

文章编号: 1005-0523(2025)05-0038-11



含交叉裂隙红砂岩能量耗散与声发射特征研究

刘旺^{1,2}, 刘永胜¹, 翟茂林¹

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 江西建设职业技术学院管理工程系, 江西 南昌 330200)

摘要: 为研究含交叉裂隙岩石在加载过程中的力学行为、能量耗散特性以及声发射信号特征, 制备了具有不同角度交叉裂隙的岩石试样, 并采用单轴加载试验与声发射监测技术, 获取了力学参数和声发射特征, 包括振铃计数和累计振铃计数。研究结果显示: 交叉裂隙对岩石的应力-应变关系和力学特性产生了显著影响, 尤其是在裂隙角度为30°和60°时, 岩石出现了显著的应力突降和局部损伤现象; 通过对能量耗散分析可知岩石在压密阶段吸收并耗散能量, 在弹性阶段将能量转化为弹性应变能, 而在塑性阶段, 随着微破坏的增加, 耗散能增加, 弹性应变能的增长速率减缓; 振铃计数与耗散能动态趋势密切相关, 裂隙扩展和局部应力集中促进声发射事件频发, 同时加剧岩石内部能量耗散, 导致弹性应变能减少。研究结果为土木工程领域中的裂隙岩石工程灾害预警提供了一定的理论依据。

关键词: 交叉裂隙; 能量耗散; 声发射; 力学行为; 振铃计数

中图分类号: TU452; TU458

文献标志码: A

本文引用格式: 刘旺, 刘永胜, 翟茂林. 含交叉裂隙红砂岩能量耗散与声发射特征研究[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(5): 38-48.

Study on Energy Dissipation and Acoustic Emission Characteristics of Red Sandstone with Cross-Fractures

Liu Wang^{1,2}, Liu Yongsheng¹, Zhai Maolin¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. Department of Management Engineering, Jiangxi Institute of Construction, Nanchang 330200, China)

Abstract: The objective of this study is to investigate the mechanical behavior, energy dissipation characteristics, and acoustic emission (AE) signal features of rocks with cross-fractures during loading. Rock specimens with varying angles of cross-fractures were fabricated, and uniaxial compression tests coupled with AE monitoring were conducted to obtain mechanical parameters and AE characteristics, including ring counts and cumulative counts. The results indicate that cross-fractures significantly affect the stress-strain relationship and mechanical properties of rocks, particularly at fracture angles of 30° and 60°, where pronounced stress drops and localized damage phenomena occur. The analysis of energy dissipation reveals that during the compaction phase, rock absorbs and dissipates energy. In the elastic phase, energy is transformed into elastic strain energy. However, in the plastic phase, as micro-damage increases, the dissipated energy rises while the growth rate of elastic strain energy decelerates. The AE ring count is closely related to the dynamic trend of dissipated energy. The propagation of fractures and the concentration of local stress promote frequent AE events, simultaneously intensifying the in-

收稿日期: 2024-05-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51664014); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ2407501, GJJ2407506)

ternal energy dissipation of the rock and leading to a reduction in elastic strain energy. These findings provide a theoretical basis for the early warning of engineering disasters in fractured rocks within the field of civil engineering.

Key words: cross-fractures; energy dissipation; acoustic emission; mechanical behavior; ringing count

Citation format: LIU W, LIU Y S, ZHAI M L. Study on energy dissipation and acoustic emission characteristics of red sandstone with cross-fractures[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(5): 38–48.

研究岩石的力学行为和声发射特性对于揭示岩石破坏的微观机制、预测岩体的稳定性至关重要,尤其在矿山巷道围岩、隧道工程、地铁及地下工程等领域中。鉴于工程实践中岩石普遍存在的裂隙,特别是交叉裂隙,对岩石力学性质和破坏模式的显著影响,使得岩石的力学行为变得更加复杂。因此,研究含交叉裂隙岩石的力学与声发射特性,对于理解不同应力状态下裂隙岩石的性能,具有重要的理论意义和实践价值。

众多学者已对岩石的力学性能进行了广泛研究^[1-4]。Niu等^[5]通过单轴压缩试验,对裂隙红砂岩试样进行了研究,探讨了裂隙角度对试样的力学特性和断裂行为的影响。Zhao等^[6]通过试验研究了湿度和单轴加载共同作用下红砂岩的宏观损伤劣化。Huang等^[7]探讨了砂岩在反复干湿循环作用下的力学性能和损伤特征。Tan等^[8]研究了预制裂缝的红砂岩在干湿循环和疲劳耦合加载下的损伤演变和破坏特征。Cheng等^[9]研究了单轴压缩载荷作用下含有缺陷的类岩石试样的裂纹扩展规律。Zhou等^[10]对含有多个缺陷的类岩石材料进行了单轴压缩实验,并探讨了预制裂隙对类岩石力学性能和裂纹起始模式的影响。岩石的破坏是一个涉及能量积累、储存和释放的复杂过程。在加载过程中,岩石会吸收外部能量,其中一部分能量转化为弹性应变能存储于岩石内部,而另一部分能量则由于摩擦、塑性变形和裂纹扩展等活动而耗散。当应力超过岩石的强度极限时,储存的弹性应变能会迅速释放,导致岩石的断裂和破坏^[11-14]。Chen等^[15]通过试验研究了不同尺寸砂岩样品在单轴和三轴压缩条件下的渐进破坏和能量演化特征。Zhang等^[16]探讨了砂岩在高温和酸性溶液影响下的能量演化和破坏特征。Meng等^[17]研究了三轴循环加载和卸载条件下

约束压力和温度对岩石能量演化的影响。Yang等^[18]对三轴卸载约束压力试验中砂岩破坏的能量演化进行了试验研究。

声发射技术被用于监测岩石内部的裂纹扩展和变形,为理解破坏机制、预测岩体稳定性以及防治岩石工程灾害提供重要信息^[19-21]。倪彬等^[22]通过声发射定位技术,研究了黄砂岩在单轴压缩过程的裂纹的扩展规律。王笑然等^[23-24]采用声发射监测手段,建立了微裂纹张开或闭合和剪切滑移的位移不连续震源模型,测试不同加载速率下含平行裂纹砂岩声发射行为。郑强强等^[25]采用声发射监测技术和延时双差层析成像技术,揭示了砂岩在不同应力阶段的破裂规律和速度结构的动态变化。

尽管声发射技术已被广泛应用于裂缝扩展行为的研究,但将其与能量理论相结合,以探究裂隙岩石的力学响应和能量耗散机制,特别是在交叉裂隙岩石中,这方面的研究仍然较为有限。

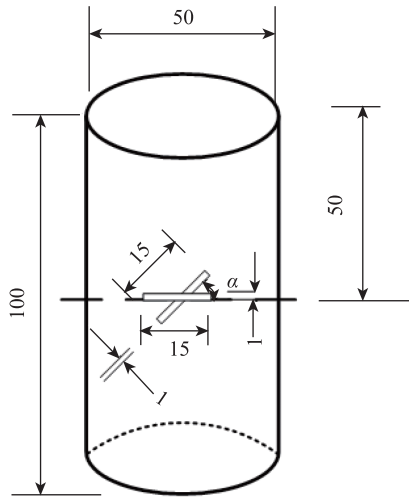
因此,本研究通过单轴加载试验和声发射监测,分析含交叉裂隙红砂岩的力学性能及声发射特征。通过制备不同角度的交叉裂隙红砂岩试样,获得应力-应变曲线、力学参数以及声发射特征,旨在揭示交叉裂隙对红砂岩力学性能和声发射特征的影响,并探讨其破坏机制和能量耗散过程。研究成果可为土木基础设施领域提供一定的理论支持,并为岩石工程灾害的预测和防治提供一定科学依据。

1 试验概况

1.1 岩样准备

岩石样本取自红砂岩分布广泛的中国云南省,所有样本均源自同一母岩块,以确保试验结果的准确性。根据国际岩石力学学会(ISRM)的标准,样本加工成直径50 mm、高度100 mm的圆柱形试件,

采用水磨切割技术形成预定的交叉裂隙,裂隙宽度为1 mm,长度为15 mm,其中一条裂缝与载荷方向垂直。另一裂隙与中心裂隙的夹角分别设置为 30° 、 45° 、 60° 和 90° 。为满足试验精度要求,试件端面经过打磨,确保了端面平行度和垂直度均小于0.02 mm,从而最小化试验误差,提高测试结果的准确性。试件的设计和加工成型的试件如图1所示。



(a) 试件设计 (单位: mm)



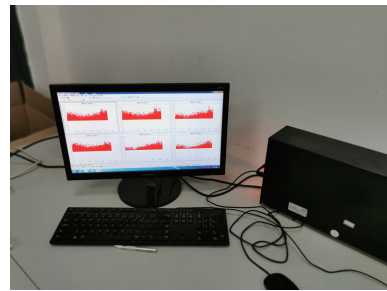
(b) 加工成型的试件

图1 裂隙岩石试件

Fig. 1 Cross-fractured rock specimens

1.2 试验设备

利用ZTRE-210型微机控制岩石三轴测试系统进行单轴压缩试验,设定加载速率为0.06 mm/min。声发射监测采用固定阈值40 dB的系统,以1 MHz的采样率采集数据,并通过两层结构共6个传感器进行信号采集,每层3个传感器角度呈 120° ,上层传感器距试件上端面15 mm,下层距下端面同样距离。声发射数据的采集用6个传感器进行,以保证采集数据的准确性。试验的声发射测试系统和岩石试件安装如图2所示。



(a) 声发射测试系统



(b) 岩石试件安装

图2 岩石声发射测试系统和试件安装

Fig. 2 Rock acoustic emission system and specimen installation

1.3 试验设计

为研究单轴压缩条件下完整岩石和不同交叉裂隙角度(30° 、 45° 、 60° 和 90°)岩石的力学行为与声发射信号变化规律,制备了5种类型的岩石试件,包括完整岩石试件以及具有上述裂隙角度的岩石试件。为确保试验数据的可靠性,每种类型试件均进行了3组平行试验,共计15个试件。通过采集和分析试验数据,评估裂隙角度对岩石力学性能的影响,包括峰值强度、峰值应变和弹性模量。试验将对完整岩石试件与具有不同角度交叉裂隙的岩石试件的力学性能进行对比分析,以揭示裂隙角度对岩石破坏模式和声发射活动的影响。

2 试验结果与分析

2.1 应力-应变曲线分析

在单轴压缩试验中,岩石的应力-应变关系通过应力-应变曲线来表征,该曲线的典型特征如图3所示。考虑到岩石中裂隙的存在,本研究特别关注

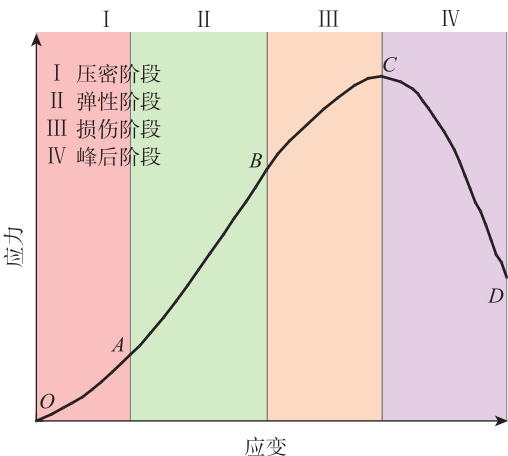


图3 典型应力-应变曲线
Fig. 3 Typical stress-strain curve

了弹性阶段之后岩石损伤的累积效应。鉴于裂隙端部的应力集中和随后的释放作用,裂纹扩展阶段的动态远比无裂隙岩石更为复杂。因此,在弹性阶段之后,岩石进入了一个损伤累积的阶段,将其定义为损伤阶段。这一阶段涵盖了裂纹从稳定扩展到非稳定扩展的过渡。该曲线可划分为4个连续的阶段:首先是压密阶段(OA 段),其次是弹性阶段(AB 段),随后是损伤阶段(BC 段),最后是峰后阶段(CD 段)。这4个阶段分别代表了岩石从初始加载至破坏的完整力学响应过程。

岩石的应力-应变曲线揭示了其力学行为。压密阶段(OA 段)主要表现为岩石内部初始微裂纹的闭合,随后的弹性阶段(AB 段)则体现了岩石的弹性变形特性,此阶段的斜率为弹性模量。进入损伤阶段(BC 段),岩石开始展现出明显的塑性变形,标志着其内部结构的损伤累积。当达到峰值应力后,岩石进入峰后阶段(CD 段),此时应力迅速下降,反映了岩石内部微缺陷的扩展和贯通,导致局部破坏区域的形成和断裂面的产生。随着变形的持续,岩石内部断裂面的黏聚力逐渐消失,其承载能力随之降低,最终导致岩石发生宏观破坏。

通过单轴压缩试验,测定岩石的力学参数,如表1所示。岩石的单轴压缩强度,不仅表征了岩石对压缩荷载的抵抗能力,而且对于评估其在工程实践中的强度、稳定性及应用潜力具有重要意义。为深入分析,从各岩样组中选取了抗压强度值最接近该组平均值的试件。根据表1所提供的数据,选取编号为WZ-1的完整岩石试件,以及具有 30° 、 45° 、

60° 和 90° 裂隙角度的岩石试件,分别为LX-30-2、LX-45-2、LX-60-1和LX-90-1进行分析。这些选定试件的应力-应变曲线如图4所示。

表1 单轴加载下不同类型岩石力学参数表
Tab.1 Mechanical parameters of different rock types under uniaxial loading

岩石类型	试件编号	峰值应变/ ($\times 10^{-3}$)	峰值应力/ MPa	弹性模量/ GPa
完整岩石	WZ-1	3.31	70.89	28.98
	WZ-2	3.32	69.77	28.43
	WZ-3	3.28	72.03	29.72
30° 裂隙岩石	LX-30-1	2.93	28.45	15.12
	LX-30-2	2.82	29.86	14.29
	LX-30-3	2.84	30.14	14.06
45° 裂隙岩石	LX-45-1	2.44	36.23	25.23
	LX-45-2	2.48	38.83	23.24
	LX-45-3	2.34	39.23	24.52
60° 裂隙岩石	LX-60-1	2.68	33.52	18.22
	LX-60-2	2.77	35.54	17.58
	LX-60-3	2.73	34.42	17.52
90° 裂隙岩石	LX-90-1	2.89	54.04	24.99
	LX-90-2	2.92	56.24	25.14
	LX-90-3	2.88	52.36	24.77

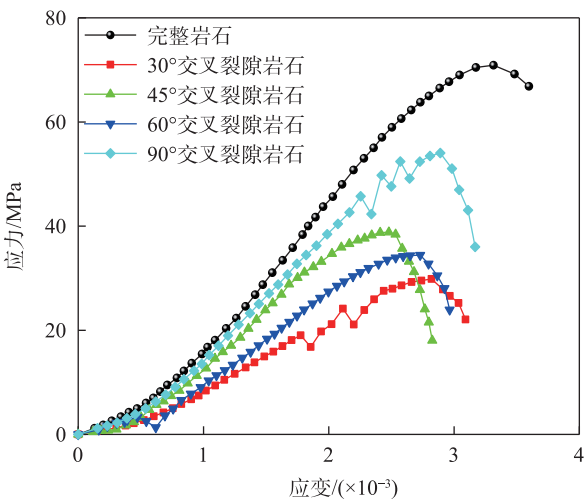


图4 应力-应变曲线
Fig. 4 Stress-strain curve

分析这些具有代表性的岩石试件可知,在单轴压缩试验的初始加载阶段,对于应变值低于0.000 5的情况,具有 90° 预制裂隙的岩石试件与完整岩石试件的应力-应变曲线显示出高度一致性。这表明,在低应变水平下,预制裂隙对岩石的压缩行为

影响不显著。进入损伤阶段后,应力-应变曲线呈现阶梯状下降,伴随着双峰值特征,反映岩石内部损伤的累积和裂纹扩展过程。夹角为 60° 的岩样在压密阶段的中后期经历了应力突降,表面预制裂隙端部在初始压密阶段已经开始萌生并扩展新的裂纹,促进了预制裂隙的闭合。相比之下, 45° 裂隙角的岩石试件的应力-应变曲线与完整岩石试件的趋势保持一致。而对于 30° 裂隙角的试件,在达到峰值应力前出现了两个较小的峰值,预示了在最终破坏之前,预制裂隙区域经历了两次局部损伤事件,尽管这些损伤并未导致试件的宏观破坏。应力-应变曲线中应力的跌落是因为含有裂隙的岩石在加载过程中,其应力-应变曲线上出现的应力跌落和回升现象,是由裂隙扩展、微裂纹萌生与扩展以及裂隙间相互作用等多重因素共同作用的结果。加载过程中,裂隙因应力集中而扩展,导致局部损伤和应力集中区域的应力释放,出现应力跌落。随着加载的继续,岩石内部发生微裂纹的萌生和扩展,进一步消耗能量,但当这些裂纹促使岩石结构重新调整直到裂隙闭合时,可以观察到应力回升的现象。

2.2 力学参数分析

峰值抗压强度表征了岩石在压缩过程中的最大应力值,是衡量其抗压强度的重要指标;弹性模量反映了岩石在弹性变形阶段抵抗形变的能力;峰值应变则揭示了岩石在达到峰值强度时的应变值,反映了其在加载过程中的变形能力。具体而言,完整岩石以及在不同裂隙倾角下的峰值应力、峰值应变和弹性模量分别如图5、图6、图7所示。

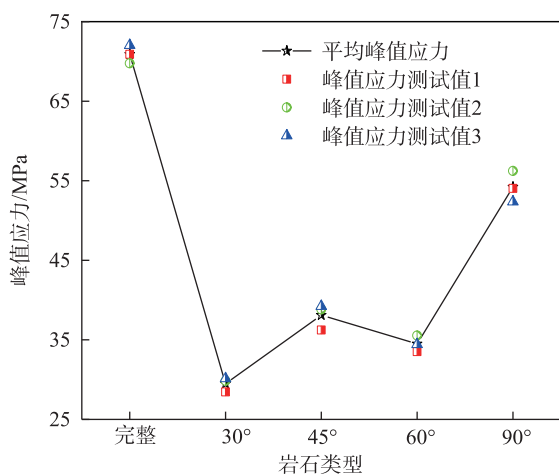


图5 岩石峰值应力

Fig. 5 Peak stress of rocks

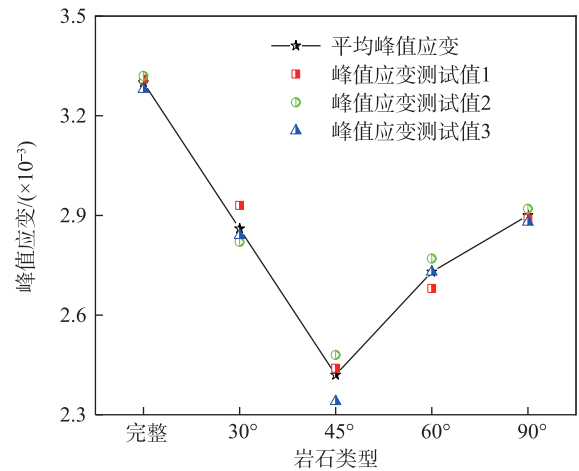


图6 岩石峰值应变

Fig. 6 Peak strain of rocks

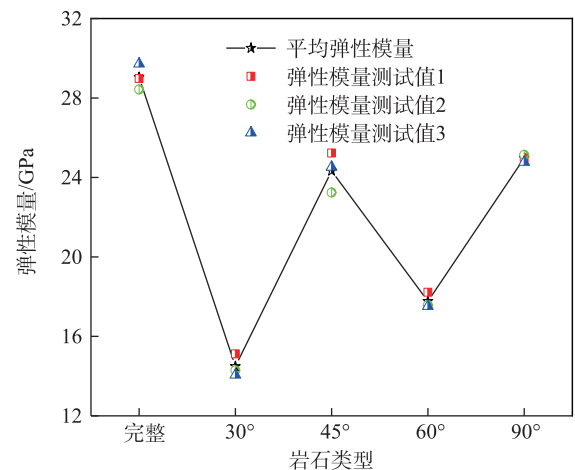


图7 岩石弹性模量

Fig. 7 Elastic modulus of rocks

具体地,完整岩石的平均峰值应力为70.90 MPa。随着裂隙夹角的增大,观察到平均峰值应力显著下降,分别为29.48 MPa(30° 裂隙岩石)、38.10 MPa(45° 裂隙岩石)、34.49 MPa(60° 裂隙岩石)和54.21 MPa(90° 裂隙岩石)。与完整岩石相比,这些下降的峰值应力值对应的折减率分别为58.42%、46.26%、51.35%和23.54%。同样地,完整岩石的平均弹性模量为29.04 GPa,而当裂隙夹角增加时,平均弹性模量分别降至14.49 GPa(30° 裂隙岩石)、24.33 GPa(45° 裂隙岩石)、17.77 GPa(60° 裂隙岩石)和24.97 GPa(90° 裂隙岩石)。这些变化导致的折减率分别为50.10%、16.22%、38.81%和14.02%。此外,完整岩石的平均峰值应变为0.003 30,随着裂隙夹角的增加,平均峰值应变分别降至0.002 86(30° 裂隙岩

石)、0.002 42(45°裂隙岩石)、0.002 73(60°裂隙岩石)和0.002 90(90°裂隙岩石),相应的折减率分别为13.33%、26.67%、17.27%和12.12%。这些结果综合表明,裂隙的存在与岩石力学性能的显著降低具有直接相关性。

在单轴压缩条件下,交叉裂隙岩石的力学性能劣化主要归因于裂隙的物理和力学特性。裂隙端部的应力集中效应促使裂隙附近的岩石区域优先发生破坏,这降低了试件的整体承载能力。随着加载的持续,裂隙的扩展进一步导致岩石的破坏范围扩大,从而减少了峰值强度。此外,裂隙的存在减少了岩石的有效受力面积,进而降低了单位面积上的应力水平。裂隙的连通性、闭合状态、加载条件以及损伤的累积效应也是导致裂隙岩石力学性能下降的关键因素。因此,裂隙岩石的峰值强度、弹性模量和峰值应变普遍低于完整岩石。特别是交叉裂隙的存在,其在裂隙交汇处引起的应力集中显著提升了局部损伤风险,进一步降低了岩石的整体弹性模量和强度,削弱了其承载能力,并且由于其对结构稳定性的负面影响,使得岩石在相对较低的应力水平下即发生破坏。

2.3 能量耗散分析

在岩石力学领域,研究岩石试件在加载过程中的能量转换机制是关键的科学问题之一。考虑到岩石样本在外部力作用下的变形行为,假设在整个加载过程中试件与外界之间不存在热量交换,即该系统为一个绝热封闭系统。在此假设下,外界对试件所做的功代表了系统的总输入能量。依据热力学第一定律,即能量守恒定律,封闭系统内的总能量应保持恒定。因此,外界对试件所做的功将完全转化为试件内部的能量变化。总输入能量 U 的计算可通过适当的能量转换表达式来定量描述。

$$U = U^e + U^d \quad (1)$$

式中: U^d 为耗散能; U^e 为可释放弹性应变能。应力-应变关系曲线、 U^d 与 U^e 之间关系如图8所示。

单位岩石各部分能量在主应力空间中表示为

$$U_u = \frac{1}{2}\sigma_1\varepsilon_1^e + \frac{1}{2}\sigma_2\varepsilon_2^e + \frac{1}{2}\sigma_3\varepsilon_3^e \quad (2)$$

式中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为3个加载方向上的应力; ε_1^e 、 ε_2^e 、 ε_3^e 分别为与应力相对应的弹性应变。由胡克定律可知

$$U^e = \frac{1}{2E}[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] \quad (3)$$

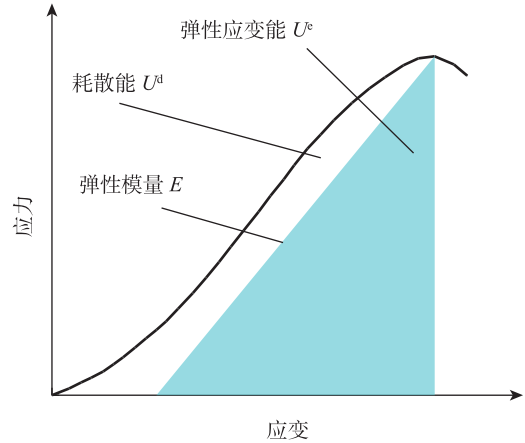


图8 耗散能和弹性应变能关系

Fig. 8 Relationship between dissipation energy and elastic strain energy

式中: E 为初始弹性模量; ν 为泊松比。对单轴压缩试验,弹性应变能 U^e 计算公式可简化为

$$U^e = \frac{\sigma_1^2}{2E} \quad (4)$$

总能量 U 计算公式为

$$U = \int \sigma_i d\varepsilon_i = \sum_{i=1}^{n-1} \int_{\varepsilon_i}^{\varepsilon_{i+1}} \sigma_i d\varepsilon_i = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i}{2} (\sigma_{i+1} + \sigma_i) \quad (5)$$

式中: σ_i 和 ε_i 分别为岩样应力-应变曲线上每一点的应力和应变值。因此,岩样变形破坏过程中的耗散能 U^d 为

$$U^d = U - U^e \quad (6)$$

为深入理解岩石在受力状态下强度演变及其破坏过程的机理,分析岩石在加载过程中的能量变化规律及其与岩石强度和破坏机制之间的内在联系。对完整岩石和裂隙岩石试件从变形至破坏的整个过程中的能量转换进行了定量计算,包括总能量、弹性应变能和耗散能。考虑到岩石的脆性特性,尤其是在峰后阶段能量变化的不显著性,重点分析岩石达到峰值强度前的能量响应。

图9展示了在单轴压缩加载过程中,完整岩石与裂隙岩石的能量变化规律及其对应的应力-应变曲线。根据图9所示,岩石试件在压密阶段表现出总能量、弹性应变能和耗散能的增长速率相对较低。在这一阶段,试件内部微裂隙的闭合以及裂隙表面的摩擦作用导致能量主要以耗散能的形式被吸收。随着变形的增加,输入的总能量呈现非线性增长,这主要是由于岩石内部微裂纹的闭合和摩擦作用消耗了大量能量,使得耗散能在该阶段通常略

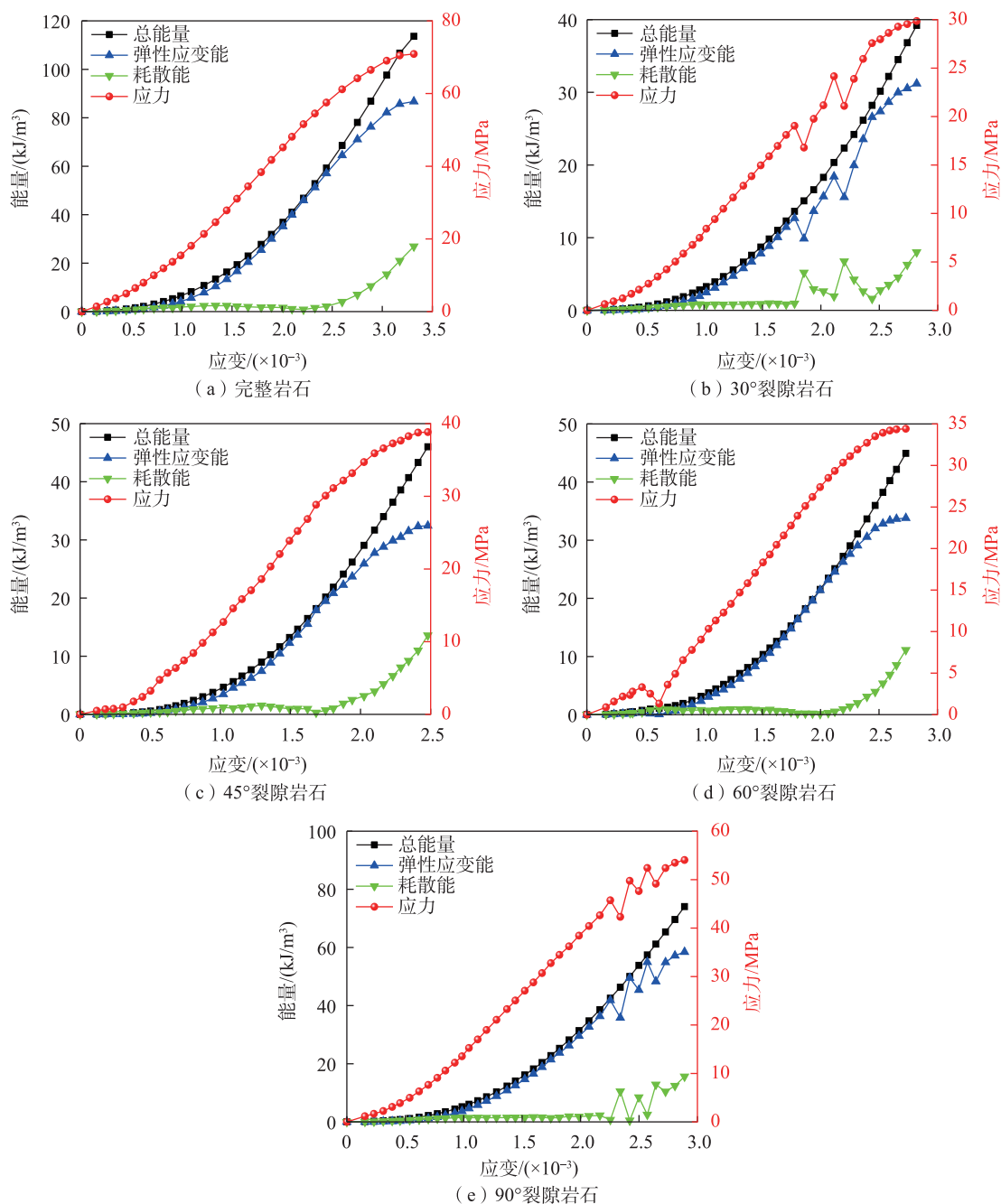


图9 完整岩石和裂隙岩石能量演化及应力-应变曲线

Fig. 9 Energy evolution and stress-strain curves of intact and fractured rocks

高于弹性应变能。尽管如此,弹性应变能的积累现象仍然可被观察到。

进入弹性变形阶段,随着应变的增加,总能量与弹性应变能呈现出近似线性的增长趋势,表明岩石试件在经历压密后,主要表现出弹性响应,且新裂纹尚未形成。因此,外力输入的能量主要转化为弹性应变能,而耗散能保持相对稳定,有时甚至出

现轻微下降。

在塑性变形阶段,随着外部载荷的增加直至接近峰值应力,岩石试件开始经历塑性变形,并伴随着微破坏的持续发展,导致区域性损伤和裂纹扩展的形成。这一过程中,由于岩石内部结构的改变,部分输入的能量被耗散,使得耗散能开始上升。对于完整岩石以及裂隙角度为45°和60°的岩石试件,

内部裂隙迅速发展并相互贯通,不可逆的塑性变形加剧,导致耗散能迅速增加,而弹性应变能增长相对缓慢。接近破坏时,裂隙的发展形成破裂面,弹性应变能达到储能极限,耗散能急剧增加,随即岩石发生整体破坏。对于裂隙角度为 30° 和 90° 的岩石试件,随着变形的增加,积累的弹性应变能突然释放,表现为弹性应变能曲线的台阶状下降,而耗散能曲线则相应地出现台阶状的突然增加。

2.4 声发射振铃计数分析

在岩石力学实验中,声发射技术被广泛应用于

监测岩石破坏过程中产生的弹性波,以实时表征岩石的破坏状态。采用AE振铃计数和累计振铃计数参数,旨在评估岩石在加载过程中的微观缺陷活动和裂隙发育情况,进而推断损伤程度的变化。声发射事件的活跃程度与应力-应变曲线之间存在密切的内在联系,共同揭示了岩石的力学行为和损伤演化过程。

完整岩石与裂隙岩石在变形至破坏过程中的应力-应变曲线及声发射特征参数的变化趋势如图10所示。在岩石的压密和弹性阶段,AE振铃计数

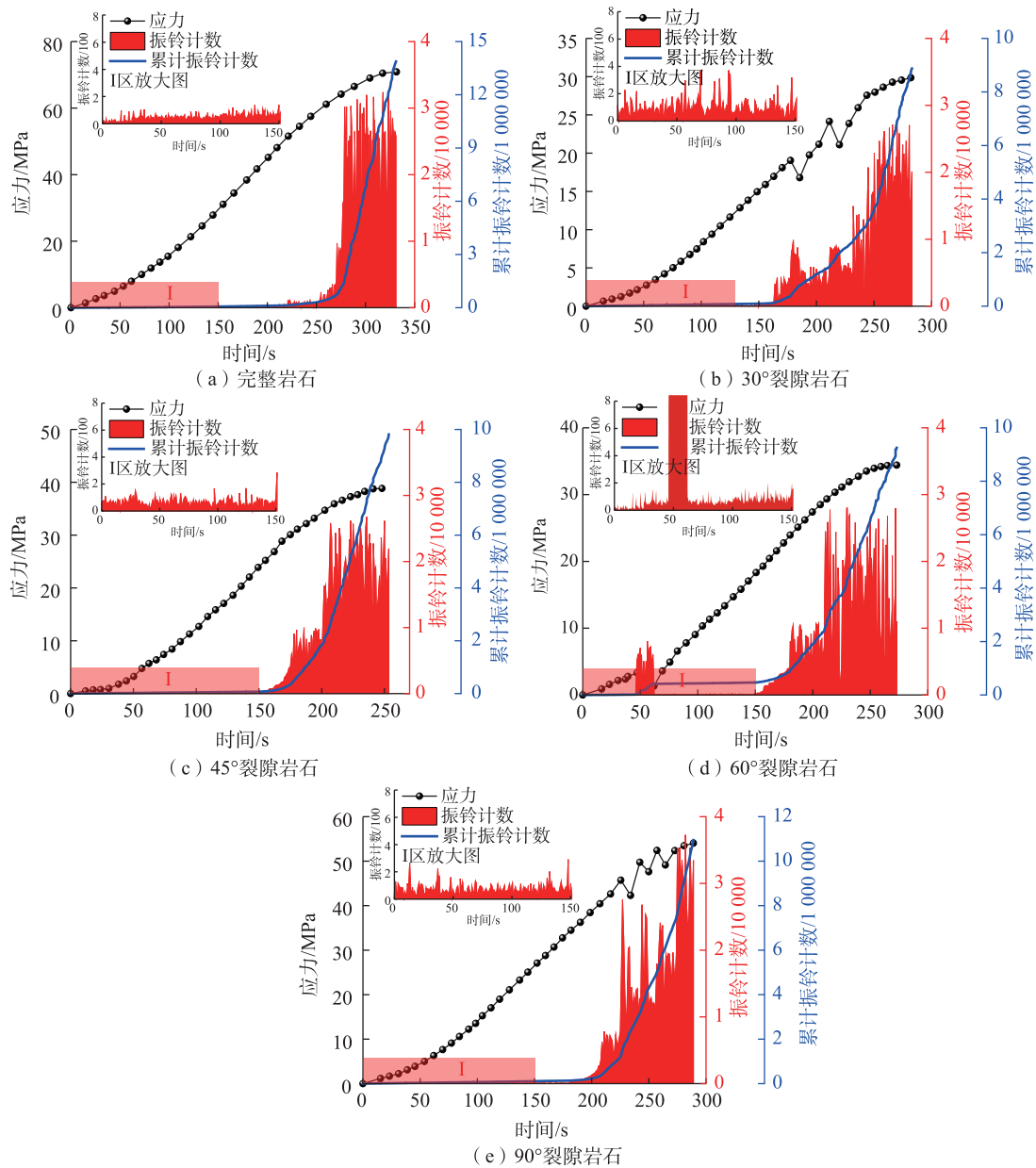


图10 完整岩石和裂隙岩石声发射特征参数及应力-应变曲线

Fig. 10 Acoustic emission characteristic parameters and stress-strain curves of intact and fractured rocks

相较于塑性阶段偏低,故将这两个阶段的振铃计数-时间关系进行放大处理,并在图中标为I区。在加载的初始期,无论是完整岩石还是含有裂隙的岩石,均表现出较低的AE振铃计数并伴随小幅度的波动,此现象揭示了岩石内部原生节理和微裂隙闭合的过程。然而,裂隙岩石在加载初期的AE振铃计数普遍高于完整岩石,这一现象表明了预制裂隙在压密阶段已开始扩展。特别是对于60°裂隙岩石,其在加载初期AE振铃计数急剧上升,这一变化归因于预制裂隙的存在,促进了裂隙的快速扩展,而在该阶段累计振铃计数的增长速率相对较缓。应力-应变曲线在该阶段出现的短暂下降后迅速回升,进一步证实了岩石内部结构和应力的调整。

在整体趋势的分析中,I区的放大图谱揭示了声发射计数率的小幅波动,随后岩石进入了一个相对稳定的阶段,即声发射平静期。在这一阶段,岩石主要表现为弹性变形,应力-应变曲线近似线性,表明岩石内部正在进行能量积累和应力调整,而并未形成显著的新裂隙。随着荷载的进一步增加,AE计数率逐渐上升,累计振铃计数的增长速率加快,标志着岩石内部不可逆的塑性变形和新裂隙的生成,即为声发射过渡期。在此阶段,AE计数率相比平静期出现了小幅的陡增-陡降现象,这反映了岩石内部裂隙的连续产生和应力分布的变化。特别是30°裂隙岩石,在过渡期AE振铃计数显著增加,表明了由于应力分布不均导致的裂隙快速扩展。进入塑性阶段的中后期,累计振铃计数的增长速率进一步加快,AE计数率显著上升,这一活跃期表明岩石内部裂隙迅速发展并贯通,最终引起了岩石的破坏。对于90°裂隙岩石,该阶段振铃计数的急剧增加归因于裂隙相互作用和应力集中,这促进了裂隙网络的快速扩展和连通。

结合声发射振铃计数曲线和能量演化曲线分析可知,在应力-应变曲线的波动区域,声发射振铃计数的显著变化与耗散能的动态趋势紧密相关。随着裂隙的持续发展,岩石内部能量耗散加剧,导致试件的变形抵抗能力下降,反映在弹性应变能的减少上。同时,裂隙的扩展引发的局部应力集中促进了声发射事件的频繁发生,标志着岩石内部损伤的累积。因此,声发射振铃计数与耗散能的一致性变化,为理解裂隙岩石在加载下的力学行为提供了一定的依据。

3 结论

1) 预制裂隙的倾角对岩石的应力-应变曲线及破坏模式有显著影响,尤其是60°和30°裂隙岩石在特定阶段的应力突降和局部损伤现象,表明了预制裂隙在岩石破坏过程中的重要作用。

2) 随着裂隙倾角的增加,岩石的峰值抗压强度、弹性模量和峰值应变等力学参数均显示出下降趋势,其中峰值抗压强度和弹性模量的降低尤为显著。裂隙导致的应力集中和有效受力面积的减少是岩石力学性能劣化的主要原因。

3) 岩石在加载过程中的能量变化规律与其强度演变和破坏机理紧密相关。声发射技术是监测岩石加载过程中损伤程度变化的有效手段。压密阶段和弹性阶段的声发射活动相对较低,而塑性阶段声发射计数率的显著增加反映了岩石内部裂隙的扩展和应力分布的变化。

参考文献:

- [1] 刘永胜,詹学才,邱传传.层状复合岩石三轴压缩力学性能研究[J].华东交通大学学报,2021,38(3):1-6.
LIU Y S, ZHAN X C, QIU C C. Study on mechanical properties of layered composite rock under triaxial compression[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(3): 1-6.
- [2] 王苏生,杨圣奇,田文岭,等.预制裂隙岩石裂纹扩展相场模拟方法研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(2):365-377.
WANG S S, YANG S Q, TIAN W L, et al. Research on phase-field simulation method of crack propagation of rock with pre-existing fissures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(2): 365-377.
- [3] 汤双臣,冯鹏,赵家琛.含交叉裂隙岩石试样单轴力学特性与破坏机理[J].地下空间与工程学报,2021,17(5):1376-1383.
TANG S C, FENG P, ZHAO J C. Uniaxial mechanical properties and failure mechanism of rock specimens containing cross fissures[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(5): 1376-1383.
- [4] 王志,秦文静,张丽娟.含裂隙岩石注浆加固后静动态力学性能试验研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(12):2451-2459.
WANG Z, QIN W J, ZHANG L J. Experimental study on static and dynamic mechanical properties of cracked rock

- after grouting reinforcement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(12): 2451-2459.
- [5] NIU Y, ZHOU X P. Fracture and time-varying multifractal behaviors of single-flawed red sandstone with different waviness angles[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(9): 04020272.
- [6] ZHAO Z H, LIU H, GAO X J, et al. Meso-macro damage deterioration of weakly cemented red sandstone under the coupling effect of high-humidity and uniaxial loading[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 143(Part B): 106911.
- [7] HUANG Z, ZHANG W, ZHANG H, et al. Damage characteristics and new constitutive model of sandstone under wet-dry cycles[J]. Journal of Mountain Science, 2022, 19(7): 2111-2125.
- [8] TAN H, LI J T, SHI Z M, et al. Damage evolution and failure characteristics of red sandstone with prefabricated crack under coupled dry-wet cycle-fatigue loading[J]. International Journal of Fatigue, 2023, 175: 107751.
- [9] CHENG H, ZHOU X P, ZHU J, et al. The effects of crack openings on crack initiation, propagation and coalescence behavior in rock-like materials under uniaxial compression[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(9): 3481-3494.
- [10] ZHOU X P, CHENG H, FENG Y F. An experimental study of crack coalescence behavior in rock-like materials containing multiple flaws under uniaxial compression [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(6): 1961-1986.
- [11] 任青阳, 陈斌, 孟欣, 等. 单轴压缩下充填节理石灰岩力学特性与能量演化[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(1): 91-98.
- REN Q Y, CHEN B, MENG X, et al. Mechanical properties and energy evolution of limestone with filling joints under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2024, 20(1): 91-98.
- [12] 刘星辰, 黄锋, 李修磊, 等. 高温处理灰岩单轴压缩力学性质及能量演化规律[J]. 力学季刊, 2023, 44(4): 854-866.
- LIU X C, HUANG F, LI X L, et al. Uniaxial compression mechanical properties and energy evolution law of high temperature treated limestone[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2023, 44(4): 854-866.
- [13] 邢国华, 罗小宝, 秦拥军, 等. 预制裂隙3D打印岩体能量演化和破裂机制[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(4): 1177-1187.
- XING G H, LUO X B, QIN Y J, et al. Energy evolution and cracking mechanism of pre-cracked 3D printing rock mass[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(4): 1177-1187.
- [14] 刘冬桥, 郭允朋, 李杰宇, 等. 单轴压缩下脆性岩石损伤破坏能量演化规律试验研究[J]. 工程地质学报, 2023, 31(3): 843-853.
- LIU D Q, GUO Y P, LI J Y, et al. Experimental study on damage and failure energy evolution of brittle rocks under uniaxial compression[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(3): 843-853.
- [15] CHEN Y, GUO B H. An experimental investigation of the progressive failure of sandstone and its energy evolution characteristics[J]. Advances in Civil Engineering, 2018: 8206073.
- [16] ZHANG P, WU F, LIU R, et al. Energy evolution and failure characteristics of sandstone under high temperature and acidic solutions[J]. Journal of Central South University, 2023, 30(9): 3162-3172.
- [17] MENG Q B, LIU J F, HUANG B X, et al. Effects of confining pressure and temperature on the energy evolution of rocks under triaxial cyclic loading and unloading conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(2): 773-798.
- [18] YANG R, MA D P, YANG Y J. Experimental investigation of energy evolution in sandstone failure during triaxial unloading confining pressure tests[J]. Advances in Civil Engineering, 2019: 7419752.
- [19] KONG X G, WANG E Y, HU S B, et al. Fractal characteristics and acoustic emission of coal containing methane in triaxial compression failure[J]. Journal of Applied Geophysics, 2016, 124: 139-147.
- [20] WANG H, LIU X F, WANG X R, et al. Stress-induced AE varying characteristics in distinct lithologies subjected to uniaxial compression[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 286: 109266.
- [21] LI H R, HE M C, SHEN R X, et al. Acoustic emission waveform analysis of sandstone failure with different water content[J]. Geofluids, 2021: 5290076.
- [22] 倪彬, 谢伟, 李乾龙, 等. 基于声发射不同粒径黄砂岩裂纹扩展研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(3): 824-832.
- NI B, XIE W, LI Q L, et al. Study on crack propagation

modes of yellow sandstone with different particle sizes based on acoustic emission technology[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(3): 824-832.

- [23] 王笑然, 李楠, 王恩元, 等. 岩石裂纹扩展微观机制声发射定量反演[J]. 地球物理学报, 2020, 63(7): 2627-2643.

WANG X R, LI N, WANG E Y, et al. Microcracking mechanisms of sandstone from acoustic emission source inversion[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(7): 2627-2643.

- [24] 王笑然, 王恩元, 刘晓斐, 等. 裂隙砂岩裂纹扩展声发射响应及速率效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(6): 1446-1458.

WANG X R, WANG E Y, LIU X F, et al. Macro-crack propagation process and corresponding AE behaviors of fractured sandstone under different loading rates[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(6): 1446-1458.

- [25] 郑强强, 徐颖, 胡浩, 等. 单轴荷载作用下砂岩的破裂与速度结构层析成像[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(6): 1069-1077.

ZHENG Q Q, XU Y, HU H, et al. Fracture and tomography of velocity structures of sandstone under uniaxial

loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(6): 1069-1077.



第一作者: 刘旺(1991—), 男, 博士研究生, 研究方向为岩石力学, 结构防灾减灾工程。E-mail: 2020019081400003@ecjtu.edu.cn。



通信作者: 刘永胜(1974—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为岩石动力学、结构防灾减灾工程等。E-mail: ysh-liu07@126.com。

(责任编辑: 吴海燕)