分布所对应的幂律指数,即雪崩指数。Chen等^[9]探究了Mg-Ho合金的雪崩特征,发现Mg-Ho合金破坏包括多孔坍塌引起的强声发射事件和错位运动引起的弱声发射事件,两种机制对应的雪崩指数不同。Xie等^[10]探究了高温影响下花岗岩压缩破坏的雪崩特征,结果表明,随着温度的增加,雪崩指数值逐渐增大。Jiang等^[11]探究了循环荷载作用下砂岩的雪崩特征,结果表明,随着循环次数的增加,声发射能量指数值呈增大、平稳和下降3个阶段。Xie等^[12]探究了不同干湿循环次数下砂岩的声发射能量分布,结果表明,随着循环次数的增加,声发射能量分布指数呈下降趋势。多孔介质材料破坏失效雪崩特征与其破坏机制密切相关,对应的雪崩指数值受材料内部结构损伤演化的影响,为进一步了解多孔介质材料破坏机制及其损伤定量评估提供了思路。

混凝土作为一种典型的多孔非均匀材料,目前对其雪崩特征的研究较少。为探究拉、压破坏下混凝土的雪崩特征,笔者开展混凝土单轴压缩和巴西劈裂声发射监测试验,统计分析破坏过程中声发射信号的绝对能量、幅值、持续时间、等候时间等参数,为混凝土损伤评价及破坏预测提供参考。

1 试验

1.1 试样制备

选用P·O 42.5普通硅酸盐水泥、粒径为5~22.5 mm的碎石、中粗河砂、粉煤灰、水及适当减水剂等为混凝土试件原材料,水泥成分及混凝土配比如表1、表2所示。将搅拌均匀的混凝土置于150 mm×150 mm×300 mm的立方体模具中,完全固化后脱模,放置在标准养护室中养护28 d。参照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081

—2019)及《煤与岩石物理力学参数测定方法》(GB/T 3561—2009)的规定,将养护好的混凝土试件进行取芯、切割、打磨,制成直径 50 mm、长 100 mm 的圆柱和直径 50 mm、长 25 mm 的圆盘试样,试件端面的水平度偏差不大于 0.1 mm。

表 1 水泥化学组成

Table 1 Chemical composition of the cement

成分	质量分 数/%	成分	质量分 数/%	成分	质量分 数/%
SiO ₂	20.40	MgO	1.31	K ₂ O	0.28
Al ₂ O ₃	5.14	CaO	62.80	SO ₃	2.48
Fe ₂ O ₃	4.40	Na ₂ O	0.42	LOI	2.77

注:LOI=loss on ignition(煅烧损失)。

表 2 混凝土配合比

Table 2 Mixture proportions

水泥	矿物粉	粉煤灰	细骨料	粗骨料	水	减水剂	kg/m ³
270.0	75.0	45.0	860.0	880.0	190.0	8.5	

1.2 试验方法

采用 HYAS-1000C 型岩石三轴仪分别对混凝土圆柱和圆盘试样开展单轴压缩和巴西劈裂试验,由此测得试件应力值,加载试验图及示意图如图 1、图 2 所示。巴西劈裂试验采用特制的夹具放置试件,在圆盘两个端面的中心各放置一个传感器,夹

具的左右两端带钢板,以固定试件,上下两端呈三角形,当上部受到荷载时,能够将力传递给试件^[13-14]。试验采用的加载方式为轴向位移加载,加载速率为 0.003 mm/s。在进行单轴压缩试验的试件上放置 4 个声发射传感器,进行巴西劈裂试验的试件上布置 2 个声发射传感器^[15]。测得现场噪音约 40 dB,设置声发射阈值为 45 dB,前置增益设置为 40 dB。根据声发射系统生产商对非金属复合材料时间参数的建议,撞击闭锁时间(hit lockout time, HLT)、撞击鉴别时间(hit definition time, HDT)、峰值鉴别时间(peak definition time, PDT)分别为 300、150、35 μs。由于试件表面存在孔隙,故在试件与传感器之间涂抹一层薄薄的凡士林,确保能够收集到充足的信号,在试验前进行断铅试验,确保能接收到准确、良好的信号。

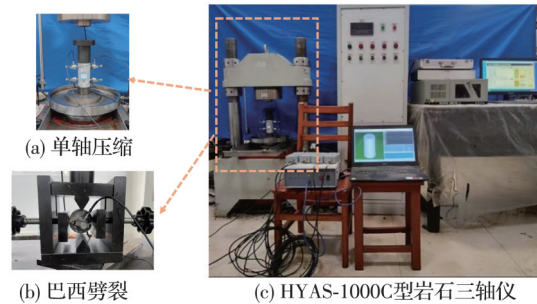


图 1 试件加载试验图

Fig. 1 Loading test diagram of specimens

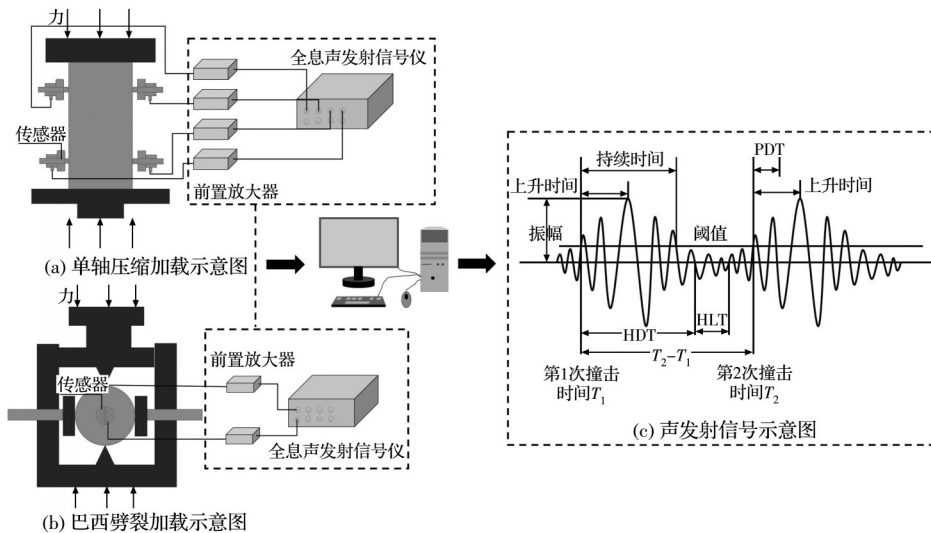


图 2 试件加载及声发射信号示意图

Fig. 2 Schematic diagram of specimen loading and AE signals

2 试验结果与讨论

2.1 拉压破坏下应力与声发射能量的关系

在单轴压缩试验中,试件沿不规则斜面产生破坏,过程中有细小的碎片开裂崩出,整体被破坏为多个部分。在巴西劈裂试验中,试件破坏沿中心面

整体被分为两部分,有少数细小的碎片崩出,破裂部分比较完整。

图 3(a)为单轴压缩下应力、声发射能量参数随时间的演化曲线,累计声发射能量在前期增长缓慢,没有明显的增长趋势,中期近似呈直线匀速增长,后期迅速增长。因此,将破坏过程划分为 3 个阶

段:裂隙压密阶段(阶段A)、裂缝产生及稳定发展阶段(阶段B)、裂缝非稳定发展阶段(阶段C)。试验初期,由于混凝土内部存在孔隙,荷载作用下孔隙被压密,产生少量声发射信号,信号能量值较小,累积能量增长平缓。随着荷载的增大,砂浆和骨料发生摩擦断裂,裂缝产生并稳定发展,此时产生较多的声发射信号,信号能量值变大,累积能量缓慢增长。当荷载继续增大,试件内部产生较多的小裂缝,这些微裂纹相互贯通,形成大裂缝,声发射信号能量值与数量急剧增加,累积能量快速上升。作为一种非均质材料,混凝土的强度具有离散性,导致各试件产生的声发射信号存在一定差异。其中,压缩破坏过程中试件产生的声发射信号最大能量值为 2 690. 62 mV·ms,主要分布在峰值应力附近。图 3(b)为巴西劈裂下应力、声发射能量随时间的演化曲线,声发射分布特征与单轴压缩相似,但声发射信号数量低于单轴压缩。劈裂破坏下试样内部产生的声发射信号最大能量为 86 747. 51 mV·ms,远大于压缩破坏。

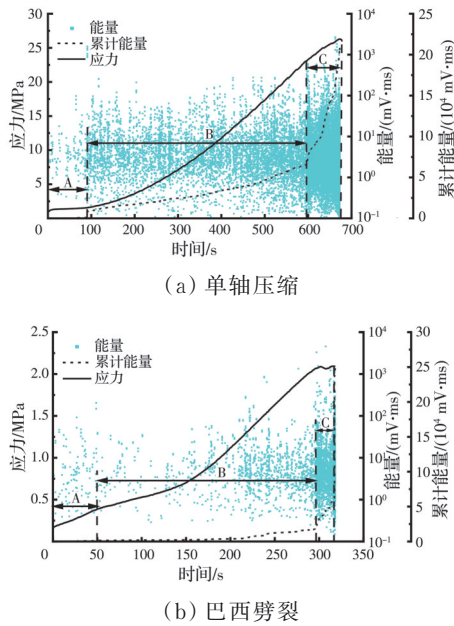


图 3 单轴压缩和巴西劈裂破坏下混凝土应力、声发射参数随时间的变化曲线
Fig. 3 Curves of concrete stress and AE parameters with time under uniaxial compression and Brazilian splitting failure

2.2 拉压破坏下 b 值演化特征

b 值概念来自对地震的研究,也是声发射试验中反映材料损伤的重要参数之一^[15-16],后来也常用于研究混凝土破坏时裂纹演化特征。b 值较大时,材料内部产生小损伤,b 值较小时,内部产生大损伤。因此,对 b 值的研究成为探究混凝土破坏过程

的重要途径^[17-18]。为保证每段有足够多的样本数,从峰值应力 σ_{max} 的 20% 开始,每段依次增加峰值应力的 20%,将全过程分为 5 个阶段。在各应力段所处的时间点进行划分,将幅值同步分为 5 个阶段。根据最小二乘法求出各阶段 b 值^[18],分析不同应力阶段混凝土内部的损伤情况。

$$\lg N = a - b \left(\frac{A_{db}}{20} \right) \quad (1)$$

式中: N 为幅值大于 $A_{db}/20$ 的声发射事件累积频次; a 为常数; A_{db} 为声发射振幅最大值,步距设为 5 dB。

图 4(a)为单轴压缩下应力、b 值随时间的变化曲线,b 值整体呈先上升后下降趋势。在前 80% σ_{max} 阶段,混凝土内部产生小裂缝,释放的能量也较少,低能量信号占比高,b 值增大。随着小裂纹的累积、贯通、扩展,大尺寸裂纹出现,释放大量的能量,高能量信号占比高,b 值减小。图 4(b)为巴西劈裂下应力、b 值随时间的变化曲线,劈裂破坏下 b 值同样呈先上升后下降趋势,变化幅度更加明显。在前 60% σ_{max} 阶段,其内部以小裂缝为主,释放能量较少,低能量信号占比高,b 值增大。随着应力的增大,内部出现大裂纹,高能量信号占比高,b 值减小。相对于单轴破坏,在劈裂荷载下试件 b 值变化幅度更大,说明内部发生了更大的损伤,同时,验证了混凝土不抗拉。在劈裂荷载下,b 值下降较早,说明混

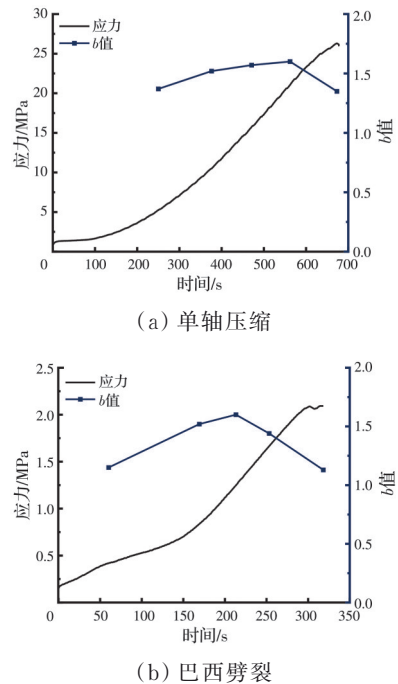


图 4 单轴压缩和巴西劈裂破坏下混凝土应力、b 值随时间的变化曲线

Fig. 4 Curves of concrete stress and b-value with time under uniaxial compression and Brazilian splitting failure

凝土内部出现大尺寸裂纹较早。

2.3 拉压破坏下混凝土的雪崩特征

图 5(a)为直方图法得到的混凝土破坏过程中声发射绝对能量的概率密度分布。在双对数坐标下,拉、压破坏下对应的分布均表现出较好的线性关系,即服从幂律分布。单轴破坏下的绝对能量分布指数为 1.57,劈裂破坏下的绝对能量分布指数为 1.47。

由于直方图法受区间间隔的选取和结构的影响,所以同时采用最大似然法(maximum likelihood, ML)进行分析^[19],对应的能量分布指数 ϵ 和误差 σ 如式(2)、式(3)所示^[11]。

$$\epsilon(E_{\min}) = 1 + n \left[\sum_{i=1}^n \ln \frac{E_i}{E_{\min}} \right]^{-1} \quad (2)$$

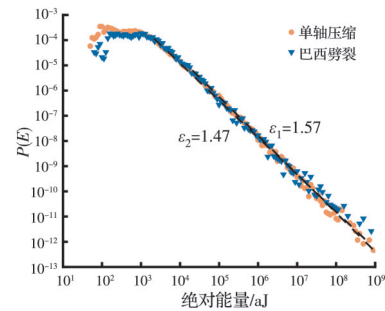
$$\sigma = \frac{\epsilon(E_{\min}) - 1}{\sqrt{n}} + O\left(\frac{1}{n}\right) \quad (3)$$

式中: ϵ 为幂律指数; E_{\min} 为归一化下限; $E_i(i=1, 2, \dots, n)$ 为所检测到的声发射能量,满足不等式 $E_i \geq E_{\min}$ 。

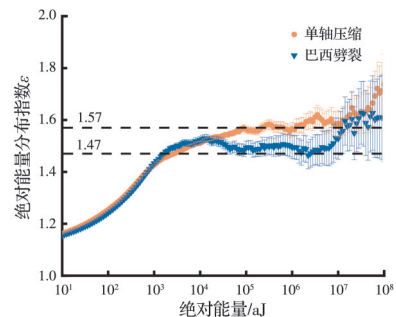
基于最大似然法的多孔介质材料破坏声发射能量分布存在纯幂律分布、带阻尼的幂律分布以及混合幂律分布等形式^[1],能量分布指数曲线中跨越多个量级的平台段对应的指数常作为最佳幂律指数。由图 5(b)可知,混凝土单轴破坏下能量指数曲线呈上翘趋势,无明显的平台段,表现为带阻尼的幂律分布。劈裂破坏下能量分布指数曲线呈平稳的、跨越 4 个量级的平台段,具有较明显雪崩现象。直方图法得到的斜率值与平台段对应的最佳幂律指数相同,单轴破坏下的绝对能量分布指数均为 1.57,劈裂破坏下均为 1.47。

在多孔材料的破坏过程中,通常主要存在两种失效机制:一种与断裂、孔隙塌陷有关,产生的声发射信号数量少、能量大;另一种与摩擦错动有关,产生的声发射信号数量多、能量小。混凝土受压破坏的能量指数大于受拉破坏,主要原因是,在单轴压缩下,混凝土内部声发射信号来源于水泥砂浆与骨料的断裂及其界面的分离与摩擦错动。其中裂纹非稳定扩展阶段界面摩擦错动产生的低能量信号占主导地位,能量指数曲线呈现上翘,对应的能量指数值更大,表现为带阻尼的幂律分布。巴西劈裂条件下混凝土破坏主要沿中心面扩展,以剪切破坏为主,最终导致失稳破坏。破坏机制主要表现为水泥砂浆与骨料的断裂,其产生的大能量声发射信号占主导。能量指数曲线出现跨越多个量级的平台段,指数值较低,表现为纯幂律分布。

雪崩指数不是独立存在的,在平均场理论模型中,它们之间存在理论关系。雪崩指数的声发射特



(a) 单轴压缩和巴西劈裂破坏下声发射能量直方图



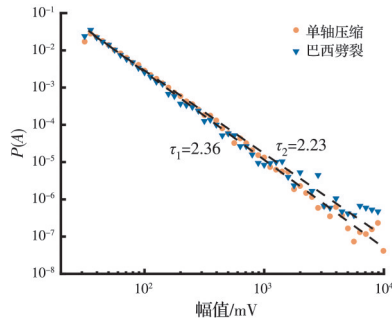
(b) 单轴压缩和巴西劈裂破坏下声发射能量最大似然图

图 5 单轴压缩和巴西劈裂破坏下混凝土绝对能量概率密度分布

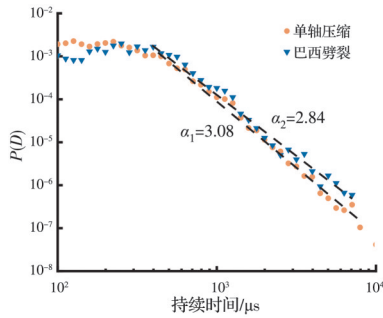
Fig. 5 Probability density distribution of concrete absolute energy under uniaxial compression and Brazilian splitting failure

征表征包括绝对能量分布指数 ϵ 、幅值分布指数 τ 、持续时间分布指数 α 、幅值与绝对能量之间的分布指数 x 、持续时间与幅值之间的分布指数 χ 。在平均场理论模型中,各雪崩指数平均场模型满足 $\tau-1=x(\epsilon-1)=(\alpha-1)/\chi=0.66$,各雪崩指数的力积分平均场模型满足 $\tau-1=x(\epsilon-1)=(\alpha-1)/\chi=1.33$,各参数指数值由图 5、图 6 中数据点拟合得到,理论值和试验值如表 3 所示。采用直方图法对拉压破坏下的声发射幅值和持续时间进行统计分析,各雪崩指数值对应各分布的拟合斜率,选取中间部分数据进行拟合,得到雪崩指数值。图 6(a)、(b)分别为幅值与持续时间的概率密度分布。单轴压缩与劈裂破坏对应的幅值分布指数 τ 分别为 2.36、2.23,对应的持续时间分布指数 α 分别为 3.08、2.84,两种指数与力积分平均场模型的理论值接近。由图 6(c)可知,幅值与绝对能量之间的相关性较强,拉、压破坏下对应的分布指数 $x_1=x_2=2.35$,与力积分平均场模型接近。根据图 6(d),持续时间与幅值之间的相关性较弱,原因可能为监测过程中信号重叠。拉、压破坏下对应的分布指数值与理论值 1.5 接近。

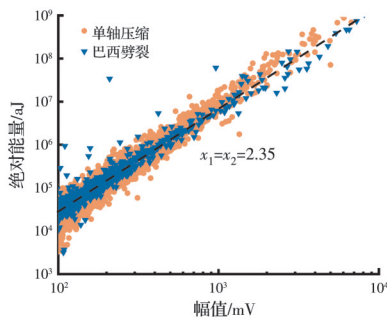
根据阻尼效应的概率密度函数理论模型(式



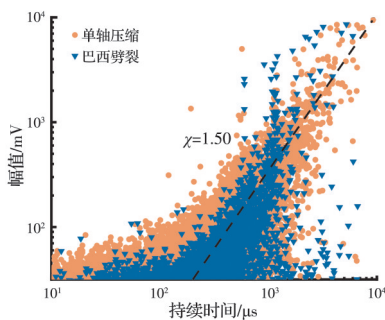
(a) 幅值概率密度分布



(b) 持续时间概率密度分布



(c) 幅值-绝对能量关系



(d) 持续时间-幅值关系

图 6 单轴压缩和巴西劈裂破坏下混凝土雪崩指数

Fig. 6 Avalanche index of concrete under uniaxial compression and Brazilian splitting failure

(4)^[20]对曲线进行拟合。

$$g(E)dE = \frac{E^{-a} e^{-\frac{E}{\Lambda}} dE}{\int_{E_{\min}}^{\infty} E^{-a} e^{-\frac{E}{\Lambda}} dE} \quad E > E_{\min} \quad (4)$$

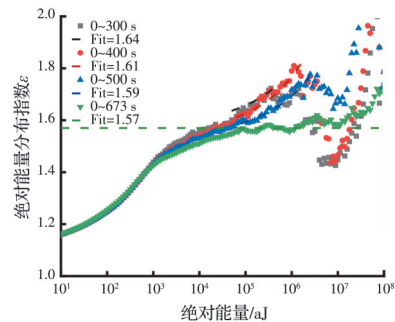
式中: a 为常数; E_{\min} 为归一化下限; E 为所检测到的声发射能量; Λ 为能量的阻尼系数。

表 3 雪崩指数理论值与混凝土试验值

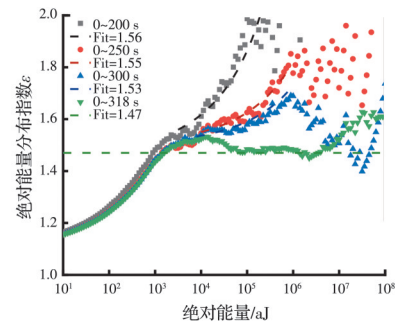
Table 3 Avalanche index theoretical values and concrete test values

雪崩指数	理论值		试验值	
	平均场模型	力积分平均场模型	单轴压缩	巴西劈裂
ϵ	1.33	1.67	1.57	1.47
τ	1.67	2.33	2.36	2.23
α	2.00	3.00	3.08	2.84
x	2.00	2.00	2.35	2.35
χ	1.50	1.50	1.50	1.50

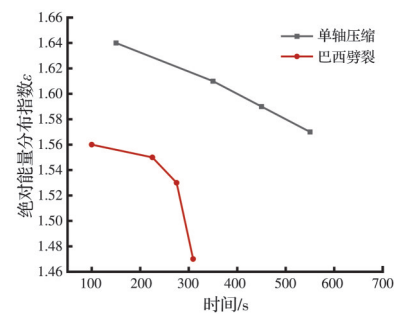
拟合结果如图 7(a)、(b)所示。单轴破坏下指数值为 1.57~1.64。0~300 s 试件内部颗粒摩擦产生的小信号占主导地位,指数值达到最高,为 1.64。随着加载时间的增加,骨料砂浆断裂产生的大能量信号占比增大。0~673 s 指数值最低,为 1.57,说明试件内部断裂产生的大能量信号占主导地位,试件破坏。劈裂荷载下指数值约 1.47~1.56。0~200 s



(a) 单轴压缩



(b) 巴西劈裂



(c) 能量指数值分布

图 7 试件在不同时间段的 ML 曲线

Fig. 7 ML curves of specimens at different periods

指数值最高,为 1.56,0~318 s 指数值最低,为 1.47。由图 7(c)可知,与单轴压缩相比,劈裂荷载下指数值由 1.56 降为 1.47,下降的幅度更大。随着时间的增长,指数值都降低。试验开始时摩擦信号较多,导致出现较大的指数值,随着时间的推移,裂纹发展,大能量信号增多,指数值下降。与同样反映材料损伤的 b 值相比,通过对不同时间段能量分布指数变化的分析,更清楚地展示了不同时间段裂纹产生时的破坏机制,能够对结构破坏做出更精确的风险评估。

等候时间表示雪崩发生后系统恢复所需要的时间,本文的等候时间为相邻声发射信号之间的时间间隔。图 8 为单轴压缩和巴西劈裂下等候时间 δ 经平均归一化后的概率密度分布。与绝对能量分布对比,在双对数坐标下,等候时间呈双幂律分布。在小区间内幂律指数分别为 1.25 和 1.15,接近理论值 1,在大区间内幂律指数分别为 2.17 和 2.32,接近理论值 2^[21]。拉压破坏下等候时间的分布基本相同,表明等候时间分布不受加载方式的影响,具有稳定性。

综上,拉压破坏下混凝土的雪崩特征较为相似,但对应的雪崩指数值不同。雪崩特征及其指数值可以较好地反映混凝土在拉、压破坏下的失效机

制。混凝土拉、压破坏的雪崩统计规律与煤、砂岩等材料的研究结果一致,印证了雪崩统计方法在混凝土材料中的适用性。

3 结论

通过声发射统计研究单轴压缩和劈裂荷载下混凝土的雪崩特征,以及对绝对能量、幅值、持续时间、等候时间等声发射参数的统计分析,得到以下主要结论:

1) 声发射 b 值总体均呈先升后降的趋势,单轴压缩下整体 b 值为 1.35,巴西劈裂下整体 b 值为 1.13,劈裂破坏下 b 值降低得更早,变化幅度更大。说明混凝土在压缩破坏下低能量信号占比高,抗拉强度低于抗压强度。

2) 拉、压破坏下混凝土的声发射绝对能量分布均符合幂律,通过声发射更好地反映了混凝土在变形破坏中力的离散突发行。其他雪崩指数值与力积分平均场模型的理论值接近。拉、压破坏下的等候时间分布均呈双幂律分布,与地震统计规律相似,说明其统计规律适用于混凝土材料。

3) 雪崩特征及其指数值可以较好地反映拉、压破坏下的失效机制:单轴压缩破坏下混凝土能量指数值高,产生数量多、能量小的声发射信号,主要是由于内部摩擦、错动而发生破坏。劈裂破坏下混凝土能量指数值低,产生数量少、能量大的声发射信号,主要是由于内部断裂而发生破坏。

参考文献

- [1] 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)
- [2] 邢雪峰, 李善明, 周永东, 等. 声发射技术在木质材料损伤监测中的应用研究进展[J]. 世界林业研究, 2022, 35(6): 63-68.
XING X F, LI S M, ZHOU Y D, et al. Application of acoustic emission technology to damage monitoring of wood-based materials: research progress [J]. World Forestry Research, 2022, 35(6): 63-68. (in Chinese)
- [3] 秦涛, 任凯. 煤岩组合体变形破裂声发射特征及损伤演化规律研究[J]. 煤炭工程, 2023, 55(1): 118-123.

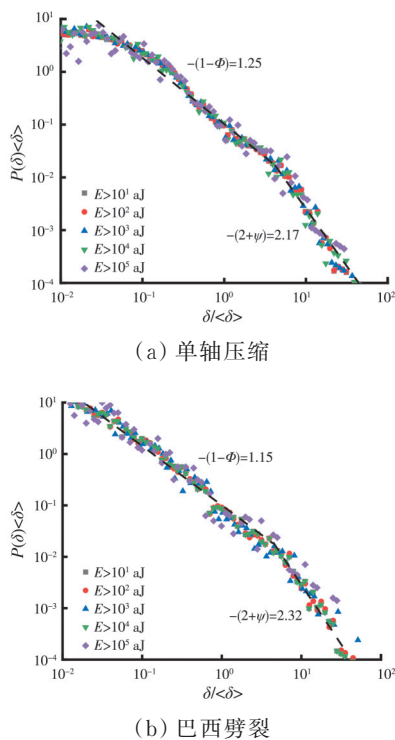


图 8 单轴压缩和巴西劈裂破坏下混凝土等候时间概率密度分布

Fig. 8 Probability density distribution of concrete waiting time under uniaxial compression and Brazilian splitting failure

- QIN T, REN K. Acoustic emission characteristics and damage evolution of coal and rock combination bodies during deformation and fracture [J]. *Coal Engineering*, 2023, 55(1): 118-123. (in Chinese)
- [4] 胡敏, 郭强, 刁向东, 等. 玻璃钢管材新型无损检测研究进展[J/OL]. *材料导报*. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/50.1078.TB.20230801.1447.002.html>
- HU M, GUO Q, XI X D, et al. Research progress of new nondestructive testing of GFRP pipes [J/OL]. *Materials Reports*. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/50.1078.TB.20230801.1447.002.html>. (in Chinese)
- [5] 刘鑫, 侯新宇, 林军, 等. 实时高温下钢纤维混凝土的力学特性及其声发射响应[J]. *硅酸盐通报*, 2021, 40(2): 447-454.
- LIU X, HOU X Y, LIN J, et al. Mechanical properties and acoustic emission response of steel fiber reinforced concrete under real time high temperature [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 40(2): 447-454. (in Chinese)
- [6] 邱继生, 潘杜, 关琥, 等. 冻融后煤矸石混凝土受压损伤声发射特性[J]. *建筑材料学报*, 2018, 21(2): 196-201.
- QIU J S, PAN D, GUAN X, et al. Acoustic emission characteristics of compression damage of coal gangue concrete after freeze-thaw cycles [J]. *Journal of Building Materials*, 2018, 21(2): 196-201. (in Chinese)
- [7] 范向前, 葛菲. 基于声发射技术的早龄期混凝土断裂性能[J]. *建筑材料学报*, 2024, 27(2): 153-160.
- FAN X Q, GE F. Fracture performance of early-age concrete based on acoustic emission measurement [J]. *Journal of Building Materials*, 2024, 27(2): 153-160. (in Chinese)
- [8] 张恺, 尹志刚, 陈晨, 等. 基于声发射技术的再生混凝土冻融损伤特性研究[J]. *人民长江*, 2023, 54(8): 221-226.
- ZHANG K, YIN Z G, CHEN C, et al. Damage characteristics of recycled aggregate concrete subjected to freeze-thaw deterioration based on acoustic emission technology [J]. *Yangtze River*, 2023, 54(8): 221-226. (in Chinese)
- [9] CHEN Y, DING X D, FANG D Q, et al. Acoustic emission from porous collapse and moving dislocations in granular Mg-Ho alloys under compression and tension [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 1330.
- [10] XIE K N, JIANG X, JIANG D Y, et al. Change of crackling noise in granite by thermal damage: Monitoring nuclear waste deposits [J]. *American Mineralogist*, 2019, 104(11): 1578-1584.
- [11] 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.
- [12] XIE K N, JIANG D Y, SUN Z G, et al. NMR, MRI and AE statistical study of damage due to a low number of wetting-drying cycles in sandstone from the Three Gorges reservoir area [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(11): 3625-3634.
- [13] 胡俊, 丁克伟, 韦璐. EPS混凝土静态压缩和劈裂性能[J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(5): 737-741.
- HU J, DING K W, WEI L. Compressive and splitting behavior of EPS concrete under static loading [J]. *Journal of Building Materials*, 2015, 18(5): 737-741. (in Chinese)
- [14] 赵军, 缪昌国, 姚如胜. 高强混凝土巴西圆盘动态劈裂试验[J]. *河南科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(1): 56-60.
- ZHAO J, MIAO C G, YAO R S. Brazilian disc dynamic split test of high strength concrete [J]. *Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science)*, 2017, 38(1): 56-60. (in Chinese)
- [15] 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(增刊1): 267-274.
- LIU X L, LIU Z, LI X B, et al. Study on b -value characteristics of limestone acoustic emission under uniaxial compression and splitting load [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(Sup 1): 267-274. (in Chinese)
- [16] 王桂林, 杨证钦, 张亮, 等. 干湿循环节理砂岩单轴压缩声发射演化特征[J]. *长江科学院院报*, 2023, 40(2): 81-86, 94.
- WANG G L, YANG Z Q, ZHANG L, et al. Acoustic emission evolution characteristics of jointed sandstone at drying-wetting damage under uniaxial compression [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2023, 40(2): 81-86, 94. (in Chinese)
- [17] 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)
- [18] 王立柱, 赵云峰, 郭嘉豪, 等. 混凝土及其组成材料单轴破坏的声发射特征[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2025, 47(2): 174-181.
- WANG L Z, ZHAO Y F, GUO J H, et al. Acoustic

- emission characteristics of concrete and its constituent materials under uniaxial failure [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2025, 47(2): 174-181. (in Chinese)
- [19] 蒋翔. 基于声发射的煤岩单轴压缩雪崩动力学及其应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- JIANG X. Avalanches dynamics and its application in mining materials under uniaxial compression based on acoustic emission [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017. (in Chinese)
- [20] 谢凯楠. 基于声发射的岩石脆性破坏雪崩动力学统计特征及其应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- XIE K N. Statistical characteristics of avalanche dynamics and its application based on acoustic emission of rock brittle fracture [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020. (in Chinese)
- [21] SOTO-PARRA D, VIVES E, BOTELLO-ZUBIATE M E, et al. Acoustic emission avalanches during compression of granular manganites [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(25): 251906.

(编辑 王秀玲)