含不同倾角充填节理岩体内岩桥裂纹扩展规律及损伤特征试验研究*

张伟强[1]，张士川[1,2]，王成功[2]，吴振华[2]，初立新[2]，胡卫华[3]

（1.山东科技大学 能源与矿业工程学院， 山东 青岛市 266590；
2.山东能源鲁西矿业有限公司 彭庄煤矿， 山东 菏泽市 274701；
3.宁阳国开鲁珠绿色建材有限公司， 山东 泰安市 271401）

摘要：地下岩体常含有不同倾角的裂隙及各类填充物，岩桥结构的裂纹扩展与破坏行为直接影响地下岩体工程的稳定性。通过不同倾角充填节理红砂岩的单轴压缩试验、声发射参数（振铃计数、上升时间、幅值、持续时间）监测及FRACOD数值模拟，系统研究了不同倾角的充填节理岩桥结构的裂纹扩展规律与损伤机制。结果表明，应力-应变曲线呈现压密、弹性变形及应力骤降三个阶段，因试样滑移及裂纹萌生，在峰值应力附近出现应力突增现象。声发射信号在峰值应力前后显著增强，累计振铃计数呈阶梯式跃升，其曲线突增点可有效判定裂纹萌生临界点。RA-AF分析结果表明，节理倾角为30°时，剪切裂纹占比最大，节理倾角为45°时以拉伸破坏为主；随着节理倾角增大，裂纹扩展模式由拉伸主导向拉剪复合再向拉伸主导转变。FRACOD模拟结果显示，随着应力比降低，水平应力显著抑制裂纹萌生与扩展范围；水平应力增大通过抑制张拉裂纹扩展，显著改变了岩体破坏模式。研究结果揭示了节理倾角对岩桥结构裂纹扩展与损伤演化的作用机制，为深部地下岩体工程的稳定性分析提供了理论依据。

关键词：倾角效应；充填节理；岩桥结构；裂纹扩展；损伤机制

中图分类号：TD315；TU45　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2026)08-0179-14

Experimental Study on Crack Propagation Law and Damage Characteristics of Rock Bridges in Filled Jointed Rock Masses with Different Inclination Angles

Zhang Weiqiang[1], *Zhang Shichuan*[1,2], *Wang Chenggong*[2], *Wu Zhenhua*[2], *Chu Lixin*[2], *Hu Weihua*[3]

(1.College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;
2.Pengzhuang Coal Mine, Shandong Energy Luxi Mining Co., Ltd., Heze, Shandong 274701, China;
3.Ningyang Guokailuzhu Green Building Materials Co., Ltd., Tai'an, Shandong 271401, China)

Abstract: Underground rock masses often contain fissures with different inclination angles and various fillings, and the crack propagation and failure behavior of rock bridge structures directly affect the stability of underground rock engineering. Through uniaxial compression tests on filled jointed red sandstone with different inclination angles, acoustic emission parameters (ring count, rise time, amplitude, duration) monitoring and FRACOD numerical simulation, the crack propagation law and damage mechanism of rock bridge structures in filled joints under different inclination angles of joint were systematically studied. The results show that the stress-strain curves exhibit three stages of compaction, elastic deformation and rapid stress drop. A stress surge occurs near the peak stress due to specimen slip and crack initiation. The acoustic emission signals increase significantly before and after the peak stress. The cumulative ring count shows a stepwise jump, and the abrupt increase points of its curve can effectively determine the critical point of crack initiation. The results of RA-AF analysis show that the proportion of shear cracks is the largest when inclination angle of joint is 30°, and tensile failure dominates when inclination angle of joint is 45°. With the increase of inclination angle of joint, the crack propagation mode transforms from tensile-dominated to tensile-shear composite, and then back to tensile-dominated. The FRACOD simulation results show that with the decrease of stress ratio, the horizontal stress significantly restrains the initiation and propagation range of cracks. The increase in horizontal stress significantly changes the failure mode of the rock mass by inhibiting the propagation of tensile cracks. The results reveal the mechanism of joint inclination angle on crack propagation and damage evolution of rock bridge structures, providing a

* **收稿日期**：2025-09-04
基金项目：国家自然科学基金项目(52474137)
作者简介：张伟强(2001—)，男，山东青岛人，硕士研究生，主要研究方向为矿山岩石力学。E-mail:2658958058@qq.com
通信作者：张士川(1989—)，男，山东济宁人，博士，副教授，主要从事矿山岩石力学、耦合断裂力学、矿井水害防治、增强型地热系统开发等方向的研究工作。E-mail:zsc373260186@sdust.edu.cn

theoretical basis for stability analysis of deep underground rock engineering.

Key words: Inclination angle effect, Filled joint, Rock bridge structure, Crack propagation, Damage mechanism

0 引言

随着浅部矿产资源日益枯竭,深部矿产资源逐渐成为开发重点,其复杂的力学行为、损伤演化机制及破坏规律亟待深入研究。在复杂应力作用下,当存在节理时,岩桥结构极易成为岩体的薄弱环节[1],其力学特性与裂纹扩展行为对岩体整体稳定性的影响较大,而岩桥结构的破坏是导致岩体结构失稳的关键因素之一[2-3]。节理倾角对岩桥的受力状态、裂纹扩展路径及破坏形式具有显著影响。因此,深入探讨不同倾角下含充填节理岩体内岩桥的裂纹扩展与损伤机制具有重要的理论和工程意义。

在实际的深部岩体工程中,充填节理广泛存在,其对岩体工程的稳定性构成了更复杂的影响。国内外学者对充填节理的剪切特性、渗透性及其对岩体力学响应的影响进行了大量研究。Wu 等[4]研究了干湿循环作用下预制裂隙灌浆岩样的损伤机制。高福洲等[5]深入揭示了充填岩石节理强度机理,为理解充填物对岩体在单轴压缩下承载能力的间接影响奠定了基础。此外,康永水等[6]全面回顾了充填型岩石节理的剪切力学行为及其多尺度效应。焦峰等[7]通过系统的剪切试验,深入揭示了充填厚度对岩石节理剪切强度的显著影响规律。柴少波等[8]则关注了循环荷载下充填节理岩石的累积损伤演化及其动力压缩特性。Shen 等[9]研究了含缺陷红砂岩在循环荷载下的裂纹扩展与声发射特性。动态荷载下充填节理行为也受到了学者们的关注,殷志强等[10]研究了动静载作用下充填节理砂岩的应力波传播特性。张宪尚等[11]则聚焦于冲击荷载下充填节理岩体Ⅰ型裂纹的动态扩展特性。宋浪等[12]利用颗粒流方法(PFC)模拟了充填节理特性对岩石静态压缩力学行为的影响,为理解细观机制提供了新视角。综上,充填节理的存在及其性质(如充填物、厚度、界面条件)显著改变了岩体的力学响应,其中裂纹在岩桥区域的萌生与扩展是诱发岩体整体失稳的核心环节。

裂纹扩展与岩石力学性质、节理几何特征、分布模式及外部荷载作用方式紧密相关[13-17]。因此,国内外学者围绕含节理岩石的力学特性与破坏特征展开了大量研究。结果表明,节理几何特征(如倾角、连通率)是控制含节理岩体强度的关键因素。Li 等[18]研究了具有不同倾角预制裂纹的煤样,分析了预制裂纹倾角对煤样力学性能、破坏模式及加载破坏过程中的声学特性和热学特性的影响。吉东亮等[19]、Wang 等[20]均发现节理倾角为 45°左右时,岩体的峰值强度和弹性模量通常达到最低值。孔洋等[21]的研究进一步表明,随节理连通率的增大,强度与模量的衰减程度受失效模式的影响显著。Zhang 等[22]发现裂纹萌生传播对应变和声发射的转折点具有显著影响,且剪切裂纹的耗能更大。上述研究虽为理解含节理岩体的破坏特征奠定了基础,但在特定条件下,特别是在含充填节理岩桥的裂纹扩展与损伤机制方面,仍需从多角度进行深入分析。

由于岩石破坏过程的复杂性,部分学者从能量角度对含裂隙岩石的破裂过程进行了深入分析。张鹏海等[23]研究了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。赵娜等[24]、程虹铭等[25]、李东文等[26]分别采用数字散斑、声发射及试验方法,分析了裂纹演化规律、能量转化特征及弹性能的密度关系。声发射(AE)技术凭借其高灵敏度和实时监测能力,成为揭示岩石损伤演化、裂纹动态扩展及破坏机理的有力工具。

此外,数值模拟作为重要的研究手段,也被广泛用于验证岩石破裂过程中的裂纹扩展规律。王桂林等[27]利用室内岩石单轴压缩试验、数字图像相关法以及 PFC 数值模拟方法,探讨了节理长度、节理倾角及围压对节理砂岩峰前宏细观能量演化的自我抑制特性的影响。Shen 等[28-29]基于最大应变能释放率创建了裂纹 F 准则,并基于该准则研发了用于模拟岩石Ⅱ型的模拟软件 FRACOD,可以有效模拟多种场耦合作用下裂纹扩展特征。Zhang 等[30]采用 FRACOD 模拟发现剪切裂纹的扩展是造成突水通道形成的主要原因。数值模拟帮助学者们更深入地理解、预测岩石及岩体结构的力学行为,对于理论研究和工程实践至关重要。

综上所述,当前研究对充填节理岩体的研究较为全面,通过多种方法深入探讨了节理几何特征对岩体强度及破坏模式的影响,并分析了能量转化与释放特征与破坏模式之间的关联。同时,利用数值模拟技术进行了预测分析,为后续研究奠定了基础。现有研究虽涉及含充填节理岩体,但系统性地针对不同倾角节理岩体中岩桥结构的裂纹扩展路径、破坏模式及损伤累积过程的试验研究较少。本文聚焦

于倾角尖端处对含充填节理岩体中岩桥结构的影响，综合运用 AE 实时监测、全场应变分析及 FRACOD 数值模拟等多种手段，重点研究不同节理倾角下岩桥的损伤演化与裂纹扩展机制；研究不同应力比对充填节理岩体失效模式及岩桥破坏规律的影响。本研究旨在为深部地下工程围岩稳定性评估与加固设计提供更精准的理论依据。

1　红砂岩试样制备及试验装置

1.1　试验样品准备

本文选用了均质的红砂岩作为试验材料。根据试验规程要求，经取芯、切割、打磨后制成长×宽×高为 50 mm×50 mm×100 mm 的标准试件，如图 1 所示。



图 1　红砂岩试样

Fig.1　Red sandstone specimens

在制备含倾角的试样前，对同一批红砂岩试样进行严格筛选后取 3 块完整岩石，并通过对 3 块完整岩石进行单轴压缩试验以检验样本的力学性能，结果显示该试样具有高度均匀性，如图 2 所示。

使用岩石切割机在红砂岩试样的两侧切割出不同倾角的节理，节理倾角分别为 0°、15°、30°、45°、60°。为了更加合理地模拟试样的破坏过程，本研究用水泥浆对预制裂隙进行填充。试验中，水泥浆是由 325# 水泥与水按质量比 2∶1 混合而成。根据岩石力学试验结果，水泥标准试样(水灰比 0.5)抗压强度为 32 MPa，抗拉强度为 5.5 MPa，密度为 3.0 g/cm^3，红砂岩的抗压强度为 50.7 MPa，抗拉强度为 4 MPa。在实际工程中，充填材料通常会比围岩具有较低的强度，在加载过程中充填材料更容易发生破坏，也能更好地模拟岩桥的裂纹扩展和损伤特征，进而合理地模拟实际工程中充填节理的力学行为，因此本试验采用水泥填充预制裂缝。

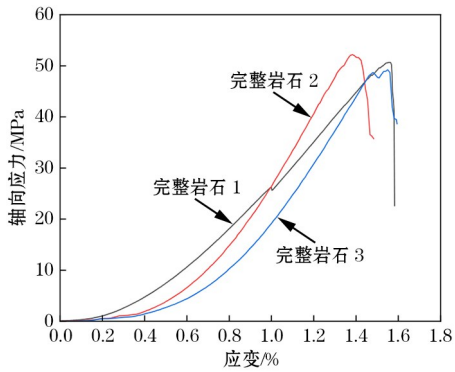


图 2　红砂岩力学性能测试结果

Fig.2　Results of mechanical properties testing for red sandstone

1.2　试验方案设计

本试验设计 5 组节理岩体，试验方案详见表 1 和图 3。首先，利用切割机对红砂岩进行切割，确保每条切割裂隙的平均宽度为 5 mm，且裂隙端部为椭圆形。其次，使用注射器向切割裂隙注入水泥浆，并用防水胶带固定在红砂岩表面。待充填水泥浆完成后，将制作好的节理岩体置于保温箱中养护 28 d。对养护完成后的试样进行伺服位移加载控制的单轴压缩试验。

表 1　含节理红砂岩试样的设计方案

Table 1　Design schemes for jointed red sandstone specimens

试样编号	试样宽度 D/mm	试样高度 H/mm	节理倾角 α/(°)	岩桥垂直高度 h/mm	岩桥水平长度 l/mm
Ⅳ-1	50	100	0	45	25
Ⅳ-2	50	100	15	45	25
Ⅳ-3	50	100	30	45	25
Ⅳ-4	50	100	45	45	25
Ⅳ-5	50	100	60	45	25
完整岩石	50	100	—	—	—

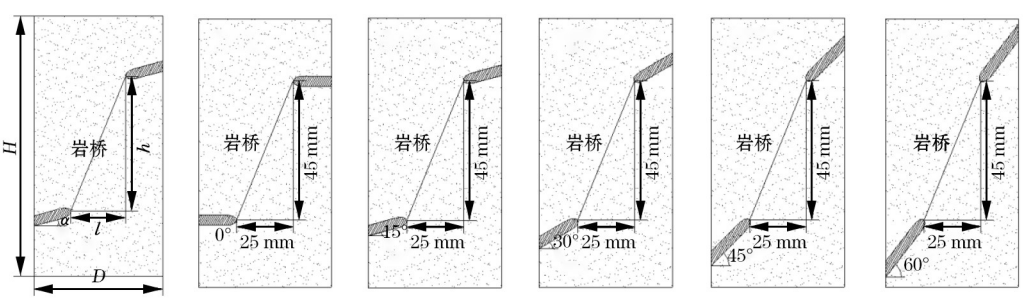


图 3　节理岩石试验设计方案

Fig.3　Test design schemes for jointed rock specimens

1.3 试验设备及系统

本次试验的测试仪器主要有试验加载系统、声发射监测、静态应变检测和高速摄像系统，如图 4 所示。利用 AG-X250 伺服压力机对样品开展常规单轴压缩试验，试验机轴向载荷采用位移控制，加载速率为 0.001 mm/s。声发射监测系统为 MISTRAS 系列 PCI-2 系统，用于监测单轴压缩时试件的声发射事件，系统的阈值为 40 dB，浮动阈值为 6 dB，以适应噪声的变化。该传感器的类型为 R3a，其共振频率为 20～100 kHz，采样频率为 106 Hz。借助 DH-3816N 静态应变测量系统收集岩石表面应变数据，其应变灵敏度系数在 1.0～3.0 之间。高速摄像机用于捕捉表面裂缝扩展过程。测试时，加载、声发射检测、应变监测系统及摄像机同步工作，以同步处理数据并分析裂缝的闭合、产生与扩展。声发射传感器置于试样中心，应变片 S1 垂直于岩桥方向，S2 沿岩桥方向。

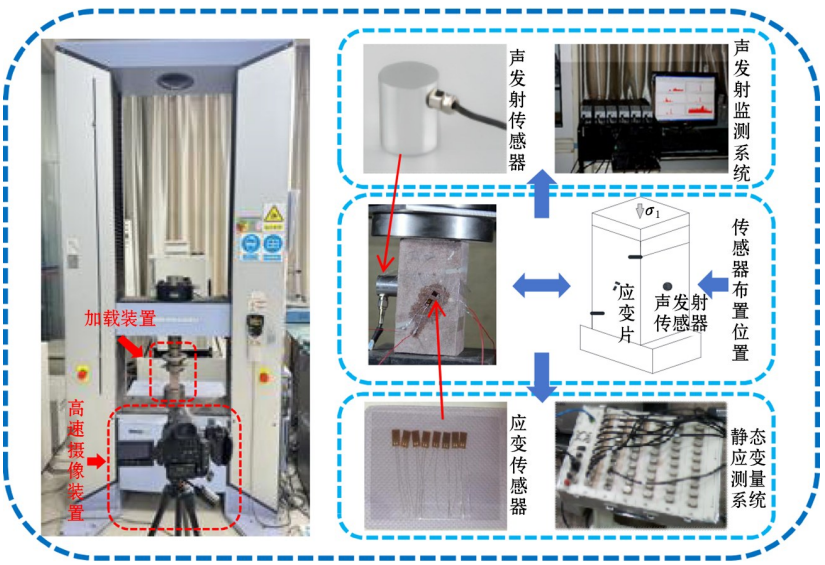


图 4 试验过程

Fig.4 Test process

2 红砂岩试样破坏特征分析

2.1 应力-应变曲线及弹性模量特征

在荷载作用下，应力-应变曲线分为三个阶段（压密阶段、弹性变形阶段、应力骤降阶段）。含有充填节理红砂岩试样峰值强度均低于完整岩石，且在峰值应力附近出现了应力突增现象，出现这种现象的原因是试样发生滑移或者内部有新裂纹萌生。应力-应变曲线如图 5 所示。

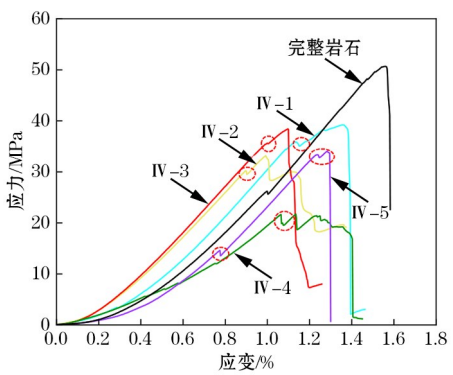


图 5 应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves

试验得到了不同倾角节理试件的峰值强度及弹性模量，如图 6 所示。由图 6 可知，节理倾角对峰值应力与弹性模量的影响显著，与完整岩石相比，含有倾角的试样其抗压强度均降低，呈现出先减后增再减再增的趋势，其中倾角为 45°时抗压强度最低。弹性模量呈现出先减后增再减再增的趋势，倾角为 0°～15°时弹性模量逐渐增大，45°时弹性模量最小。

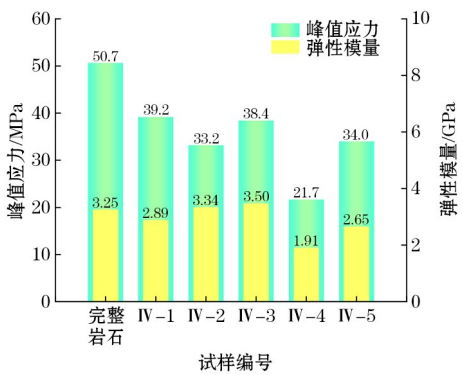


图 6 不同节理倾角试样的峰值强度及弹性模量

Fig.6 Peak strength and elastic modulus of rock specimens with joints of different inclination angles

2.2　倾角对裂纹扩展路径的控制效应

2.2.1　试验离散性分析

为了排除试验的离散性，对特殊节理倾角(30°、45°)各补充了2组试验，进行单轴压缩试验，得出应力-应变曲线，分别如图7、图8所示。通过对比图7、图8和图9，发现同一节理倾角的试样，其裂纹的扩展方向基本一致，且峰值应力相差很小，可以解决试验的离散性问题。

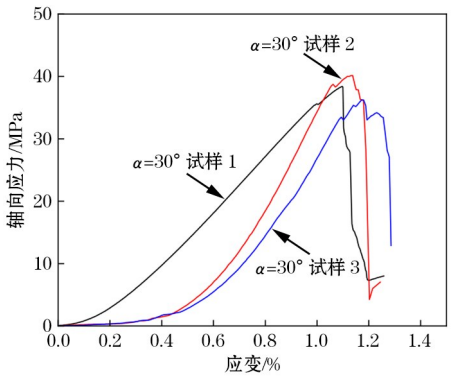


图7　节理倾角30°试样应力-应变曲线

Fig.7　Stress-strain curves of specimens with joint of 30° inclination angle

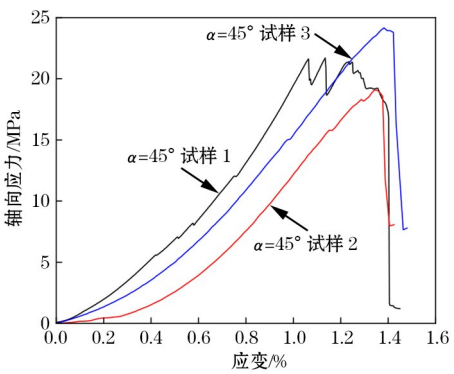
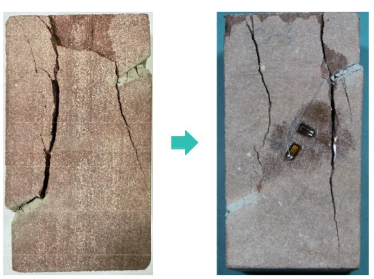


图8　节理倾有45°试样应力-应变曲线

Fig.8　Stress-strain curves of specimens with joint of 45° inclination angle



(a) 补充试验　(b) 原试验

图9　原试验与补充试验裂纹扩展对比

Fig.9　Comparison of crack propagation between original test and supplementary test

2.2.2　裂纹扩展形态分析

试样最终破坏形态如图10所示。节理倾角为0°时，裂纹出现在试样局部区域，破坏形态呈点状放射状，未形成贯穿性裂纹；节理倾角为15°时，裂纹开始定向延伸，形成明显的主裂纹路径，裂纹长度较0°时增加，出现次级微裂纹；节理倾角为30°时，主裂纹贯穿试样宽度的60%以上，裂纹边缘出现羽毛状分叉，破坏模式从点状破坏转变为线状破坏形状；节理倾角为45°时，裂纹呈Y形分叉，形成两条主要扩展路径，破坏范围覆盖试样表面的75%～80%，裂纹尖端出现应力集中导致的扇形破碎区；节理倾角为60°时，裂纹完全贯穿试样，裂纹网络覆盖整个试样，呈现多级分叉的树状裂纹形态，伴随明显的材料剥落和分层现象。

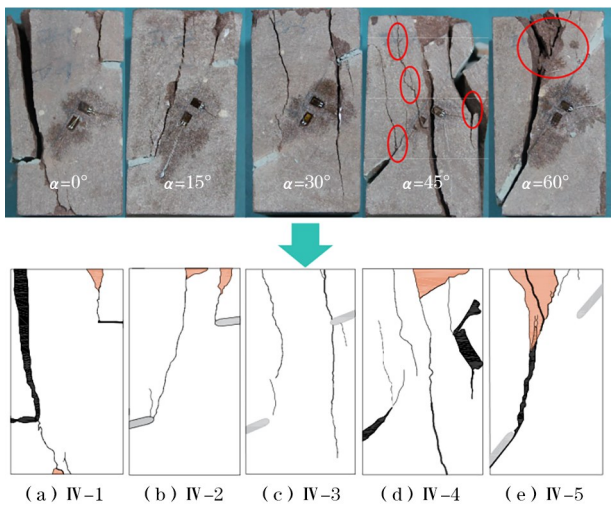


图10　试样最终破坏形态

Fig.10　Final failure modes of specimens

2.2.3　双阈值假设及机理解释

根据摩尔-库伦准则分析，低节理倾角下，作用在节理面上的剪应力相对于节理面较低的剪切强度来说，更容易达到节理面的破坏阈值。满足节理面摩尔-库伦剪切破坏准则所需的应力水平，可能比在岩桥区域产生足以引发张拉裂纹的应力水平更低。因此，沿这个预先存在的、相对软弱的节理面发生剪切滑移成为主要且优先发生的破坏形式，并致使主裂纹沿节理方向扩展。裂纹扩展路径从“沿充填界面滑移”向“穿透岩桥”转变，因此将$\alpha=30°$视为阈值1。

在混合模式裂纹中，Ⅰ型应力强度因子K_{I}和Ⅱ型应力强度因子K_{II}共同影响裂纹路径。对于岩石等脆性材料，张开型裂纹是常见的扩展模式，其应力强度用K_{I}表示。K_{I}反映了裂纹尖端附近拉应力场的强度，其一般形式为：

$$K_{\mathrm{I}}=Y\sigma_{\mathrm{t}}\sqrt{\pi a} \tag{1}$$

式中:Y 为无量纲的几何因子;σ_{t} 为作用在裂纹张开方向上的拉应力;a 为节理半长。

裂纹扩展判据:当裂纹尖端的应力强度因子 K_{I} 达到材料的断裂韧度 K_{IC}($K_{\mathrm{I}}\geqslant K_{\mathrm{IC}}$)时,裂纹就会发生失稳扩展。

当 $\alpha>45°$时,虽然外部加载是压缩,但节理的存在及其几何形状导致岩桥区域产生了很强的拉应力集中。拉应力作用在岩桥内部的微裂纹或潜在的裂纹路径上,使得这些位置的应力强度因子 K_{I} 迅速升高。由于岩石的抗拉强度很低,当 K_{I} 达到岩石的断裂韧度 K_{IC} 时,就会引发张拉裂纹。这些张拉裂纹倾向于垂直局部最大拉应力的方向扩展,这通常意味着它们会跨越岩桥,连接相邻的节理尖端。此时,破坏不再沿节理面发生,而是通过岩桥的拉伸断裂进行。断裂过程由岩桥区域的拉应力集中程度及岩石自身的断裂韧性主导。裂纹倾向于向着使其尖端处周向拉应力达到最大值的方向扩展,或者向着使其能量释放率达到最大值的方向扩展。当存在 K_{II} 时,裂纹尖端的应力场同时包含拉伸和剪切分量,这会导致在原始裂纹平面之外存在一个最大拉应力方向。裂纹会偏转,沿着这个方向扩展,从而使得新扩展的裂纹尖端处的 K_{II} 尽可能减小,最终使得裂纹主要以Ⅰ型(张开型)模式扩展。由于 K_{II} 的作用,裂纹路径可能发生偏转[31],破坏模式从单一主裂纹主导变为多裂纹分叉。因此将 $\alpha=45°$视为阈值 2。

(1) 应力分量计算。

正应力 σ_{n} 和剪应力 τ 的计算公式如下:

$$\sigma_{\mathrm{n}}=\sigma\cos^2\alpha \tag{2}$$

$$\tau=\sigma\sin\alpha\cos\alpha \tag{3}$$

计算预制节理尖端场:

$$K_{\mathrm{I}}=\sigma_{\mathrm{n}}\sqrt{\pi a}\cdot Y_{\mathrm{I}}(\alpha) \tag{4}$$

$$K_{\mathrm{II}}=\tau\sqrt{\pi a}\cdot Y_{\mathrm{II}}(\alpha) \tag{5}$$

式中:σ 为拉伸应力;Y_{I}、Y_{II} 为几何修正因子。

不同节理倾角的几何修正因子见表 2。

表 2 不同节理倾角的几何修正因子

Table 2 Geometric correction factors of different inclination angles of joint

α/(°)	Y_{I}	Y_{II}
0	0.72	0.91
15	0.78	1.01
30	0.85	1.12
45	1.02	1.05
60	1.15	0.93

根据式(4)、式(5)计算得出各不同节理倾角下的 K_{I}、K_{II} 值,并进行归一化处理,绘制了归一化应力强度因子及 $K_{\mathrm{I}}/K_{\mathrm{II}}$ 随节理倾角的变化曲线,如图 11 所示,图中 K_0 为无量纲化的参考基准应力强度因子。从图 11 中可以看出,随着节理倾角的增大,张开型裂纹逐渐增大,剪切裂纹先增大后减小。节理倾角小于 45°时裂纹扩展由剪切破坏主导,节理倾角大于 45°时裂纹扩展逐渐由拉伸破坏主导。

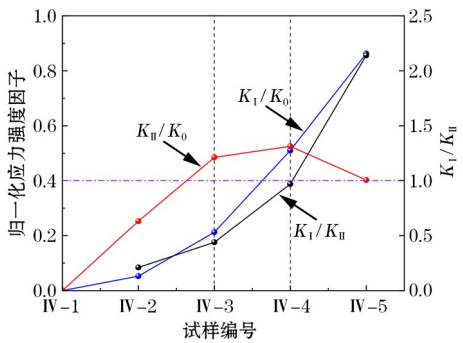


图 11 归一化应力强度因子及 $K_{\mathrm{I}}/K_{\mathrm{II}}$ 随节理倾角的变化曲线

Fig.11 Variation curves of normalized stress intensity factor and $K_{\mathrm{I}}/K_{\mathrm{II}}$ with inclination angle of joint

(2) 临界载荷计算。

阈值 1($\alpha=30°$)的破坏判据:

$$\tau\geqslant c_{\mathrm{j}}+\sigma_{\mathrm{n}}\tan\varphi_{\mathrm{j}} \tag{6}$$

阈值 2($\alpha=45°$)的破坏判据:

$$K_{\mathrm{I}}\geqslant K_{\mathrm{IC}} \tag{7}$$

临界载荷计算公式:

$$P_{\mathrm{cr}}=\begin{cases}\dfrac{c_{\mathrm{j}}}{\sin\alpha\cos\alpha-\sin^2\alpha\tan\varphi_{\mathrm{j}}} & (\alpha=30°)\\ \dfrac{K_{\mathrm{IC}}}{\sin^2\alpha\cdot Y_{\mathrm{I}}\sqrt{\pi a}} & (\alpha=45°)\end{cases} \tag{8}$$

式中:c_{j} 为水泥充填物黏聚力,取 2 MPa;φ_{j} 为水泥充填物的内摩擦角,取 25°;K_{IC} 取 0.8 MPa·$\mathrm{m}^{1/2}$;a 取 0.012 5 m。

$\alpha=30°$和 $\alpha=45°$时,P_{cr} 的计算结果见表 3。

表 3 关键倾角临界荷载

Table 3 Critical loads at key inclination angles

α/(°)	P_{cr}/MPa
30	6.32
45	7.92

2.3 岩桥结构阶段性变形特征分析

试验采用双应变片布置方案:一枚沿垂直于岩桥方向(S1)粘贴,另一枚沿岩桥方向(S2)粘贴。在单轴压缩荷载作用下,S1 可精确捕捉垂直岩桥方向的横向应变,S2 则直接获取沿岩桥方向的纵向应变,二者协同实现对岩桥结构变形特征的实时监测。所得

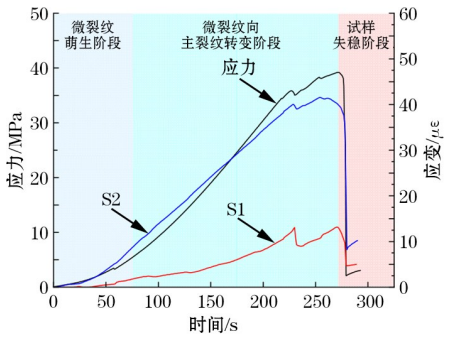
到的应力-应变-时间曲线如图 12 所示。

0°、15°节理倾角：S2 方向应变始终高于 S1 方向应变，岩桥结构在 S1 方向的变形较弱，而沿岩桥方向（S2 方向）的应变变化显著，尤其在裂纹扩展及失稳阶段呈现剧烈波动，表明该方向的应变集中程度更高。这说明裂纹主扩展路径更趋向于沿岩桥方向发展。

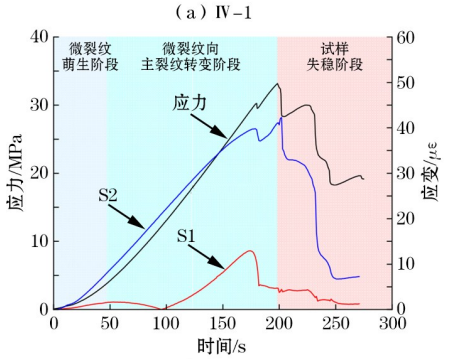
30°节理倾角：S1 方向的应变增量较 0°和 15°节理倾角更为明显，显示出该方向开始受局部裂纹扩展影响；S2 方向的应变集中现象依然突出，其波动剧烈程度高于 0°和 15°节理倾角，表明此节理倾角下裂纹扩展路径更为复杂。

45°节理倾角：S1 方向表现出显著的应变集中现象，峰值高于 S2 方向的峰值，说明裂纹在垂直于岩桥和沿着岩桥这两个方向均显著扩展，表现出该倾角下裂纹扩展的复杂性。

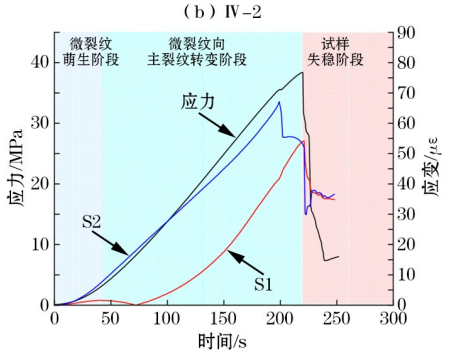
60°节理倾角：S1 方向的曲线与 S2 方向的曲线接近，应变的上升趋势与波动幅度进一步增强，表明裂纹主扩展路径仍集中于该区域，裂纹扩展模式复杂。



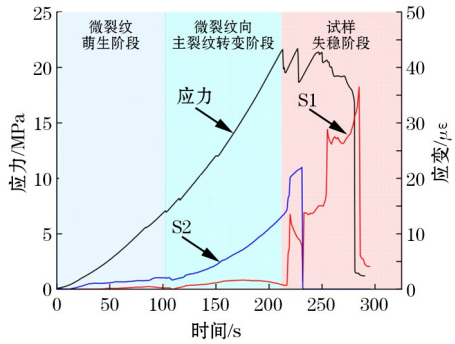
（a）Ⅳ-1



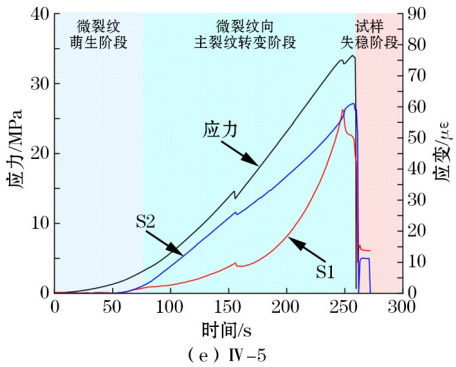
（b）Ⅳ-2



（c）Ⅳ-3



（d）Ⅳ-4



（e）Ⅳ-5

图 12　岩桥区域应力-应变-时间曲线

Fig.12　Stress-strain-time curves of the rock bridge region

2.4　岩桥结构声发射特征分析

岩体内部裂纹的发育、扩展最终以弹性波形式将能量向外部释放[32]。声发射技术能有效监测弹性波，通过接收的信号直观反映岩体内部裂纹发育情况[33]。因此，本文通过振铃计数、能量、累计振铃计数等参数，分析不同倾角的节理对红砂岩岩桥损伤程度的影响，探究其内部微观裂隙发育情况及破坏特征。不同节理倾角红砂岩的声发射特征如图 13 所示。加载初期：红砂岩内部的原生裂隙在应力作用下逐渐闭合，随后预制节理处水泥充填物被压实，此阶段声发射信号相对不活跃，且未出现信号突增。当应力不断增大，临近峰值应力及峰值应力过后，声发射信号出现多次明显突增现象。

振铃计数分布：在裂隙不稳定扩展阶段及峰值应力前后，振铃计数事件更为集中。累计振铃计数呈现阶梯式跃升。应力-应变曲线的应力值出现突增时，振铃计数也同步出现突增。倾角的影响：随裂隙倾角增大，当振铃计数突增时，累计振铃计数出现更显著的跃升，同时应力-应变曲线的应力值也呈现相应波动。

振铃计数随时间的变化直接反映材料内部微

观损伤的速率,累计振铃计数的显著增加表明材料内部损伤正在加速积累,累计振铃计数曲线突变点(如数值突然增大)是识别裂纹萌生临界点的关键信号。

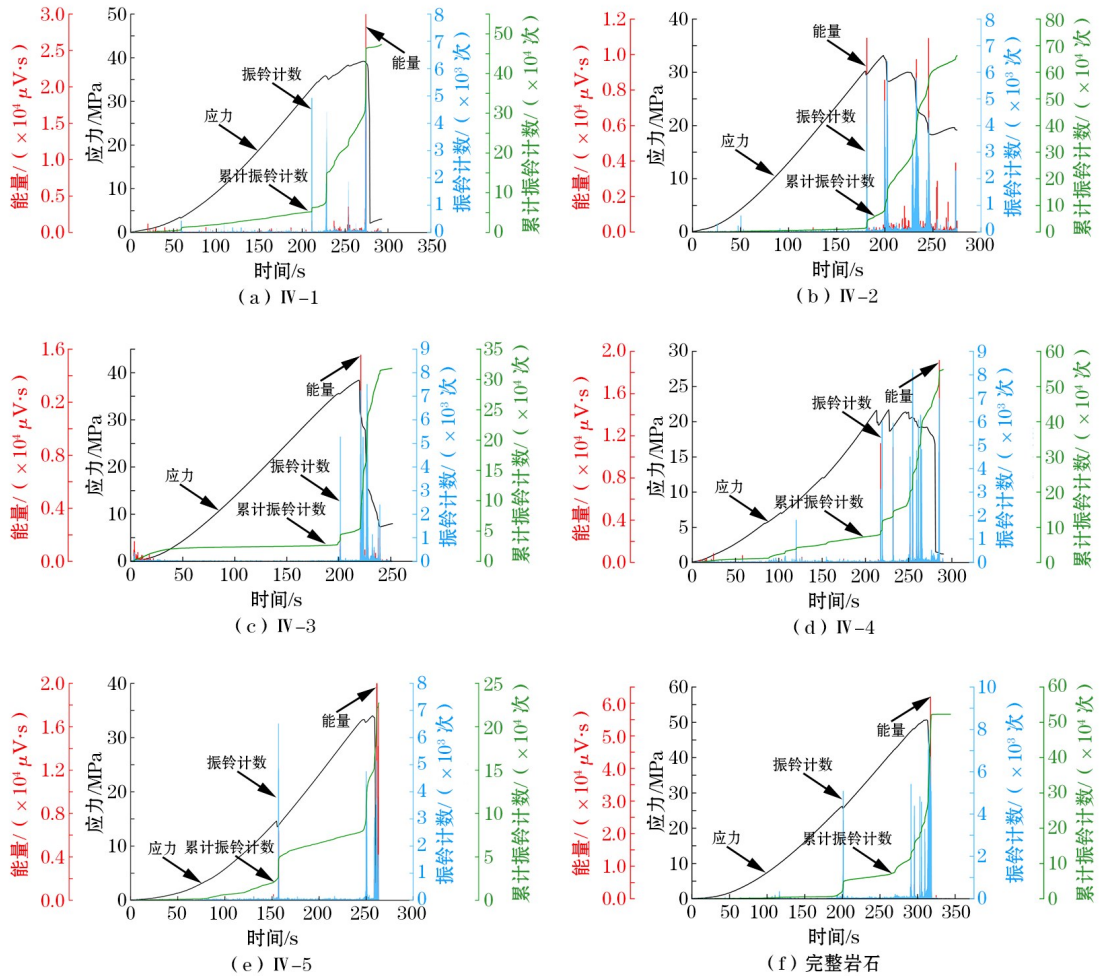


图 13 不同节理倾角下的红砂岩声发射特征

Fig.13 Acoustic emission characteristics of red sandstone under different inclination angles of joint

2.5 岩桥结构破坏模式分析

为深入研究岩桥结构内部的破坏模式,通过提取声发射振铃计数、上升时间、幅值、持续时间这些相关参数,进行 RA、AF 值计算并统计所占比例,根据两种数值所占比例进行微裂纹划分[34]。拉伸裂纹的出现伴随弹性势能的释放,体现出声发射上升时间短、幅度大、振铃计数多,此时表现出低 RA 值和高 AF 值,而剪切裂纹与之相反[35-37]。不同倾角充填节理红砂岩岩桥内部裂纹分布及占比分别如图 14 和图 15 所示。从图 14 及图 15 中可以看出,随节理倾角增大,拉伸裂纹先减少后增加,在 45°节理倾角时达到峰值(86.8%),表现出显著拉伸破坏特征;随节理倾角增大,剪切裂纹先增加后减少,在 30°节理倾角时占比最大(29.1%)。0°节理倾角时,以拉伸破坏为主(拉伸裂纹占 74.4%),剪切裂纹占比(25.6%)高于完整岩石(19.7%),表明剪切作用开始影响裂纹扩展;15°和 30°节理倾角时,剪切裂纹占比逐步提升(26.4%和 29.1%),破坏模式由拉伸向拉剪复合破坏过渡;45°节理倾角时,拉伸裂纹占比达到峰值(86.8%),呈现显著拉伸破坏特征。60°节理倾角时,剪切裂纹占比回升(17.4%),但仍以拉伸裂纹主导,破坏模式为拉剪复合破坏。

综上所述,30°的节理倾角是剪切裂纹占比最大的临界点,表明此节理倾角下剪切作用最强;45°的节理倾角是拉伸破坏最显著的阶段,裂纹扩展主要受拉伸控制。随着节理倾角增大,裂纹扩展模式从拉伸主导向拉剪复合再向拉伸主导转变,但剪切作用在中间节理倾角(15°和 30°)时影响显著。

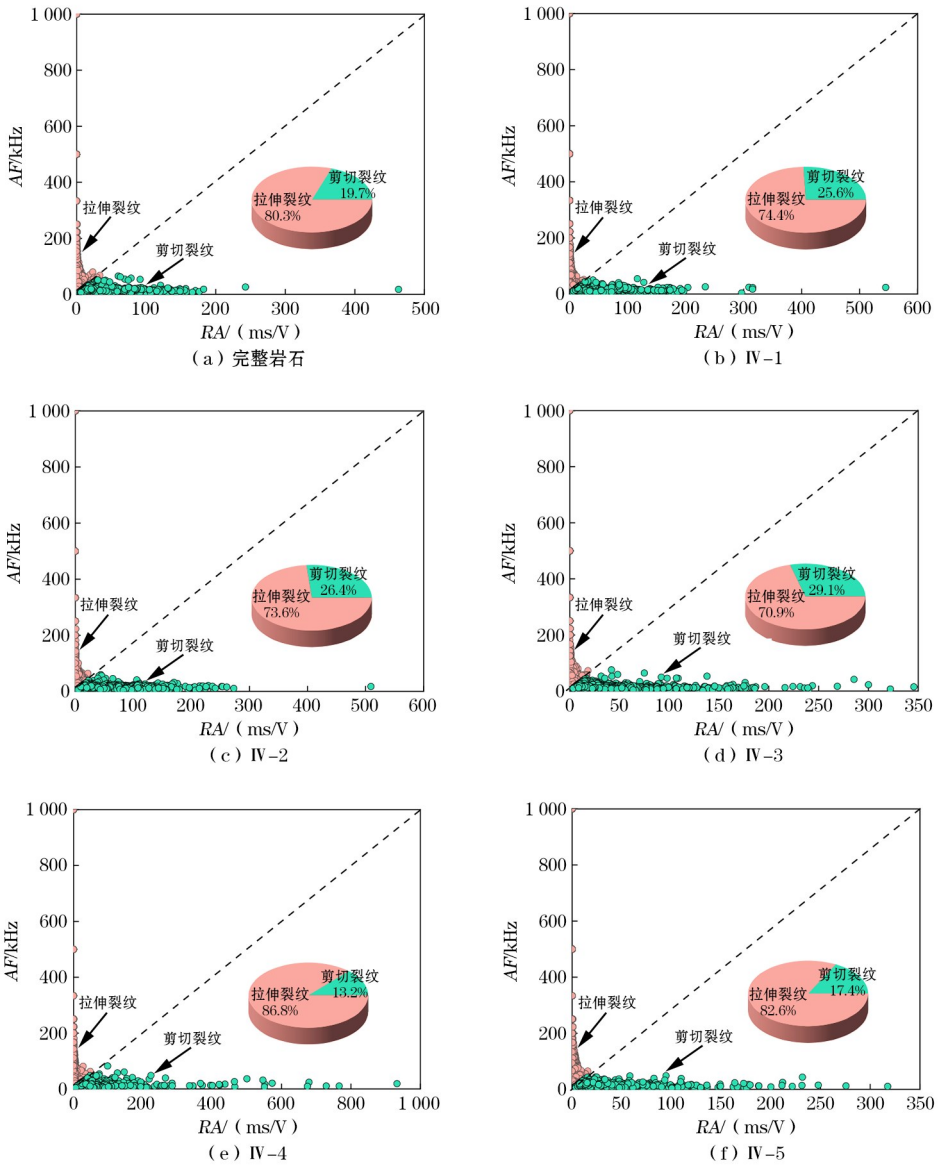


图 14　不同倾角充填节理红砂岩岩桥内部裂纹分布

Fig.14　Internal crack distribution in rock bridges of red sandstone containing filled joint with different inclination angles

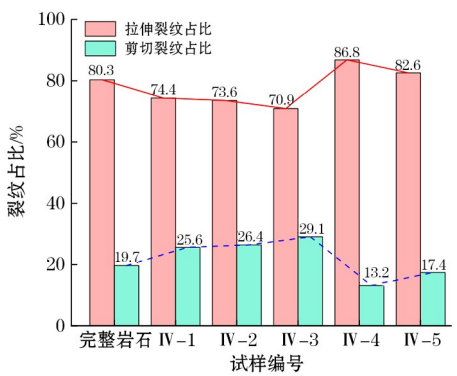


图 15　不同倾角充填节理红砂岩裂纹占比

Fig.15　Crack proportion in red sandstone containing filled joint with different inclination angles

3　FRACOD 模拟裂纹扩展

本节重点阐述基于 FRACOD 软件的二维裂纹力学建模过程，包括三轴应力状态下拉应变引起的拉伸破坏、裂纹贯通机制及剪切主导的裂纹扩展行为分析。

FRACOD 软件可以模拟复杂岩体裂纹的起裂和扩展[38]，该软件的理论基础及工程应用案例详见沈宝堂等[39]的研究成果。FRACOD 基于边界元法（BEM）的理论框架开发，采用位移不连续方法（DDM）实现显式裂纹演化预测，能够精确捕捉裂纹萌生条件、扩展路径及多裂纹相互作用机制，其算法

优势在于通过边界积分方程求解应力场和位移场,有效降低计算维度,适用于复杂裂纹网络演化模拟。

3.1 FRACOD 软件验证与工程应用

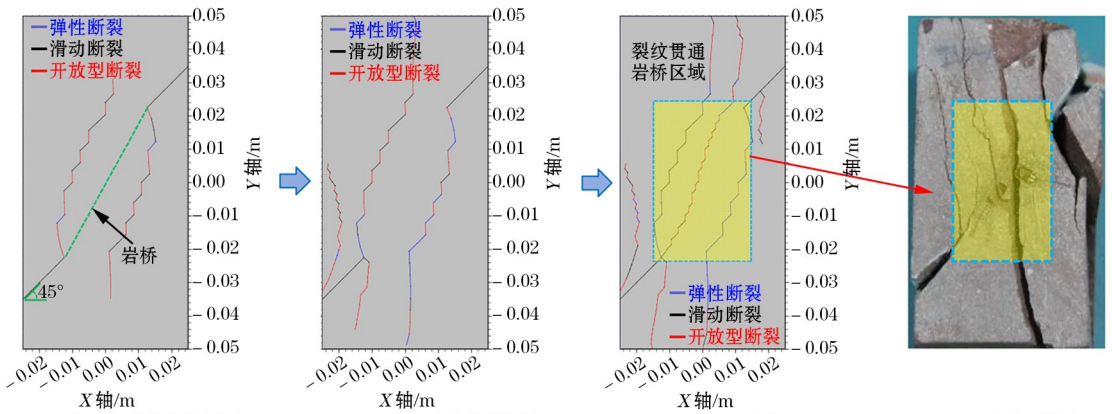
前述章节提到,45°节理倾角作为阈值 2 时,试样裂纹曲折,破坏模式从单一主裂纹主导变为多裂纹分叉。为验证 FRACOD 的裂纹扩展机制,选取含 45°节理倾角的试样建立数值模型。该模型几何参数与试验试样完全一致,加载条件设置为单轴压缩(竖向应力 40 MPa,水平应力 0 MPa)。材料参数基于红砂岩试验数据设定,见表 4。裂纹参数包括初始开度与残余开度,两者均为 10 mm,切向与法向刚度均为 100 GPa/m,Ⅰ型断裂韧度为 30 kPa·$m^{1/2}$,Ⅱ型断裂韧度为 180 kPa·$m^{1/2}$。

表 4 红砂岩力学参数

Table 4 Mechanical parameters of red sandstone

抗压强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
50.7	3.6	31.2	4.0	3.25	0.24

不同循环次数裂纹扩展过程如图 16 所示。由图 16 可知,在循环第 15 次时,节理端部因应力集中萌生竖向扩展裂纹;在循环第 25 次时,节理端部裂纹贯通导致结构失稳。裂纹曲折复杂,出现弯曲与分叉,最终贯通岩桥导致试件发生破坏。由图 16(d)可知,岩桥破坏是试样整体破坏的主控机制,同时验证了数值模型的可靠性。模拟与试验的裂纹萌生时序、扩展路径呈现高度相似性。



(a) 循环 15 次数值模拟图 (b) 循环 20 次数值模拟图 (c) 循环 25 次数值模拟图 (d) 试验观测图

图 16 不同循环次数裂纹扩展过程

Fig.16 Crack propagation process under different numbers of cycles

基于模拟结果和试验数据对裂纹情况进行了全面分析,通过计算主裂纹长度和裂纹数量密度,得到了两者之间的对比结果,如图 17 所示。

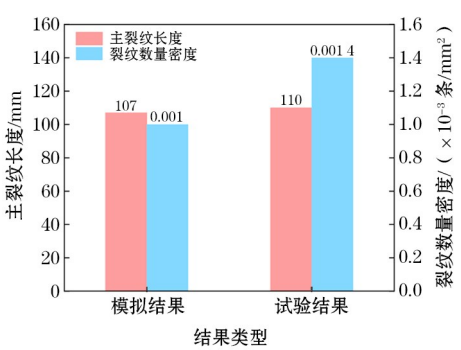


图 17 试验结果与模拟结果对比

Fig.17 Comparison of test and simulation results

图 17 中显示,模拟结果与试验结果在主裂纹长度和裂纹数量密度方面差异极小,这验证了模拟的可靠性,同时表明模拟能够准确再现试验中的裂纹特征。这为后续研究和工程应用提供了坚实的理论基础。

3.2 数值模拟与结果分析

前述章节通过单轴压缩试验研究了含节理岩体的裂纹扩展与破坏规律。然而,由于深部岩石受到上覆岩层的竖向应力及水平构造应力的共同作用,形成三轴应力状态,其力学行为与单轴压缩情况存在显著差异。例如,考虑三维应力时,岩体表现出拉剪复合行为,其中剪切为主要机制,这具有重要的工程意义。因此,在二维数值模拟中采用了 3 种不同的应力比,以研究裂纹扩展及损伤机制。3 种不同应力比的基础模型尺寸为 50 mm×100 mm,含 45°节理倾角(开度 5 mm),岩体力学参数与验证模型一致。具体工况如下。

工况 1:垂直应力 σ_v=40 MPa,水平应力 σ_h=5 MPa(应力比 8∶1)。

工况 2:σ_v=40 MPa,σ_h=10 MPa(应力比 4∶1)。

工况 3：σ_v＝40 MPa，σ_h＝20 MPa(应力比 2∶1)。

3.2.1　破坏模式与裂纹演化

循环 20 次时不同工况裂纹扩展情况如图 18 所示。对比图 16，在有水平应力作用下破坏始于节理端部张拉裂纹，裂纹沿着岩桥方向扩展。裂纹扩展初期，节理端部产生张开型裂纹，并沿岩桥方向贯通；随后在完整岩体内萌生新的竖向裂纹，扩展后期产生新的交叉裂纹。因此，该工况以剪切破坏为主导，张拉破坏占比减少。

对比不同应力比工况：应力比降低(σ_v/σ_h 从 8∶1 降至 2∶1)显著抑制裂纹萌生数量与扩展范围。应力比为 8∶1 时，裂纹沿着岩桥方向扩展并贯通，扩展方向偏离垂直应力方向，与之呈一定夹角；应力比为 4∶1 时，裂纹沿岩桥方向延伸，但未发生贯通；应力比为 2∶1 时，裂纹仅存在于节理端部附近，以节理为主体向外有限扩展。

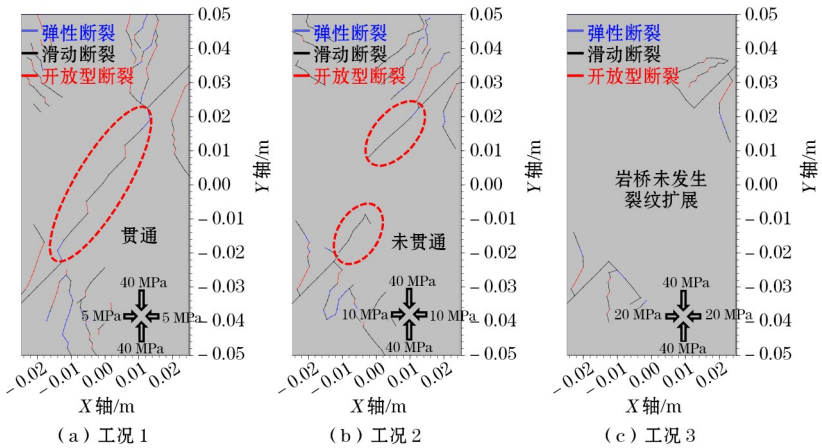


图 18　循环 20 次时不同工况裂纹扩展情况

Fig.18　Crack propagation under different loading conditions after 20 cycles

3.2.2　应力场演化特征

循环 20 次时不同工况下的应力场演化特征如图 19 所示。由图 19 可知，低围压工况(σ_h＝5 MPa)：主应力集中区局限于节理附近，裂纹群导致应力集中减弱，重分布区呈现小范围不规则形态。高围压工况(σ_h＝20 MPa)：高应力区呈规则片状分布，与最大主应力成一定倾角扩展，裂纹主要沿节理端部上下缘发展。

研究表明，3 组工况均以剪切破坏为主，剪切破坏占比与张拉破坏占比相差不大，且剪切破坏是主导裂纹路径选择的根本原因。水平应力的增大通过抑制张拉裂纹扩展显著改变岩体破坏模式，这对深部工程岩体稳定性评估具有重要指导意义。

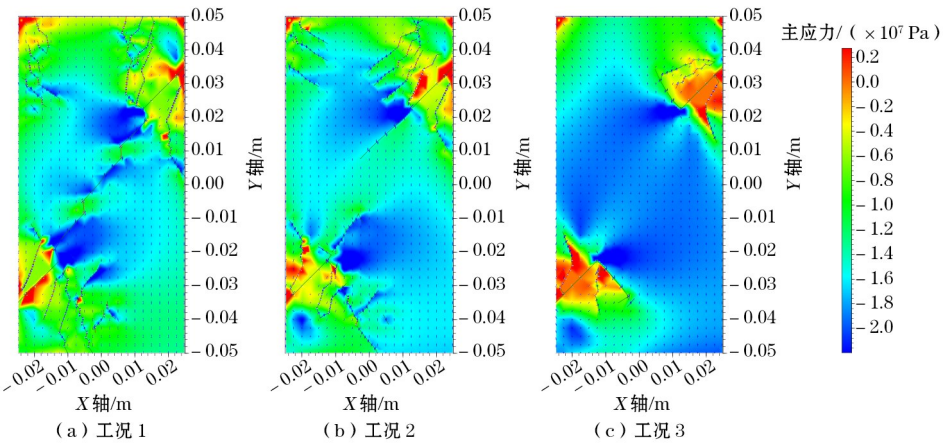


图 19　循环 20 次时不同工况主应力场演化特征

Fig.19　Principal stress field evolution characteristics under different loading conditions after 20 cycles

4　结论

本文研究了不同倾角充填节理对岩桥结构的影响，利用声发射、应变监测及 FRACOD 等手段，深入探究了其裂纹扩展及损伤机制。得出的主要结论如下。

(1) 通过不同倾角充填节理岩体单轴压缩试验发现:在荷载作用下,应力-应变曲线呈现典型的压密、弹性变形及应力骤降三个阶段。含充填裂隙红砂岩试样在峰值应力附近出现应力突增现象,这是由于试样发生滑移及内部裂纹萌生所致。

(2) 根据声发射监测试验过程中的裂纹扩展情况发现:随应力增大,加载初期声发射信号未出现突增;而在峰值应力前后均出现信号突增。声发射振铃计数在裂隙不稳定扩展阶段及峰值应力前后更为集中,累计振铃计数呈阶梯式跃升。依据累计振铃计数曲线的突增点可有效确定裂纹萌生的临界点。

(3) 基于声发射参数的 RA 值和 AF 值,计算分析表明:30°节理倾角是剪切裂纹占比最大(29.1%)的临界点,表明此节理倾角下剪切作用最强;45°节理倾角是拉伸破坏最显著(占比 86.8%)的阶段,裂纹扩展主要受拉伸控制。随着节理倾角增大,裂纹扩展模式从拉伸主导向拉剪复合再向拉伸主导转变,但剪切作用在中间节理倾角(15°和 30°)时影响显著。

(4) 基于 FRACOD 软件对节理倾角为 45°的试样在不同应力比下的数值模拟结果发现:随着应力比降低,水平应力显著抑制裂纹萌生数量与扩展范围;水平应力的增大通过抑制张拉裂纹扩展,显著改变岩体破坏模式。具体表现为:高应力比(8∶1)时,裂纹沿岩桥方向扩展并贯通;中等应力比(4∶1)时,裂纹沿岩桥方向延伸但未贯通;低应力比(2∶1)时,裂纹仅局限于节理端部附近向外有限扩展。

参考文献(References):

[1] 陈结,孟历德仁,崔义,等.基于声光联合试验的预制双裂隙砂岩损伤演化特征研究[J].岩石力学与工程学报,2025,44(1):30-42.
Chen Jie, Mengli Deren, Cui Yi, et al. Study on the damage evolution characteristics of prefabricated double-fracture sandstone based on acoustic-optical combined tests [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(1):30-42.

[2] 谢和平,陈忠辉.岩石力学[M].北京:科学出版社,2004.
Xie Heping, Chen Zhonghui. Rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2004.

[3] 陈国庆,秦昌安,魏涛,等.岩质边坡阶梯状破坏及岩桥破裂机制研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(4):809-821.
Chen Guoqing, Qin Chang'an, Wei Tao, et al. Study on the stepped failure of rock slopes and fracture mechanism of rock bridges[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(4):809-821.

[4] Wu Benniu, Liu Qinjie, Fu Qiang, et al. Damage mechanism of prefabricated fracture-grouted rock specimens under the action of dry and wet cycles[J]. Applied Sciences, 2023, 13(6):2076-3417.

[5] 高福洲,张俊云,罗晓龙,等.充填岩石节理剪切力学特性及强度经验公式研究[J].岩土工程学报,2025,47(3):608-617.
Gao Fuzhou, Zhang Junyun, Luo Xiaolong, et al. Shear mechanical properties and empirical formula of infilled rock joints[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47(3):608-617.

[6] 康永水,周秀斌,刘滨,等.充填型岩石节理剪切力学特性研究进展[J].岩土力学,2024,45(12):3576-3595.
Kang Yongshui, Zhou Xiubin, Liu Bin, et al. Research progress on shear mechanical behavior of filled rock joints [J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(12):3576-3595.

[7] 焦峰,许江,郭保华,等.充填厚度对岩石节理剪切强度影响的剪切试验研究[J].采矿与安全工程学报,2022,39(2):405-412.
Jiao Feng, Xu Jiang, Guo Baohua, et al. A shear test study on the influence of filled thickness on the shear strength of rock joints[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2022, 39(2):405-412.

[8] 柴少波,王昊,井彦林,等.充填节理岩石累积损伤动力压缩特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(10):2025-2037.
Chai Shaobo, Wang Hao, Jing Yanlin, et al. Experimental study on dynamic compression characteristics of rock with filled joints after cumulative damage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(10):2025-2037.

[9] Shen Baotang, Sun Xizhen, Yin Dawei, et al. Experimental study of the crack propagation and acoustic emission characteristics of red sandstone under cyclic loading [J]. Geotechnical Testing Journal, 2022, 45(3):590-605.

[10] 殷志强,马凯莉,吴昊原,等.动静载作用下充填节理砂岩应力波传播特性研究[J].应用力学学报,2024,41(2):432-442.
Yin Zhiqiang, Ma Kaili, Wu Haoyuan, et al. Study on stress wave propagation characteristics of filled jointed sandstone under dynamic and static loading[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2024, 41(2):432-442.

[11] 张宪尚,文光才,朱哲明,等.冲击荷载下充填节理岩体Ⅰ型裂纹动态扩展特性研究[J].岩土力学,2024,45(2):396-406.
Zhang Xianshang, Wen Guangcai, Zhu Zheming, et al. Dynamic propagation characteristics of mode I crack in infilled jointed rock masses under impact load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(2):396-406.

[12] 宋浪,柴少波,宋博阳,等.充填节理特性对岩石静态压缩力学行为影响的颗粒流模拟[J].中山大学学报(自然科学版)(中英文),2023,62(5):145-156.
Song Lang, Chai Shaobo, Song Boyang, et al. Particle flow simulation of the effect of characteristics of filled joints on rock mechanical behavior under static compression[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2023, 62(5):145-156.

[13] 王正堂,张祺,王晨龙,等.节理几何参数对岩体力学特征的影响[J].高压物理学报,2021,35(6):145-157.

Wang Zhengtang, Zhang Qi, Wang Chenlong, et al. Influence of joint geometrical parameters on mechanical properties of rock mass[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2021,35(6):145-157.

[14] 梁露,刘怀忠,肖明砾,等.断续节理岩体破坏模式对强度特性的影响[J].水电能源科学,2020,38(5):113-117.
Liang Lu, Liu Huaizhong, Xiao Mingli, et al. Influence of failure mode on strength characteristics of intermittent jointed rock mass[J]. Water Resources and Power,2020,38(5):113-117.

[15] 许江,陈奕安,焦峰,等.循环荷载条件下充填厚度对结构面剪切力学特性影响试验研究[J].采矿与安全工程学报,2021,38(1):146-156.
Xu Jiang, Chen Yian, Jiao Feng, et al. Experimental study on the influence of filling thickness on shear mechanical properties of structural plane under cyclic loading[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(1): 146-156.

[16] 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].采矿与岩层控制工程学报,2023,5(4):54-64.
Peng Yanyan, 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):54-64.

[17] Li Xianzhong, Zhang Jinhao, Li Zhenhua, et al. Failure characteristics and crack propagation process of coal-rock combinations under mine-induced stress[J]. Journal of Applied Geophysics,2025,236:105668.

[18] Li Zhonghui, Tian He, Niu Yue, et al. Study on the acoustic and thermal response characteristics of coal samples with various prefabricated crack angles during loaded failure under uniaxial compression[J]. Journal of Applied Geophysics,2022,200:104618.

[19] 吉东亮,朱永全,李晓斌,等.静载作用下复合岩体损伤演化与渐进破坏机制[J].复合材料学报,2025,42(8):4691-4701.
Ji Dongliang, Zhu Yongquan, Li Xiaobin, et al. Damage evolution and progressive failure mechanism of composite rock mass under static loading[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2025,42(8):4691-4701.

[20] Wang Zhenhua, Fang Jun, Wang Gang, et al. Experimental and numerical investigation of failure characteristics and mechanism of granites with different joint angles[J]. Shock and Vibration,2021:6890833.

[21] 孔洋,阮怀宁,张桂荣,等.玄武岩节理系数及其与强度和变形特性的关系研究[J].岩土工程学报,2024,46(增刊1):132-137.
Kong Yang, Ruan Huaining, Zhang Guirong, et al. Joint factor of basalt and its relationship with strength and deformation characteristics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2024,46(Suppl.1):132-137.

[22] Zhang Shichuan, Li Yangyang, Liu Hui, et al. Experimental investigation of crack propagation behavior and failure characteristics of cement infilled rock[J]. Construction and Building Materials,2021,268(3):121735.

[23] 张鹏海,马庆山,刘溪鸽,等.含Y型组合节理花岗岩单轴压缩破坏机理及声发射特征[J].东北大学学报(自然科学版),2024,45(4):564-572.
Zhang Penghai, Ma Qingshan, Liu Xige, et al. Uniaxial compression failure mechanism and acoustic emission characteristics of granite with Y-type composite joints[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2024,45(4):564-572.

[24] 赵娜,卫帅,王来贵,等.含不同倾角单裂隙岩石单轴压缩破裂演化过程分析[J].实验力学,2024,39(4):518-528.
Zhao Na, Wei Shuai, Wang Laigui, et al. Analysis of fracture evolution process of single fractured rock mass based on uniaxial compression[J]. Journal of Experimental Mechanics,2024,39(4):518-528.

[25] 程虹铭,杨小彬,杨东辉,等.单轴压缩下裂隙砂岩的能量转化特征及倾角效应[J].煤炭工程,2023,55(10):143-148.
Cheng Hongming, Yang Xiaobin, Yang Donghui, et al. Energy conversion characteristies and dip effect of fractured sandstone under uniaxial compression[J]. Coal Engineering,2023,55(10):143-148.

[26] 李东文,赵光明,刘之喜,等.单轴压缩下岩石全应力应变过程中能量演化特征[J].煤矿安全,2023,54(2):135-144.
Li Dongwen, Zhao Guangming, Liu Zhixi, et al. Characteristics of energy evolution during total stress-strain in rocks under uniaxial compression[J]. Safety in Coal Mines,2023,54(2):135-144.

[27] 王桂林,曹天赐,文兴祥,等.单轴压缩下单节理砂岩峰前能量自我抑制演化规律[J].煤炭学报,2021,46(增刊1):211-221.
Wang Guilin, Cao Tianci, Wen Xingxiang, et al. Evolution law of self-suppression of peak energy of single jointed sandstone[J]. Journal of China Coal Society,2021,46(Suppl.1):211-221.

[28] Shen Baotang, Shi Jingyu, Barton N. An approximate nonlinear modified Mohr-Coulomb shear strength criterion with critical state for intact rocks[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 10(4): 645-652.

[29] Shen Baotang. Hydraulic fracture modeling[M]. Amsterdam:Elsevier Publishing Company,2018.

[30] Zhang Shichuan, Shen Baotang, Li Yangyang, et al. Modeling rock fracture propagation and water inrush mechanisms in underground coal mine[J]. Geofluids,2019(1):1-15.

[31] Miao Xinting, Zhang Jinbo, Hong Haisheng, et al. Study on elastic mixed mode fracture behavior and Ⅱ-Ⅲ coupling effect[J]. Materials,2023,16(13):4879.

[32] 贾蓬,钱一锦,王茵,等.基于声发射信息的热损伤花岗岩单轴压缩破裂机制及破裂前兆[J].工程科学学报,2023,45(12):2129-2139.
Jia Peng, Qian Yijin, Wang Yin, et al. Fracture mechanism and precursors of thermally damaged granite uniaxial compression based on acoustic emission information[J]. Chinese Journal of Engineering,2023,45(12):2129-2139.

[33] 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 Leibo, Liu Xiqi, et al. Shear fracture mechanical properties and acoustic emission characteristics of discontinuous jointed granite[J]. Rock and Soil Mechanics,2022,43(6):1533-1545.

[34] 许庆钊,史文豹,常聚才,等.不同加载速率含水煤样力学响应及宏微观破坏机制研究[J].岩土力学,2025,46(3):881-893.
Xu Qingzhao, Shi Wenbao, Chang Jucai, et al. Mechanical response and macro and micro failure mechanism of water-bearing coal samples with different loading rates[J]. Rock and Soil Mechanics,2025,46(3):881-893.

[35] 陈炳瑞,魏凡博,王睿,等.西南地区某深埋隧道花岗岩破坏机制与前兆特征研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(3):469-479.
Chen Bingrui, Wei Fanbo, Wang Rui, et al. Failure mechanisms and precursory characteristics of deep buried granite in a tunnel in Southwest China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2020,39(3):469-479.

[36] 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 research of AE monitoring index in tunnel based on RA and AF[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(6):723-730.

[37] Kourkoulis S K, Pasiou E D, Dakanali I, et al. Mechanical response of notched marble beams under bending versus acoustic emissions and electric activity[J]. Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2018,56(2):523-547.

[38] Shen B T, Stephansson O, Rinne M. Modelling rock fracturing processes with FRACOD[M]. Cham: Springer International Publishing,2020.

[39] 沈宝堂,柴顺杰,张士川,等.FRACOD模拟裂纹扩展液-力耦合模块的研发及工程应用[J].山东科技大学学报(自然科学版),2021,40(3):26-34.
Shen Baotang, Chai Shunjie, Zhang Shichuan, et al. Development and application of hydro- mechanical coupling function in simulating crack propagation of FRACOD[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science),2021,40(3):26-34.