不同迭加断裂角类岩体模型的声发射特征和破裂机制

苏占东[1,2],朱祥锟[1],刘晓丽[3],陶志刚[4],胡　楠[3],尹　乾[5],牛　耀[4]
(1. 防灾科技学院 防灾减灾工程学院,河北 三河　065201;2. 河北省地震灾害防御与风险评价重点实验室,河北 三河　065201;3. 清华大学 水圈科学与水利工程全国重点实验,北京　100084;4. 中国矿业大学(北京)隧道工程灾变防控与智能建养全国重点实验室,北京　100083;5. 中国矿业大学 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室,江苏 徐州　221116)

摘要: 为探究含不同裂隙走向岩体在外荷载作用下的破裂特征,采用数字图像相关技术和声发射技术开展加载方向分别与裂隙夹角为25°,35°,45°和60°(迭加断裂角,β)的类岩体模型单轴压缩试验. 结果表明:随β的增大,模型强度逐渐降低. 当β较小时,法向应力占据主导地位,会促使Ⅰ型张拉破裂更易发生;当β较大时,Ⅱ型应力强度因子更占优势,导致Ⅱ型剪切破裂成为主导形式,模型在前2个变形阶段内损伤不断累积,达到模型强度对应时刻后,振铃计数变小. 模型能量释放总量、平均累积能量、能量释放速率随β增大而增大;模型破坏速率越大,能量释放越剧烈,印证破裂是能量产生的根源. β=60°的模型峰值频率点数量最少,分布最分散;β=35°的模型数量分布多,损伤演化过程更剧烈. 通过引入b值误差分析发现,β=35°和β=45°模型的b值曲线在弹性变形阶段末期的突变可作为岩体破裂前兆. 研究成果可为工程建设中岩体稳定性分析提供理论支撑.

关键词: 迭加断裂角;类岩体模型;声发射;特征参数;破裂模式
中图分类号: TD 315　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1000-1964(2026)01-0061-13

Acoustic emission characteristics and fracture mechanisms of rock-like models with different superimposed fracture angles

SU Zhandong[1,2], ZHU Xiangkun[1], LIU Xiaoli[3], TAO Zhigang[4], HU Nan[3], YIN Qian[5], NIU Yao[4]
(1. Institute of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, Institute of Disaster Prevention, Sanhe, Hebei 065201, China; 2. Hebei Key Laboratory of Earthquake Disaster Prevention and Risk Assessment, Sanhe, Hebei 065201, China; 3. State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. State Key Laboratory for Tunnel Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 5. State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: To investigate the failure characteristics of fractured rock masses with varying fracture orientations under external loading, uniaxial compression tests were conducted on rock-like models with loading directions at 25°, 35°, 45°, and 60° (superimposed fracture angle, β) relative to the fractures. Digital image correlation and acoustic emission techniques were employed. The results

收稿日期: 2025-08-23　　**修回日期:** 2025-10-22　　**DOI:** 10.13247/j.cnki.jcumt.20250324
基金项目: 国家自然科学基金项目(42372322);地震科技星火计划攻关项目(XH24060A)
通信作者: 苏占东(1987—),男,陕西省榆林市人,教授,博士生导师. E-mail: szdchris@163.com
引用格式: 苏占东,朱祥锟,刘晓丽,等. 不同迭加断裂角类岩体模型的声发射特征和破裂机制[J]. 中国矿业大学学报,2026,55(1):61-73.
SU Zhandong, ZHU Xiangkun, LIU Xiaoli, et al. Acoustic emission characteristics and fracture mechanisms of rock-like models with different superimposed fracture angles[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(1): 61-73.

show that the compressive strength of the models decreases progressively with increasing β. When β is small, normal stress dominates and makes Mode Ⅰ tensile fracture more likely to occur. When β increases, Mode Ⅱ stress intensity factor dominates, leading to Mode Ⅱ shear fracture becoming the dominant mode. The damage of the model accumulates continuously in the first two deformation stages, and after reaching the corresponding moment of model strength, the ringing count decreases. The total energy release, average cumulative energy, and energy release rate of the model increase with the increase of β. The greater the rate of model destruction, the more intense the energy release, confirming that rupture is the root cause of energy generation. The model with $\beta=60^\circ$ has the fewest peak frequency points and the most dispersed distribution. The model with $\beta=35^\circ$ have a higher distribution of quantities and a more severe damage evolution process. By introducing b-value error analysis, it was found that the sudden change in the b-value curve of the $\beta=35^\circ$ and $\beta=45^\circ$ models at the end of the elastic deformation stage can serve as a precursor to rock mass fracture. These findings provide valuable theoretical support for engineering design and stability assessment of fractured rock masses.

Key words: superimposed fracture angle; rock-like model; acoustic emission; characteristic parameters; fracture mode

在岩体工程建设和地下能源开采过程中,岩体破裂失稳现象频发,给相关工程带来了巨大的安全隐患与经济损失.岩体结构复杂多样,内部存在各种尺度的缺陷(如节理、裂隙、断层等)[1-3],缺陷的几何特性对岩体变形和强度等力学行为有着显著影响.在荷载作用下,不同的裂隙走向会严重干扰完整应力的传播,改变外力施加和传递的路径,从而影响岩体的破裂特征和稳定性[4-6].声发射(AE)作为一种无损检测技术,凭借其独特的优势,在围岩稳定性实时监测分析以及岩体破裂演化行为表征方面发挥着重要作用,为降低工程岩体风险提供了有力的技术支持[7-9].因此,研究含不同角度裂隙岩体的破裂演化行为和声发射特征,对认识含裂隙岩体的破坏机理和评估岩体稳定性具有重要意义.

通过利用AE技术,学者们在工程岩石力学测试领域取得了丰硕的成果.文献[10]通过单轴压缩试验探究了不同倾角对充填体直接顶复合结构协同承载能力的影响机理,获得了组合体的强度和弹性模量随倾角的变化规律.文献[11]进一步针对含裂隙岩石开展研究,通过分析其力学特性与破坏规律,发现裂隙自身角度及外部加载方式均会显著影响含裂隙岩石的裂纹扩展路径与最终破坏模式,二者共同决定岩体的失稳机制.在岩体尺寸研究方面.文献[12]通过预制大尺度类岩体试样,系统分析了不同方向断裂对岩体局部应力场分布及AE活动特征的影响.研究发现,局部应力偏转角与AE特征参数的相关性可为声发射信号反演岩体内部应力状态提供重要依据.文献[13]则通过改变裂隙角度与数量,结合AE特征分析与数字图像相关(DIC)技术,观察共面双裂隙试样的裂纹扩展过程,发现裂隙倾角会直接影响岩体抗拉强度,且随倾角变化呈现规律性波动.此外,利用AE特征参数预测岩体失稳破裂已成为该领域的前沿研究方向.文献[14]针对含不同锚固缺陷的锚固节理试样开展试验,通过捕捉声发射信号的动态变化,得到了岩体破裂前兆特征,为锚固岩体工程稳定性预警提供了理论支撑.文献[15]则聚焦岩石非均质性差异,深入分析不同非均质性岩石的AE特征与应力状态和能量水平之间的关系,为煤岩预警提供了依据.

尽管以上学者对含缺陷岩体的AE特征开展了细致的分析,并取得诸多有价值的成果.但工程岩体中的优势结构面产状与岩体的主要受力方向存在不同的组合关系,导致岩体的破坏方式和破裂规模存在显著差异[16-17].针对这一现象,文献[18]通过研究发现,叠加断裂体系的发育主要受控于地质力学层分布、晚期应力强度、先期断裂与后期应力方向夹角的共同控制.文献[19]则将加载方向与裂隙走向的夹角定义为迭加断裂角(β).文献[20]进一步对迭加断裂进行了分类.文献[21]则将叠加断裂作用原理应用于实际工程,成功分析了厦门地区断裂的稳定性.在此基础上.文献[22]探讨了不同迭加断裂角对断裂局部应力场演化特征以及断裂活动性的影响,研究结果表

明：当$\beta<35^\circ$和$\beta\geqslant35^\circ$时，模型的破裂行为有所不同；而当$5^\circ<\beta<10^\circ$时，断裂的滑移趋势增强．然而，上述学者针对不同角度裂隙岩体内部声发射特征参数与破裂演化行为的分析存在不足．基于此，本文通过预制含迭加断裂角(β)为25°，35°，45°，60°的单裂隙小尺度类岩体模型，开展单轴压缩试验，同步采集模型在压缩过程中的声发射全波形信号，深入探讨迭加断裂角对含裂隙类岩体模型的声发射活动特性及其破裂机制，为更好地将其应用于实际工程岩体稳定性分析提供相关理论依据．

1　试验与方法

1.1　试验材料

由于岩体的物理力学特性主要取决于内部存在的孔隙、微裂隙和介质组构[23-24]，材料的种类和选取原则对类岩体模型的力学行为和变形破坏特征具有很大的影响，对模拟试验的成功与否起着决定性作用．本文选取河砂和重晶石粉为骨料，石膏和水泥为胶结剂，蒸馏水作溶剂，各种材料的规格参数见表1.

表1　试验材料参数

Table 1　Material testing parameters

材料名称	性状	物理指标	规格	主要成分
河砂	黄白颗粒	细度:33% 堆积密度:1.5 g/cm^3 含泥量:0.3%	40～120 μm	二氧化硅
重晶石粉	白色粉末	白度:75 pH值:6～9 堆积密度:1.8 g/cm^3	325 nm	硫酸钡
石膏	白色粉末	细度:15.0% 抗压强度:2.9 MPa 抗折强度:1.8 MPa	1 500 nm	硫酸钙
水泥	灰色粉末	细度:5% 堆积密度:1.3 g/cm^3 莫氏硬度:3.2	P.O 42.5	氧化钙

类岩体模型配比为m(河砂)∶m(重晶石粉)∶m(石膏)∶m(水泥)=28∶12∶7∶3，水占模型质量的20%[24-25]．本文将迭加断裂角为25°，35°，45°和60°的类岩体模型分别编号为DJ-1，DJ-2，DJ-3和DJ-4.

1.2　试验设备

本试验采用的设备为如图1所示的ZYSS-2000伺服压力机、VIC-2D岩土多尺度摄影测量实时监测系统以及DS5-16B全信息声发射监测系统．设备参数见文献[24].

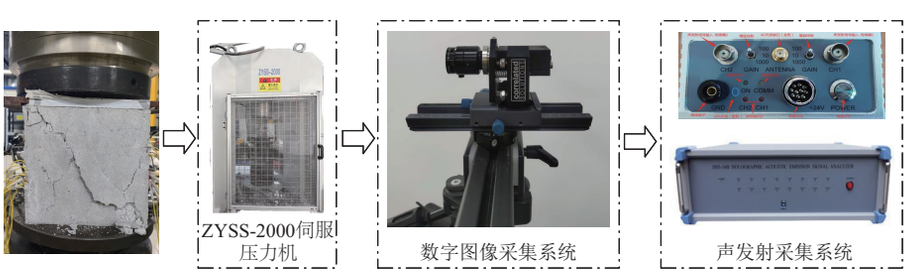


图1　试验设备

Fig. 1　Experimental equipment

2　试验流程

2.1　模型制备

类岩体模型制备采用分层加料法，裂隙预制采用钢片抽出法．首先，组装好边长为150 mm的正方体模具，测量好尺寸为150 mm×60 mm×2 mm的预制裂隙钢片(图2a)，随后用直尺在尺寸为150 mm×150 mm的纸板上标出几何中心，并根据裂隙走向与加载方向的角度裁剪出预制裂隙大小相符的预留孔洞，根据表1的材料调配好后浇筑模型(图2b)．浇筑模型时，将预制单裂隙钢片通过纸板上预留的孔洞固定在正方体模具上，形成与加载方向呈25°，35°，45°，60°的类岩体模型(图2c)，待模型(图2d)初凝后，抽出预制裂隙钢片，磨

平模型表面，并移至 25 ℃室温和 95% 相对湿度环境下养护 14 d 后拆模．之后将试样搬移至压力机加压处，利用热熔胶将声发射探头(1～8)粘贴(图 2e)在模型侧边并涂抹凡士林作为耦合剂，连接声发射数据采集器(图 2f)至电脑端，打开声发射软件进行通道信号检测，检测合格后进行下一步试验．

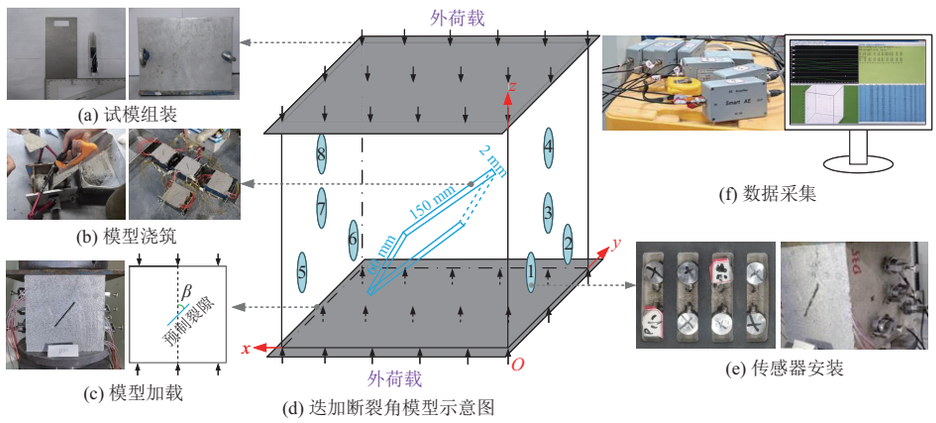


图 2　试验流程

Fig. 2　Experimental process

2.2　模型压缩及数据采集

将伺服压力机、数字图像采集系统和声发射数据采集仪连接完成之后，按照位移压缩法，设置位移压缩速率为 0.005 mm/s；调整好 VIC^{2D} 镜头对准试样采集面，图像采集间隔时间设置为 0.5 s；启动声发射数据采集仪，设置声发射门槛值为 40 dB，探头对称布置后，进行声信号测试(AST)，测试无误后同步开始采集数据．当类岩体模型在单轴压缩荷载作用下，达到强度或出现单斜面剪切破坏、拉伸破坏等明显的破坏特征时，终止加载，同时停止各试验设备．

3　试验结果与分析

3.1　类岩体模型的应力-应变特征

不同迭加断裂角含裂隙类岩体模型在压缩过程中的应力-应变/时间曲线如图 3 所示(阶段划分示意图以模型 DJ-1 为例)．依据应力-应变/时间曲线特征(轴向刚度的变化)，将类岩体模型的变形阶段划分为裂隙压密阶段(阶段Ⅰ)、弹性变形阶段(阶段Ⅱ)、破裂发展阶段(阶段Ⅲ)和破裂后阶段(阶段Ⅳ)，将每个阶段节点对应于加载时间，可统计出各阶段对应的时间范围(表 2)．

根据图 3，模型的强度随迭加断裂角的增大而降低，依次为：2.35，1.83，1.79，1.75 MPa．在阶段Ⅰ，模型 DJ-4 应力随应变的变化较大，应力达到了 0.48 MPa，约占其强度的 1/4，且用时更长．这是由于在裂隙压密阶段，外力作用使得模型孔隙体积压缩，影响了有效应力的大小与分布，导致裂隙压密阶段出现差异．在阶段Ⅱ，模型 DJ-4 比其余模型用时少了约 50 s，说明其具有的弹性能力更弱．进入阶段Ⅲ，模型开始出现裂纹扩展，随着压力的增加，到达强度后模型逐渐进入不稳定状态．对于阶段Ⅳ而言，模型已经发生破裂，而迭加断裂角较大的模型应力下降更迅速，这说明迭加断裂角较小的类岩体模型具有的强度和稳定性相对较好．

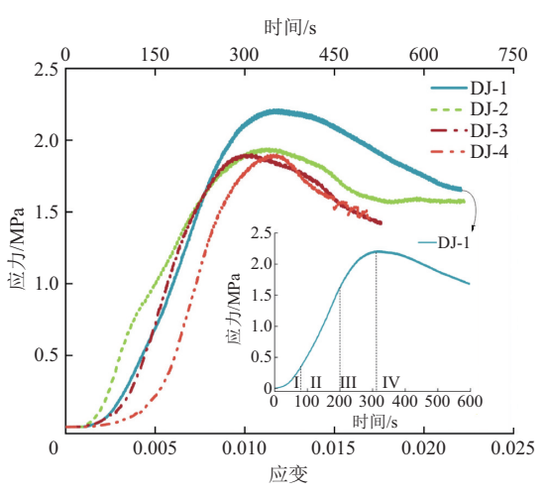


图 3　类岩体模型在单轴压缩情况下的应力-应变/时间曲线

Fig. 3　Stress-strain/time curve of the rock-like model during uniaxial compression

表 2　不同类岩体模型各阶段对应时间节点

Table 2　Corresponding time nodes of each stage for different types of rock mass models

模型编号	各阶段时间区间/s			
	阶段Ⅰ	阶段Ⅱ	阶段Ⅲ	阶段Ⅳ
DJ-1	0～75	76～200	201～310	311～600
DJ-2	0～65	66～200	201～305	306～600
DJ-3	0～77	78～195	196～268	269～465
DJ-4	0～145	146～220	221～315	316～465

3.2　类岩体模型声发射振铃计数的演化特征

声发射振铃计数是指在声发射监测过程中，单位时间内声发射信号超过设定阈值的次数．声发射振铃计数可以反映模型内部微破裂事件产生和发展的强度和频度，在一定程度上能够表征模型内部声发射活动的强弱．图 4 为类岩体模型声发射信号演化特征（P 表示模型强度）．

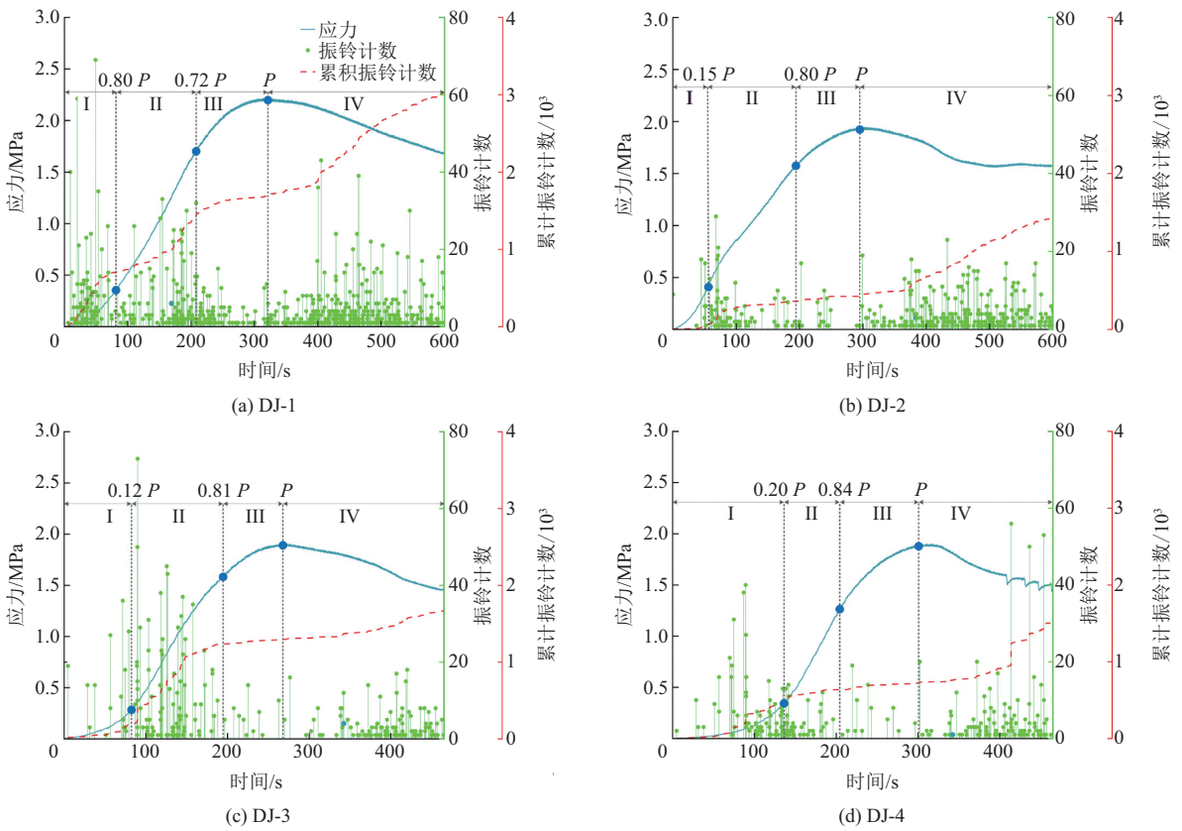


图 4　类岩体模型声发射信号演化特征

Fig. 4　Evolution characteristics of acoustic emission signals in rock-like models

由图 4 可知，在阶段Ⅰ和Ⅱ 4 个模型的振铃计数均较大，使得累积振铃计数上升较快，这说明模型内部裂纹在持续扩展，损伤不断累积，模型稳定性相对欠佳．同时，4 个模型在强度对应时刻振铃计数均较小，这与以往研究存在差异[26]，这可能是在裂隙压密阶段和弹性阶段，模型自身完整性相对较好，应力集中程度低，内部裂隙较少、较为均匀，使得在达到强度时，裂纹扩展的规模和数量受到限制，因而导致振铃计数偏小．而在破裂后阶段，振铃计数和累计振铃计数仍然保持较高水平，说明模型破坏后的残余强度还能支撑模型短暂的稳定性．

3.3　类岩体模型声发射能量的分布特征

岩体在受力变形和破坏过程中，自身发射出的声波和微震会携带能量信息．这种能量释放的大小随着岩体临近失稳而变化，声发射能量包含着岩体内部介质动态损伤变化的信息，声发射能量的大小与裂纹扩展的剧烈程度有关[23]．不同迭加断裂角类岩体模型的声发射能量特征曲线见图 5．由图 5 可知，不同迭加断裂角类岩体模型在压缩过程中能量释放存在显著差异．模型 DJ-1 和模型 DJ-3 的累积能量大致为 28 V·ms，模型 DJ-2 所释放的能量累积则在 4 个模型中最少，仅有 11 V·ms 左右，而模型 DJ-4 所释放的能量累积达到了 35 V·ms 左右．这表明迭加断裂角越大，能量释放总量相对较高．4 个模型的累计能量曲线均存在阶梯平台段，出现阶梯平台的原因是产生声发射事件的能量值不规则波动和突然变化．

由表 3 可知，平均累积能量随迭加断裂角的增大而呈现变大的趋势，模型 DJ-4 平均累计能量最高，为 71.5 mV·ms，模型 DJ-2 的最小，为 33.6 mV·ms．标准差随迭加断裂角增大也呈现增大的趋势，说明迭加断裂角越大的类岩体模型在加载过程中的能量释放波动性越大，能量数据点之间的差异也越大．平均累计能量、标准差和能量释放速率最快的模型是 DJ-4，平均能量速率为 76.6 mV·ms/s，

是模型 DJ-2 的 4.3 倍，表明迭加断裂角较大的模型，破裂更迅速，使得能量释放更剧烈．通过能量释放统计分析发现迭加断裂角对能量释放具有显著影响．

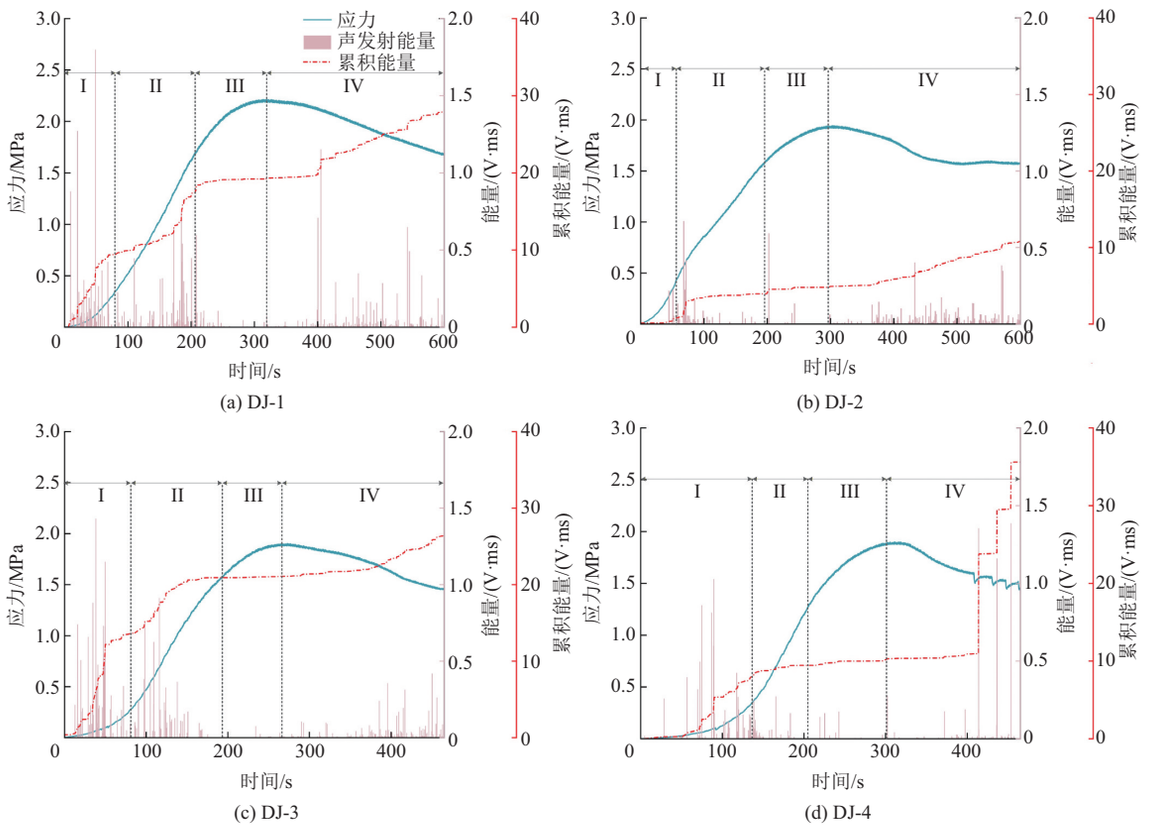


图 5 不同迭加断裂角类岩体模型的声发射能量特征曲线

Fig. 5 Acoustic emission energy characteristic curves of rock mass models with different superimposed fracture angles

表 3 不同迭加断裂角模型能量累积统计分析

Table 3 Statistical analysis of energy accumulation in different superimposed fracture angle models

模型编号	平均累积能量/(mV·ms)	标准差	平均能量速率/(mV·ms·s^{-1})
DJ-1	48.7	141.6	46.7
DJ-2	33.6	74.2	18.0
DJ-3	63.4	155.9	56.9
DJ-4	71.5	198.2	76.6

3.4 类岩体模型峰值频率的变化特征

为了分析不同迭加断裂角类岩体模型声发射峰值频率的分布特征差异，将低于 100 kHz 的峰值频率定为低频，高于 100 kHz 的峰值频率定为高频[27]．峰值频率的变化可以推断模型内部产生的破裂尺度和损伤模式．高峰值频率可能对应于小尺度裂纹的萌生和扩展，而低峰值频率则可能与大尺度裂纹或塑性变形有关[28]．不同迭加断裂角类岩体模型的峰值频率分布特征见图 6.

由图 6 可知，迭加断裂角的不同使得类岩体模型在加载过程中峰值频率的时程分布密度和数量等特征存在差异．迭加断裂角越大，模型产生的峰值频率点数量越少，呈现越来越分散的分布特征．这反映出迭加断裂角较大的模型内部存在多种损伤机制，并同时作用，导致破裂损伤在不同的区域或不同的时间发生．

值得注意的是，天然岩石在接近破坏时，产生的声发射事件最密集，并表现出损伤加剧的规律．但模型的应力水平在达到峰值强度前，峰值频率点出现了空档期，即峰值频率点在峰值应力前的一定时间段内没有分布，这与天然岩石在单轴加载条件下表现的规律不一致，这可能是由于应力主要沿着预制裂隙传递和集中，导致裂隙的扩展相对较为有序，预制裂隙的导向和应力屏蔽效应使模型在峰值强度附近（阶段Ⅲ）不会产生大量的声发射事件．

采用 α 表示张拉破裂占比[29]，α 的表达式如下：

$$\alpha=\frac{E_k}{E_0}\times 100\%, \tag{1}$$

式中：E_0 为矩形窗口中破裂事件的总个数；E_k 为矩形窗口中 AF 值/RA 值大于 k 的破裂事件个数（AF 值/RA 值和 k 值释义见第 3.5 节）．

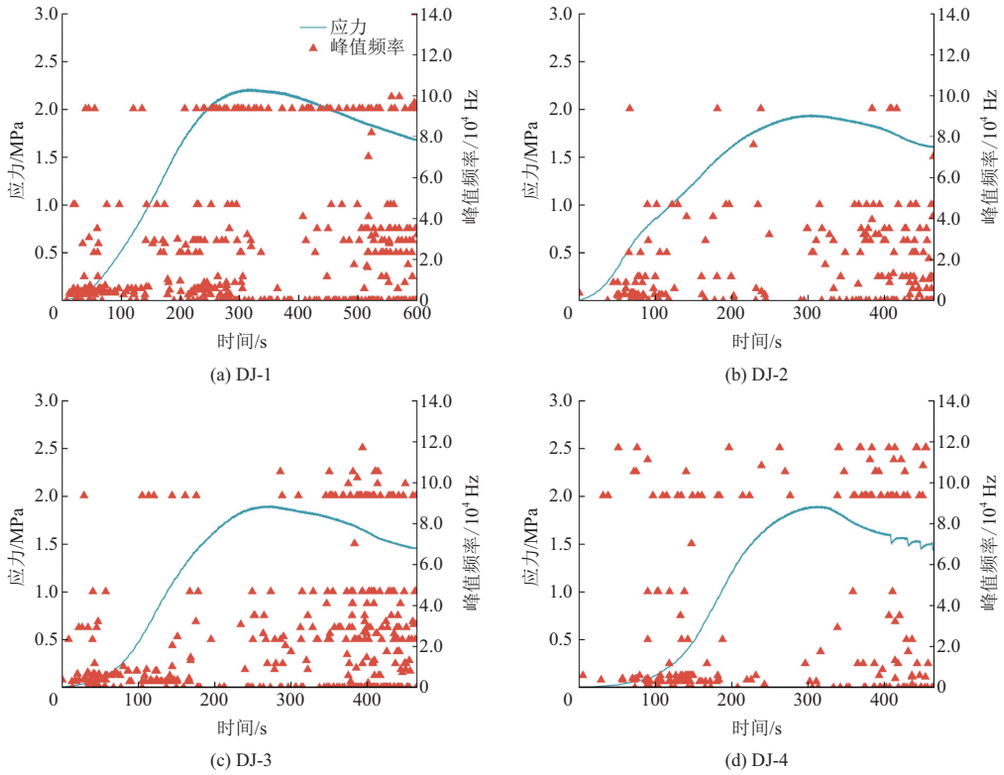


图 6　不同迭加断裂角类岩体模型的峰值频率分布特征

Fig. 6　Peak frequency distribution characteristics of rock-like models with different superimposed fracture angles

由图 7 可知，不同迭加断裂角类岩体模型破裂过程中产生了不同频率的低频和高频信号，但低频信号的数量占比要大于高频信号的数量占比，并且模型 DJ-2 的低频信号占比高达 99.7%. 低频信号数量较多，说明类岩体模型破裂过程中，应力在模型中的传递主要通过较大规模的宏观裂隙或损伤区域实现，模型内部存在较多的宏观裂隙，应力波在这些宏观裂隙附近传播时会发生散射和反射，使得信号频率降低.

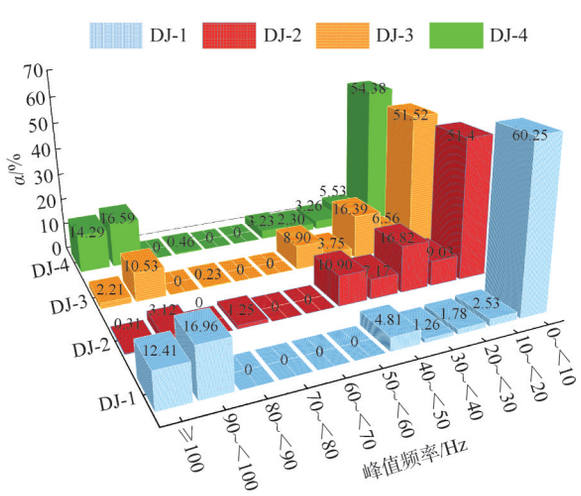


图 7　不同区间声发射峰值频率的分布特征

Fig. 7　Distribution characteristics of AE peak frequency in different intervals

而各模型的高频信号占比均未超过 15%，且数量少，幅度大，体现了模型内部存在相对较小规模但能量集中的破裂源，并且每次事件释放的能量较高. 同时，在破裂过程中，低频和高频信号的差异性也反映出模型整体结构的不均匀特征，表明不同迭加断裂角的类岩体模型既有宏观结构上的大规模调整，也有微观结构上的局部破坏.

3.5　类岩体模型的破裂模式

为更好地了解不同迭加断裂角类岩体模型的破裂机制，利用上升时间与幅值之比（RA 值）和振铃计数与持续时间之比（AF 值）对岩体模型的破裂模式进行分析[30-31]. 当模型发生剪切破裂时，上升时间和持续时间长，振铃计数幅度均较小，表现出 RA 值高，AF 值低的特点；反之，低 RA 值和高 AF 值对应张拉破裂. 采用日本混凝土声发射监测规范（JCMS-III B5706）中提出的 AF 值-RA 值判断方法[32]，分别选取 RA 值和 AF 值的最大值，并与横、纵坐标轴组成矩形窗口，对角线则作为模型发生张拉破裂和剪切破裂的分界线，该线的斜率（AF 值/RA 值）为阈值 k[33]. 图 8 为类岩体模型各阶段破裂类型和 RA 值-AF 值特征曲线，通过计算比较模型产生每个声发射事件的 AF 值与 RA 值的比值和阈值 k，可量化模型产生张拉与剪切破裂事件的数量和占比.

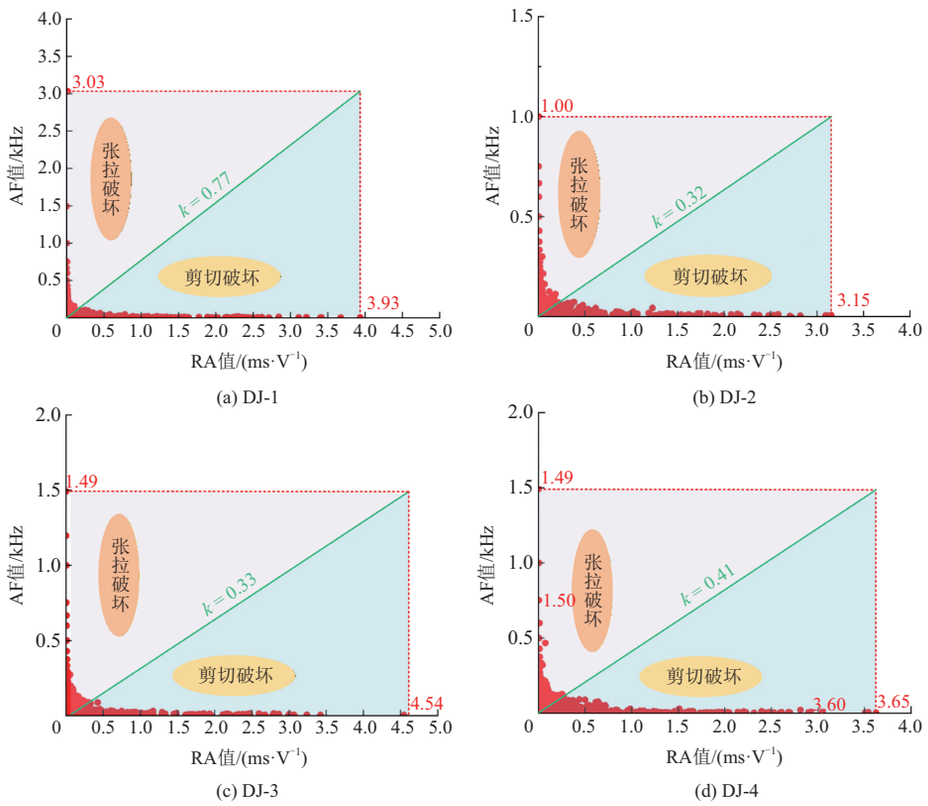


图 8 类岩体模型各阶段破裂类型与 RA 值-AF 值特征

Fig. 8 Fracture types and RA-AF characteristics at different stages of rock-like models

当外荷载与预制裂隙之间的夹角(迭加断裂角)不同时,裂隙面上的应力可分解为法向应力和剪切应力. 当模型达到峰值强度后,可以根据以下公式计算模型破坏时裂隙面上 2 个方向的应力分量:

$$\sigma_n = P\cos^2\beta, \tag{2}$$

$$\tau = P\sin\beta\cos\beta, \tag{3}$$

式中:σ_n 为法向应力,MPa;P 为强度,MPa;τ 为剪切应力,MPa.

图 9 为模型强度以及裂隙面法向应力和剪切应力. 由图 9 可知,随着迭加断裂角的增大,强度逐渐降低,而法向应力整体呈现逐渐减小的趋势,剪切应力则是先增大后减小,在 $\beta=45°$ 时达到最大值. 根据断裂力学理论,Ⅰ型应力强度因子与法向应力相关,Ⅱ型应力强度因子与剪切应力相关[34]. 对于含迭加断裂角较小的类岩体模型,法向应力占据主导地位,会促使Ⅰ型张拉破裂更易发生;迭加断裂角越大,裂隙面上的剪切应力呈现增大的趋势,Ⅱ型应力强度因子更占优势,导致Ⅱ型剪切破裂成为主导形式.

图 10 为模型各阶段张拉破裂占比及裂隙发展云图. 由图 10 可知,当迭加断裂角较小时,裂纹的发展形式和模型表面最大主应变的演化趋势揭示了多个破裂面的传播路径与模型轴向方向(加载方向)基本平行,导致模型最终发生张拉破坏. 当迭加断裂角较大时,裂纹主要沿着预制裂隙走向发展,并在此基础上,裂隙尖端发生 X 型剪切裂纹,这种破坏模式属于剪切破坏. 在前 3 个变形阶段(Ⅰ,Ⅱ和Ⅲ),模型 DJ-1,DJ-2 和 DJ-3 产生张拉破裂事件的占比相对剪切破裂事件占比更高,破坏后(阶段Ⅳ)产生的破裂事件则以张拉型为主(α 均大于 50%);模型 DJ-4 在全加载过程中的张拉破裂事件占比(α)均小于 50%,说明模型 DJ-4 在全加载过程中更容易产生以剪切型为主的破裂事件.

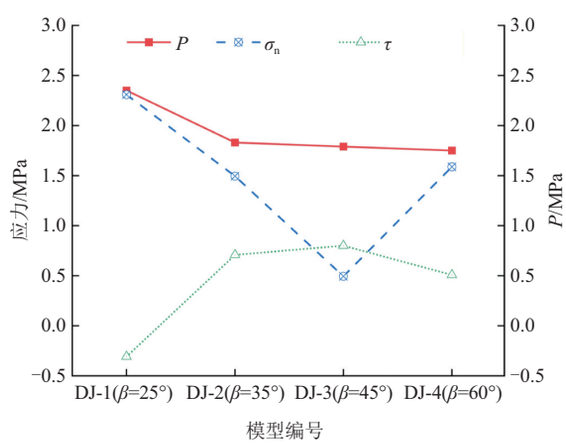


图 9 模型强度以及裂隙面法向应力和剪切应力

Fig. 9 Model strength and normal and shear stresses on the fracture surface

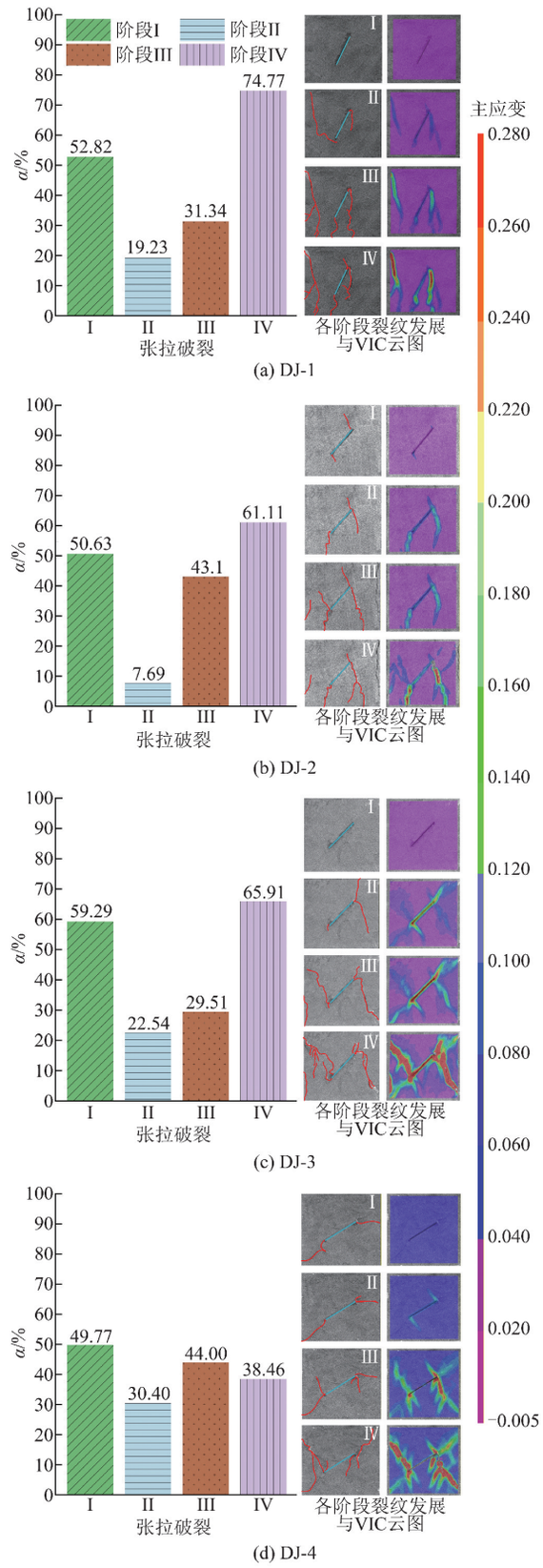


图 10　模型各阶段张拉破裂占比及裂隙发展云图

Fig. 10　Proportion of tensile fractures and fracture development contour maps of rock-like models at each stage

3.6　声发射 b 值变化特点

b 值是地震学中描述地震震级和频数之间的一个重要参数[35]. 声发射 b 值大小表示低幅值事件相对于高幅值事件的比例，即 b 值越大，表明低幅值事件所占比例越大，通常意味着岩体发生小尺度破裂的概率更高. 在 b 值的计算过程中，一般认为最大似然法计算更加简单且误差更小，用最大似然法经修正后计算岩体发生破裂时所对应的 b 值公式[36-37]如下：

$$b = 20\lg e/(\bar{A} - A_{\min}), \tag{4}$$

式中：$\bar{A}$ 为平均幅值，dB；$A_{\min}$ 为最小幅值，dB；e 为自然常数.

在地震领域中，当样本数量较少（＜2000）时，为了保证 b 值的可靠性，相应地增大震级间隔可有效减小计算误差[38]. 因此，本文设定较大的时间步长，在每个时间段内根据公式(4)计算相应的 b 值. 计算结果如图 11 所示.

图 11 中，模型 DJ-1 的 b 值较小，在(0，0.3)区间内波动，说明破裂以大尺度破裂事件为主. 模型 DJ-2 的 b 值在模型破坏前较大，破坏时降低，破坏后变得更低，这体现了裂纹的扩展过程从微观尺度逐渐过渡到宏观尺度，最终导致模型的破坏，反映了裂隙扩展的阶段性，体现小尺度破裂的累积导致后期的大尺度破裂. 模型 DJ-2 和模型 DJ-3 的 b 值在阶段Ⅱ末期出现了明显的突变，这可作为岩体开始发生破裂的前兆. 模型 DJ-4 的 b 值波动趋势较模型 DJ-3 小，比 DJ-1 大，在(0，0.75)区间内波动. 总体来说，b 值总体维持在较低的水平，这与图 7 峰值频率所表现出的规律大致相同，即模型易产生大尺度破裂事件.

声发射 b 值大小表示低幅值事件相对于高幅值事件的比例. 在实际的模型中，b 值通常会随着材料的损伤过程而变化[39-40]，因此，对 b 值的标准误差和置信度进行了分析[41]，结果如表 4 所示. 根据表 4，在 95% 置信度下，模型 DJ-1 呈现低 b 值、低波动，b 值曲线平缓，在 1 附近小幅波动，表明其误差较小，但破裂过程以稳定的大尺度事件为主. 模型 DJ-2 高 b 值、高波动，反映小尺度破裂累积，均值最高，方差和标准差最大，置信区间范围宽，b 值曲线较为分散，在阶段Ⅰ，Ⅱ出现多个峰值，阶段Ⅲ后 b 值快速下降，体现小尺度破裂累积并向大尺度破裂过渡. 模型 DJ-3 的 b 值较低，均值居中，方差和标准差中等，置信区间较窄，在阶段Ⅱ末期 b 值降至 0 附近，于阶段Ⅲ回升，有较大的波动性. 模型 DJ-4 高波动、均值较高，方差和标准差显著，置信区间范围最宽，b 值曲线剧烈波动，在阶段Ⅲ出现多次下降，反映其破裂过程不稳定.

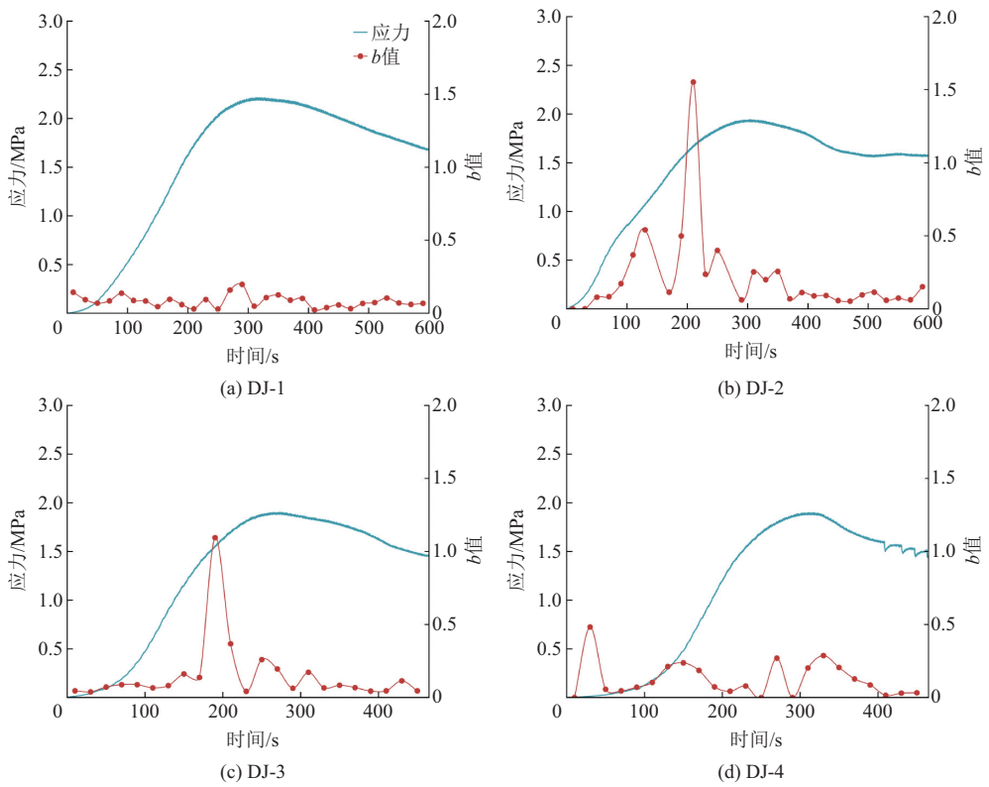


图 11 声发射 b 值变化特征

Fig. 11 Variation characteristics of AE b-value

表 4 b 值误差分析结果

Table 4 Analysis results of b-value error

模型编号	均值	方差	标准差	标准误差	置信区间
DJ-1	0.082 5	0.001 7	0.040 8	0.007 5	(0.067 9,0.097 2)
DJ-2	0.261 5	0.406 5	0.637 6	0.116 4	(0.023 4, 0.500 0)
DJ-3	0.149 7	0.048 9	0.221 0	0.046 1	(0.054 1, 0.245 3)
DJ-4	0.193 2	0.177 9	0.421 8	0.088 0	(0.010 8, 0.375 6)

4 结 论

1)破坏模式由裂隙面法向应力与剪切应力共同控制. 随迭加断裂角的增大,模型强度逐渐降低,法向应力整体呈减小趋势,剪切应力则呈现“先增后减”的变化状态,且当 β=45°时,剪切应力达到最大值;当 β 较小时,法向应力占据主导地位,会促使Ⅰ型张拉破裂更易发生;当 β 较大时,裂隙面上的剪切应力呈现增大的趋势,Ⅱ型应力强度因子更占优势,导致Ⅱ型剪切破裂成为主导形式.

2)在裂隙压密和弹性变形阶段的振铃计数维持较高水平,且累积振铃计数上升速率较快;但 4 个模型在强度对应时刻(模型破坏时刻)振铃计数均较小,这与以往研究存在差异. 随迭加断裂角增大,总体上模型能量释放总量、平均累积能量和平均能量释放速率均递增,且模型破坏速率大,能量释放越剧烈.

3)迭加断裂角越大的模型,峰值频率点呈数量越少、分布越分散的趋势,反映模型内部多种损伤机制同时作用,破裂损伤发生区域与时间更分散;峰值应力前一定时间段无峰值频率分布,与天然岩石规律不一致,可能是应力主要沿预制裂隙传递集中,使裂隙扩展较有序,以及预制裂隙的导向与应力屏蔽效应导致的.

4)b 值低均值和低方差表明破裂以大尺度事件为主;高均值和高方差表明能量释放低但波动性高,小尺度破裂频繁. 模型 DJ-2 与 DJ-3 阶段Ⅱ末期 b 值均出现明显突变,可作为岩体破裂前兆;模型 DJ-4 的 b 值波动趋势较模型 DJ-3 小,较模型 DJ-1 大,在(0,0.75)区间内波动. 总的来说,b 值

总体维持在较低的水平，这与峰值频率所表现出的规律大致相同，即模型易产生大尺度破裂事件.

参考文献：

[1] 蔡美峰，何满朝，刘东燕．岩石力学与工程［M］．北京：科学出版社，2013.
CAI Meifeng, HE Manchao, LIU Dongyan. Rock mechanics and engineering［M］. Beijing: Science Press, 2013.

[2] 刘　杰，王恩元，宋大钊，等．岩石强度对于组合试样力学行为及声发射特性的影响［J］．煤炭学报，2014，39(4)：685-691.
LIU Jie, WANG Enyuan, SONG Dazhao, et al. Influence of rock strength on mechanical behavior and acoustic emission characteristics of composite specimens［J］. Journal of China Coal Society, 2014, 39(4): 685-691.

[3] 吴顺川，张思瑞，韩龙强，等．从随机节理分布角度探讨工程岩体不均匀性和尺寸效应［J］．中国矿业大学学报，2024，53(6)：1063-1073.
WU Shunchuan, ZHANG Sirui, HAN Longqiang, et al. Discussion on the inhomogeneity and size effect of engineering rock mass from the perspective of random joints distribution［J］. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(6): 1063-1073.

[4] 赵　菲，孟世卓，刘冬桥，等．基于声发射信号特征的花岗岩岩爆破坏前兆信息研究［J］．岩石力学与工程学报，2024，43(11)：2669-2686.
ZHAO Fei, MENG Shizhuo, LIU Dongqiao, et al. Study on precursor information of granite rockburst failure based on acoustic emission signal characteristics［J］. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(11): 2669-2686.

[5] 赵国贞，程　伟，刘　超，等．基于循环加卸载的煤岩体破坏力学行为和能量演化规律研究［J］．岩石力学与工程学报，2024，43(7)：1636-1645.
ZHAO Guozhen, CHENG Wei, LIU Chao, et al. Study on mechanical behavior and energy evolution law of coal-rock mass failure under cyclic loading and unloading［J］. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(7): 1636-1645.

[6] 赵毅鑫，乔海清，谢镕澴，等．煤岩单轴压缩破坏声发射轻量化三维卷积预测模型研究［J］．岩石力学与工程学报，2022，41(8)：1567-1580.
ZHAO Yixin, QIAO Haiqing, XIE Ronghuan, et al. Lightweight 3D convolutional prediction model for acoustic emission of coal-rock uniaxial compression failure［J］. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(8): 1567-1580.

[7] 袁振明，马羽宽，何泽云．声发射技术及其应用［M］．北京：机械工业出版社，1985.
YUAN Zhenming, MA Yukuan, HE Zeyun. Acoustic emission technology and its application［M］. Beijing: China Machine Press, 1985.

[8] BU F C, XUE L, ZHAI M Y, et al. Evaluation of the characterization of acoustic emission of brittle rocks from the experiment to numerical simulation［J］. Scientific Reports, 2022, 12(1): 498.

[9] ZHANG Z N, LIU X X, ZHAO K, et al. Experimental study on acoustic emission features and energy dissipation properties during rock shear-slip process［J］. Materials, 2024, 17(19): 4684.

[10] 杨小彬，程虹铭，裴艳宇．不同加载方式下岩石变形及峰后能量演化特征研究［J］．岩石力学与工程学报，2020，39(增 2)：3229-3236.
YANG Xiaobin, CHENG Hongming, PEI Yanyu. Study on deformation and post-peak energy evolution characteristics of rock under different loading modes［J］. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(Sup 2): 3229-3236.

[11] 冯国瑞，王　晶，杜献杰，等．界面倾角对岩充组合体协同承载特征的影响机理［J］，中国矿业大学学报，2024，53(6)：1053-1062.
FENG Guorui, WANG Jing, DU Xianjie, et al. The influence mechanism of interface dip angle on the synergistic bearing characteristics of rock-backfill composite［J］. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(6): 1053-1062.

[12] SU Z D, NIU Y, ZANG A, et al. Analysis of stresses in gypsum-cement mortar blocks with strike-slip faults of different orientations inferred from acoustic emission and embedded strain sensors［J］. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2025, 58(3): 3889-3908.

[13] 董晋鹏，杨圣奇，李　斌，等．共面双裂隙类岩石材料抗拉强度试验研究［J］．工程力学，2020，37(3)：188-201.
DONG Jinpeng, YANG Shengqi, LI Bin, et al. Experimental study on tensile strength of rock-like materials with coplanar double fractures［J］. Engineering Mechanics, 2020, 37(3): 188-201.

[14] 占　赛，关　凯，朱万成，等．基于声发射的含锚固缺陷节理试样单轴压缩破裂机制研究［J］．采矿与岩层控制工程学报，2024，6(4)：80-90.
ZHAN Sai, GUAN Kai, ZHU Wancheng, et al. Study on fracture mechanism of jointed specimens with anchorage defects under uniaxial compression based on acoustic emission［J］. Journal of Mining

and Strata Control Engineering,2024,6(4):80-90.

[15] 纪洪广,张春瑞,张月征,等.岩石材料破裂过程中声发射信号的应力状态及能量演化研究[J].中国矿业大学学报,2024,53(2):211-223.
JI Hongguang, ZHANG Chunrui, ZHANG Yuezheng, et al. Study on stress state and energy evolution of acoustic emission signals during rock fracture process [J]. Journal of China University of Mining & Technology,2024,53(2):211-223.

[16] 李利平,贾 超,孙子正,等.深部重大工程灾害监测与防控技术研究现状及发展趋势[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(8):2539-2556.
LI Liping, JIA Chao, SUN Zizheng, et al. Research status and development trend of monitoring and prevention technology for major deep engineering disasters [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2021,52(8):2539-2556.

[17] 苏方声,潘鹏志,高要辉,等.含天然硬性结构面大理岩破裂过程与机制研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(3):611-620.
SU Fangsheng, PAN Pengzhi, GAO Yaohui, et al. Study on fracture process and mechanism of marble with natural hard structural planes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(3):611-620.

[18] 冯建伟,王志坤,商 琳.渤海湾盆地南堡凹陷3区多期叠加断裂体系形成机制[J].石油与天然气地质,2017,38(6):1032-1042.
FENG Jianwei, WANG Zhikun, SHANG Lin. Formation mechanism of multi-stage superimposed fault system in Block 3 of Nanpu Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology,2017,38(6):1032-1042.

[19] 李兴唐.城市区域地壳稳定性评价原则[J].水文地质工程地质,1987(6):17-22.
LI Xingtang. Principles for evaluating crustal stability in urban areas [J]. Hydrogeology and Engineering Geology,1987(6):17-22.

[20] 唐 智.叠加断裂及其分类[J].四川地质学报,1997(2):107-109.
TANG Zhi. Superimposed faults and their classification [J]. Sichuan Geology Journal,1997(2):107-109.

[21] 谢含华,方志峰,吴少娟,等.叠加断裂作用原理在厦门地区断裂稳定性分析中的应用[J].煤田地质与勘探,2016,44(2):85-88.
XIE Hanhua, FANG Zhifeng, WU Shaojuan, et al. Application of superimposed fault action principle in stability analysis of faults in Xiamen area [J]. Coal Geology & Exploration,2016,44(2):85-88.

[22] 周思哲.迭加断裂角对走滑断裂局部应力场的影响及其对断裂活动的指示意义[D].三河:防灾科技学院,2024.
ZHOU Sizhe. Influence of superimposed fault angle on local stress field of strike-slip faults and its indication significance for fault activity [D]. Sanhe: Institute of Disaster Prevention, 2024.

[23] 牛少卿.巷道围岩峰后大变形过程的稳定性特征及锚固控制机理研究[D].太原:太原理工大学,2014.
NIU Shaoqing. Study on stability characteristics and anchorage control mechanism of roadway surrounding rock during post-peak large deformation [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology,2014.

[24] NIU Y, SU Z D, SUN J Z, et al. Influence of the strength of rock-like models on the local deformation field and acoustic emission characteristics [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023,82(8):334.

[25] 牛 耀,苏占东,孙进忠,等.岩体物理模拟实验中的相似材料配比[J].吉林大学学报(地球科学版),2024,54(5):1645-1656.
NIU Yao, SU Zhandong, SUN Jinzhong, et al. Proportioning of similar materials in rock physical simulation experiments [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024,54(5):1645-1656.

[26] 刘保县,黄敬林,王泽云,等.单轴压缩煤岩损伤演化及声发射特性研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(增1):3234-3248.
LIU Baoxian, HUANG Jinglin, WANG Zeyun, et al. Study on damage evolution and acoustic emission characteristics of coal under uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009,28(Sup 1):3234-3248.

[27] DU K, LI X F, TAO M, et al. Experimental study on acoustic emission (AE) characteristics and crack classification during rock fracture in several basic lab tests [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 133: 104411.

[28] KONG B,WANG E Y,LI Z H,et al. Acoustic emission signals frequency-amplitude characteristics of sandstone after thermal treated under uniaxial compression [J]. Journal of Applied Geophysics, 2017, 136: 190-197.

[29] 王 珂,杨 博.断裂力学[M].徐州:中国矿业大学出版社,2018.
WANG Ke, YANG Bo. Fracture mechanics [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2018.

[30] 吴顺川,甘一雄,任 义,等.基于RA与AF值的

声发射指标在隧道监测中的可行性[J].工程科学学报,2020,42(6):723-730.
WU Shunchuan, GAN Yixiong, REN Yi, et al. Feasibility of acoustic emission indices based on RA and AF values in tunnel monitoring [J]. Journal of Engineering Science,2020,42(6):723-730.

[31] AGGELIS D G. Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters [J]. Mechanics Research Communications, 2011, 38(3): 153-167.

[32] JCMS-III B5706. Monitoring method for active cracks in concrete by acoustic emission [S]. Tokyo: Federation of Construction Material Industries, 2003.

[33] 孙杰豪,郭保华,田世轩,等.基于声发射特征参数的砂岩节理直剪破坏特征试验研究[J].岩土力学,2024,45(增1):167-177.
SUN Jiehao, GUO Baohua, TIAN Shixuan, et al. Experimental study on direct shear failure characteristics of sandstone joints based on acoustic emission parameters [J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(Sup 1):167-177.

[34] 徐启钟,朱泽奇.基于声发射RA和AF的玄武岩水-力耦合破裂特征研究[J].水电能源科学,2022,40(9):181-194.
XU Qizhong, ZHU Zeqi. Study on water-mechanical coupling fracture characteristics of basalt based on acoustic emission RA and AF [J]. Water Resources and Power,2022,40(9):181-194.

[35] GUTENBER B R C F. Frequency of earthquakes in California [J]. Bulletin of the Seismological Society of America,1944,34(4):185-198.

[36] RAO M, LAKSHMI K J P. Analysis of *b*-value and improved *b*-value of acoustic emissions accompanying rock fracture [J]. Current Science, 2005: 1577-1582.

[37] SAGASTA F, ZITTO M E, PIOTRKOWSKI R, et al. Acoustic emission energy *b*-value for local damage evaluation in reinforced concrete structures subjected to seismic loadings [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 102: 262-277.

[38] 刘善琪,李永兵,田会全,等.影响*b*值计算误差的Monte Carlo实验研究[J].地震,2013,33(4):135-144.
LIU Shanqi, LI Yongbing, TIAN Huiquan, et al. Monte Carlo experimental study on factors affecting *b*-value calculation error [J]. Earthquake, 2013, 33(4):135-144.

[39] 陈东升,纪洪广,付　桢.基于声发射*b*值演化的脆性岩石裂纹起裂应力评价方法[J].金属矿山,2024(3):60-77.
CHEN Dongsheng, JI Hongguang, FU Zhen. Method for evaluating crack initiation stress of brittle rock based on acoustic emission *b*-value evolution [J]. Metal Mine,2024(3):60-77.

[40] 赵小平,陈淑芬.基于声发射振幅分布的裂隙岩体破坏演化过程[J].岩石力学与工程学报,2015,34(增1):3012-3027.
ZHAO Xiaoping, CHEN Shufen. Fracture evolution process of fractured rock mass based on acoustic emission amplitude distribution [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Sup 1):3012-3027.

[41] AKI K. Maximum likelihood estimate of *b* in the formula log$N$=a-bM and its confidence limits [J].Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 1965, 43: 237-249.

（责任编辑　宋　爽）