·建筑科学·

引用格式:孙杰龙,温子怡,李丹,等. 含裂隙砂岩压剪破坏特征及裂纹扩展机理[J]. 延安大学学报(自然科学版),2026,45(3):78-83. [SUN J L,WEN Z Y,LI D,et al. Characteristics of shear failure in fractured sandstone and mechanism of crack propagation[J]. Journal of Yan'an University(Natural Science Edition),2026,45(3):78-83.] **DOI**:10.13876/J.cnki.ydnse.250130

含裂隙砂岩压剪破坏特征及裂纹扩展机理

孙杰龙[1*],温子怡[1],李　丹[2],娄　冰[1],邱明明[1]

(1. 延安大学 建筑工程学院;2. 富县建设服务中心,陕西 延安 716000)

摘　要:为研究裂隙砂岩压剪破坏特征及裂纹扩展机制,通过开展饱和状态下不同裂隙角度(0°、15°、30°、45°、60°、75°和90°)试样的剪切试验,结合数字图像技术(DIC)监测不同倾角试样的平面应变演化云图,分析红砂岩在不同裂隙倾角下的破坏特征、裂纹扩展路径及应变场的演化规律。结果表明,随着裂隙倾角的增大,试样的破坏模式由小角度(0°、15°)的张拉破坏逐渐转变为中角度(30°、45°、60°)的张拉-剪切破坏,最终在裂隙角度为90°时表现出典型的剪切破坏;当裂隙倾角从0°增加到90°时,峰值抗剪强度从7.6 MPa(α=0°)上升至11.58 MPa(α=75°),再减小至3.6 MPa(α=90°),试样的峰值抗剪强度呈现先波动上升后急剧下降的趋势;DIC分析结果进一步表明,高应变区域分布与裂隙几何特性密切相关,小角度裂隙高应变区沿加载方向扩展,中角度裂隙沿裂隙的倾斜方向扩展,大角度裂隙则直接沿裂隙面迅速贯通。研究成果可为边坡或隧道的设计与稳定性评估提供参考。

关键词:裂隙岩石;压剪试验;裂纹发展;DIC

中图分类号:TU458　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1004-602X(2026)03-0078-06

深部岩体处于高地应力环境,受到扰动后岩体应力会发生重新分布,极易引起压剪复合破坏,导致裂隙扩展、贯通,引发围岩大变形甚至垮塌[1-2]。工程灾害的发生本质上是裂隙砂岩在压剪过程中裂纹萌生、扩展直至贯通的演化过程。在实际工程中,岩体内部会存在或受因扰动产生的各种裂隙,这些裂隙在压剪复合应力作用下发生扩展和贯通,从而导致裂隙岩体失稳破坏。

近年来,国内许多学者通过室内试验和数值模拟的方法对裂隙岩石的损伤机制进行研究,并取得了系统的成果。其中,在室内试验方面,范文臣[3]、杨圣奇[4]和范宏运[5]等分别采用压剪试验和单轴压缩试验研究裂隙砂岩的力学特性,通过对多裂纹起裂顺序、扩展路径以及相互作用机制的系统性研究,并指出裂隙角度小于30°是主要呈现张拉破坏,大于45°时表现为拉剪复合破坏。李地元等[6]采用分离式霍普金森压杆(SHPB)试验结合高速摄像技术,探究了含圆形及椭圆形孔洞大理岩在冲击载荷下的动态力学响应与破坏机制,揭示了孔洞几何特征与动态破坏模式的关联性。张波[7]和杨大方[8]等针对含有预制裂隙的砂岩进行单轴压缩分析岩桥宽度岩桥倾角与应力应变曲线和扩展之间的关系,进一步分析岩石的破坏模式。

除了室内试验外,还有利用数值模拟的方法验证岩体裂隙的微观特性研究,对裂纹的起裂、扩展机理及裂纹的发展路径进行研究。刘伟韬等[9]利用常规单轴试验,研究边缘预制裂隙对岩石宏观力学行为及内部微裂纹扩展演化,裂纹扩展遵循着从微

收稿日期:2025-11-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(12462032,12102379);延安大学十四五中长期重大科研项目(2021ZCQ011)

作者简介:孙杰龙(1989—),男,副教授,博士,主要从事岩体力学与土力学研究。

*通信作者 E-mail:sunjielong@126.com

观损伤累积到宏观裂纹贯通的内在规律。冯豪天[10]和蒋明镜[11-12]等通过离散元数值分析方法建立数值模型，分析岩体在荷载作用下的裂纹扩展，并指出应力峰值随倾角的增大呈现先增大后减小的趋势。张科等[13]对反倾角裂隙岩石的压剪断裂进行分析，指出裂隙的不同角度直接影响岩石的抗剪强度。王二博[14]和陈家嵘[15]等利用DIC技术和扫描电镜(SEM)技术，研究含预制裂隙砂岩的应变演化特征，进一步研究裂隙倾角对裂纹微观的影响。王辉等[16]研究发现预制裂隙影响黑色页岩的强度和破坏模式，层理和裂隙角度改变裂纹扩展路径。

综上所述，目前针对裂隙砂岩裂纹扩展路径、起裂角度与变形破坏规律的研究手段比较单一，结合DIC技术的裂隙砂岩在压剪荷载下的试验研究报道较少。为此，本文采用自制的压剪试验模具对裂隙砂岩进行试验，利用DIC技术分析裂隙砂岩在压剪复合作用下的裂纹扩展机理与演化规律，对裂隙岩体稳定性与安全性评价具有重要意义。

1　试样制备及方案

1.1　试样制备

试验所用岩石材料为细红砂岩，试验砂岩选自彬长矿区某综合开挖工作面，地层划分属于华北地层区鄂尔多斯盆地，岩层为中侏罗统延安组，平均埋深700 m[17]。为保证试样的均质性，选取质地均匀的红砂岩，沿垂直于层面方向进行钻孔取芯，尺寸为50 mm×50 mm×50 mm正方体试样。为研究不同裂隙角度下砂岩试样性能和破坏过程的影响，在试样中心预制尺寸为长×宽=10 mm×1 mm，倾角在0°~90°的裂隙，如图1所示。

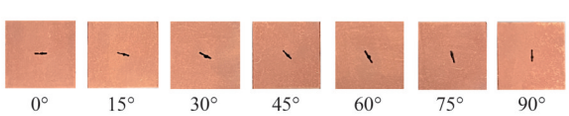


图1　砂岩试样示意图

1.2　试验方案

试样制备完成后，测量每个试样的尺寸、质量和波速，以确保试样的均质性，减小试验误差。将编好号的试样放入烘箱，在105 ℃下烘干24 h后冷却至常温，再将冷却后的试样放入真空饱和缸内，在-0.1 MPa下抽取真空2 h，随后在10 MPa的压力下进行饱水24 h，期间反复称量试样质量，直至无变化。在对试样进行DIC处理时，试样散斑的制作对试验结果准确性起着至关重要的作用。需要在试样表面制作均匀的散斑，试样饱和后采用喷漆法对试样含有裂隙一面的表面进行散斑处理，先在打磨光滑的试样表面均匀喷涂一层白色底漆，待白色底漆干燥后在其表面均匀的喷涂黑色散斑点，如图2A所示。

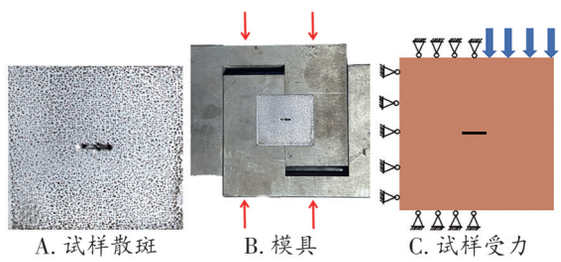


图2　试样散斑处理、剪切模具及受力分析图

散斑处理完成后采用自制压剪模具(图2B)进行压缩剪切试验，加压设备为YAW-2000 C微机控制电液伺服压力试验机，加载速率为0.10 kN/s，采用MV-CS200-10 UC高速工业摄像机对试样表面应变场演化与裂纹扩展过程进行实时记录，采集频率为50 Hz。此外，为了保证拍摄的图片质量，拍照时利用LED补光灯照亮试样表面。在试样的起裂、裂纹扩展和贯通中，无法通过肉眼进行准确观测，而是要通过DIC技术分析散斑点变化从而获取试样的变形过程。随着不断施加荷载的演化过程，可以清晰的辨识到裂纹的起裂、扩张等其他行为。

2　结果与分析

2.1　应力-应变曲线规律

在压剪荷载作用下，不同裂隙角度试样的应力-应变曲线表现出显著差异。这种差异来源于裂隙面与加载方向之间夹角的变化，从而引起了裂纹的起裂、扩展与最终的破坏模式。图3为不同裂隙试样在压剪荷载作用下的应力-应变曲线。裂隙与加载方向之间的夹角不仅影响试样的抗剪能力，同时影响着试样内裂纹的发展路径和最终破坏形式。根据其力学响应与破坏模式，将裂隙角度划分为小角度(0°、15°)、中角度(30°、45°、60°)、和大角度(75°、90°)。

小角度试样的应力-应变曲线在压密阶段呈现上凹型，主要变形机制为岩石内部原生裂隙与孔隙在荷载作用下被压缩闭合。在裂隙尖端出现轻微的应变集中，表明在较小的应力增量下产生较大的应变，这反应岩石内部天然裂隙和孔隙被逐渐压密，此时裂隙对试样的整体变形影响较小；随着剪切应力不断增大，曲线呈现近似直线变化，标志着

微裂纹在裂隙尖端开始萌生,此时试样表现出在裂隙尖端沿近乎垂直的方向扩展。随着试样不断被压密,内部的微裂纹不断发展,直至试样发生完全破坏。小角度试样的破坏模式从裂隙尖端萌生的张拉裂纹向裂隙面方向扩展,直至试样发生张拉破坏。高应变区域沿加载方向迅速扩展并贯通试样,该阶段内裂纹迅速贯通导致试样宏观裂纹快速发展,最后破坏模式表现为典型的张拉破坏。

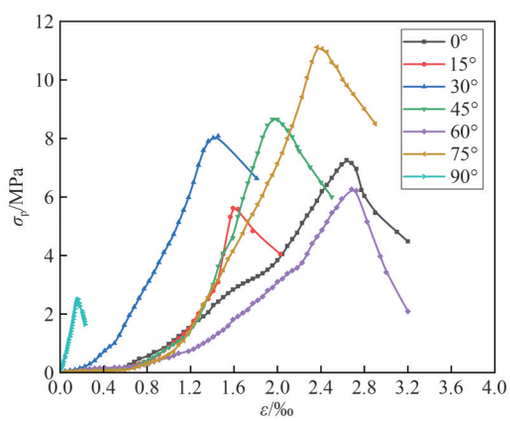


图3 压剪荷载作用下各裂隙的应力-应变曲线

中角度裂隙试样,试样的剪切应变分布相较于小角度裂隙试样发生显著转变,裂纹从裂隙尖端萌生,并沿着与荷载方向约呈45°至60°夹角的路径扩展,形成明显的"Z"形。这表明剪切作用在裂纹扩展过程中的显著增强。在裂隙角度为30°和45°时,试样在8.3 MPa时达到峰值强度。在峰后阶段应力峰值下降较为平缓,有一定的残余强度。与小角度裂隙试样相比,中角度裂隙试样在加载过程中滑移效应更为显著,裂隙面上的剪应力作用显著增强,导致裂隙尖端的应力集中区域进一步扩大,裂隙滑移和剪切破坏占主导作用,裂隙的张拉作用进一步减弱,裂纹呈倾斜扩展特征,从而导致中角度裂隙试样的破坏模式从单一的张拉破坏向张拉-剪切的复合破坏进行过渡。

大角度裂隙试样所受到的剪切应力不断增大,裂隙面更容易闭合,当裂隙角度达到90°时,初始的压密阶段较短,应力达到2.5 MPa时,试样发生剪切破坏。由于裂隙角度与加载方向平行,极易发生破坏,滑移效应更为显著,高应变区域更加明显。在大角度裂隙试样中,剪切滑移逐渐成为主导机制,裂纹的扩展方向更倾向于沿裂隙面方向发展并产生剪切裂纹。高应变区域沿裂隙方向迅速扩展至全域,试样在剪切滑移作用下快速失稳破坏。

随着裂隙角度不断增大,最大剪切应变的发生位置从裂隙尖端转移至裂隙面中部或另一端。不同倾角试样的破坏形态从张拉主导(小角度)到张拉-剪切复合(中角度)主导,最终过渡为剪切主导(大角度)。

2.2 抗剪强度随裂隙倾角的发展规律

为揭示压剪荷载作用下裂隙砂岩的破坏机制,对不同裂隙角度的试样进行加载得出峰值抗剪强度,如图4所示。当裂隙倾角为75°时,试样的峰值抗剪强度达到最高(11.58 MPa),当裂隙倾角为90°时,峰值抗剪强度最低(3.62 MPa)。当裂隙角度从0°增加到90°时,试样的峰值抗剪强度先呈现波动上升,在75°时达到最大值后急剧下降,试样的峰值抗剪强度变化主要受裂隙倾角与加载方向的控制。

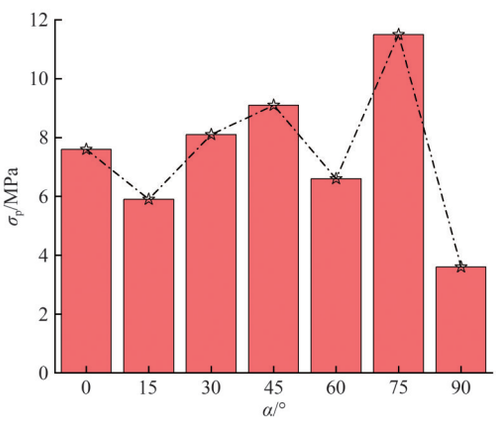


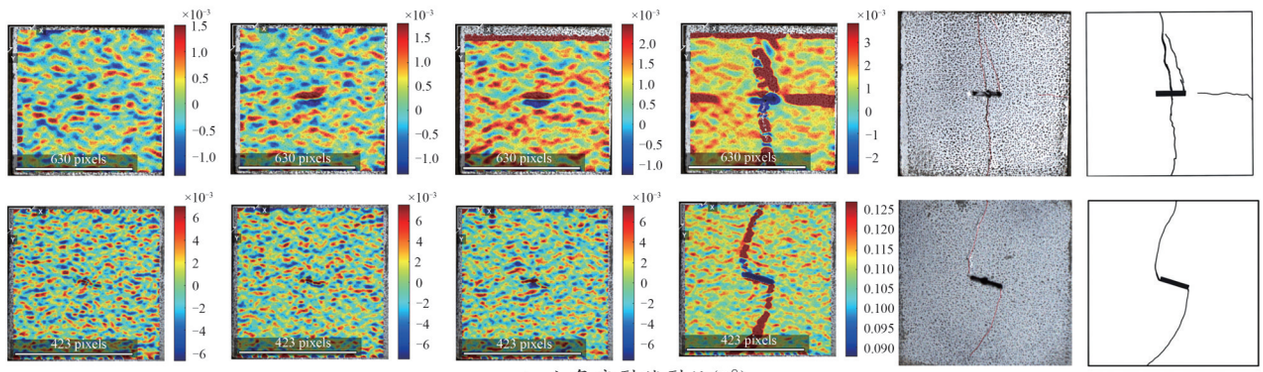
图4 不同裂隙角度试样峰值抗剪强度

在压剪荷载作用下裂隙面的法向应力提供摩擦阻力(图2C),剪应力影响裂隙滑移。当裂隙角度为0°时,裂隙面垂直于加载方向,法向应力很大,摩擦阻力也很大,但直接作用在裂隙面上的剪切力很小,试样的破坏是由裂隙尖端产生的张拉型裂纹主导,张拉应力在裂隙尖端集中,破坏模式主要以张拉裂纹破坏为主。随着裂隙角度增至30°和45°,裂隙面与剪切作用面夹角减小,试样峰值抗剪强度上升,此阶段裂隙滑移作用增强,剪切和张拉共同作用,使破坏模式趋于混合型,尤其在45°时达到滑移的最佳角度,试样表现出典型的张拉-剪切符合破坏模式。相比于其他裂隙角度而言,当裂隙角度继续增至60°时,试样峰值抗剪强度再次下降,此时的裂隙面与剪切面的夹角不断减小,在裂隙角度到75°时试样的峰值抗剪强度达到最大值(11.58 MPa)。此时较高的法向应力在裂隙面上产生了显著的摩擦阻力,从而提升了宏观的抗剪强度。裂隙面同时承受较高的剪应力与足够的法向应力,二者达到最佳

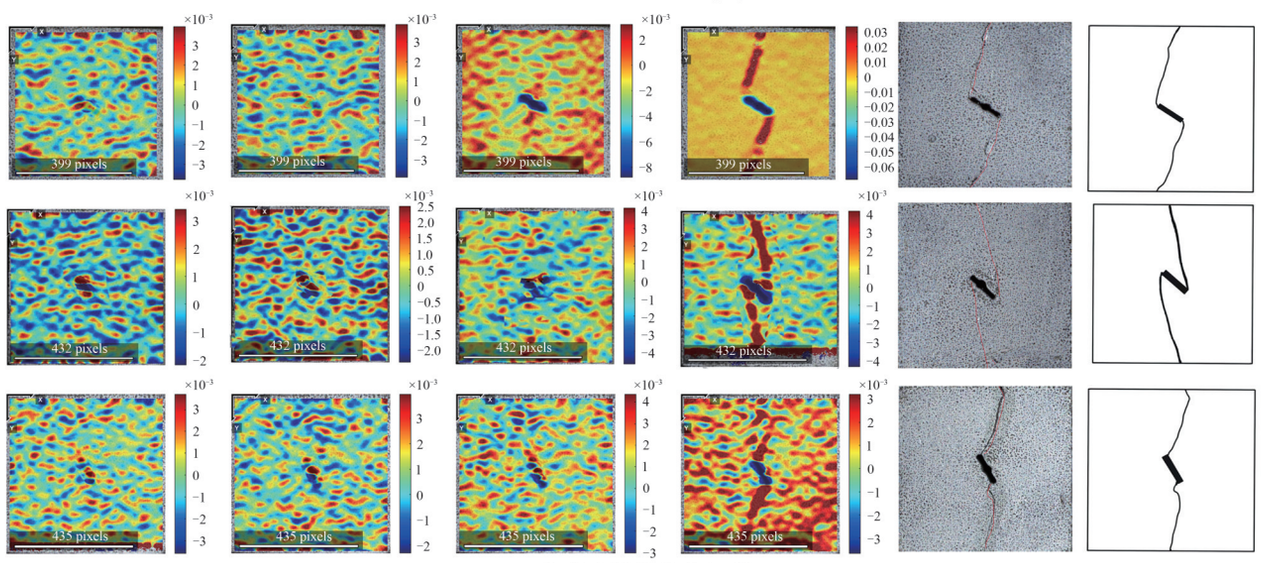
耦合，因而表现出抗剪强度的最大值，说明试样峰值抗剪强度的变化受裂隙倾角与加载作用方向的相对关系决定。试样裂隙角度达到90°时，裂隙面与加载方向平行时，裂隙面上法向应力趋近于0，峰值抗剪强度出现大幅度降低，试样在很小的剪切力作用下就会发生剪切滑移，裂隙面上几乎不承受法向压应力，因此，剪切作用导致试样沿裂隙面滑移成为主导破坏模式。

2.3　裂纹扩展分析

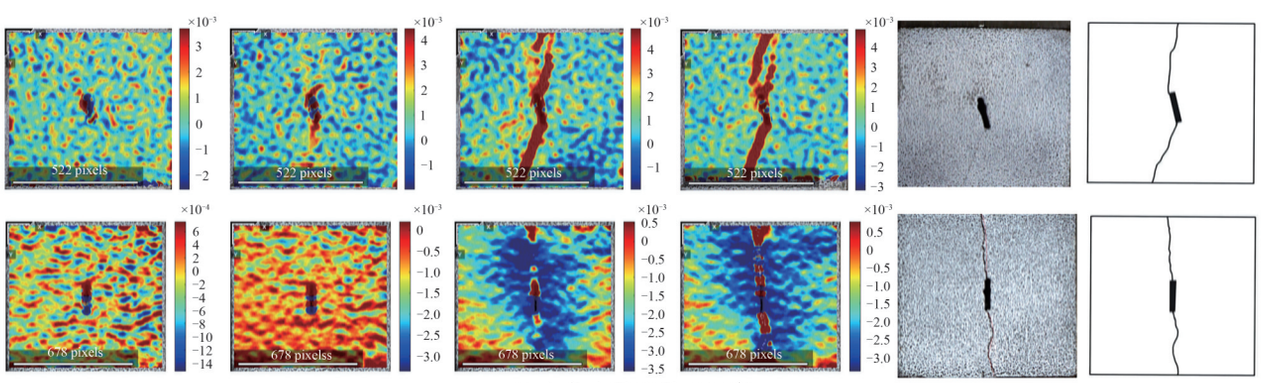
采用Vic-2D软件内嵌的数字图像相关算法，得出了不同裂隙试样的破坏对比图如图5所示。这些算法依托于子区变形分析、非线性优化和可靠性引导等技术，确保了数据处理的精确性。所有7个裂隙试样均呈现规律性的破坏模式演变，选取其中最具代表性的0°（小角度）、45°（中角度）和90°（大角度）3种典型情况进行分析。



A. 小角度裂隙裂纹(0°)



B. 中角度裂隙裂纹(45°)



C. 大角度裂隙裂纹(90°)

图5　破坏试样对比图

在0°裂隙试样中,随着荷载不断增加,裂纹主要从裂隙两端的尖端区域萌生,由于裂隙面垂直于最大压应力方向,在裂隙尖端产生强烈的拉应力集中,从而出现张拉型翼裂纹,其扩展方向平行于加载方向。在破坏阶段,裂纹扩展沿裂隙倾斜方向贯通,高应变区垂直扩展,裂纹路径以竖向为主,轴向应变在裂隙处集中,表现为典型的张拉破坏模式。在此过程中,裂隙滑移作用较弱,图中显示小角度裂隙倾角的试样破坏特征较为复杂,预制裂隙的上下尖端与试样边缘贯通,左右尖端产生的次生裂纹指向预制裂隙方向。

在45°裂隙试样中,受压过程中翼裂纹从裂隙尖端萌生并扩展,受剪切效应影响显著,扩展路径沿裂隙倾角方向延伸。裂隙尖端的高应变区域扩大,这表明张拉效应在起裂阶段占主导作用,而随后剪切效应增强,张拉作用减弱。此时,裂隙面与最大主应力方向呈一定的夹角,裂隙尖端同时存在显著的拉应力区和剪应力区。初始扩展的翼裂纹在后续扩展中受到剪应力的影响发生偏转,最终与次生剪切裂纹连接,形成典型的拉-剪复合贯通"Z"路径。高应变区域主要集中在裂隙尖端,并沿裂隙倾角扩展,表明剪切效应在裂纹扩展中的主导地位逐渐增强。最终导致以剪切破坏为主,张拉破坏为辅的破坏模式。

在90°裂隙试样中,裂隙与剪切方向完全平行,滑移效应达到最大值,裂纹扩展完全由剪切破坏主导。DIC应变场显示,在宏观裂纹出现前,沿裂隙面已经形成高应变局部化带,表明试样内部的损伤积累。裂纹从裂隙尖端向下扩展,并沿裂隙面迅速贯通。由于裂隙角度较大,剪切滑移效应显著增强,同时张拉效应在裂纹扩展中的作用减弱。裂纹扩展路径与裂隙面基本平行,几乎不受张拉破坏的影响。裂隙面与最大剪应力方向几乎平行,且法向应力极小,破坏主要表现为沿预制裂隙面的纯剪切滑移,几乎不产生新的张拉裂纹,最终破坏模式为典型的剪切滑移贯通破坏,裂隙滑移主导整个破坏过程。DIC应变场结果与应力-应变曲线、裂纹扩展路径及宏观破坏模式的观测结果高度一致。

3 结论

1)随着裂隙倾角的增大,砂岩的破坏模式由张拉破坏向张拉-剪切复合进行过渡,最后发生剪切破坏。

2)不同裂隙角度下试样的峰值荷载呈现非线性变化,当裂隙倾角从0°增加到90°时,试样的峰值抗剪强度呈现先波动上升,在75°时达到峰值后急剧下降。

3)基于应变场演化的裂纹扩展路径揭示破坏机理,随裂隙倾角增大,裂隙滑移效应增强,裂纹扩展加速。小角度试样裂纹沿加载方向扩展,以张拉破坏为主;中角度试样裂纹沿倾角方向扩展,以张拉剪切复合型破坏为主;大角度试样裂纹沿裂隙面贯通,以剪切破坏为主。

参考文献:

[1]龚涛,钱江澎,张继,等.从四川筠连县金坪村滑坡论乌蒙山区"群蝶效应"致冬季滑坡机制[J].岩石力学与工程学报,2025,44(11):2943-2958..

[2]刘绍昌.基于Newmark模型的怒江州设定地震潜在滑坡危险性评估[J].大地测量与地球动力学,2026,46(4):399-407.

[3]范文臣,曹平,张科.不同压剪应力比作用下节理类岩石材料破坏模式的试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(3):926-932.

[4]杨圣奇,刘相如,李玉寿.单轴压缩下含孔洞裂隙砂岩力学特性试验分析[J].岩石力学与工程学报,2012,31(S2):3539-3546.

[5]范宏运,张盛,李傲博,等.含预制裂隙岩石多裂纹起裂和扩展演化规律及相互影响机制研究[J].煤炭科学技术,2026,54(5):314-327.

[6]李地元,成腾蛟,周韬,等.冲击载荷作用下含孔洞大理岩动态力学破坏特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(2):249-260.

[7]张波,李术才,杨学英,等.含交叉多裂隙类岩石材料单轴压缩力学性能研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(9):1777-1785.

[8]杨大方,张丁元,牛双建,等.预制裂隙细砂岩裂纹扩展过程及宏观破坏模式单轴压缩试验研究[J].采矿与安全工程学报,2019,36(4):786-793.

[9]刘伟韬,周在兴,苏苗苗,等.含边缘裂隙红砂岩力学特性与裂纹扩展规律试验研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(6):736-745.

[10]冯豪天,陈俊智,任春芳.含裂隙岩石裂纹扩展与剪切特性的数值研究[J].中国安全生产科学技术,2022,18(6):134-140.

[11]蒋明镜,张宁,申志福,等.含裂隙岩体单轴压缩裂纹扩展机制离散元分析[J].岩土力学,2015,36(11):3293-3300+3314.

[12]蒋明镜,陈贺,张宁,等.含双裂隙岩石裂纹演化机理的离散元数值分析[J].岩土力学,2014,35(11):3259-3268+3288.

[13]张科,陈宇龙,程赫明,等.反倾角裂隙岩体压剪断裂及破碎特征研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(S1):

3291-3299.
[14]王二博,王志丰,王亚琼. 含裂隙岩石单轴压缩下力学性能及能量演化机制研究[J]. 高压物理学报,2024,38(1):119-132.
[15]陈家嵘,周昌台,周韬,等. 压剪荷载下含单一裂隙砂岩的应变演化与破坏特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,2023,42(7):1743-1758.
[16]王辉,李勇,曹树刚,等. 含预制裂隙黑色页岩裂纹扩展过程及宏观破坏模式巴西劈裂试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(5):912-926.
[17]孙杰龙,陈锐,李晓敏,等. 单轴压缩下饱和裂隙红砂岩力学特性试验及PFC^{2D}模拟[J]. 延安大学学报(自然科学版),2024,43(4):114-120.
[18]WANG L C, CARDENAS M B. Development of an empirical model relating permeability and specific stiffness for rough fractures from numerical deformation experiments [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2016, 121(7):4977-4989.
[19]ZOU L C, JING L R, CVETKOVIC V. Shear-enhanced nonlinear flow in rough-walled rock fractures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 97:33-45.
[20]邵冬亮,李术才,李明田,等. 单轴压缩条件下不同裂纹制作方式的裂纹破坏分析及其声发射特征研究[J]. 山东大学学报(工学版),2011,41(3):131-136.
[21]潘鹏志,丁梧秀,冯夏庭,等. 预制裂纹几何与材料属性对岩石裂纹扩展的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008(9):1882-1889.
[22]易成,郝彬,朱红光,等. 裂隙岩体的一体两介质模型抗剪性能研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(6):1207-1215.
[23]马永尚,陈卫忠,杨典森,等. 基于三维数字图像相关技术的脆性岩石破坏试验研究[J]. 岩土力学,2017,38(1):117-123.
[24]WANG Q S, CHEN J X, GUO J Q, et al. Acoustic emission characteristics and energy mechanism in karst limestone failure under uniaxial and triaxial compression [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(3):1427-1442.
[25]NING J G, WANG J, JIANG J Q, et al. Estimation of crack initiation and propagation thresholds of confined brittle coal specimens based on energy dissipation theory [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(1):119-134.

[责任编辑　张　香]

Characteristics of shear failure in fractured sandstone and mechanism of crack propagation

SUN Jielong[1*], WEN Ziyi[1], LI Dan[2], LOU Bing[1], QIU Mingming[1]

(1. School of Architecture and Engineering, Yan'an University; 2. Fuxian Construction Service Center, Yan'an 716000, China)

Abstract: To study the characteristics of shear failure in fractured sandstone and the mechanism of crack propagation, shear tests were conducted on specimens with different fracture angles (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° and 90°) under saturated conditions. Combined with digital image technology (DIC) to monitor the plane strain evolution cloud diagrams of specimens with different inclination angles, the failure characteristics, crack propagation paths and evolution laws of strain fields of red sandstone under different fracture angles were analyzed. The results show that with the increase of the fracture inclination angle, the failure mode of the specimen gradually changes from small angle (0°, 15°) tensile failure to medium angle (30°, 45°, 60°) tensile-shear failure, and finally shows typical shear failure at the fracture angle of 90°. When the fracture inclination angle increases from 0° to 90°, the peak shear strength increases from 7.6 MPa (α=0°) to 11.58 MPa (α=75°), and then decreases to 3.6 MPa (α=90°), and the peak shear strength of the specimen shows a trend of fluctuating first and then decreasing sharply. The results of DIC analysis further show that the distribution of high-strain areas is closely related to the geometric characteristics of fractures, with high-strain zones in small-angle fractures propagating along the loading direction, medium-angle cracks propagating along the inclination direction of fractures, and large-angle cracks directly penetrating rapidly along the fracture surface. The research results can provide a reference for the design and stability evaluation of slopes or tunnels.

Key words: fractured rocks; compression-shear test; crack development; DIC