

# 含Y型组合节理花岗岩单轴压缩破坏机理及声发射特征

张鹏海, 马庆山, 刘溪鹤, 杨天鸿  
(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 利用劈裂法在花岗岩试件中预制不同倾角的Y型组合节理,进行单轴压缩实验,分析组合节理倾角对破坏模式、峰值强度、表面变形场、声发射能量释放特征的影响,探究不同破坏模式下的破坏机理。实验结果表明:1)含Y型组合节理岩石随节理倾角变化呈现整体破坏、楔形体弹射破坏和沿主节理面破坏三种主要模式;2)组合节理夹角、主节理倾角均与岩石强度具有负相关关系;3)破坏模式从整体破坏转变到弹射破坏、沿主节理破坏时,滑移变形集中区域由次节理向主节理转变,AE高能级事件诱发原因由主、次节理压密及滑移错动向主节理压密及滑移错动转变;4)随主节理倾角的不断增大,主节理面上释放的能量更高、能量的分布更加不均匀。

**关键词:** 组合节理;破坏模式;强度;变形场;声发射

中图分类号: TD 459 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)04-0564-09

## Uniaxial Compression Failure Mechanism and Acoustic Emission Characteristics of Granite with Y-Type Composite Joints

ZHANG Peng-hai, MA Qing-shan, LIU Xi-ge, YANG Tian-hong

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHANG Peng-hai, E-mail: zhangpenghai@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** Y-type composite joints with different inclination angles are prefabricated in granite specimens using the splitting method, and uniaxial compression experiments are conducted. The effects of the inclination angle of the composite joint on the failure mode, peak strength, surface deformation field, and acoustic emission energy release characteristics are analyzed, and the failure mechanism under different failure modes is explored. The experimental results show that: 1) Rock with Y-shaped composite joints exhibit three main failure modes: overall failure, wedge ejection failure, and failure along the main joint surface, which vary with joint inclination; 2) The angle of composite joints and the inclination angle of main joints have a negative correlation with rock strength; 3) When the failure mode transitions changes from overall failure to ejection failure and failure along the main joint, the concentrated slip deformation zone shifts from the secondary joint to the main joint, and the high-energy AE events induce a transition from the main and secondary joint compaction and slip dislocation to the main joint compaction and slip dislocation; 4) As the inclination angle of the main joint increases, the energy released on the main joint surface is higher and the distribution of energy is more uneven.

**Key words:** composite joints; failure mode; strength; deformation field; acoustic emission(AE)

岩爆是一种因累积弹性应变能急剧释放而诱发的突发性地质灾害。由于发生过程的不确定性及其后果的严重性,岩爆已成为国内外深部地下工程普遍关注的难题<sup>[1]</sup>。例如,锦屏二级水电站引

收稿日期: 2022-12-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41941018)。

作者简介: 张鹏海(1987-),男,辽宁沈阳人,东北大学副教授;杨天鸿(1968-),男,辽宁抚顺人,东北大学教授,博士生导师。

水隧洞施工过程中发生了百余次不同等级的岩爆,绝大多数岩爆的发生位置受到节理裂隙的控制<sup>[2]</sup>.不同节理裂隙组合状态下岩体的破坏模式及力学特征具有明显的差异,因此,研究组合节理角度与岩体破坏模式、力学特征间的关系具有十分重要的理论与工程意义.

国内外众多学者对含天然节理岩石及人工预制节理的相似材料开展了一系列室内实验工作.如:刘红岩等<sup>[3]</sup>采用相似材料模型实验,设置不同的节理倾角、节理贯通度、节理条数等因素,探究节理几何特征对岩石变形、强度及破坏模式的影响规律;Nasseri等<sup>[4]</sup>和Niandou等<sup>[5]</sup>开展页岩三轴实验,发现页岩层节理倾角和围压是影响试件破坏形式的主要因素;Wong等<sup>[6]</sup>、Bobet等<sup>[7]</sup>分析了试样变形破坏的宏观存在机制及影响因素,主要包括裂隙倾角、裂隙间距、连续性及张开性等,并未定量分析;李宏哲等<sup>[8]</sup>选用含穿切节理大理岩开展常规三轴压缩实验,试件破坏模式、变形特征、强度特征主要取决于节理面与最大主应力夹角大小;张波等<sup>[9]</sup>以相似材料制作含交叉裂隙岩石试件进行单轴压缩实验,探究了主裂隙及次裂隙多角度变化下对岩石破坏及强度特征的影响.

上述研究主要针对含贯通节理岩石的力学实验,分析宏观力学行为,在细观力学特性方面,国内外学者以数值模拟、声发射为手段,开展了一系列研究工作.Latha等<sup>[10]</sup>采用有限差分软件研究了节理倾角、节理密度和围压对节理岩体的影响,并分析了节理岩体的细观位移场;Lee等<sup>[11]</sup>采用PFC2D软件对含有单节理与双节理的岩体试样进行数值模拟,探究了节理岩体破坏过程中裂纹的扩展机理;Moradian等<sup>[12-13]</sup>将声发射信号与岩石的应力-应变曲线对比分析,评估岩石节理剪切实验中的损伤规律;王刚等<sup>[14]</sup>采用完整及非贯通节理花岗岩开展了剪切实验,分析声发射信号特征规律,并提出了一种利用声发射信号特征及其关键信息点预判花岗岩剪切破坏的方法;曹吉胜等<sup>[15]</sup>对含预制节理岩石进行三轴加卸载实验,分析节理岩石在卸荷条件下的强度特征、变形破坏机理及声发射特征.此外,许多学者利用概率统计学理论对含复杂节理分布的岩体进行研究<sup>[16-18]</sup>.

综上所述,学者们大多数以单组、多组平行,含X型交叉节理岩石作为研究对象,针对含Y型组合节理岩石特征规律的研究较少,而地下隧道

工程中Y型组合节理诱发的冒顶事故频发,比如关键块体失稳,因此本文选用含Y型组合节理岩石进行单轴压缩实验,分析组合节理倾角对岩石破坏模式、峰值强度及表面变形场、声发射能量释放特征的影响,为实际工程应用提供理论帮助.

## 1 试件制备及实验方案

### 1.1 试件制备

利用巴西劈裂方法在长×宽×高为100 mm×50 mm×200 mm的完整花岗岩试样(单轴抗压强度为169 MPa、基本摩擦角为34.15°、内摩擦角41.72°)上预制Y型组合节理,如图1所示.组合节理中包括1条贯通试件的主节理和1条未贯通试件的次节理,2条节理的倾角分别为 $\theta_1$ 和 $\theta_2$ (图2),倾角组合( $\theta_1+\theta_2$ )分别为30°+50°,35°+45°,40°+50°,45°+45°,45°+55°,50°+50°,每种倾角组合制备3个,共计18个试件.传感器布置及加载方式如图3所示.

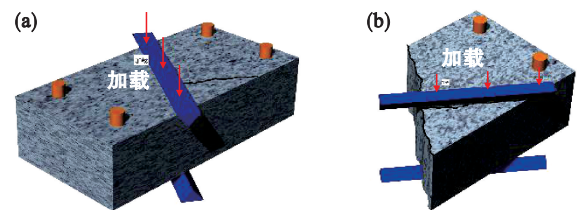


图1 组合节理预制过程

Fig. 1 Composite joint prefabrication process  
(a)—主节理; (b)—次节理.

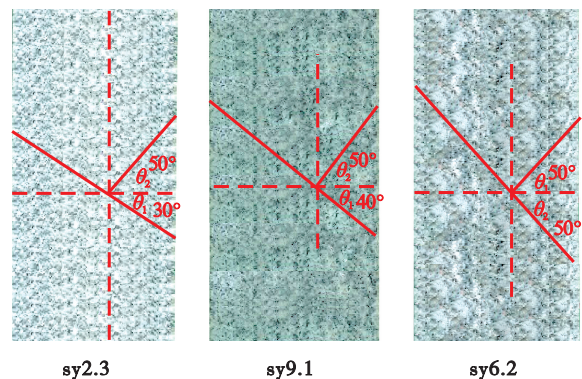


图2 含Y型组合节理岩石(选取3个典型试件)

Fig. 2 Rock mass with Y-type composite joints  
(three typical specimens selected)

### 1.2 实验方案

如图4所示,实验系统包括佳能EOS 5D4高清摄影机、TAW-2000kN型微机控制电液伺服压力机以及PCI-II型声发射监测系统.实验前在试件表面喷涂散斑用于获取实验过程中试件表面位移场及应变场.实验过程采用荷载加载,加载

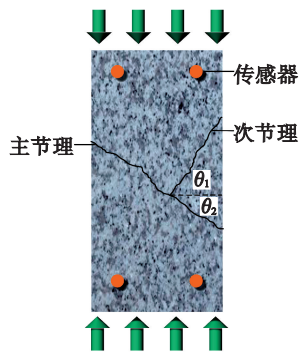


图 3 传感器布置及加载方式

Fig. 3 Sensor layout and loading mode

速率为 0.5 kN/s. 声发射监测系统参数设置为:前置增益 40 dB; 阈值 40 dB; 预触发 256  $\mu$ s; 采样频率  $1 \times 10^6$  次/s. 8 个 Nano30 型声发射传感器探头分别布置在距试件顶、底及侧面 20 mm 处(图 3). 表 1 为完整花岗岩试件物理力学参数.

表 1 岩石物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock

弹性模量 GPa	泊松比	抗压强度 MPa	内聚力 MPa	抗拉强度 MPa	内部摩擦角/( $^{\circ}$ )	基本摩擦角/( $^{\circ}$ )
52.05	0.27	169.59	6.53	6.37	41.72	34.15

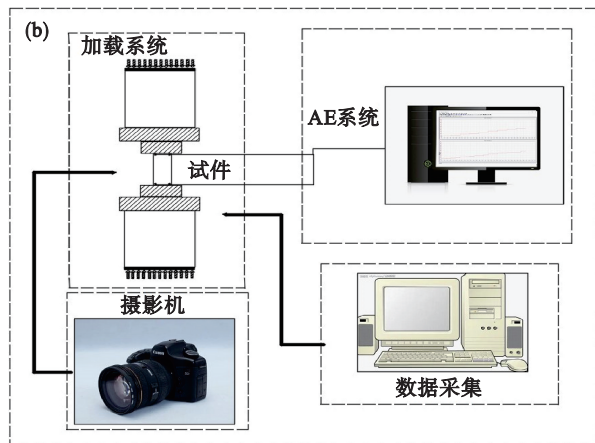


图 4 实验系统

Fig. 4 Testing system

(a)—实验现场; (b)—实验设备示意图.

## 2 实验结果分析

### 2.1 不同组合节理倾角下破坏模式

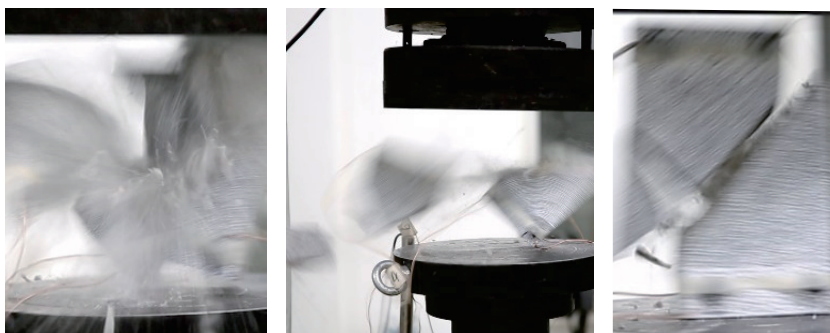
通过高清摄影机捕捉岩石破坏瞬间,以岩石发生破坏失稳的区域为依据,将含 Y 型组合节理岩石的破坏模式分为整体破坏、楔形体弹射破坏和沿主节理面破坏 3 种(图 5).

整体破坏(图 5a)多出现在组合节理角度为  $30^{\circ}+50^{\circ}$  时,破坏现象猛烈,破坏瞬间岩石碎裂并向四周快速飞出,宏观裂纹以竖向拉裂纹为主,破坏后岩石相对破碎,抗压强度主要集中于 102~

124 MPa.

楔形体弹射破坏(图 5b)多出现在组合节理角度为  $30^{\circ}+60^{\circ}$ ,  $45^{\circ}+45^{\circ}$  时,破坏时楔形体首先向外飞出,楔形体卸荷使节理交叉点处发生应力集中,导致下部岩块出现递进式破坏,破坏后岩石相对完整,抗压强度主要集中于 35.55~50.65 MPa.

沿主节理面破坏(图 5c)多出现在组合节理角度为  $50^{\circ}+50^{\circ}$ ,  $45^{\circ}+55^{\circ}$  时,破坏时主节理面上部岩块沿主节理面滑落,破坏后岩块形状完整,抗压强度主要集中于 11.02~37.13 MPa.



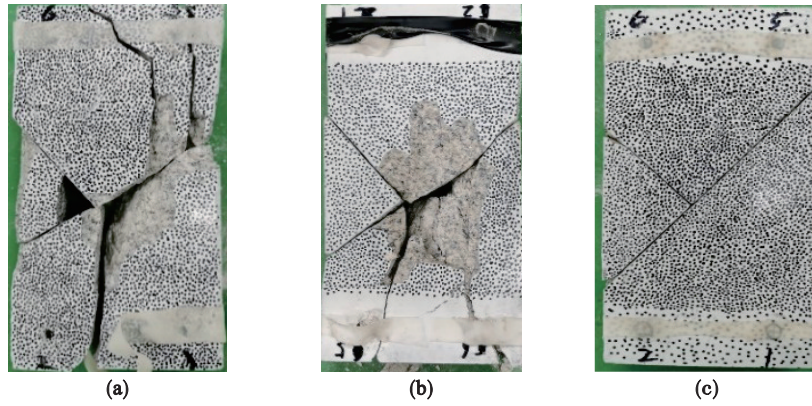


图 5 破坏模式

Fig. 5 Failure mode

(a)—sy2.3-80—整体破坏; (b)—sy9.1-90—弹射破坏; (c)—sy6.2-100—沿主节理破坏.

2.2 不同组合节理倾角下强度特征

由表 2 所示的实验结果可知,在该组实验中单轴抗压强度最高的试件 sy2.3 节理倾角组合为

30°+50°,抗压强度为 121.60 MPa,约为完整试件的 72%,说明组合节理的存在明显降低了岩石的强度.

表 2 岩石单轴抗压强度

Table 2 Uniaxial compressive strength of rock mass

序号	试件	单轴抗压强度	强度折减比	角度/(°)			序号	试件	单轴抗压强度	强度折减比	角度/(°)		
		MPa	%	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_T$			MPa	%	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_T$
1	sy2.1	118.08	30.37	30	50	80	10	sy2.1	102.12	39.78	44	45	90
2	sy2.2	121.60	28.29	30	50	80	11	sy2.2	75.34	55.57	45	45	90
3	sy2.3	113.34	33.17	30	50	80	12	sy2.3	37.13	78.10	45	45	90
4	sy7.1	70.11	58.65	35	45	80	13	sy7.1	47.08	72.23	45	55	100
5	sy7.2	97.87	42.29	35	45	80	14	sy7.2	33.74	80.10	45	55	100
6	sy7.3	111.37	34.33	35	45	80	15	sy7.3	51.33	69.73	45	55	100
7	sy9.1	50.65	70.13	40	50	90	16	sy9.1	31.74	81.28	50	50	100
8	sy9.2	110.72	34.71	40	50	90	17	sy9.2	21.35	87.41	50	50	100
9	sy9.3	35.55	79.04	40	50	90	18	sy9.3	11.02	93.50	50	50	100

注:强度折减比为与完整岩石相比,含 Y 型组合节理岩石的单轴抗压强度降低百分数.

如图 6 及图 7 所示,随着组合节理夹角(两节理倾角之和)自 80° 升高至 100°,试件的平均单轴抗压强度由 105.39 MPa 下降至 32.71 MPa;随着

主节理倾角由 30° 升高至 50°,试件的平均单轴抗压强度由 117.67 MPa 逐渐下降至 21.37 MPa,说明组合节理夹角、主节理倾角均与岩石强度具有负相关关系.

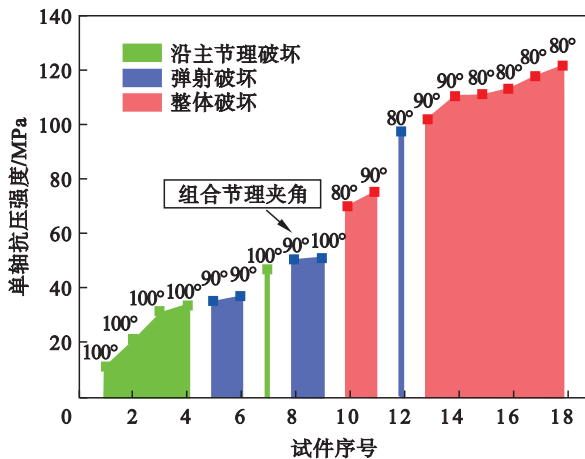


图 6 破坏模式、试件抗压强度与节理角度间的关系

Fig. 6 Relationship between failure mode, compressive strength and joint angle

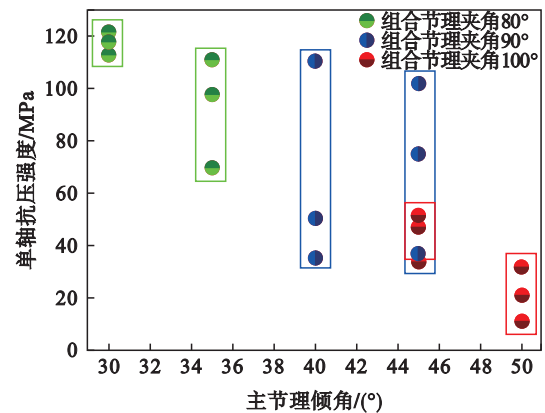


图 7 节理角度与峰值强度关系

Fig. 7 Relationship between joint angle and peak strength

相同轴压下,组合节理夹角及主节理角度越小,节理面上的正应力越大,节理抗剪强度越高,破坏前储存的势能越大,破坏强度也就越高、破坏现象也越剧烈,破坏模式越接近整体破坏.

### 3 不同组合节理倾角下变形特征

本文选取3种破坏模式、组合节理角度的典型试件 sy2.3(30°+50°,整体破坏)、sy9.1(40°+50°,楔形体弹射破坏)、sy6.2(50°+50°,沿主节理破坏)进行试件表面变形特征的描述.采用 Vic-2D 6 软件处理试件表面数字散斑图像获得如图 8~10 所示的试件表面水平位移云图以及最大主应变云图,位移云图中负值代表向左、正值代表向右,应变云图中负值代表压缩、正值代表膨胀.由于预制节理面具有一定粗糙度,沿预制节理滑动时会伴随明显的剪胀现象,即沿预制节理滑动会引起预制节理产生正应变.

对于试件 sy2.3,在低应力水平下,楔形体存在与周围岩块分离的趋势,但楔形体的位移和应变均较小(图 8a 和 8b).随着应力的增加,楔形体和周围岩块的分离趋势显著增加,应变集中分布于次节理(图 8c 和 8d),并开始自主沿节理交叉点处竖向延伸至试样底部(图 8e),其延伸形态与破坏后的宏观裂纹一致.变形场的空间分布表明次节理错

动变形诱发岩块张拉破坏是导致试件破坏的原因.

对于试件 sy9.1,在加载过程中应变集中区域始终较为均匀地沿主节理分布,说明试件的变形以主节理整体滑移为主(图 9a~9e);自 0.4σ 应力水平开始,次节理两侧的岩块开始出现分离趋势,但直至试件破裂,次节理两侧的位移差及其上应变均远小于主节理,说明主节理错动变形诱发楔形体沿主节理滑出,进而引起其余岩块破坏失稳是导致试件破坏的原因.

对于试件 sy6.2,在加载过程中应变集中区域不均匀地沿主节理分布,说明试件的变形以主节理的不均匀滑移为主,主节理的顶、底端是应变集中程度最高的区域,次节理两侧的位移差及其上应变均远小于主节理(图 10a~10e),说明主节理错动变形是导致试件破坏的原因.

### 4 基于声发射特征的破坏机制分析

#### 4.1 声发射事件的时空演化

图 11~13 为试件 sy2.3, sy9.1, sy6.2 的声发射事件时空分布图,将声发射事件根据应力增量进行分段,每阶段应力增量  $\Delta\sigma=0.25\sigma$  ( $\sigma$  为单轴抗压强度).不同颜色(详见色条)代表不同能级,将能级分布范围中前 20% 定义为高能级,后 45% 定义为中能级,中间的 35% 定义为中能级<sup>[19]</sup>.

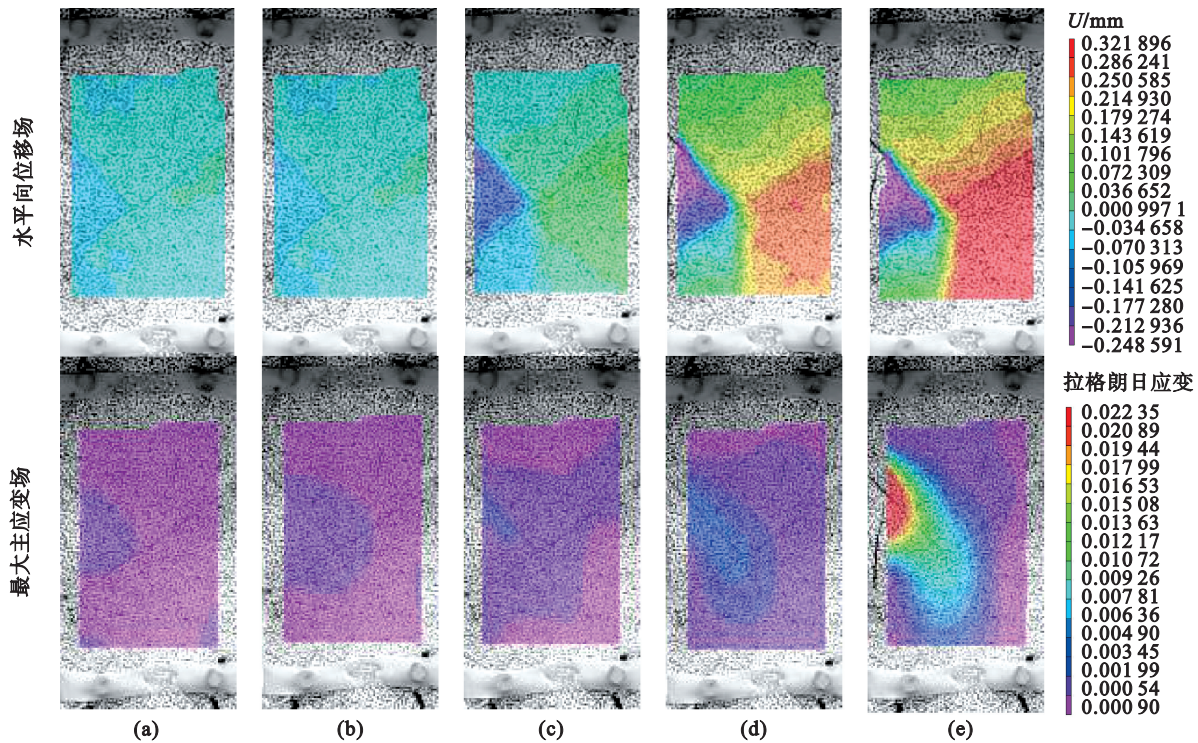


图 8 整体破坏模式下变形场的演化过程(sy2.3)

Fig. 8 Evolution process of deformation field under overall failure mode (sy2.3)

(a)— $0.2\sigma$ ; (b)— $0.4\sigma$ ; (c)— $0.6\sigma$ ; (d)— $0.8\sigma$ ; (e)— $\sigma$ .

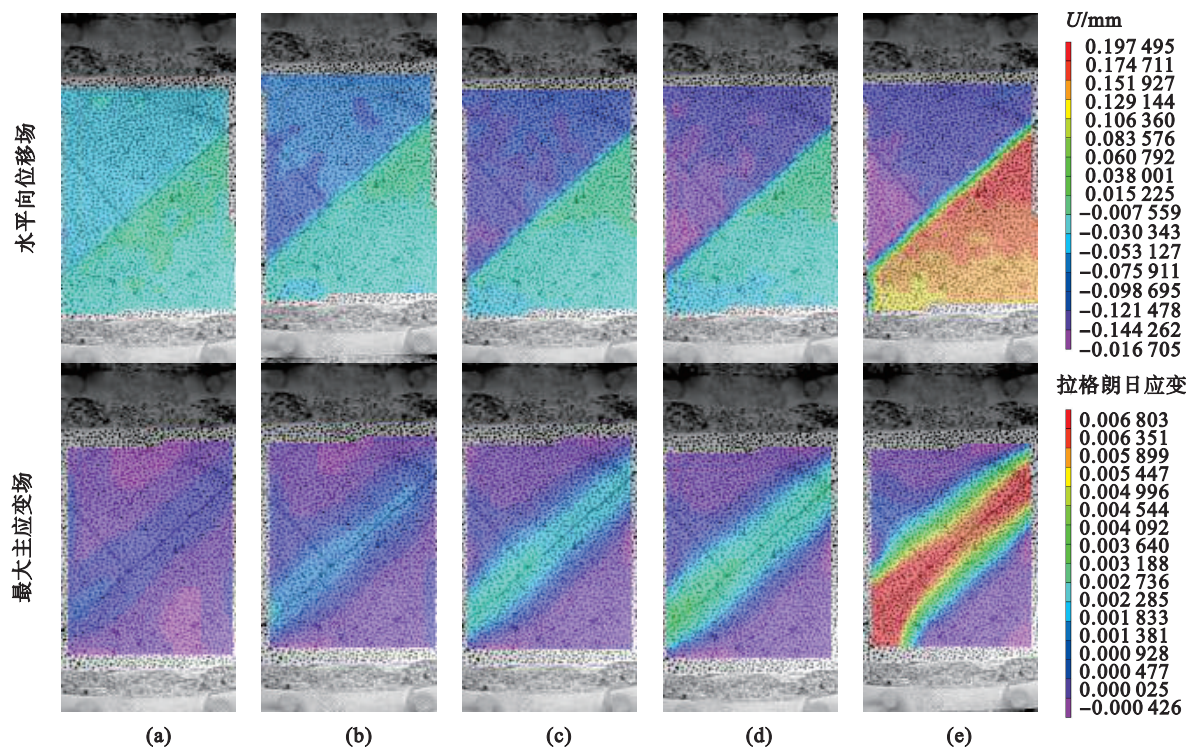


图 9 弹射破坏模式下变形场的演化过程(sy9.1)

Fig. 9 Evolution process of deformation field under ejection failure mode (sy9.1)

(a)— $0.2\sigma$ ; (b)— $0.4\sigma$ ; (c)— $0.6\sigma$ ; (d)— $0.8\sigma$ ; (e)— $\sigma$ .

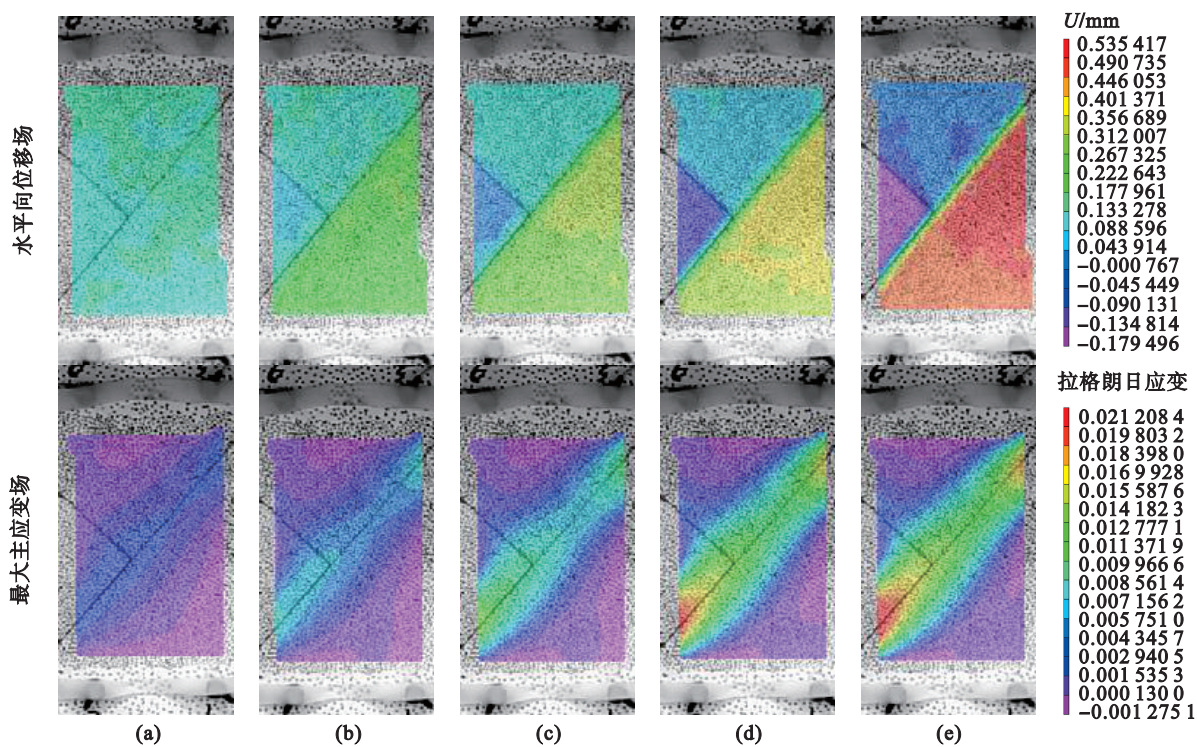


图 10 沿主节理破坏模式下变形场的演化过程(sy6.2)

Fig. 10 Evolution process of deformation field under failure mode along main joint (sy6.2)

(a)— $0.2\sigma$ ; (b)— $0.4\sigma$ ; (c)— $0.6\sigma$ ; (d)— $0.8\sigma$ ; (e)— $\sigma$ .

如图 11 所示,对于发生整体破坏的岩石 (sy2.3),在中、低应力水平( $0\sim 0.75\sigma$ )AE(acoustic emission)事件整体分布较为分散,但 AE 高能级事件主要聚集于主、次节理面附近,且随着应力

水平的提高,AE 高能级事件在次节理上的分布范围逐渐向主、次节理交叉点方向扩展,对比图 8a~8d 可推测此阶段岩石主、次节理压密及滑移错动是诱发 AE 高能级事件的主要原因;继续加

载直至破坏( $0.75\sim 1\sigma$ ), AE 高能级事件在主、次节理面附近的聚集特征明显降低,说明主、次节理对岩石破裂的主导作用受到了抑制,对比图 8e 可

推测此阶段岩石主节理面的低倾角使其可在荷载作用下实现自锁,而次节理则是受到主节理下方岩块的约束。

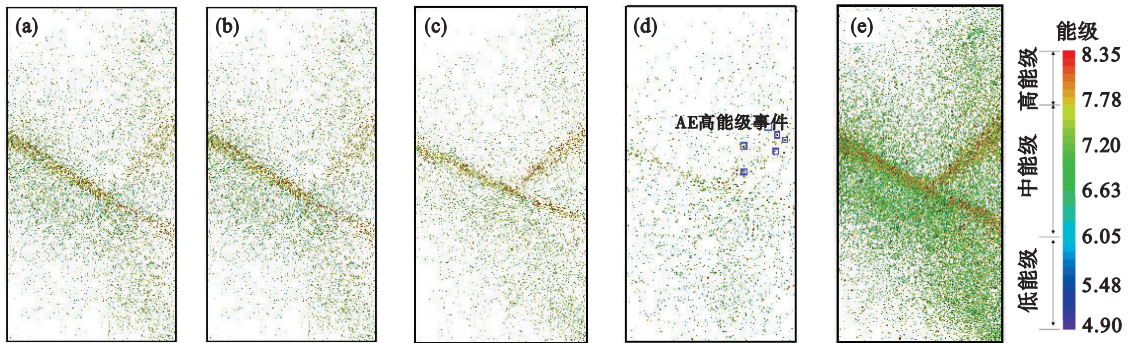


图 11 整体破坏 AE 事件时空分布(sy2.3)

Fig. 11 Temporal and spatial distribution of overall failure AE events(sy2.3)

(a)— $0\sim 0.25\sigma$ ; (b)— $0.25\sim 0.5\sigma$ ; (c)— $0.5\sim 0.75\sigma$ ; (d)— $0.75\sim 1\sigma$ ; (e)— $0\sim 1\sigma$ .

注:框选的 AE 事件为能级大于 8 的 AE 高能级事件.下同

如图 12 所示,发生楔形体弹射破坏的岩石 (sy9.1), AE 高能级事件主要聚集在主节理面附近,主、次节理交叉点左侧 AE 高能级事件个数高于右侧,并且从 AE 事件定位结果中难以识别出

次节理位置,这与图 9 所示的变形场具有一致性,说明主节理的压密及错动变形是诱发 AE 高能级事件的主要原因,也是诱发楔形体弹射的原因。

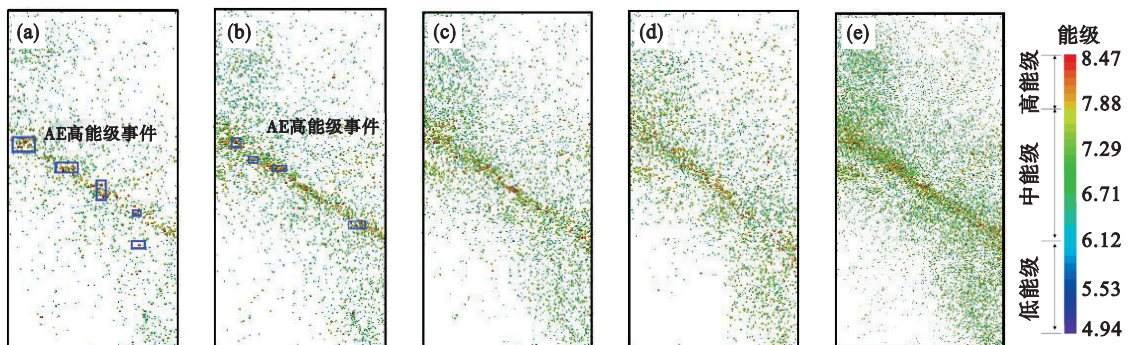


图 12 弹射破坏 AE 事件时空分布(sy9.1)

Fig. 12 Temporal and spatial distribution of ejection failure AE events(sy9.1)

(a)— $0\sim 0.25\sigma$ ; (b)— $0.25\sim 0.5\sigma$ ; (c)— $0.5\sim 0.75\sigma$ ; (d)— $0.75\sim 1\sigma$ ; (e)— $0\sim 1\sigma$ .

如图 13 所示,发生沿主节理面破坏的岩石 (sy6.2), AE 高能级事件簇状分布在预制节理交叉点及其左侧主节理附近,对比图 10 所示的变形场可发现, AE 高能级事件空间分布与主节理变形的空间分布并不一致:1)楔形体下方主节理附近 AE 高能级事件极少,而对应位置的变形量则很大,推测原因为高倾角的主、次节理同时存在使该区域节理剪胀刚度显著降低,导致其错动变形过程中不易诱发起伏体的断裂;2) AE 高能级事件集中分布区对应的变形量反而相对较小,推测原因为节理面上若干关键起伏体抑制了节理错动变形,但这些起伏体错动过程中却可以诱发大量 AE 高能级事件。

#### 4.2 声发射能量密度分布

AE 事件能量密度 (event energy density, EED) 被广泛用于解释岩石的破坏过程,可由式 (1) 表达:

$$EED = \begin{cases} \frac{\sum_{j=1}^{n_i} E_j}{\pi r_s^2 h_s}, & n_i \geq 1, \\ 0, & n_i = 0. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $E_j$  是搜索块  $i$  中第  $j$  个 AE 事件的能量; $r_s$  是搜索半径; $h_s$  是搜索宽度; $n_i$  是第  $i$  个搜索块。

图 14 为岩石能量密度云图,在整体破坏模式下, AE 能量释放沿主节理和次节理分布,次节理能量密度远高于主节理 (图 14a), 与应变集中位置一致 (图 8e); 弹射破坏模式下, AE 能量释放主

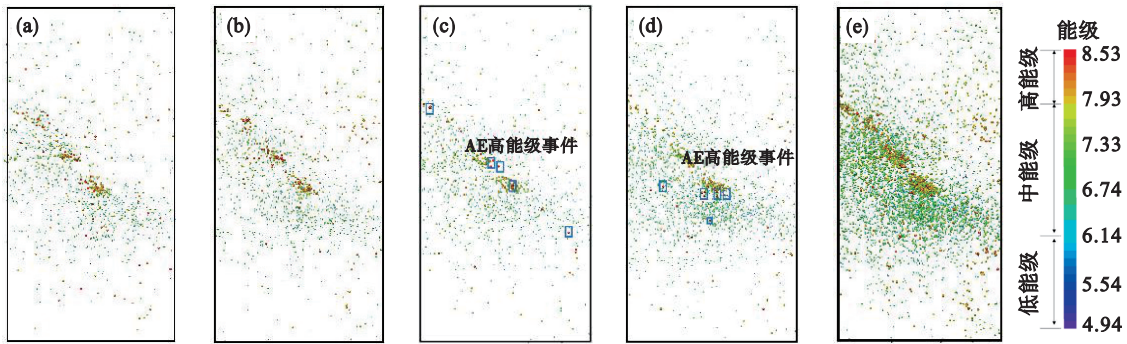


图 13 沿主节理破坏 AE 事件时空分布 (sy6.2)

Fig. 13 Temporal and spatial distribution of along the main joint failure AE events (sy6.2)

(a)—0~0.25  $\sigma$ ; (b)—0.25~0.5  $\sigma$ ; (c)—0.5~0.75  $\sigma$ ; (d)—0.75~1  $\sigma$ ; (e)—0~1  $\sigma$ .

要沿主节理分布且楔形体一侧的能量释放远小于另一侧(图 14b);沿主节理破坏模式下 AE 能量释放分布在组合节理交叉点附近,与主节理面上应变较低的区域一致。

随主节理倾角的不断增高,主节理面的自稳

定性能及剪胀刚度不断降低,剪切强度更加受控于若干关键起伏体.在荷载作用下,主节理面更易发生剪切错动,剪应力在节理面上的分布更加不均匀,导致主节理面上释放的能量更高、能量的分布更加不均匀。

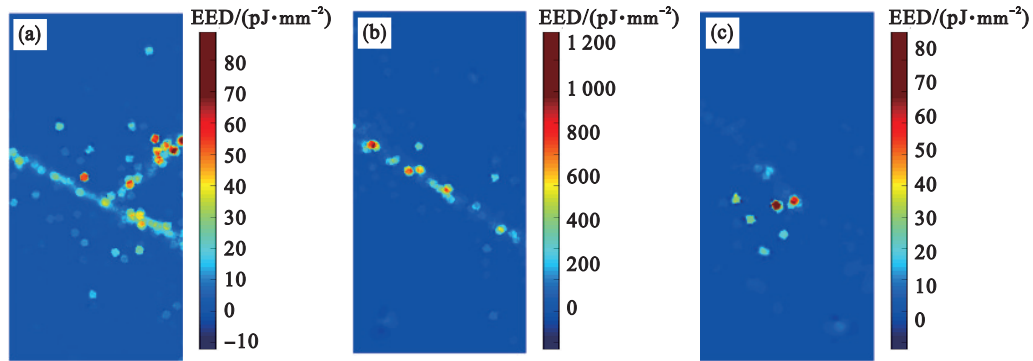


图 14 岩石能量密度云图

Fig. 14 Cloud chart of rock energy density

(a)—sy2.3; (b)—sy9.1; (c)—sy6.2.

## 5 结 论

1) 随着 Y 型组合节理夹角的增大,岩石的破坏呈现整体破坏、楔形体弹射破坏和沿主节理面破坏三种模式,组合节理夹角、主节理倾角均与岩石强度具有负相关关系。

2) 整体破坏模式下,次节理错动变形诱发岩块张拉破坏是导致岩石破坏的原因;楔形体弹射破坏模式下,主节理错动变形诱发楔形体沿主节理滑出是导致岩石破坏的原因;剪切滑移破坏模式下,主节理错动变形是导致岩石破坏的原因。

3) 发生整体破坏的岩石,主、次节理压密及滑移错动是诱发 AE 高能级事件的主要原因;发生楔形体弹射破坏及沿主节理面破坏的岩石,主节理的压密及错动变形是诱发 AE 高能级事件的主要原因。

4) 随主节理倾角的不断增大,主节理面更易

发生剪切错动,剪应力在节理面上的分布更加不均匀,导致主节理面上释放的能量更高、能量的分布更加不均匀。

### 参考文献:

[1] 李夕兵,周健,王少锋,等.深部固体资源开采评述与探索[J].中国有色金属学报,2017,27(6):1236-1262.  
(Li Xi-bing, Zhou Jian, Wang Shao-feng, et al. Review and practice of deep mining for solid mineral resources [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27(6): 1236-1262.)

[2] 徐士良.基于工程岩体起裂判据的岩爆破坏区研究[J].地下空间与工程学报,2017,13(5):1407-1413.  
(Xu Shi-liang. Study on rockburst failure zone based on crack initiation criterion of in-situ rock mass [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2017, 13(5): 1407-1413.)

[3] 刘红岩,邓正定,王新生,等.节理岩体动态破坏的 SHPB 相似材料实验研究[J].岩土力学,2014,35(3):659-665.  
(Liu Hong-yan, Deng Zheng-ding, Wang Xin-sheng, et al. Similar material test study of dynamic failure of jointed rock mass with SHPB [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35

- (3):659-665.)
- [ 4 ] Nasser M H, Rao K S, Ramamurthy T. Failure mechanism in schistose rocks [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(3/4): 219.e1-219.e15.
- [ 5 ] Niandou H, Shao J F, Henry J P, et al. Laboratory investigation of the mechanical behaviour of Tournemire shale [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(1):3-16.
- [ 6 ] Wong L N Y, Einstein H H. Crack coalescence in molded gypsum and Carrara marble; part 1. macroscopic observations and interpretation [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2009, 42(3):475-511.
- [ 7 ] Bobet A, Einstein H H. Fracture coalescence in rock-type materials under uniaxial and biaxial compression [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1998, 35(7):863-888.
- [ 8 ] 李宏哲, 夏才初, 王晓东, 等. 含节理大理岩变形和强度特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2118-2123.  
(Li Hong - zhe, Xia Cai - chu, Wang Xiao - dong, et al. Experimental study on deformation and strength properties of jointed marble specimens [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(10):2118-2123.)
- [ 9 ] 张波, 李术才, 杨学英, 等. 含交叉裂隙岩体相似材料试件力学性能单轴压缩试验[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3674-3679.  
(Zhang Bo, Li Shu - cai, Yang Xue - ying, et al. Uniaxial compression tests on mechanical properties of rock mass similar material with cross - cracks [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(12):3674-3679.)
- [ 10 ] Latha G M, Garaga A. Elasto-plastic analysis of jointed rocks using discrete continuum and equivalent continuum approaches [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 53(5):56-63.
- [ 11 ] Lee H, Jeon S. An experimental and numerical study of fracture coalescence in pre-cracked specimens under uniaxial compression [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2011, 48(6):979-999.
- [ 12 ] Moradian Z A, Einstein H H, Ballivy G. Detection of cracking levels in brittle rocks by parametric analysis of the acoustic emission signals [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(3):785-800.
- [ 13 ] Moradian Z A, Ballivy G, Rivard P, et al. Evaluating damage during shear tests of rock joints using acoustic emissions [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(4):590-598.
- [ 14 ] 王刚, 宋磊博, 刘夕奇, 等. 非贯通节理花岗岩剪切断裂力学特性及声发射特征研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(6): 1533-1545.  
(Wang Gang, Song Lei-bo, Liu Xi-qi, et al. Shear fracture mechanical properties and acoustic emission characteristics of discontinuous jointed granite [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(6):1533-1545.)
- [ 15 ] 曹吉胜, 戴前伟, 马德鹏. 预制节理岩体卸荷损伤破坏机理及声发射特征试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(6):1465-1471.  
(Cao Ji - sheng, Dai Qian - wei, Ma De - peng. Experiment research on damage mechanism and acoustic emission characteristics of rock mass with prefabricated joints under unloading condition [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2018, 49(6):1465-1471.)
- [ 16 ] Yamaji A. Genetic algorithm for fitting a mixed Bingham distribution to 3D orientations; a tool for the statistical and paleostress analyses of fracture orientations [J]. *Island Arc*, 2016, 25(1):72-83.
- [ 17 ] Wu Q, Kulatilake P H S W, Tang H M. Comparison of rock discontinuity mean trace length and density estimation methods using discontinuity data from an outcrop in Wenchuan area, China [J]. *Computers and Geotechnics*, 2011, 38(2):258-268.
- [ 18 ] Watson G S. Analysis of dispersion on a sphere [J]. *Geophysical Supplements to the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1956, 7(4):153-159.
- [ 19 ] 张鹏海. 基于声发射时序特征的岩石破裂前兆规律研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2015.  
(Zhang Peng - hai. Study on precursory law prior to rock failure based on acoustic emission time order [D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.)