

断续节理产状对砂岩破坏特征影响的真三轴试验研究

蒋剑青^{1,2,3}, 罗敏华¹, 胡诗红¹, 柳志灏¹

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁, 530004; 2. 广西大学 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西 南宁, 530004;
3. 广西大学 广西岩溶区水安全与智慧调控工程研究中心, 广西 南宁, 530004)

摘要: 为揭示深埋工程中断续节理岩体的破坏机制, 开展了含不同节理产状(倾角和走向)断续节理砂岩的真三轴压缩试验, 并利用声发射(acoustic emission, 简称 AE)系统实时监测试样破坏过程, 系统分析了节理产状对砂岩破坏形态、强度、变形特性、声发射演化特征及特征应力的影响。研究结果表明: 真三轴应力条件下, 当断续节理走向与 σ_2 平行时, 节理倾角为 0° 、 30° 和 45° 的试样出现拉剪混合破坏, 节理倾角为 60° 和 90° 的试样分别出现滑移剪切破坏和共轭剪切破坏; 当断续节理走向与 σ_3 平行时, 含不同节理倾角试样的破坏模式均为外部板裂内部剪切破坏, 说明节理走向对试样破坏模式的影响大于节理倾角。试样强度、起裂应力、损伤应力、弹性模量和峰值应变均随着节理倾角的增加而呈现先降低后增加的趋势。节理走向与 σ_2 平行的试样强度、起裂应力、损伤应力和峰值应变低于节理走向与 σ_3 平行的试样, 而节理走向对试样弹性模量的影响不大。此外, AE 平静期持续时间和 AE 高频信号比例随着节理倾角的增加而先降低后增加。当断续节理走向与 σ_2 平行时, 试样破坏过程的 AE 累计撞击数随节理倾角的增加而先降低后增加再降低; 当断续节理走向与 σ_3 平行时, 试样破坏过程的 AE 累计撞击数随节理倾角的增加而先增加后降低。该研究结果为深埋工程的断续节理岩体破坏机制分析及工程地质灾害防治提供了科学依据。

关键词: 天然岩体; 断续节理; 节理产状; 真三轴试验; 破坏特征

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2025)10-3077-17

True triaxial test study on the influence of intermittent joint occurrence on sandstone failure characteristics

JIANG Jian-qing^{1,2,3}, LUO Min-hua¹, HU Shi-hong¹, LIU Zhi-hao¹

(1. School of Civil and Architecture Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;

2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;

3. Guangxi Provincial Engineering Research Center of Water Security and Intelligent Control for Karst Region, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

Abstract: To reveal the failure mechanism of intermittent jointed rock in deep-buried engineering, true triaxial compression tests of intermittent jointed sandstone with different joint occurrences (dip and strike) were carried out, and acoustic emission (AE) system was used to monitor the failure process of specimens in real-time. The influences of joint occurrence on sandstone failure form, strength, deformation characteristics, AE evolution characteristics, and characteristic stresses were systematically analyzed. The results show that under the condition of true triaxial stress, when the intermittent joint strike is parallel to σ_2 , the specimens with joint dip angles of 0° , 30° , and 45° exhibit tensile-shear mixed failure, while the specimens with joint dip angles of 60° and 90° exhibit slipping-shear failure and conjugate shear failure, respectively. When the intermittent joint strike is parallel to σ_3 , the failure mode of the samples with different joint angles is "internal shear and external spalling", indicating that the joint strike has a greater influence on the failure mode of the specimens than the joint dip angles. The strength, crack initiation stress, damage stress, elastic modulus, and peak strain of specimens all decrease first and then increase with the increase of joint dip angle. The strength, initiation stress, damage stress, and peak strain of the specimens with joint strike parallel to σ_2 are lower than those with joint strike parallel to σ_3 , and

收稿日期: 2024-11-08

录用日期: 2025-02-05

基金项目: 国家自然科学基金(No. 52269023); 广西科技基地和人才专项(No. AD22080030); 广西研究生教育创新计划项目(No. YCBZ2023047)。This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52269023), the Guangxi Science and Technology Project (AD22080030) and the Innovation Project of Guangxi Graduate Education (YCBZ2023047).

第一作者简介: 蒋剑青, 男, 1988年生, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事水工结构安全方面的研究。E-mail: jiangqing880201@163.com

通讯作者: 胡诗红, 男, 1996年生, 博士研究生, 主要从事水工结构安全方面的研究。E-mail: 2210403005@st.gxu.edu.cn

the influence of joint strike on the elastic modulus of specimens is minimal. In addition, the duration of the AE quiet period and the proportion of AE high-frequency signal during this period decrease first and then increase with the increase of joint dip angle. When the intermittent joint strike is parallel to σ_2 , the cumulative number of AE hits during the failure process of the specimen decreases first, then increases, and then decreases with the increase of the joint dip angle. When the intermittent joint strike is parallel to σ_3 , the cumulative number of AE hits during the failure process of the specimen increases first and then decreases with the increase of the joint dip angle. The research results provide a scientific basis for the failure mechanism analysis of intermittent jointed rock mass and the prevention of engineering geological disasters in deep-buried engineering.

Keywords: natural rock mass; intermittent joints; joint occurrence; true triaxial test; failure characteristics

1 引言

天然岩体通常包含有节理、断层和破碎带等不同尺寸的结构面^[1]。结构面会极大提高岩体的空间变异性,使能量在深埋岩体中呈非连续和非均匀分布,导致岩石破坏的孕育和发生过程更加复杂。节理,也称为裂隙,是岩体受力断裂后两侧岩块没有显著位移的小型结构面。相较于断层和破碎带等大型结构面,节理具有尺寸小、隐蔽性好、分布广、随机性强和连续性差等特点,是地下岩石工程建设中最为普遍的结构面型式。节理对工程安全具有控制作用,尤其在深埋工程中,节理破坏岩体的完整性并降低岩体的承载力,进而提高岩体发生破坏的风险。此外,节理的存在会增加高应力岩体释放能量的“窗口”,进而导致发生更大规模和更剧烈的岩石破坏^[2-4]。根据其在岩体中的贯通程度,节理可分为贯穿节理和非贯穿节理^[5]。其中,多条非贯穿节理的组合被称为断续节理。断续节理在岩体中相互作用,增强了岩体的非均质性、非连续性和各向异性,导致岩体破坏机制更复杂。因此,开展断续节理岩石破坏特征研究可为进一步揭示地下工程节理裂隙岩体的破坏机制和保障地下工程安全稳定提供科学依据。

室内试验是研究断续节理岩体破坏机制的重要手段之一^[6]。由于相似材料制备的试样具有力学特性可重复性强和尺寸可精确控制的优势,国内外学者采用石膏^[7-8]、水泥砂浆^[9]和树脂^[10]等相似材料,开展了大量断续节理岩体的试验研究,并发现节理倾角对断续节理岩体破坏特征的影响较为显著。在岩体强度方面,赵修成等^[11]发现断续节理试样的单轴抗压强度随节理倾角的增大呈U型变化;Han等^[12]对断续节理类岩体进行单轴和双轴压缩试验,发现随着节理倾角的增大,单轴抗压强度呈W型变化,而双轴抗压强度呈V型变化。在岩体变形特征方面,Chen等^[13]发现单轴压缩条件下断续节理类岩体的弹性模量随节理倾角的增加呈现先减小后增大的趋势;Zhou等^[14]发现单轴压缩条件下断续节理类岩体

的峰值应变随着节理倾角的增加而减小;黎立云等^[15]对含有序多裂纹类岩体开展大量单轴压缩试验,发现试样宏观泊松比随着倾角的增加基本呈上升趋势。在岩体破坏模式方面,刘刚等^[16]发现单轴压缩条件下节理倾角对断续节理类岩体的破坏模式具有重要影响,并将破坏模式分为平面破坏、块体转动式破坏和台阶式破坏;Sun等^[17]对不同节理倾角的断续节理类岩体开展常规三轴压缩试验,发现含不同节理倾角试样破坏产生的裂纹多为拉伸裂纹,不存在纯剪切裂纹的破坏模式;Cao等^[18]对含不同节理倾角的断续节理类岩体开展压剪试验,观察到平面剪切破坏、完整剪切破坏、斜剪切破坏和阶梯式破坏等4种破坏模式。在岩体能量演化特征方面,郑远龙等^[19]研究了单轴压缩条件下含不同节理倾角的双节理裂隙类岩体的能量演化规律,发现能量随着倾角的增大呈现先减小后增大的趋势;Cao等^[20]对含多节理类岩石进行单轴压缩试验,发现随着节理倾角的增加,输入能量与应变能呈现先增大后减小的趋势,而耗散能有一定波动。

然而,类岩石材料与天然岩体在物理力学性质上存在一定差异,含节理裂隙类岩石材料的试验结果在一定程度上与岩体工程的实际情况不符^[21-23],因此,开展节理产状对含断续节理天然岩石破坏特征影响的相关研究也极其重要。例如,Pang等^[24]对含断续节理砂岩进行单轴压缩试验,发现随着节理倾角的增大,破坏模式由拉伸破坏转变为压缩剪切破坏;杨圣奇等^[25]对含断续节理的大理岩试样开展单轴压缩试验,发现随着倾角的增大,弹性模量和峰值应变减小;彭岩岩等^[26]对含三节理的灰岩开展单轴压缩试验研究,发现上下两条平行节理的倾角比中间节理倾角对岩体破坏模式的影响更大。

上述研究主要通过单轴压缩、双轴压缩、常规三轴压缩和直剪试验探究断续节理产状对岩体破坏特征的影响。近年来,有学者为进一步揭示深埋断续节理岩体破坏机制,开展了能够模拟深埋岩体应力状态的真三轴试验研究。例如,Zhang等^[27]比较了真三轴应力条件下含倾角为30°和90°雁形裂纹

砂岩的脆性破坏特征，发现两种试样的破坏以最外层裂纹尖端的剪切破坏为主，但前者的岩桥破坏以拉伸为主，后者以剪切为主。Zhang 等^[28]对含不同裂纹重叠长度的断续节理花岗岩开展真三轴试验研究，发现裂纹重叠长度增加可能导致岩桥内部裂纹合并，进而降低试样的强度。迄今为止，已有的断续节理岩体破坏的真三轴试验研究较少，且侧重于探究节理倾角和节理位置对断续岩体破坏特征的影响，而节理走向对断续节理岩体破坏特征影响的真三轴试验研究还未见报道。

本研究通过真三轴试验系统对含不同断续节理产状（倾角和走向）的砂岩开展真三轴压缩试验，探究断续节理产状对砂岩破坏形态、强度和变形特性的影响。此外，本研究还利用声发射系统实时监测断续节理砂岩的破坏过程，分析断续节理产状对岩体声发射演化特征和特征应力的影响。研究结果对正确认识深埋工程含断续节理岩体的破坏特性，提高深埋工程设计和施工的合理性及安全性具有重要意义。

2 试验方法

2.1 试样制备

本次试验选取中国四川省自贡市灰白色砂岩制备试样。试样尺寸为 70 mm×70 mm×140 mm，密度约为 2 669 kg/m³，纵波波速为 2.9 km/s，单轴抗压强度为 121.8 MPa；矿物成分包括石英（49.0%）、钠长石（37.4%）和高岭石（13.6%）等。首先，为尽量保证其具有良好的一致性和均质性，试样均从同一无明显裂隙的完整岩体切割获得。其次，为提高其平整度，试样各表面均进行抛光打磨。随后，采用水刀切割的方法预制 3 组共 9 条断续节理，节理长度为 12 mm，张开度约为 1 mm，位于同一截面的节理间岩桥长度为 8 mm，平行节理间的间距为 8 mm，节理在深度方向是贯通的，即长度为 70 mm，如图 1 所示。

为探究断续节理倾角对岩体破坏特征的影响，以 O 点为断续节理的旋转中心，节理与水平方向的夹角为节理倾角 β ，分别制备了 0°、30°、45°、60° 和 90° 共 5 种不同节理倾角的试样。

2.2 试验设备

采用广西大学自主研发的高压伺服动真三轴试验系统开展本次试验，该系统主要包括动真三轴试验机和声发射系统，如图 2 所示。真三轴试验机刚度高达 9 000 kN/mm，垂直方向最大静载压力可达 5 000 kN，两个水平方向的最大静载压力可达 3 000 kN，

可实现三向独立加载，保障了本次断续节理岩体真三轴压缩试验的顺利开展^[29]。本次试验还采用 PAC 公司生产的 Express8 声发射系统对断续节理岩体破坏过程进行实时监测，获取试样破坏过程中的声发射信号。声发射传感器型号为 PXR30，性能参数见表 1。

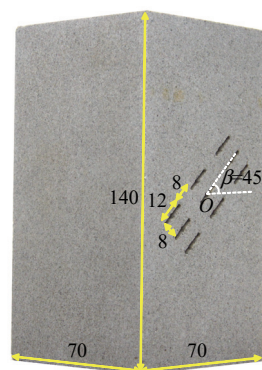


图 1 试样尺寸示意图（单位：mm）
Fig.1 Specimen size diagram (unit: mm)

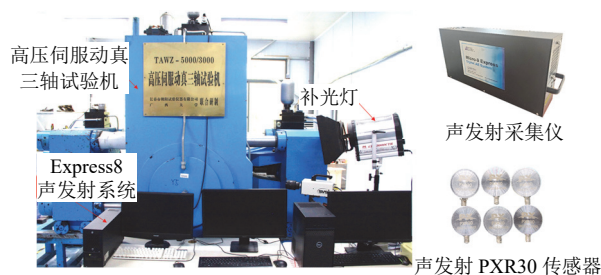


图 2 高压伺服动真三轴试验系统
Fig.2 High-pressure servo dynamic true triaxial test system

表 1 PXR30 传感器性能参数

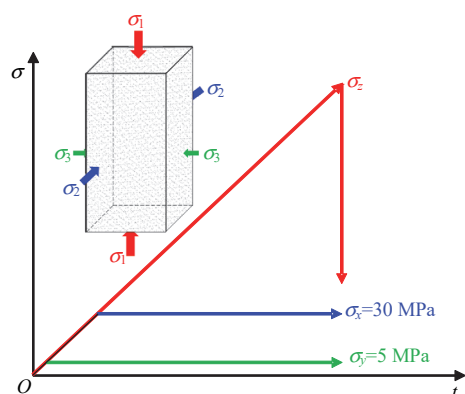
Table 1 PXR30 sensor performance parameters

灵敏度/dB	频率带宽/kHz	谐振频/kHz	工作温度/°C
65	80~400	300	-20~70

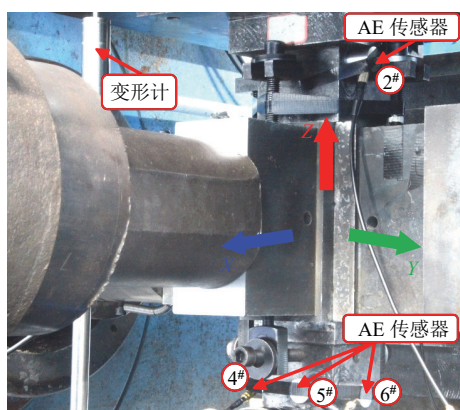
2.3 试验方案

为模拟深埋断续节理岩体在真三轴应力条件下的破坏过程，本次试验对试样进行三向独立加载，具体加载方案如图 3 所示，加载过程如下：①X、Y 和 Z 向均以 0.1 MPa/s 的加载速率匀速加载，当 Y 向（ σ_3 ）应力达到 5 MPa 时，Y 向应力保持恒定不变；②当 X 向（ σ_2 ）应力达到 30 MPa 时，X 向应力保持恒定不变；③Z 向（ σ_1 ）按照原定加载速率继续加载，直至试样发生失稳破坏。本次试验考虑了 0°、30°、45°、60° 和 90° 共 5 种断续节理倾角对岩体破坏特征的影响，还考虑了断续节理走向对岩体破坏特征的影响，即探讨断续节理走向分别与中间主应力 σ_2 方向平行和与最小主应力 σ_3 方向平行

两种情况对岩体破坏特征的影响,各试样的编号及试验条件如表 2 所示。考虑到试样可能存在一定的离散性,每种情况开展两次重复试验,若两者数据差距过大则重复开展第 3 次验证试验。



(a) 加载路径示意图



(b) 传感器布置图

图 3 试验加载方案示意图

Fig.3 Test loading scheme

表 2 试样编号和分组情况

Table 2 Specimen number and group

编号	走向	倾角/(°)	加载示意图
Tri-i	—	—	
X0-i	与中间主应力方向 (X 向) 平行	0	
X30-i		30	
X45-i		45	
X60-i		60	
X90-i		90	
Y0-i	与最小主应力方向 (Y 向) 平行	0	
Y30-i		30	
Y45-i		45	
Y60-i		60	
Y90-i		90	

注: $i=1, 2$ 和 3 分别代表同一工况下的 3 个重复试验试样。

3 断续节理产状对砂岩力学特性的影响

3.1 断续节理产状对砂岩破坏形态的影响

图 4 为典型的完整试样和含不同断续节理产状试样的最终破坏形态,图中黄色虚线表示张拉型裂纹,蓝色虚线表示剪切型裂纹,红色区域表示表面剥落。总体上看,所有试样均形成富含大量白色粉末的倾斜剪切裂纹,且这些裂纹都平行于 σ_2 ,这与典型真三轴压缩岩石破坏形态一致^[30]。同时,随着节理倾角和走向的改变,试样的破坏形态还表现出一定的差异。

当断续节理走向与 σ_2 方向平行时,随着节理倾角的增加,试样破碎程度先降低后增加,且试样破坏模式由拉剪混合破坏转变为剪切破坏。当倾角为 0° 、 30° 和 45° 时,在节理尖端不仅会出现倾斜的剪切裂纹,也会出现翼型裂纹(张拉裂纹),拉、剪裂纹沿着 σ_1 方向扩展延伸,最终导致岩石破坏,这种破坏模式称为拉剪混合破坏。当节理倾角为 60° 和 90° 时,试样破坏的主裂纹表现出了明显的剪切破坏特征,且未发现明显的拉伸裂纹,故试样的最终破坏模式为剪切破坏。值得注意的是,当节理倾角为 60° 时,裂纹沿着断续节理截面扩展延伸,并最终导致岩样发生沿着断续节理截面错动的滑移剪切破坏。当节理倾角为 90° 时,试样的破坏形态与完整试样类似,呈现共轭剪切破坏的特征。然而,相比于完整试样,倾角为 90° 的断续节理对试样中部造成的结构损伤,导致试样中部还出现了多条源于节理端部的剪切裂纹。因此,当断续节理走向与 σ_2 方向平行时,含不同节理倾角试样的破坏模式可以分为拉剪混合破坏、滑移剪切破坏和共轭剪切破坏。换言之,相比于完整试样,倾角为 0° 、 30° 和 45° 的断续节理增加了试样产生张拉裂纹的倾向,倾角为 60° 的断续节理增加了试样产生滑移剪切裂纹的倾向,而倾角为 90° 的断续节理对试样破坏模式的影响不大。

当断续节理走向与 σ_3 方向平行时,随着节理倾角的增加,试样的破坏形态变化较小,均呈现外部板裂内部剪切(简称“外板内剪”)的特征。其具体表现为:在 σ_3 作用的试样表面,尤其在断续节理周边位置出现了局部薄片板裂剥落;在 σ_2 作用的试样表面,观察到近似平行于 σ_2 方向的两条主剪切裂纹,呈 X 型分布(见图 4(g)~4(k))。值得注意的是,通过观察破坏试样内部裂纹发育情况发现,当节理倾角为 0° 、 30° 、 45° 和 60° 时,在节理端部还出现了少量近似平行于节理走向的裂纹。由此推断,倾角为 0° 、 30° 、 45° 和 60° 的断续节理对试样破坏形

态的影响相对较大,而倾角为 90° 的断续节理对试样破坏形态的影响较小。

当断续节理倾角相同,无论节理走向与 σ_2 还是 σ_3 平行,试样破坏的主裂纹均与 σ_2 近似平行。因此,在真三轴应力条件下断续节理试样的破坏模式主要受 σ_2 的影响,而断续节理倾角对试样破坏模式的影响有限。换言之,相较于节理倾角,节理走向对岩

体破坏模式的影响更显著。此外,断续节理走向与 σ_3 方向平行的试样的破裂程度或裂纹数量明显大于断续节理走向与 σ_2 方向平行的试样,这可能是由于断续节理走向与 σ_3 方向平行的试样在节理两侧受到较大约束力,进而试样强度较高,峰前存储的能量更多,最终破坏时释放的能量也更多,造成试样发生裂纹数量更多、规模更大的破坏。

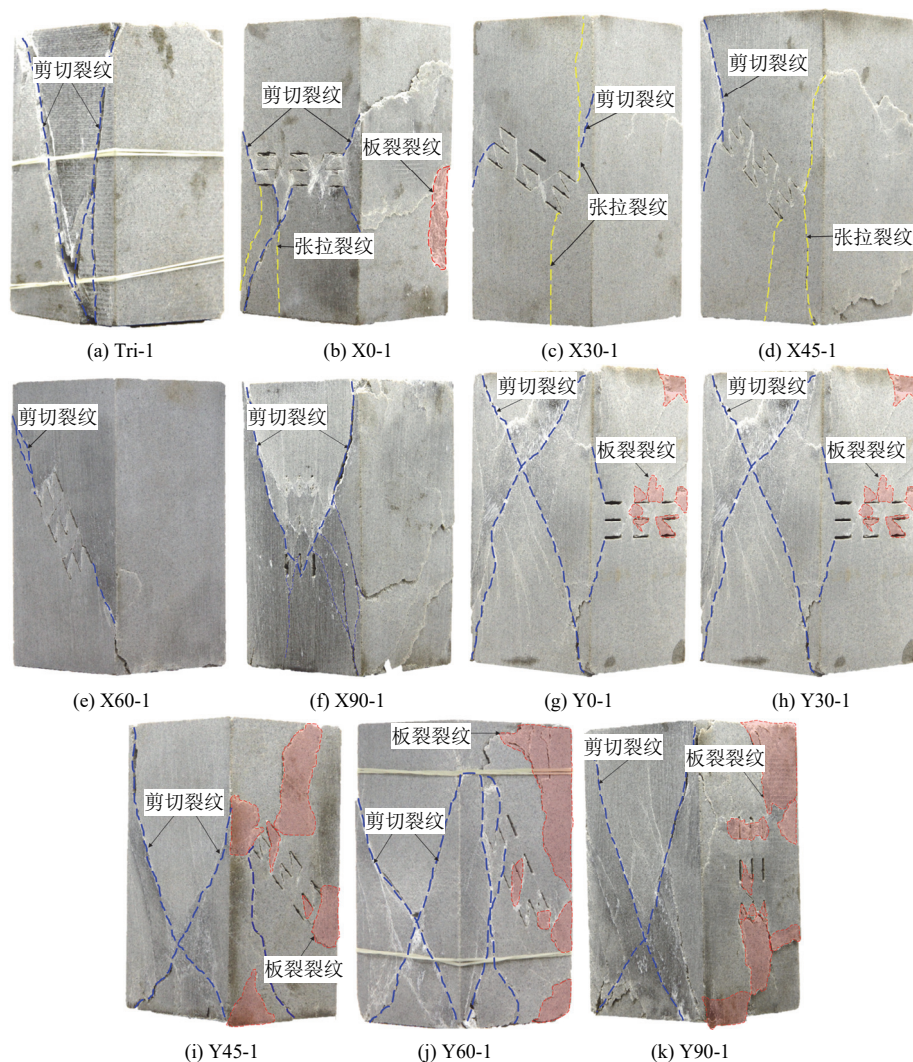


图 4 典型试样的破坏形态

Fig.4 Failure patterns of typical specimens

3.2 断续节理产状对砂岩强度和变形特征的影响

典型试样的应力-应变曲线见图 5。由图可知,完整试样和含断续节理试样的应力-应变曲线变化趋势基本一致,皆经历了压密阶段、线弹性阶段、塑性屈服阶段和失稳破坏阶段。然而,相比于断续节理走向与 σ_2 方向 (X 向) 平行的试样,断续节理走向与 σ_3 方向 (Y 向) 平行试样的应变软化阶段较长,说明试样的塑性变形更大,表现出更为明显的塑性破坏特性和更加显著的渐进破坏特征。

完整试样和断续节理试样的峰值应力、峰值应

变和弹性模量等力学参数如表 3 所示。从表中可知,含不同产状的断续节理岩体的峰值应力、峰值应变和弹性模量明显不同。

3.2.1 断续节理产状对砂岩峰值应力的影响

不同节理产状条件下断续节理试样的峰值应力如表 3 和图 6 所示。总体来看,含断续节理试样的峰值应力明显小于完整试样。当断续节理的走向与 σ_2 方向平行时,与完整试样相比,含倾角为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 和 90° 的断续节理试样的平均峰值应力分别下降了 47.1%、64.9%、53.3%、50.8% 和 24.9%; 当

断续节理的走向与 σ_3 方向平行时,含倾角为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 和 90° 的断续节理试样的平均峰值应力分别下降了 12.1%、34.4%、28.1%、19.5%和 11.8%。可以看出,断续节理对试样强度具有显著的劣化作用,这主要是由以下两方面原因导致的:一方面,断续节理对试样造成了不可逆的结构损伤^[31];另一方面,断续节理使试样表现强烈的非均质性、非连续性和各向异性的特点,导致试样局部在加载过程中出现严重的应力集中现象,即在较小的外荷载条件下,节理周边就可达到较高的应力水平。此外,随着节理倾角的增加,试样的峰值应力先减小后增加,当倾角为 30° 时,断续节理试样的峰值应力最低,即倾角为 30° 的断续节理对试样的劣化作用最大。一方面,从破坏模式上看,含倾角为 0° 、 30° 和 45° 的断续节理试样倾向于出现张拉裂纹,张拉裂纹在较低应力水平即有可能产生,因此试样强度相对于完整试样强度折减较大;含倾角为 60° 和 90° 的断续节理试样以剪切破坏为主,剪切裂纹通常在较高的应力水平下产生,因此试样强度相对于完整试样强度折减较小。另一方面,在相同荷载作用下,含倾角为 30° 的断续节理试样在 σ_1 方向的有效承载面积最小,即试样无节理裂隙的岩石部分在最大主应力方向的投影面积最小,断续节理周围的应力集中现象最严重,进而导致试样的整体强度最低。

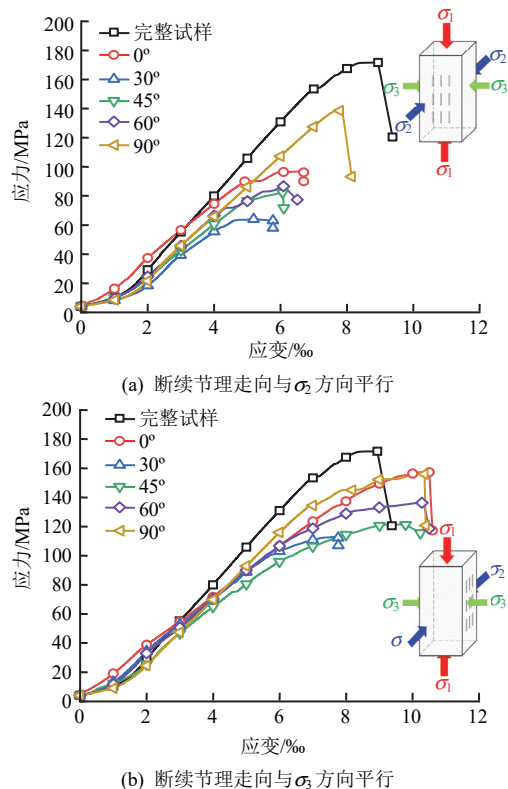


图 5 典型试样的应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of typical specimens

在相同倾角条件下,断续节理走向与 σ_2 方向平行的试样峰值应力均低于走向与 σ_3 方向平行的试样,这可能主要与中间主应力效应和节理劣化效应有关。一方面,当断续节理走向与 σ_2 平行时,中间主应力效应与节理劣化效应在同一方向上相互叠加,导致试样峰值应力下降更明显。另一方面,当断续节理走向与 σ_3 平行时,节理两侧较大的压应力(σ_2)会抑制张拉裂纹的萌生和发展,即节理劣化效应被 σ_2 抑制,最终试样发生剪切破坏,进而导致试样峰值应力下降幅度较小。再者,试样破坏前的水平向变形主要沿着 σ_3 方向发展,当节理走向与 σ_3 平行时,节理不能为岩体变形提供自由空间,岩体变形的约束较大,最终导致试样峰值应力大于节理走向与 σ_2 平行的试样。

表 3 试样的强度和变形试验结果

Table 3 Test results of strength and deformation of specimens

试样编号	峰值应力 /MPa	峰值应力平均值/MPa	峰值应变/%	峰值应变平均值/%	弹性模量/GPa	弹性模量平均值/GPa
Tri-1	171.64	176.34	8.94	9.55	25.70	25.57
Tri-2	181.04		10.18		25.43	
X0-1	96.79	93.22	6.63	6.58	18.10	17.63
X0-2	89.66		6.54		17.16	
X30-1	64.06	61.91	5.19	5.65	15.96	15.53
X30-2	59.75		6.12		15.09	
X45-1	82.18	82.39	6.07	5.94	17.86	17.08
X45-2	82.59		5.81		16.31	
X60-1	86.66	86.77	6.09	5.97	20.95	20.39
X60-2	86.88		5.85		19.82	
X90-1	126.36	132.43	8.02	7.94	20.41	20.71
X90-2	138.51		7.86		21.01	
Y0-1	157.43	155.01	10.35	9.47	17.40	17.96
Y0-2	152.59		8.59		18.53	
Y30-1	112.76	115.76	7.65	7.95	14.98	15.64
Y30-2	118.77		8.26		16.31	
Y45-1	121.33	126.85	9.58	9.71	17.69	18.49
Y45-2	132.36		9.84		19.29	
Y60-1	136.34	142.00	10.28	10.31	20.36	20.54
Y60-2	147.66		10.33		20.71	
Y90-1	156.01	155.48	10.36	10.49	23.08	22.05
Y90-2	154.96		10.63		21.02	

为进一步揭示断续节理产状对试样强度特征的影响,本文通过围线积分法,借助 ABAQUS 软件计算含不同断续节理产状试样最外侧节理尖端处的应力强度因子,并认为试样节理尖端处的 I-II 复合型断裂条件为^[32]

$$K_I^2 + K_{II}^2 \geq K_{Ic}^2 \quad (1)$$

式中: K_I 和 K_{II} 为应力强度因子; K_{Ic} 为材料的断裂

韧度。

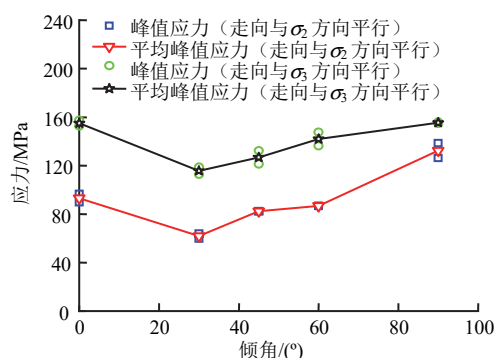


图 6 峰值应力随试样断续节理倾角变化曲线

Fig.6 Variation of peak stress with intermittent joint dip angle of specimens

采用 ABAQUS 软件建立的计算模型如图 7 所示。长方体网格边界尺寸与物理试验岩样尺寸相同，长×宽×高为 70 mm×70 mm×140 mm。为保证计算结果误差较小且具有良好的数值稳定性，围线应包含节理尖端处的最内层单元^[33]。因此，本次计算选择以试样最外侧节理尖端为圆心，以 0.05 mm 为半径的圆作为积分路径。本次计算采用应力边界条件加载，取 $\sigma_1=150$ MPa， $\sigma_2=30$ MPa， $\sigma_3=5$ MPa。

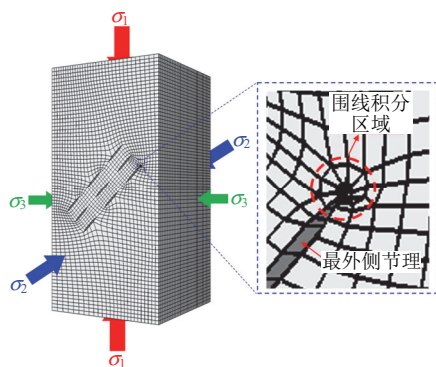


图 7 围线积分法计算应力强度因子示意图

Fig.7 Schematic diagram of calculating stress intensity factor by contour integral method

含不同产状断续节理试样最外侧节理尖端处 $K_I^2+K_{II}^2$ 的计算结果如图 8 所示。由图可知，随着断续节理倾角的增加， $K_I^2+K_{II}^2$ 的值呈现先增加后降低的趋势，且在节理倾角为 30°时取得最大值。上述结果说明在相同应力边界条件下，节理倾角为 30°的试样最外侧节理尖端处的应力集中程度最大，最容易发生裂纹扩展现象，这也是节理倾角为 30°试样的强度最低的主要原因之一。值得注意的是，当断续节理走向与 σ_3 方向平行时，由于节理两侧的侧向压力（ σ_2 ）较大，试样破坏的主裂纹并不是从节理尖端开始发育扩展，而是与 σ_2 方向平行。换言之，

当断续节理走向与 σ_3 方向平行时，相较于节理走向与 σ_2 方向平行的试样，节理两侧较高的侧压导致节理尖端的断裂韧度更高，因此，裂纹从节理尖端扩展延伸更困难。因此，当断续节理走向与 σ_3 方向平行时，基于断裂理论分析试样节理尖端的裂纹发育过程对于试样破坏分析存在一定的局限性。

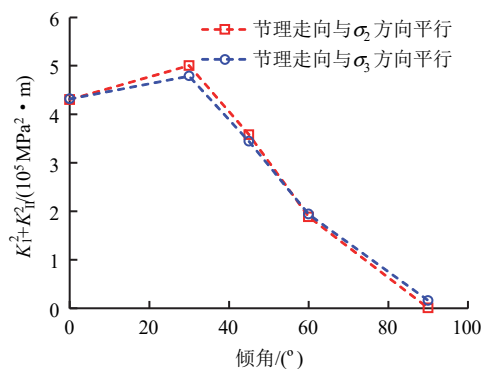


图 8 含不同节理产状试样最外侧节理尖端的 $K_I^2+K_{II}^2$ 值
Fig.8 $K_I^2+K_{II}^2$ values of outermost joint tips of specimens with different joint occurrences

3.2.2 断续节理产状对砂岩弹性模量和轴向峰值应变的影响

不同节理产状条件下含断续节理试样的弹性模量（试样弹性变形阶段应力-应变曲线的斜率）如表 3 和图 9 所示。与完整试样相比，断续节理明显降低了试样的弹性模量。当断续节理走向与 σ_2 方向平行时，含倾角为 0°、30°、45°、60°和 90°断续节理试样的弹性模量平均值分别下降了 31.1%、39.3%、33.2%、20.3%和 19.0%；当断续节理走向与 σ_3 方向平行时，含倾角为 0°、30°、45°、60°和 90°断续节理试样的弹性模量平均值分别下降了 29.8%、38.8%、27.7%、19.7%和 13.8%。

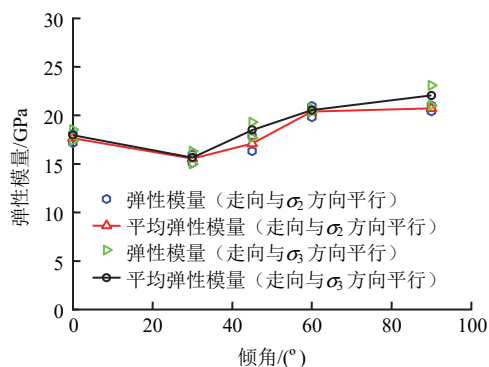


图 9 弹性模量随试样断续节理倾角变化曲线

Fig.9 Variation of elastic modulus with intermittent joint dip angle of specimens

由图 9 可见,随着节理倾角的增加,试样的弹性模量呈现先降低后增加的趋势,而节理走向对试样弹性模量的影响不大。岩石损伤前后的弹性模量比值常被用于定义试样的损伤程度^[34]。因此,随着断续节理倾角的增加,试样的结构损伤先降低后增加,倾角 30°的断续节理对试样的损伤最大。然而,断续节理的走向对试样的结构损伤影响不大。

不同节理产状条件下含断续节理试样的轴向峰值应变如表 3 和图 10 所示。随着断续节理倾角的增加,试样的峰值应变呈现先降低后增加的趋势。在相同倾角条件下,节理走向与 σ_2 方向平行的试样峰值应变均低于走向与 σ_3 方向平行的试样。当节理走向与 σ_2 方向平行时,与完整试样相比,含节理倾角为 0°、30°、45°、60°和 90°断续节理试样的峰值应变平均值分别下降了 31.1%、40.8%、37.8%、37.5%和 16.9%;当断续节理走向与 σ_3 方向平行时,与完整试样相比,含倾角为 0°和 30°断续节理试样的峰值应变平均值分别下降了 0.8%和 16.8%,而含倾角为 45°、60°和 90°断续节理试样的峰值应变平均值分别上升了 1.7%、8.0%和 9.8%。可见,相较于完整试样,断续节理走向与 σ_2 平行的试样峰值应变大幅下降,这主要是由于断续节理导致试样的峰值应力大幅下降,而弹性模量下降幅度较小,两者共同作用后导致试样的峰值应变下降。断续节理走向与 σ_3 平行的试样峰值应变随着倾角的增加呈现出先减少后增加的现象。含断续节理试样的峰值应变大于完整试样的主要原因是含断续节理试样的峰值应力降幅较小,且与完整试样仅沿着 σ_2 方向出现裂纹发育相比,断续节理走向与 σ_3 平行试样还出现了沿 σ_3 方向的裂纹发育,即试样的整体裂纹发育更显著,导致试样在屈服阶段的塑性变形较大,最终峰值应变大于完整试样。

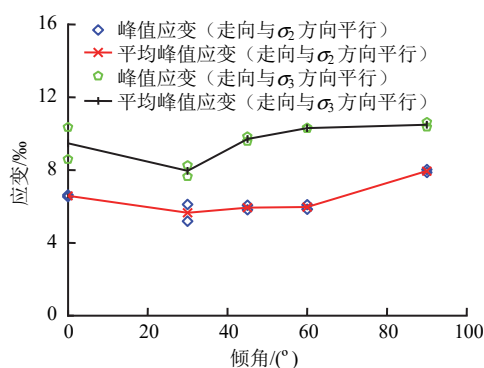


图 10 峰值应变随试样断续节理倾角变化曲线

Fig.10 Variation of peak strain with intermittent joint dip angle of specimens

4 含断续节理砂岩破坏过程的声发射演化特征

4.1 撞击演化特征

基于撞击采集模式采集声发射 (acoustic emission, 简称 AE) 信号是目前监测岩石破坏过程的常用方法,在该模式下 AE 撞击数表征了岩石破裂产生声发射信号的数量。因此,声发射撞击数的演化特征能够很好地描述试样内部裂纹发育过程。完整试样和含不同节理产状试样的 AE 撞击数演化过程如图 11 所示,试样破坏过程的 AE 撞击开始活跃的时刻和累计 AE 撞击数如表 4 所示。

在 AE 撞击数的演化特征方面,总体上看,当试样达到峰值应力且出现应力下降时,声发射撞击数都出现了突增现象。相比于完整试样 AE 撞击活跃的开始时刻,含断续节理试样的 AE 撞击出现活跃的时刻明显更早,说明断续节理促进了试样裂纹的发育过程。当断续节理走向与 σ_2 方向平行时,含倾角为 0°、30°、45°、60°和 90°断续节理试样的 AE 撞击活跃开始时刻分别为 497、386、427、528 s 和 632 s;当断续节理走向与 σ_3 方向平行时,含倾角为 0°、30°、45°、60°和 90°断续节理试样的 AE 撞击活跃开始时刻分别为 901、532、560、780 s 和 932 s。上述试验结果表明,AE 撞击活跃的时刻随着断续节理倾角的增加而先提前后延迟,且在倾角 30°时最早。其中,当节理倾角为 0°、30°和 45°时,AE 撞击活跃的时刻先提前后延迟,这可能是由于不同倾角的断续节理在最大主应力方向上对试样的损伤面积先增加后减小,使试样的节理尖端的应力集中程度先增加后减小,进而导致试样萌生裂纹的时刻先提前后延迟;当节理倾角为 60°和 90°时,节理端部萌生拉伸裂纹的倾向降低,而萌生剪切裂纹的倾向增加^[35],AE 撞击活跃的时刻明显推迟。此外,当断续节理倾角相同时,相较于节理走向与 σ_3 方向平行的试样,节理走向与 σ_2 方向平行的试样的 AE 撞击出现活跃的时刻更早,这主要是由于节理走向与 σ_2 方向平行的试样节理两侧所受到的侧向压力 (σ_3) 较低,对节理端部张拉裂纹萌生的抑制作用较小。

在 AE 累计撞击数演化特征方面,当断续节理走向与 σ_2 方向平行时,试样破坏过程的 AE 累计撞击数随节理倾角的增加而呈现先降低后增加再降低的趋势。当节理倾角为 0°~60°时,含不同断续节理倾角试样的 AE 累计撞击数变化趋势与试样的宏观破裂程度一致。然而,相对于节理倾角为 60°的

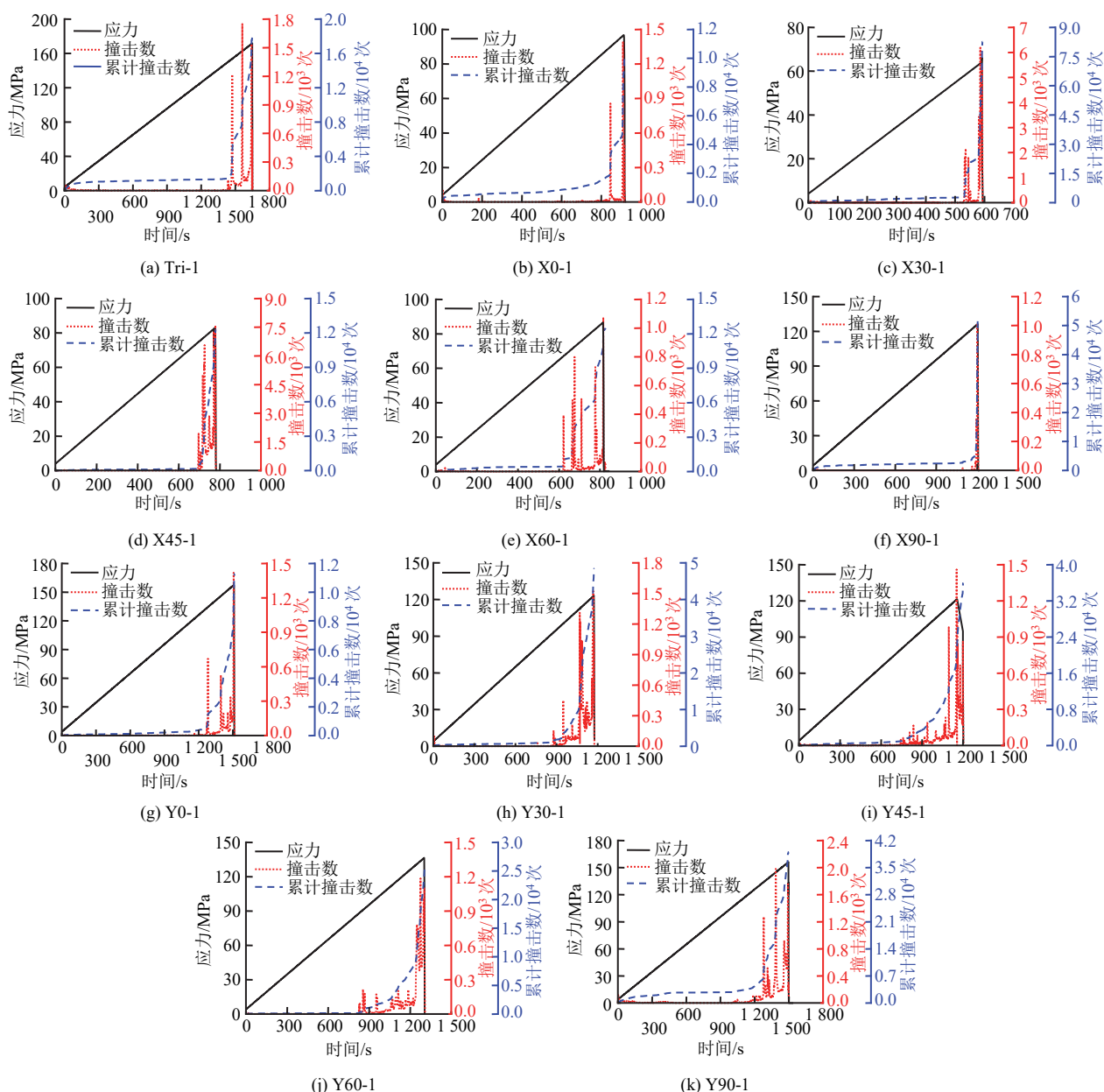


图 11 试样 AE 撞击演化过程

Fig.11 AE hits evolution process of specimens

表 4 试样的声发射撞击特征

Table 4 AE hits characteristics of specimens

编号	AE 撞击开始活跃的時刻/s	累计撞击数/次
Tri-1	988	18 331
X0-1	497	10 222
X30-1	386	8 253
X45-1	427	12 285
X60-1	528	16 264
X90-1	632	5 320
Y0-1	901	11 272
Y30-1	532	48 407
Y45-1	560	37 842
Y60-1	780	25 315
Y90-1	932	19 675

试样，节理倾角为 90° 的试样的破裂程度增加，但试样的 AE 累计撞击数却明显下降。这可能是由于

节理走向与 σ_2 方向平行且倾角为 90° 的试样破坏失稳过程较集中，导致试样破坏前夕出现较长 AE 撞击数较低的平静期，进而出现 AE 累计撞击数明显减小的现象。当断续节理走向与 σ_3 方向平行时，试样破坏过程的 AE 累计撞击数随节理倾角的增加而先增加后降低。由此可以推断，试样的破碎程度可能随着倾角的增加先增加后降低，且倾角为 30° 的试样破碎程度最严重。

4.2 主频-幅值演化特征

快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, 简称 FFT) 是一种分析声发射信号的经典谱分析方法，该方法可以将声发射信号从时域转换到频域，获取试样加载过程的声发射信号在频域的演化规律。本

文以试样 Tri-3、X30-1 和 Y30-1 为例, 绘制了 AE 主频和幅值演化过程的散点图, 如图 12 所示, 图中每一个散点代表一个 AE 撞击, 散点颜色代表 AE 撞击的幅值大小。完整试样和含不同断续节理产状试样破坏过程的 AE 平静期持续时长与平静期主频分布特征如图 13 所示。

在试样破坏过程的 AE 幅值分布特征方面, 当试样加载至 $70\%\sigma_p \sim 100\%\sigma_p$ 时, 试样开始持续产生中高幅值 (≥ 60 dB) 的 AE 信号, 且在试样破坏前夕, AE 会出现短暂高幅值低撞击数的平静期现象。当断续节理走向与 σ_2 方向平行时, 断续节理倾角为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 和 90° 的试样破坏前夕的 AE 平静期持续时长分别为 1.48、0.75、1.67、2.26 s 和 2.31 s; 当断续节理走向与 σ_3 方向平行时, 断续节理倾角为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 和 90° 的试样破坏前夕

的 AE 平静期持续时长分别为 1.74、1.38、1.80、2.09 s 和 2.35 s, 均小于完整试样破坏前夕的 AE 平静期持续时长 3.67 s。已有研究表明, AE 平静期是固定的采集参数设置使 AE 采集系统无法准确甄别岩石破坏前夕大量的信号, 以及 AE 信号相互叠加形成高幅值低撞击数的异常现象^[36]。因此, 可以推断, 随着节理倾角的增加, 试样在失稳前夕发生大尺度破坏的持续时间先减小后增加。

在试样破坏过程的 AE 主频分布特征方面, 为便于理解试样破坏过程 AE 主频演化特征, 本文将 AE 主频划分为高频 ($F \geq 300$ kHz)、中频 ($150 \text{ kHz} < F < 300 \text{ kHz}$) 和低频 ($F \leq 150 \text{ kHz}$) 3 个频带, 典型试样的 AE 主频分布如图 12 所示。总体来看, 在试样加载前中期, AE 主频主要分布在低频带和低频带上; 在试样加载后期, 分布在中频带的撞击

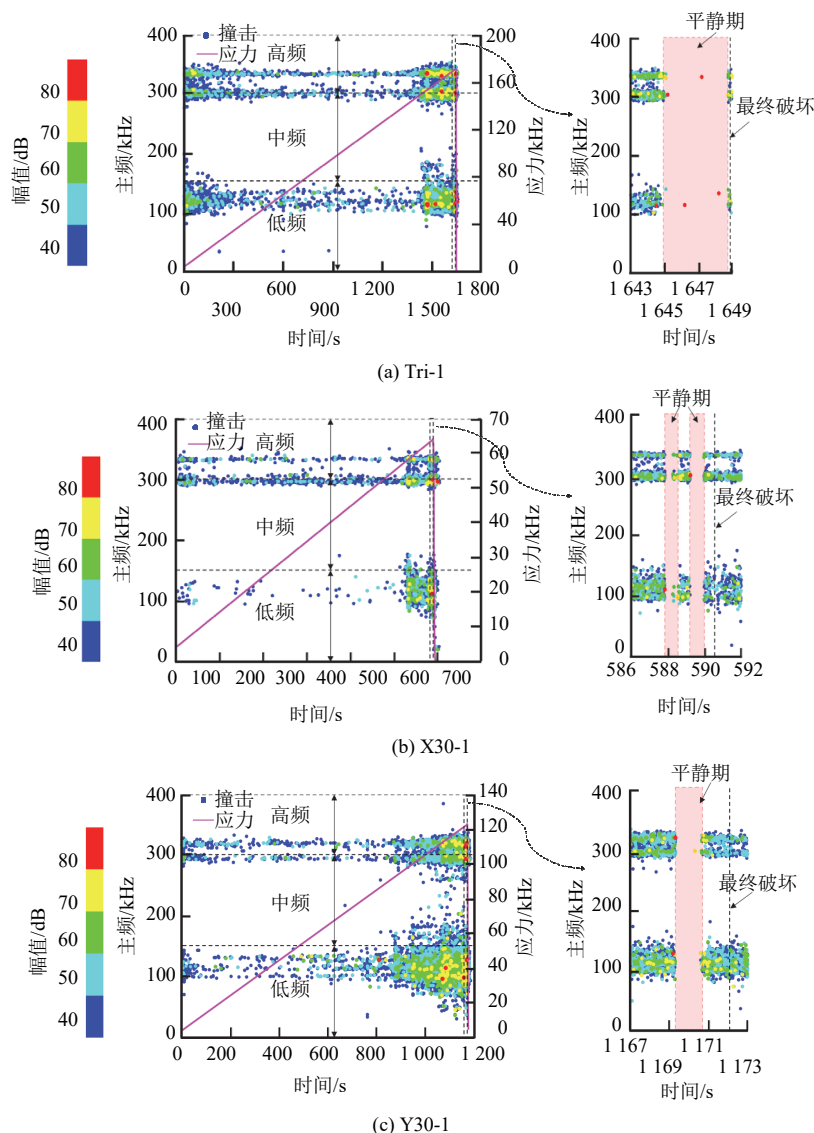


图 12 典型试样的 AE 主频-幅值演化过程

Fig.12 AE main frequency-amplitude evolution process of typical specimens

信号明显增加；随后，在试样最终失稳破坏前夕，AE 平静期出现少量低频或高频的高幅值撞击信号。因此，AE 信号出现平静期现象，且在平静期出现高幅值的 AE 撞击信号可以作为岩石破坏的前兆特征，这与已有的研究成果一致^[36-37]。

此外，在平静期，AE 高频信号占比随着节理倾角的增加而先下降后上升，AE 低频信号占比随着节理倾角的增加而先上升后下降（见图 13）。在相同断续节理倾角条件下，节理走向与 σ_2 方向平行的试样在 AE 平静期低频信号占比小于节理走向与 σ_3 方向平行的试样。已有研究表明，在岩石裂纹发育过程中，张拉型裂纹和剪切型裂纹伴生的 AE 信号在主频上呈现出不同的特征，前者以高频信号为主，后者以低频信号为主^[38-39]。因此，通过 AE 主频在平静期演化特征可以推断断续节理产状对岩石破坏机制具有重要影响。一方面，断续节理走向与 σ_3 方向平行的试样发生剪切破坏的比例明显大于断续节理走向与 σ_2 方向平行的试样。另一方面，当断续节理倾角为 $0^\circ \sim 60^\circ$ 时，试样发生张拉破坏的比例随着断续节理倾角的增加而降低，这与试样宏观破坏形态基本一致。然而，当断续节理倾角为 90° 时，从 AE 主频特征来看，试样发生张拉破坏的比例增加，这与试样宏观破坏形态中仅有剪切主裂纹

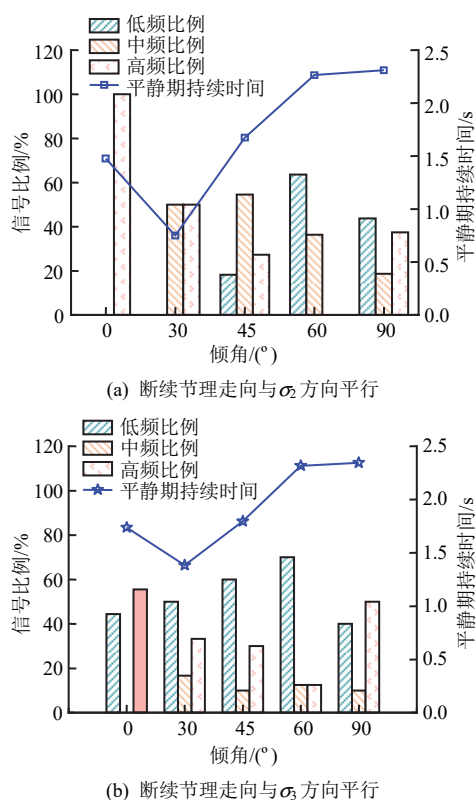


图 13 试样的 AE 平静期持续时长及期间主频分布

Fig.13 Duration and main frequency distribution of AE quiet period of specimens

明显不符。这主要是因为预制节理裂隙存在一定张开度，节理两侧的临空面在平静期会发生严重的张拉型板裂和剥落现象，导致 AE 高频信号比例增加。

4.3 基于声发射的断续节理砂岩特征应力分析

起裂应力 σ_{ci} 和损伤应力 σ_{cd} 是表征岩石强度的重要参数，也是描述硬岩发生渐进破坏的重要指标^[40]。本文采用 Zhao 等^[41]提出的基于 AE 累计撞击数的方法获取不同断续节理产状试样的特征应力，如图 14 所示。起裂应力 σ_{ci} 是指岩石内部微裂缝开始萌生和发育时的应力值，被认为是 AE 累计撞击数由线性增长转变为指数增长时对应的应力水平。损伤应力 σ_{cd} 是指微裂缝开始进一步发育和贯通，并发生非稳定扩展时的应力值，被认为是 AE 累计撞击数曲线在裂纹稳定扩展阶段拟合直线与试样破坏前夕拟合直线交点对应的应力值。

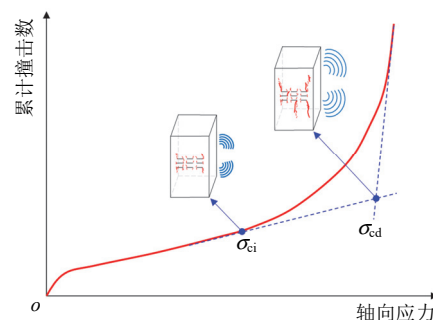


图 14 基于 AE 累计撞击数计算岩石特征应力的示意图

Fig.14 Schematic diagram of calculating rock characteristic stress based on cumulative number of AE hits

不同节理产状试样的特征应力如图 15 和表 5 所示，断续节理试样的起裂应力 σ_{ci} 和损伤应力 σ_{cd} 随着节理倾角增加而呈现先下降后上升的趋势，且分别在 $0.5\sigma_p \sim 0.7\sigma_p$ 和 $0.9\sigma_p \sim 0.98\sigma_p$ 区间内波动。

当节理倾角为 30° 时，试样的起裂应力和损伤应力水平最低，这表明倾角 30° 对断续节理试样损伤破裂过程的影响最为显著，在工程实践中应加强对该类倾角节理岩体的监测。此外，相同倾角条件下，节理走向与 σ_3 平行的断续节理试样的起裂应力 σ_{ci} 和损伤应力 σ_{cd} 明显高于节理走向与 σ_2 平行的试样，这主要是因为走向与 σ_3 平行的断续节理两侧压应力 (σ_2) 显著大于走向与 σ_2 平行的断续节理两侧压应力 (σ_3)，进而对节理尖端裂纹的萌生和发育过程产生了更强的抑制效果。

5 不同应力条件下断续节理岩体破坏机制分析

岩石在不同的应力状态下通常表现出不同的破

坏特征^[30, 42-43]。例如, 在单轴压缩条件下, 完整岩石的破坏模式通常以劈裂破坏为主, 然而在真三轴压缩条件下, 完整岩石的破坏模式通常为剪切破坏。可见, 岩石的受力状态对岩石的破坏机制具有极其重要的影响。同样, 不同应力条件下断续节理岩体也会表现出不同的破坏机制^[44]。

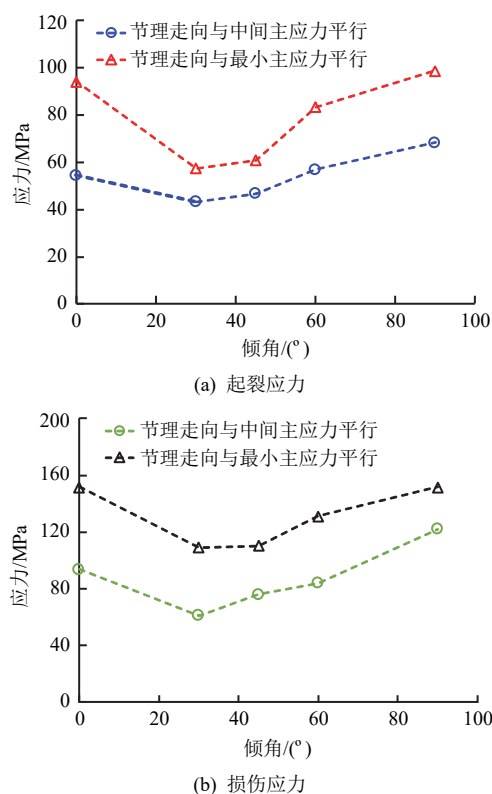


图 15 断续节理产状对试样特征应力的影响
Fig.15 Influence of intermittent joint occurrence on characteristic stress of specimens

表 5 试样的特征应力结果
Table 5 Results of characteristic stresses of specimens

节理走向	节理倾角 $\beta/(^\circ)$	峰值应力 σ_p/MPa	起裂应力 σ_{ci}/MPa	σ_{ci}/σ_p /%	损伤应力 σ_{cd}/MPa	σ_{cd}/σ_p /%
完整 试样	—	171.64	104.44	60.8	167.93	97.8
与 σ_2 方 向平行	0	96.79	54.50	56.3	93.47	96.6
	30	64.06	43.26	67.5	61.16	95.5
	45	82.18	46.78	56.9	76.04	92.5
	60	86.66	56.88	65.6	83.88	96.8
	90	127.91	68.27	53.4	122.15	95.5
与 σ_3 方 向平行	0	157.43	94.18	59.8	151.66	96.3
	30	112.76	57.33	50.8	109.19	96.8
	45	121.33	60.84	50.1	110.30	90.9
	60	136.34	83.33	61.1	131.02	96.1
	90	156.01	98.69	63.3	151.58	97.2

在单轴压缩条件下, 节理端部出现严重的拉应力集中现象, 微裂纹不断发育形成宏观张拉裂纹, 并沿着 σ_1 方向延伸, 最终导致断续节理岩石形成以

劈裂为主的整体破坏, 且裂纹走向与节理走向一致。然而, 含不同断续节理倾角试样在节理区域(岩桥)的破坏模式存在差异, 可以分为张拉破坏(见图 16(a))、转动破坏(见图 16(b))、混合破坏(见图 16(c))、剪切破坏(见图 16(d))和劈裂破坏(见图 16(e)) 5 类^[13]。可以看出, 断续节理间的贯通机制既有张拉破坏, 也有剪切滑移破坏, 这可能是由于断续节理与最大主应力之间的夹角不同, 进而断续节理所在截面受到的法向应力和切向应力不同, 最终导致岩桥发生张拉破坏和剪切破坏的倾向不同。

在双轴压缩条件下, 含断续节理试样的破坏模式可以分为临空面劈裂破坏(厚度方向)和沿节理平面剪切破坏两类, 如图 17 所示, 前者在断续节理倾角为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的试样中均有出现, 而后者仅在断续节理倾角为 60° 的试样中出现^[12]。可见, 与单轴压缩条件下含断续节理试样破坏模式为沿着节理走向发生劈裂破坏相比, 双轴压缩条件下含断续节理试样的破坏模式为沿着临空面(与节理走向垂直)发生劈裂破坏, 且节理倾角对试样破坏模式影响较小。因此, 相比断续节理倾角, 应力边界条件对含断续节理岩体破坏模式的影响更大, 这可能与两方面原因密切相关。一方面, 在侧向应力的作用下, 断续节理端部张拉裂纹的萌生和发育过程被抑制, 导致难以形成类似于单轴压缩条件下的张拉贯通裂纹。另一方面, 由于试样尺寸较薄, 试样在双重泊松效应的作用下, 容易产生垂直于临空面的拉应力, 进而形成走向与 σ_2 方向一致的张拉裂纹, 并沿着 σ_1 方向扩展延伸, 最终在临空面发生劈裂破坏。上述双轴压缩试验仅考虑了当 σ_2 方向与断续节理走向垂直时含断续节理试样的破坏特征, 若改变 σ_2 方向与断续节理走向之间的夹角, 试样可能表现出不同的破坏特征, 相关研究还需在未来进一步开展。

在真三轴压缩条件下, 断续节理试样的破坏模式不仅受节理倾角的影响, 还与节理走向密切相关(见图 18)。当断续节理走向与 σ_2 方向平行时, 含不同节理倾角的断续节理试样的破坏模式主要可以分为拉剪混合破坏($0^\circ \sim 45^\circ$)、滑移剪切破坏(60°)和共轭剪切破坏(90°) 3 类。尽管节理两侧的压应力 σ_3 抑制了拉裂纹的萌生和发育, 但是由于 σ_2 的边界约束作用要强于 σ_3 的边界约束作用, 泊松效应和节理端部应力集中现象在同一方向上叠加, 导致试样破坏的主裂纹平行于 σ_2 方向。此外, 随着节理倾角的增加, 试样的破坏模式由拉剪混合破坏转变为剪切破坏, 且倾角为 90° 的断续节

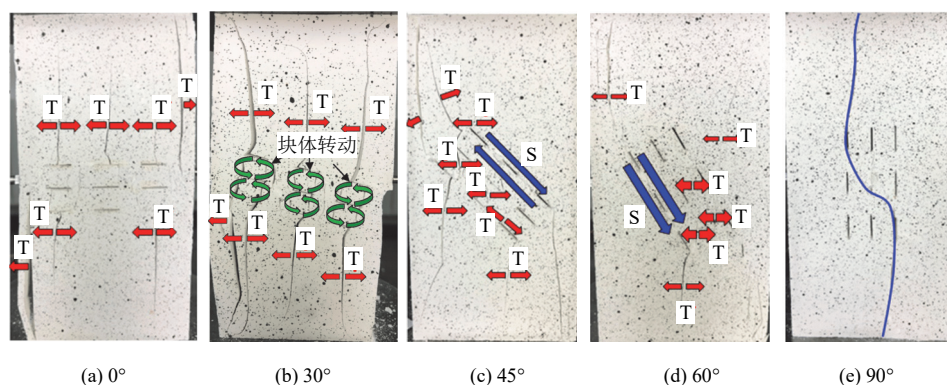
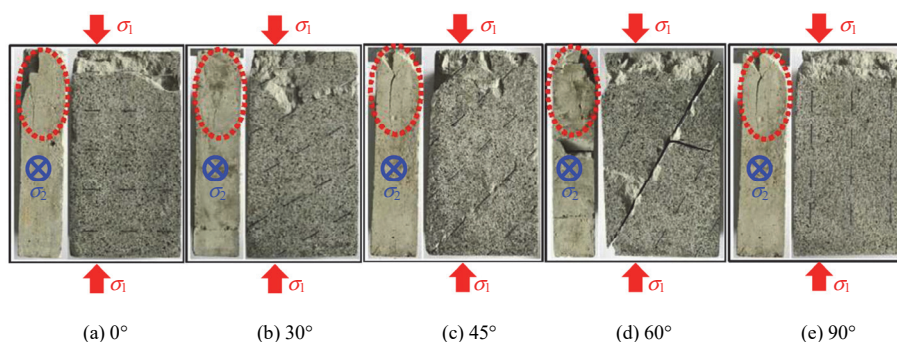
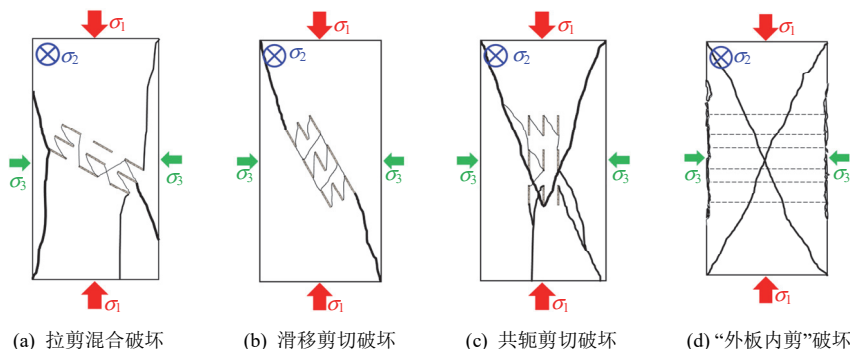
图 16 单轴压缩条件下断续节理试样的破坏形态^[13]Fig.16 Failure patterns of intermittent jointed specimens under uniaxial compression conditions^[13]图 17 双轴压缩条件下断续节理试样的破坏形态^[12]Fig.17 Failure patterns of intermittent jointed specimens under biaxial compression conditions^[12]

图 18 真三轴条件下断续节理试样的典型破坏形态示意图

Fig.18 Schematic diagram of typical failure patterns of intermittent jointed specimens under true triaxial conditions

理试样的破坏模式与完整试样类似。这可能是由于随着倾角的增加,试样的有效承载面积先降低后增加,断续节理试样的应力集中程度呈现先增加后降低的趋势,且沿着断续节理截面剪切滑移的可能性先增加后降低。因此,在低倾角条件下,断续节理试样的强度可能取决于节理端部的局部拉应力集中程度和材料抗拉强度;在中倾角条件下,断续节理试样的强度可能取决于断续节理截面的受力状态和材料抗剪强度参数(内摩擦角和黏聚力);在高倾角条件下,断续节理试样的强度可能取决于断续节理对完整试样的结构损伤程度。然而,当断续

节理走向与 σ_3 方向平行时,与双轴压缩条件下断续节理试样发生劈裂破坏不同,真三轴压缩条件下不同断续节理倾角试样的破坏模式为“外板内剪”,且断续节理倾角对试样破坏模式的影响较小。板裂剥落发生在断续节理周边的局部表面位置,而试样破坏的主裂纹为平行于 σ_2 方向,呈X型分布的剪切裂纹。这主要是由于节理两侧的侧向应力 σ_2 较大,严重抑制了节理端部拉裂纹的形成,导致断续节理产状对试样主裂纹影响较小。同时,试样受到 σ_1 和 σ_2 方向的压力后,断续节理导致节理周边出现应力集中, σ_3 方向的拉应变达到极限值,导致

试样在断续节理周边出现局部板裂破坏。综上所述,真三轴应力条件下主应力与断续节理之间的夹角对含断续节理试样的破坏特征具有显著影响,这对于优化深埋工程结构设计和围岩支护设计具有重要意义。然而,不同中间主应力 σ_2 和最小主应力 σ_3 条件下含断续节理岩体的破坏机制尚不清楚。此外,单面临空五面受力应力状态下含断续节理岩体的破坏机制也未揭示。因此,亟待进一步开展相关研究,以期为深埋工程中含断续节理岩体破坏诱发的工程地质灾害防治提供科学依据。

6 结 论

本文开展了含不同节理产状(倾角和走向)的断续节理砂岩的真三轴试验研究,获得的主要结论如下:

(1) 断续节理产状(倾角和走向)对试样的破坏模式具有重要影响。含不同断续节理产状砂岩在真三轴应力条件下的破坏模式可以分为拉剪混合破坏、滑移剪切破坏、共轭剪切破坏和“外板内剪”破坏等4类。倾角为 0° 、 30° 和 45° 的断续节理增加了试样产生张拉裂纹的倾向,倾角为 60° 的断续节理增加了试样产生滑移剪切裂纹的倾向,倾角为 90° 的断续节理对试样破坏模式的影响不大。此外,相较于节理倾角,节理走向对岩体破坏模式具有更显著的影响。因此,真三轴应力条件下含断续节理岩体的破坏特性是复杂多变的,这凸显了断续节理产状对岩体力学行为和破坏机制具有重要影响。

(2) 断续节理产状(倾角和走向)对试样的强度和变形特征具有显著劣化作用。随着断续节理倾角的增加,试样的峰值应力、峰值应变和弹性模量先降低后增加,呈现V型的变化特征,且在倾角为 30° 时,断续节理对试样的劣化作用最明显。因此,倾角为 30° 的断续节理对深埋工程安全的威胁最大,应当尽量避免。此外,相同节理倾角下,节理走向与 σ_2 方向平行的试样强度和峰值应变均低于节理走向与 σ_3 方向平行的试样,而节理走向对试样弹性模量的影响不大。

(3) 断续节理产状(倾角和走向)对岩石破坏过程的AE演化特征具有重要影响。不同节理走向条件下,节理倾角对AE演化特征的影响规律是一致的。AE平静期持续时间随着节理倾角的增加而先降低后增加,平静期AE高频信号比例随着节理倾角的增加而先降低后增加。然而,当断续节理走向与 σ_2 方向平行时,试样破坏过程的AE累计撞击数随节理倾角的增加而先降低后增加再降低;当断

续节理走向与 σ_3 方向平行时,试样破坏过程的AE累计撞击数随节理倾角的增加而先增加后降低。

(4) 断续节理降低了岩体的起裂应力 σ_{ci} 和损伤应力 σ_{cd} 。节理走向与 σ_3 平行的断续节理试样的起裂应力 σ_{ci} 和损伤应力 σ_{cd} 高于节理走向与 σ_2 平行的试样。随着节理倾角增加,断续节理试样的起裂应力 σ_{ci} 和损伤应力 σ_{cd} 先下降后上升。当试样的节理走向与 σ_2 平行且节理倾角为 30° 时,试样的起裂应力和损伤应力水平最低,这表明节理走向与 σ_2 平行且节理倾角为 30° 对断续节理试样损伤破裂过程的影响较为显著,在工程实践中应加强对该类断续节理岩体的监测和处理。

参 考 文 献

- [1] 陈新,李东威,王莉贤,等.单轴压缩下节理间距和倾角对岩体模拟试件强度和变形的影响研究[J].岩土工程学报,2014,36(12):2236-2245.
CHEN Xin, LI Dong-wei, WANG Li-xian, et al. Experimental study on effect of spacing and inclination angle of joints on strength and deformation properties of rock masses under uniaxial compression[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(12): 2236-2245.
- [2] DU C L, PAN Y C, LIU Q S, et al. Rockburst inoculation process at different structural planes and microseismic warning technology: a case study[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2022, 81: 499.
- [3] 朱金养,郭浩森,罗文俊.深埋硬岩隧洞岩爆风险与结构面倾角关系探讨[J].防灾减灾工程学报,2023,43(1):60-69.
ZHU Jin-yang, GUO Hao-sen, LUO Wen-jun. Discussion on relationship between rockburst risk and structural plane inclination of deep hard rock tunnel[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2023, 43(1): 60-69.
- [4] WANG J C, CHEN G Q, XIAO Y X, et al. Effect of structural planes on rockburst distribution: case study of a deep tunnel in Southwest China[J]. **Engineering Geology**, 2021, 292: 106250.
- [5] 范景伟,何江达.含定向闭合断续节理岩体的强度特性[J].岩石力学与工程学报,1992,11(2):190-199.
FAN Jing-wei, HE Jiang-da. The strength behavior of rock masses containing oriented and closed intermittent joints[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1992, 11(2): 190-199.
- [6] 赵延林,万文,王卫军,等.类岩石材料有序多裂纹体

- 单轴压缩破坏试验与翼形断裂数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11): 2097-2109.
- ZHAO Yan-lin, WAN Wen, WANG Wei-jun, et al. Fracture experiments on ordered multi-crack body in rock-like materials under uniaxial compression and numerical simulation of wing cracks[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(11): 2097-2109.
- [7] GEHLE C, KUTTER H K. Breakage and shear behaviour of intermittent rock joints[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2003, 40(5): 687-700.
- [8] YANG X X, JING H W, TANG C A, et al. Effect of parallel joint interaction on mechanical behavior of jointed rock mass models[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2017, 92: 40-53.
- [9] CAO R H, LIN H, CAO P. Strength and failure characteristics of brittle jointed rock-like specimens under uniaxial compression: digital speckle technology and a particle mechanics approach[J]. **International Journal of Mining Science and Technology**, 2018, 28(4): 669-677.
- [10] ZHOU T, ZHU J B, JU Y, et al. Volumetric fracturing behavior of 3D printed artificial rocks containing single and double 3D internal flaws under static uniaxial compression[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2019, 205: 190-204.
- [11] 赵修成, 赵晓彦, 郭佳奇. 断续节理岩体声学力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(7): 1408-1419.
- ZHAO Xiu-cheng, ZHAO Xiao-yan, GUO Jia-qi. Experimental study on acoustic and mechanical properties of intermittent jointed rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2020, 39(7): 1408-1419.
- [12] HAN G S, JING H W, JIANG Y J, et al. The effect of joint dip angle on the mechanical behavior of infilled jointed rock masses under uniaxial and biaxial compressions[J]. **Processes**, 2018, 6(5): 49.
- [13] CHEN M, YANG S Q, GAMAGE R P, et al. Fracture processes of rock-like specimens containing nonpersistent fissures under uniaxial compression[J]. **Energies**, 2018, 12(1): 79.
- [14] ZHOU X P, CHENG H, FENG Y F. An experimental study of crack coalescence behaviour in rock-like materials containing multiple flaws under uniaxial compression[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2014, 47(6): 1961-1986.
- [15] 黎立云, 车法星, 卢晋福, 等. 单压下类岩材料有序多裂纹体的宏观力学性能[J]. 北京科技大学学报, 2001, 56(3): 199-203.
- LI Li-yun, CHE Fa-xing, LU Jin-fu, et al. Macro-mechanical properties of regular cracks body in rock-like materials under uniaxial compression[J]. **Journal of University of Science and Technology Beijing**, 2001, 56(3): 199-203.
- [16] 刘刚, 姜清辉, 熊峰, 等. 多节理岩体裂纹扩展及变形破坏试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 1): 151-158.
- LIU Gang, JIANG Qing-hui, XIONG Feng, et al. Experimental study of crack propagation and deformation failure of multiple-jointed rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Suppl.1): 151-158.
- [17] SUN S R, WANG J, LE H L, et al. Experimental and numerical investigation on compressive strength and crack behavior of rock-like specimens with open flaws under confining loads[J]. **Frontiers in Earth Science**, 2022, 10: 972194.
- [18] CAO R H, CAO P, LIN H, et al. Failure characteristics of jointed rock-like material containing multi-joints under a compressive-shear test: experimental and numerical analyses[J]. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, 2018, 18(3): 784-798.
- [19] 郑远龙, 肖桃李, 折海成, 等. 雁行双裂隙砂岩力学特性及能量演化规律研究[J]. 工业建筑, 2025, 55(5): 239-247.
- ZHENG Yuan-long, XIAO Tao-li, SHE Hai-cheng, et al. Research on mechanical properties and energy evolution laws of sandstone with two non-coplanar fissures[J]. **Industrial Construction**, 2025, 55(5): 239-247.
- [20] CAO R H, CAO P, LIN H, et al. Experimental and numerical study of the failure process and energy mechanisms of rock-like materials containing cross un-persistent joints under uniaxial compression[J]. **PLOS One**, 2017, 12(12): e0188646.
- [21] WONG L N Y, EINSTEIN H H. Systematic evaluation of cracking behavior in specimens containing single flaws under uniaxial compression[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2009, 46(2): 239-249.
- [22] 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.
- [23] 李银平, 王元汉, 陈龙珠, 等. 含预制裂纹大理岩的压剪试验分析[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 120-124.
- LI Yin-ping, WANG Yuan-han, CHEN Long-zhu, et al. Experimental research on pre-existing cracks in marble under compression[J]. **Chinese Journal of Geotechnical**

- Engineering**, 2004, 26(1): 120-124.
- [24] PANG J W, HE Y L, HAN Q Y, et al. Experimental study of the effect of crack distribution on the failure mechanism of sandstone specimens based on inclination angles and number of parallel flaws[J]. **Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources**, 2024, 10(1): 63.
- [25] 杨圣奇, 戴永浩, 韩立军, 等. 断续预制裂隙脆性大理岩变形破坏特性单轴压缩试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2009, 28(12): 2391-2404.
- YANG Sheng-qi, DAI Yong-hao, HAN Li-jun, et al. Uniaxial compression experimental research on deformation and failure properties of brittle marble specimen with pre-existing fissures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(12): 2391-2404.
- [26] 彭岩岩, 周崇, 程啸, 等. 不同节理倾角下灰岩应变场演化及裂纹发展规律[J]. **采矿与岩层控制学报**, 2023, 5(4): 043528.
- PENG Yan-yan, ZHOU Chong, CHENG Xiao, et al. Evolution of strain field and crack development of limestone under different joint inclination angles[J]. **Journal of Mining and Strata Control Engineering**, 2023, 5(4): 043528.
- [27] ZHANG J Z, ZHOU X P, DU Y H. Cracking behaviors and acoustic emission characteristics in brittle failure of flawed sandstone: a true triaxial experiment investigation[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2022, 56(1): 167-182.
- [28] ZHANG J Z, LONG Y D, ZHANG T, et al. A true triaxial experiment investigation of the mechanical and deformation failure behaviors of flawed granite after exposure to high-temperature treatment[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2024, 306: 110273.
- [29] 罗丹旒, 卢思航, 苏国韶, 等. 含预制单裂隙花岗岩的真三轴单面凌空岩爆试验研究[J]. **岩土力学**, 2023, 44(1): 75-87.
- LUO Dan-ni, LU Si-hang, SU Guo-shao, et al. Experimental study on rock burst of granite with prefabricated single crack under true-triaxial stress condition with a free face[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(1): 75-87.
- [30] JIANG J Q, FENG X T, YANG C X, et al. Failure characteristics of surrounding rocks along the radial direction of underground excavations: an experimental study[J]. **Engineering Geology**, 2021, 281: 105984.
- [31] LIU Z L, MA C D, WEI X A, et al. Experimental study on mechanical properties and failure modes of pre-existing cracks in sandstone during uniaxial tension/compression testing[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2021, 255: 107966.
- [32] 张波, 李术才, 张敦福, 等. 含充填节理岩体相似材料试件单轴压缩试验及断裂损伤研究[J]. **岩土力学**, 2012, 33(6): 1647-1652.
- ZHANG Bo, LI Shu-cai, ZHANG Dun-fu, et al. Uniaxial compression mechanical property test, fracture and damage analysis of similar material of jointed rock mass with filled cracks[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(6): 1647-1652.
- [33] 陆阳春, 张建铭. 基于 p 型有限元法和围线积分法计算复合型应力强度因子[J]. **应用力学学报**, 2020, 34(1): 168-175.
- LU Yang-chun, ZHANG Jian-ming. Extraction of stress intensity factors based on p-version finite element method and contour integral method[J]. **Chinese Journal of Applied Mechanics**, 2020, 34(1): 168-175.
- [34] 刘泉声, 许锡昌. 温度作用下脆性岩石的损伤分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2000, 19(4): 408-411.
- LIU Quan-sheng, XU Xi-chang. Damage analysis of brittle rock at high temperature[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(4): 408-411.
- [35] 李育宗, 袁亮, 张庆贺, 等. 含结构面岩体岩爆特征真三轴试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2024, 43(1): 120-132.
- LI Yu-zong, YUAN Liang, ZHANG Qing-he, et al. True-triaxial experimental study on the rockburst characteristics of rock mass with a structural plane[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2024, 43(1): 120-132.
- [36] HU S H, SU G S, QIN Y Z, et al. Influence of the loading rate on the evolution characteristics of AE and MS signals during granite failure[J]. **Engineering Failure Analysis**, 2023, 152: 107428.
- [37] ZHANG J Z, ZHOU X P. AE event rate characteristics of flawed granite: from damage stress to ultimate failure[J]. **Geophysical Journal International**, 2020, 222(2): 795-814.
- [38] 肖颖鸣, 乔亚飞, 李红儒, 等. 单轴压缩下炭质板岩的应变速率效应及声发射特性[J]. **同济大学学报(自然科学版)**, 2022, 50(9): 1276-1285.
- XIAO Ying-ming, QIAO Ya-fei, LI Hong-ru, et al. Strain rate effect and acoustic emission characteristics of carbonaceous slates in uniaxial compression[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2022, 50(9): 1276-1285.