

基于数字图像相关技术和有限-离散元法数值模拟的含孔洞千枚岩变形破坏机制研究

郭莹^{1,2}, 张小波^{1,2}, 曹志松^{1,2}, 易乐^{1,2}, 马永力^{1,2}, 姚池^{1,2}

(1. 南昌大学 工程建设学院, 江西 南昌 330031; 2. 南昌大学 水工岩土工程安全江西省重点实验室, 江西 南昌 330031)

摘要: 在千枚岩地层中的隧洞开挖的围岩应力集中效应与层面力学效应对岩体变形破坏的影响显著, 容易引起围岩的非对称变形。为深入理解千枚岩层理倾角对围岩变形破坏的控制作用, 研究了 0°, 30°, 45°, 60° 和 90° 这 5 种层理倾角的含孔洞千枚岩试样在压缩条件下的变形特征、应力演化 and 渐进破坏机制。试验结果表明: 含孔洞千枚岩破坏荷载随层理倾角的增大呈 U 型变化趋势。基于数字图像相关 (digital image correlation, 简称 DIC) 技术研究了层理倾角对含孔洞岩样破坏模式的影响: 层理倾角为 0° 时, 孔顶与孔底形成高应变集中区, 发生张拉破坏; 层理倾角为 30°~60° 时, 在孔洞应力集中效应与层面力学效应的共同作用下, 应变集中带沿层理扩展, 诱发剪切滑移破坏; 层理倾角为 90° 时, 应变集中带沿竖直方向延伸, 发生沿层理的劈裂张拉型破坏。采用基于内聚力模型的有限-离散元方法研究了含孔洞千枚岩试样的细观破坏机制, 基于试验结果验证了该方法在模拟含孔洞层状岩样力学行为的可行性和适用性。双轴加载条件下的数值模拟研究表明, 侧压不仅提高了岩样的承载能力, 降低各向异性率, 同时还使得不同倾角岩样的破坏模式发生转变。

关键词: 千枚岩; 层理倾角; 数字图像相关; 破坏机制; 有限-离散元法

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2026) 07-2489-13

Deformation and failure mechanism of phyllite with a cavity based on digital image correlation technology and finite-discrete element method numerical simulation

GUO Ying^{1,2}, ZHANG Xiao-bo^{1,2}, CAO Zhi-song^{1,2}, YI Le^{1,2}, MA Yong-li^{1,2}, YAO Chi^{1,2}

(1. School of Infrastructure Engineering, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China;

2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Hydraulic Geotechnical Engineering Safety, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China)

Abstract: During tunnel excavation in phyllite formations, the stress concentration effect in surrounding rock and the mechanical effect of beddings significantly influence the deformation and failure of rock masses, commonly resulting in asymmetric deformation. To investigate the impact of phyllite bedding dip angle on the deformation and failure of surrounding rocks, this study examined the deformation characteristics, stress evolution, and progressive failure mechanisms of cavity-containing phyllite specimens with five bedding dip angles (0°, 30°, 45°, 60°, and 90°) under compression. Experimental results indicate that the failure load of cavity-containing phyllite exhibits a U-shaped trend with increasing bedding dip angle. By adopting the digital image correlation (DIC) technology, the influence of bedding dip angle on the failure mode of cavity-containing specimens was analyzed. At a dip angle of 0°, high strain concentration zones developed at the roof and floor of the cavity, resulting in tensile failure. When the dip angle ranged from 30° to 60°, strain concentration bands propagated along the beddings due to the combined effect of cavity stress concentration and bedding plane mechanics, thereby inducing shear-slip failure. At a dip angle of 90°, strain concentration bands extended vertically, leading to tensile-splitting failure along the beddings. The mesoscopic failure mechanisms of cavity-containing phyllite specimens were studied using the combined finite-discrete element method (FDEM) incorporating the cohesive zone model

收稿日期: 2025-06-13

录用日期: 2025-10-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.52579102, No.52369019); 江西省自然科学基金杰出青年基金资助项目 (No.20242BAB23047); 赣鄱俊才支持计划-青年科技人才托举项目 (No.2023QT06)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52579102, 52369019), the Jiangxi Provincial Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholars (20242BAB23047) and the Young Elite Scientists Sponsorship Program by Jiangxi Advanced Science and Technology Talents Program (2023QT06).

第一作者简介: 郭莹, 女, 2001 年生, 硕士研究生, 主要从事隧道 (洞) 围岩稳定性分析与数值模拟方面的研究。E-mail: gy20010401@163.com

通信作者: 张小波, 男, 1989 年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事岩石力学与地下工程方面的研究。E-mail: zhangxb@ncu.edu.cn

(CZM). Based on the experimental results, the feasibility and applicability of this modeling method for simulating the mechanical behavior of cavity-containing layered rock specimens were validated. Numerical simulation analyses of biaxial loading tests reveal that confining pressure not only enhances the bearing capacity of the specimens and reduces the anisotropy ratio, but also induces transitions in the failure modes of specimens with varying dip angles.

Keywords: phyllite; bedding angle; digital image correlation; failure mechanism; finite-discrete element method

1 引 言

近年来,随着我国水工隧洞和交通隧道建设规模与开挖深度的持续增加,工程所面临的地质条件越来越复杂^[1-2],层状岩体作为典型的岩体结构广泛分布于这些隧洞中^[3],围岩稳定性问题十分突出。值得注意的是,层状岩体因其内部普遍发育有天然页理、层理或层面等薄弱结构面,导致岩体力学行为表现出显著的各向异性^[4-5],这种各向异性使得地下工程在开挖的过程中应力重分布极其复杂,并可能诱发大变形、岩爆、坍塌^[6]和岩层剥落^[7]等多种工程灾害。因此,深入研究层状岩体中隧洞开挖诱发的应力集中效应与层面力学效应对围岩稳定性的共同作用机制具有重要意义。

为了深入研究隧洞围岩的破坏机制,许多学者通过含孔洞岩样的室内试验和数值模拟方法研究了围岩的力学响应特征。例如:李地元等^[8]采用 FLAC3D 数值模拟,揭示了不同孔洞形状大理岩的应力分布特征和应力集中系数变化规律。赵国彦等^[9]基于单轴压缩试验,通过数字图像相关(digital image correlation,简称 DIC)技术定量表征了 4 种不同几何形态孔洞红砂岩试样的变形场演化特征,阐明了孔洞形状对岩样力学性能及断裂损伤演化的影响机制。Chen 等^[10]采用 PFC2D 程序模拟了含孔洞岩体在单轴压缩条件下的破坏特征,归纳出 4 种典型的破坏模式及其演化规律。Wu 等^[11]采用 PFC 颗粒程序(particle flow code,简称 PFC)方法对不同形状的孔洞岩样开展双轴试验,并结合复变函数理论推导了孔洞周边应力场的解析解,从理论层面阐释了初始裂纹的萌生机制。Liu 等^[12]结合声发射和 DIC 技术开展单轴压缩试验,并采用 PFC2D 数值模拟方法研究了隧道围岩中孔洞直径对花岗岩力学性能及稳定性的影响。任富强等^[13]对含孔洞岩样的力学行为进行了深入研究,为揭示隧洞围岩破坏机制提供了重要的理论依据。苗胜军等^[14]通过开展双轴试验,系统研究了中间主应力对含孔洞砂岩宏观力学响应及破裂模式的控制机制。这些研究主要针对均质各向同性岩样开挖孔洞问题开展了系统讨论,对于理解均质地层中隧洞围岩开挖变形力学响应具有指导意义。

均质围岩的变形破坏机制研究可以为理解层状围岩的力学行为提供重要参考,但由于岩体结构受层面力学效应影响显著,现有研究尚不能完全揭示层状围岩特有的渐进破坏机制。因此,亟需深入探究层面控制下的层状围岩渐进破坏演化规律。李地元等^[15]对层状黄砂岩试样施加一维动静组合载荷,结合 DIC 技术对比分析了不同倾角下岩样的破裂演化过程及能耗特性。Han 等^[16]开展单轴压缩试验,结合 DIC 技术对比分析了孔洞尺寸对各向异性页岩的力学性质和破坏行为的影响,对垂直层理试样提供了有价值的认识,但对其他层理角度下材料的细观损伤演化规律尚未充分探讨。邓鹏海等^[17]采用有限-离散元法(finite-discrete element method,简称 FDEM),研究了水平层状围岩破裂碎胀大变形机制,并研究了岩体强度参数、变形参数、地应力和隧洞跨度对水平层状围岩破裂模式的影响。舒晓云等^[18]基于 3D 打印技术,开展了双轴压缩试验,系统研究了不同水平应力条件下隧道围岩的破坏特征,得到层状软岩隧道开挖扰动应变场的分布规律,受限于内部损伤可视化与数值验证手段的不足,对层状岩体细观破坏机制的揭示尚不充分。刘平等^[19]采用 FDEM 对含有不同孔洞的层状岩石试样进行单轴压缩模拟研究,揭示了孔洞形状对层状岩石力学性质和破坏模式的影响。梁现军等^[20]采用内聚力模型构建了零厚度层理面的层状岩体隧道数值模型,结合二次开发的声发射数值模拟方法,精细化分析了层理面强度对隧道围岩变形的影响规律。Feng 等^[21]开展了含圆孔页岩试样的单轴压缩试验,为研究层理倾角和圆孔对页岩力学性能和破坏行为的影响提供了重要基础,但单轴工况与岩体三向应力状态存在差距,围压对力学行为的影响机制有待系统阐明。总体而言,现有研究大多关注孔洞形状、尺寸和应力条件,而对孔洞应力集中效应与层面力学效应之间的联合作用机制及其对围岩力学行为的影响机制研究还不够深入。

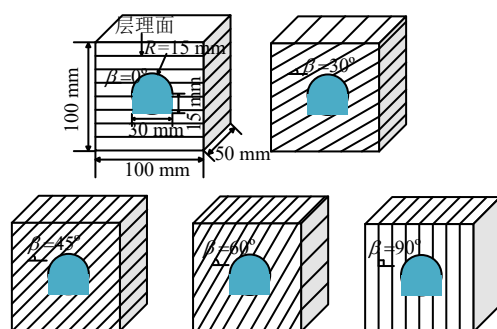
本研究采用 DIC 技术,对不同层理倾角的千枚岩试样开展压缩试验,重点研究层理面对含孔洞岩样变形破坏的影响机制,采用基于内聚力模型(cohesive zone model,简称 CZM)的 FDEM 方法,建立含不同层理倾角的孔洞岩样精细化数值模型,

通过单轴压缩模拟分析裂纹演化规律和渐进破坏过程,从而揭示含孔洞千枚岩的细观破坏机制。此外,为验证本文数值方法的适用性,进一步开展含孔洞层状试样的双轴压缩数值模拟试验,为研究含孔洞岩样的力学行为提供可靠的分析方法。

2 试样制备及试验方案

2.1 试样制备

选取典型千枚岩为研究对象,按《水利水电工程岩石试验规程》(SL/T 264—2020)^[22]加工岩样。为减少组分差异影响,从同一岩块切割制备5组层理倾角 β 分别为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° 的立方体岩样,其尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 50\text{ mm}$,每组包含2~3个平行试样。为模拟隧洞开挖,在岩样中心开挖直墙半圆拱形通孔,圆拱半径 R 为 15 mm ,孔侧墙高 15 mm 。孔中心至岩样边缘距离为 50 mm ,孔壁经抛光处理,岩样几何参数和实物如图1所示。



(a) 含不同层理倾角的开孔岩样示意图



(b) 制备好的千枚岩开孔试样

图1 岩样几何参数和实物

Fig.1 Geometric parameters and physical specimens of bedded rock

2.2 试验方案

试验采用的加载控制系统与全场应变测量系统如图2所示。加载控制系统为SHT4206型微机控制电液伺服万能试验机。该设备最大轴向荷载为 $2\,000\text{ kN}$ 。为减少边界效应,在试样两端涂抹了凡士林,精度为 $\pm 0.5\%$ FS (FS为满量程),试验采用

力控制模式进行轴向加载,鉴于千枚岩试样单轴抗压强度较高,并为优化监测数据的后处理效率,加载速率设定为 0.5 MPa/s 。全场应变测量系统:采用RDIC-3D非接触式全场应变测量系统。该系统基于DIC原理,通过双工业相机(分辨率为 $4\,096\times 3\,000$,镜头焦距为 50 mm)实时捕捉岩样表面散斑的变形图像。系统通过采集试件变形前后的表面形貌图像,识别表面结构特征,并基于三维重建与数字图像相关性算法,计算图像中各像素点的位移坐标,进而获得岩样表面的全场应变分布,用于表征结构裂缝的发展与损伤状态。岩样制备与测试过程:试验前,清洁岩样表面并均匀喷涂一层哑光白漆作为基底。基底干燥后,紧密粘贴人工散斑贴纸(圆形斑点直径为 0.2 mm ;覆盖率 $\geq 50\%$),确保散斑牢固附着且不易变形脱落。加载过程中,以 0.05 s/帧 (即 20 Hz)的采集频率对试样进行连续拍摄,直至其破坏。为实现加载过程与应变数据采集的精确同步,DIC系统与加载控制系统同时启动并同时终止运行。

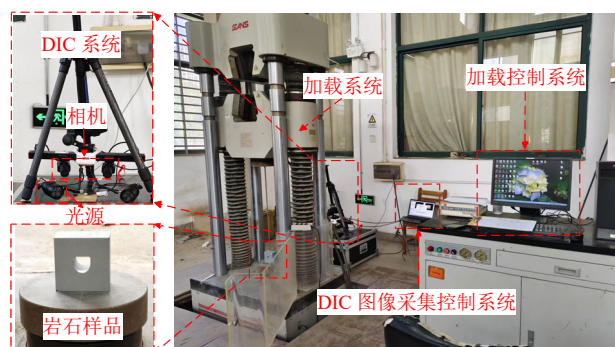


图2 试验加载与监测系统

Fig.2 Loading and monitoring system

3 含孔洞千枚岩压缩试验分析

3.1 应力-应变曲线特征

单轴压缩试验条件下不同层理倾角含孔洞层状千枚岩试样应力-应变曲线如图3所示。由图可知,不同层理倾角试样的力学响应均呈现出明显的3阶段特征。在初始压密阶段,应力-应变曲线呈现上凹型特征,这主要归因于岩样内部原生孔隙和微裂隙在轴向荷载作用下的渐进闭合过程,此时应力增长速率显著低于应变发展速率。随着荷载持续增加,岩样进入线弹性变形阶段,该阶段应力-应变关系表现出良好的线性特征,曲线斜率保持相对恒定,反映出试样在弹性范围内的均质连续变形行为。当应力达到峰值强度后,试样迅速进入破坏阶段,表现为应力值的急剧下降并伴随显著的脆性破坏现象,此过程中可听到明显的脆性崩裂响声,表明千

枚岩材料具有典型的脆性破坏特征。

3.2 渐进破坏过程与模式

基于 DIC 全场应变分析, 获取了不同加载时刻沿垂直荷载方向的全场应变分布云图, 如图 4 所示, 图中拉应变为正值, 压应变为负值。由于岩样脆性破坏过程中表现出显著的瞬时特征, 导致难以通过图像采集系统捕获足够数量的峰后破坏图像, 为深入揭示其损伤演化机制, 本研究基于应力-应变曲线特征, 重点选取峰值应力 $\sigma_{\max}$ 前的 5 个典型加载阶段进行对比分析, 分别为 $0.3\sigma_{\max}$ 应力时刻(点①), $0.6\sigma_{\max}$ 应力时刻(点②), $0.9\sigma_{\max}$ 应力时刻(点③), 点④和点⑤为即将破坏的峰前某时刻。结果表明: 不同倾角含孔洞层状千枚岩试样的应变云图呈现出一定的共性特征与差异性。所有试样在孔洞周围均表现出显著的应变集中现象, 且随荷载增大应变集

中分布区域呈现扩展趋势。层理倾角作为关键因素, 显著影响着应变集中区域的分布规律: 当层理倾角

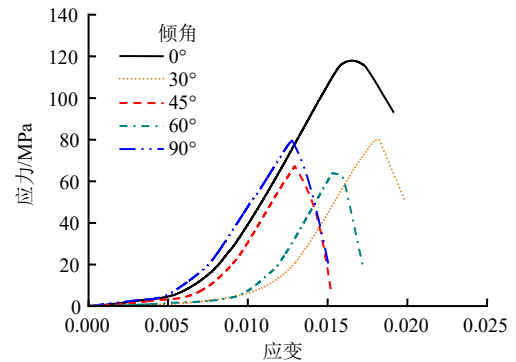


图3 不同层理倾角下含孔洞千枚岩单轴压缩应力应变曲线
Fig.3 Stress-strain curves of cavity-containing phyllite under uniaxial compression with varying bedding dip angles

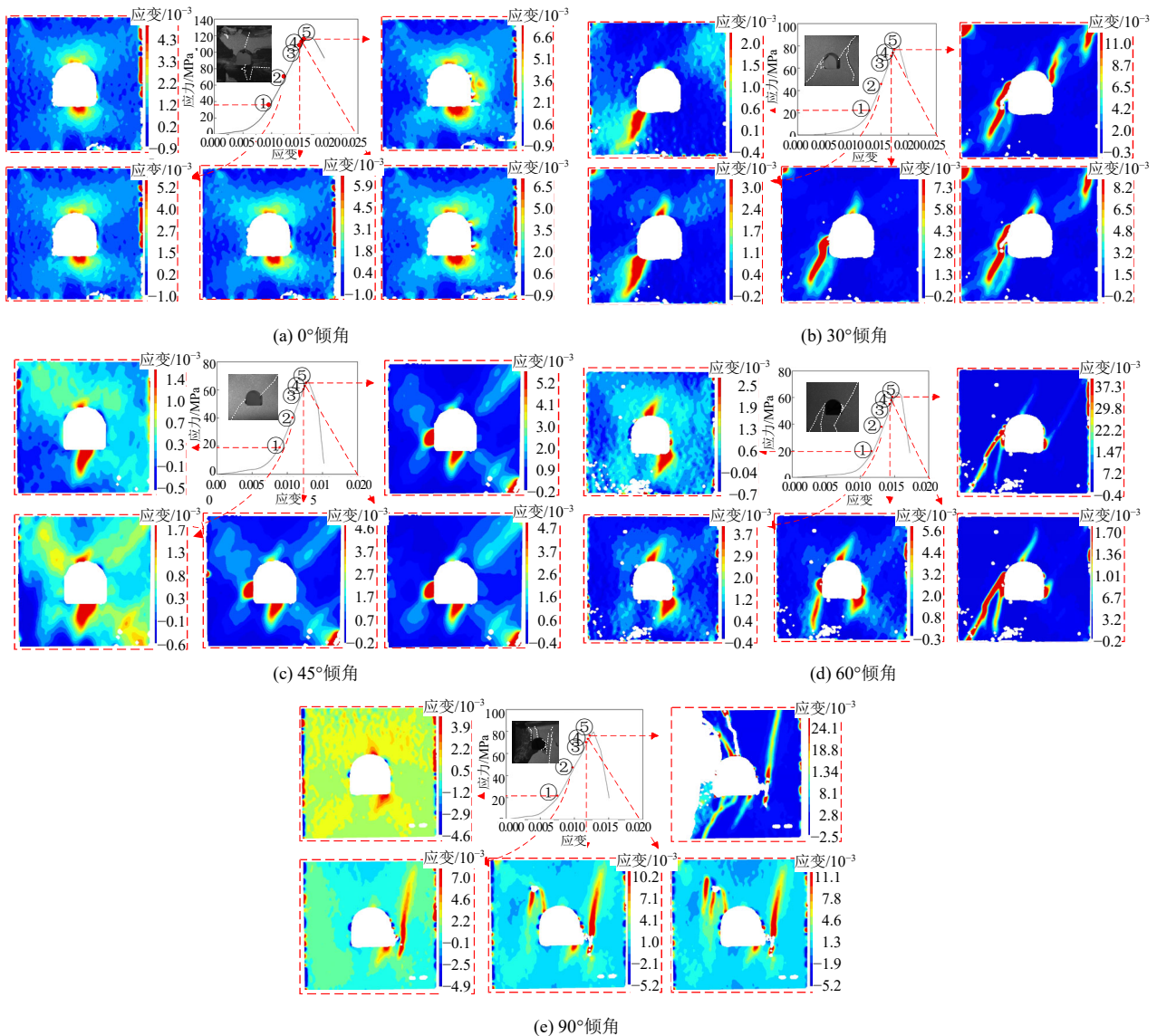


图4 不同倾角含孔洞千枚岩单轴压缩应力-应变曲线、不同应力阶段的应变云图及破坏模式特征图
Fig.4 Stress-strain curves, strain contour maps at key stress stages and failure mode characteristics of cavity-containing phyllite under uniaxial compression with varying dip angles

为 0° 和 45° 时, 应变集中现象主要出现在孔洞顶部和底部区域, 随着荷载增加, 45° 岩样应变集中区域也在孔洞侧部出现; 对于层理倾角为 30° 、 60° 和 90° 的岩样, 初始阶段的应变集中区域主要分布于孔脚部位, 随着荷载增大, 孔侧区域也逐渐出现应变集中现象。值得关注的是, 这类岩样的应变集中区域表现出明显的沿层理面扩展趋势, 这一特征揭示了层面对应变分布的重要控制作用。

为了揭示含孔洞层状岩样的损伤机制, 通过图 4 分析不同层理倾角岩样的破坏模式。当层理倾角为 0° 时, 随着轴向荷载的逐步增大, 孔顶与孔底裂纹主要沿竖向加载方向萌生并扩展贯通, 最终形成宏观断裂面, 岩样下侧还伴随有显著的片状剥落破坏特征。当层理倾角增大至 30° 、 45° 和 60° 时, 岩样的应力状态发生显著变化, 表现为垂直层理方向的压应力分量减小, 而平行层理面的剪应力分量相应增大。当剪应力达到层理面的抗剪强度时, 试样主要发生沿层理面的剪切滑移破坏。当层理倾角达到 90° 时, 加载方向与层理面平行, 随着荷载持续增加, 孔洞顶部和孔侧产生竖直裂纹, 沿层理面方向扩展延伸, 最终形成贯穿层理的宏观断裂面, 孔洞左侧出现明显的岩块剥落现象。

值得注意的是, 这些试样在加载初期的应变集中区域与最终破坏区域存在明显空间差异, 这主要归因于岩石材料的非均质特性导致其内部强度分布的不均匀性。对于层理倾角为 45° 的岩样, 初始应变集中区域由于具有较高的局部强度, 在给定荷载水平下未能形成宏观裂纹, 而对于层理倾角为 60° 的岩样, 初始应变集中区域形成的初始裂纹会在岩样破坏时变窄、闭合, 这一结果与文献[9]的结果相似。

3.3 破坏荷载的各向异性

含孔洞层状千枚岩试样破坏荷载随层理倾角变化如图 5 所示, 随着层理倾角的增大, 含孔洞层状千枚岩试样的破坏荷载先减小后增大, 呈现 U 型变化规律。当 $\beta=0^\circ$ 时, 破坏荷载最大, 为 118.21 MPa; 而 $\beta=60^\circ$ 时, 破坏荷载达到最小值, 为 63.14 MPa, 其数值仅为最大值的 50% 左右; 当 β 继续增大至 90° 时, 破坏荷载有所增加, 但仍显著低于 $\beta=0^\circ$ 时的水平。值得注意的是, β 在 $45^\circ\sim 60^\circ$ 范围内, 破坏荷载变化幅度较小, 仅相差 4.07 MPa, 在 6% 内。这些现象证实了含孔洞层状千枚岩试样具有显著的各向异性特征。

含孔洞层状千枚岩试样破坏荷载的各向异性与其破坏模式密切相关。 $\beta=0^\circ$ 时, 破坏模式表现为

穿切层理面的劈裂型剪切破坏, 破坏荷载由岩石材料强度主导, 此时岩样受压密实, 层理效应减弱, 破坏行为类似均质完整岩样。孔洞的存在导致孔顶、孔底出现类似梁板结构的受力特征, 受荷载作用时易在中间位置产生裂纹并穿切层理扩展, 导致破坏荷载最高。 β 为 30° 、 45° 、 60° 时, 破坏模式表现为沿层理弱面的剪切滑移破坏, 破坏荷载受层理弱面黏结强度控制。随着 β 的增大, 沿层理方向的剪切应力分量增加而法向应力分量减小, 弱面更易滑移。同时, 孔洞边缘应变集中加剧, 其位置和强度受层理倾角控制, 孔洞与层理弱面的联合作用导致破坏荷载显著降低。 β 为 90° 时, 破坏模式为平行层理面的劈裂张拉型破坏, 破坏荷载由层理面抗拉强度及“压杆”最大承载力共同决定。孔洞影响下, 邻近临空面的微“压杆”易弯曲失稳, 导致试样沿多个层理弱面发生竖向劈裂。

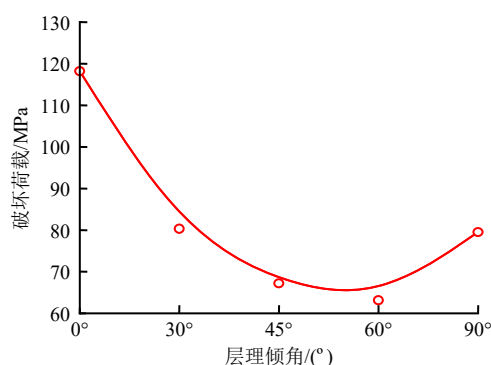


图 5 含孔洞千枚岩破坏荷载随层理倾角变化图
Fig.5 Variation of failure load with bedding dip angle in cavity-containing phyllite

4 含孔洞层状岩样 FDEM 数值模拟

本研究采用基于 CZM 的 FDEM 方法研究含孔洞岩样的破坏机制。FDEM 是 Munjiza 等^[23]开发的一种数值模拟技术, 结合了有限元法 (finite element method, 简称 FEM) 的连续变形建模和离散元法 (discrete element method, 简称 DEM) 的不连续断裂建模的优点, 能够重现岩石受到荷载作用从岩石变形到裂纹的萌生、发育和贯通, 进而发生宏观的断裂失效全过程。本文采用基于内聚力模型的 FDEM 方法基本原理可概括为: 将材料划分为三角形网格, 在两个三角形交界处插入零厚度的四节点内聚力单元, 内聚力单元在相应的应力条件下能够承受拉压和剪切应力。当内聚力单元拉伸或剪切位移达到相应的极限值时, 该内聚力单元失效, 即产生了一条微裂隙, 随着微裂隙的扩展及发育贯通,

材料发生宏观的断裂。

4.1 内聚力模型基本原理

在 ABAQUS 软件中内聚力单元服从牵引力分离准则, 其本构模型为双线性本构模型, 即在未达到损伤演化之前为线弹性强化, 到达损伤演化之后为线性软化, 本构关系^[24]如图 6 所示。图中, δ_s^0 为切向损伤起始滑移位移, δ_s^f 为切向完全断裂失效位移, δ_s 为切向位移。

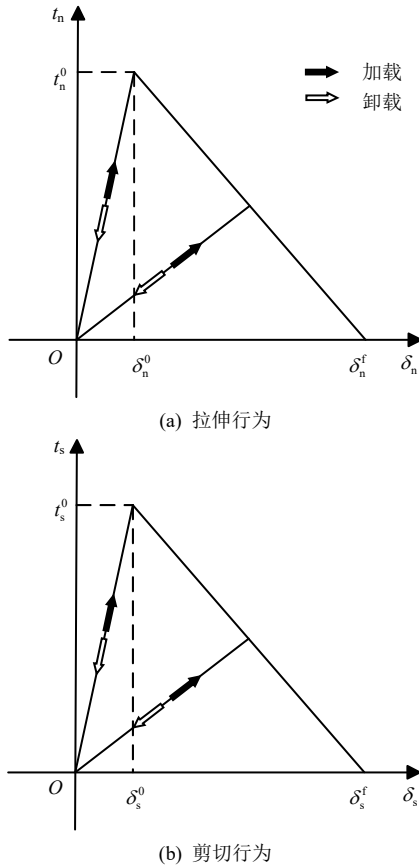


图 6 牵引力分离准则

Fig.6 Traction separation criterion

在本研究中, 损伤初始准则采用最大名义应力损伤准则, 损伤演化准则采用有效位移准则。该准则假设当正应力或切向应力达到以下预设应力水平时, 发生内聚力单元损伤^[25]。

$$\max \left\{ \frac{t_n}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0} \right\} = 1 \quad (1)$$

其中,

$$t_n = \begin{cases} 0, & t_n < 0 \\ t_n, & t_n \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: t_n 为法向应力; t_s 为切向应力; t_n^0 为法向最大应力; t_s^0 为切向最大应力。

当内聚力单元满足上述初始损伤准则时, 定义

的损伤演化准则主要用于描述材料的刚度退化率。为了描述内聚力单元的整体损伤程度, 引入损伤因子 D , 如下式所示:

$$t_n = \begin{cases} (1-D) \cdot \bar{t}_n, & \bar{t}_n \geq 0 \\ \bar{t}_n, & \bar{t}_n < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$t_s = (1-D) \bar{t}_s \quad (4)$$

式中: $\bar{t}_n$ 、 $\bar{t}_s$ 分别为当前应变条件下按照未损伤阶段牵引力分离准则计算的法向、切向应力。

为了描述内聚力单元中法向变形和剪切变形共同作用下的损伤演化, 引入有效位移, 如下:

$$\delta_m = \sqrt{\delta_n^2 + \delta_s^2} \quad (5)$$

式中: δ_m 为有效位移; δ_n 为法向位移。

损伤因子 D 由下式定义:

$$D = \frac{\delta_m^f (\delta_m^m - \delta_m^0)}{\delta_m^m (\delta_m^f - \delta_m^0)} \quad (6)$$

式中: δ_m^f 为材料破坏时的有效位移; δ_m^0 为损伤开始时的有效位移; δ_m^m 为加载期间的最大有效位移。

4.2 细观参数的标定

通过层理倾角为 0° 、 60° 、 90° 岩样的试验结果, 对数值模型中基质和层理面内聚力单元的参数进行标定, 参数校准的单轴压缩模型如图 7 所示。模型的高度和宽度分别为 100 mm 和 50 mm, 模型边界条件设定为底部固定约束, 顶部以 0.05 mm/s 的恒定速率施加位移荷载, 采用试错法^[26-27]研究岩样细观参数与宏观力学行为之间的响应关系, 直到单轴压缩模拟得到的强度和变形参数与室内试验结果一致。参数标定采用分步校准与全局验证策略, 具体流程为: ①通过基本力学试验获取岩石基本参数, 包括密度 ρ 、弹性模量 E 和泊松比 ν ; ②基于 0° 层理试样标定基质力学参数, 通过系统性参数敏感性分析与迭代计算, 优化基质内聚力单元的强度、刚度及破坏位移等参数, 使模拟的应力-应变响应与试验数据吻合; ③选用对层理面力学行为敏感的 60° 倾角试样, 通过相同流程标定层理面界面参数, 使模拟的破坏模式与试验结果相似; ④开展全局验证, 将前述确定的基质和层理面参数用于初步数值模拟, 通过小幅度参数调整使模型在全工况下保持最优预测精度。

最终获得的细观参数列于表 1 中, 数值模拟结果如图 8、9 所示。由图可知, 单轴抗压强度 (uniaxial compressive strength, 简称 UCS) 和弹性模量 E 的

模拟值与试验结果非常接近, 相对误差均在 15% 以内, 不同倾角岩样的破坏模式也与试验结果非常相似, 进一步验证了标定所得细观参数的合理性和可靠性。图 8 (b) 中, E :3.7%、UCS:11.6%表示弹性模量与单轴抗压强度计算结果相对室内试验实测结果的相对误差为 3.7%、11.6%。需要说明的是, 由

于天然岩石在成岩过程中, 其内部不可避免发育有孔隙、裂隙等初始缺陷, 导致应力-应变曲线具有明显的压密阶段, 然而现有的数值方法 (包括本文采用的 FDEM 方法) 难以直接模拟压密阶段^[28]。因此, 模拟得到的应力-应变曲线在初始阶段与试验结果略有差异。

表 1 数值模拟细观参数

Table 1 Mesoscopic parameters in numerical simulation

单元类型	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	法向刚度/($\text{GPa} \cdot \text{mm}^{-1}$)	切向刚度/($\text{GPa} \cdot \text{mm}^{-1}$)	抗拉强度/MPa	抗剪强度/MPa	破坏位移/mm
岩石材料	2 740	13.77	0.28	—	—	—	—	—
内聚力单元: 层理面	—	—	—	20	80	10	40	0.05
内聚力单元: 基质	—	—	—	38	152	16	64	0.1

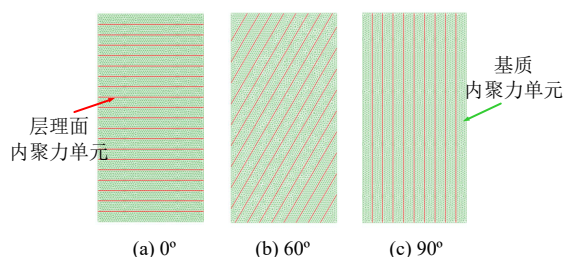


图 7 零厚度内聚力单元嵌入模型示意图

Fig.7 Schematic diagrams of the embedded zero-thickness cohesive element model

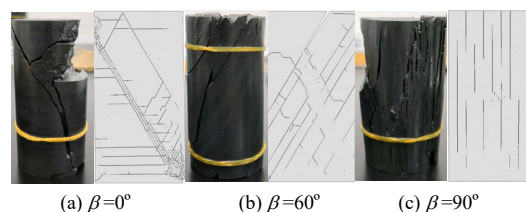
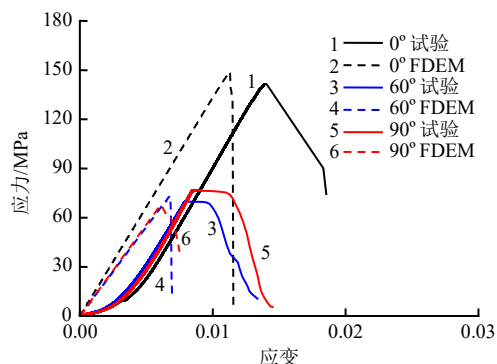
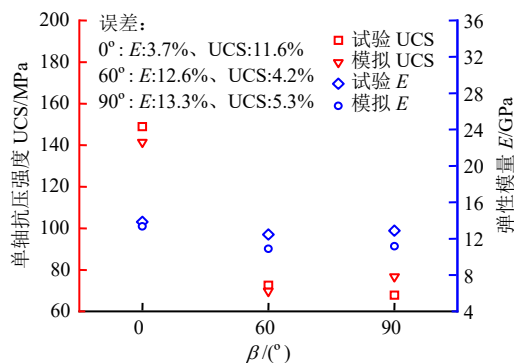


图 9 不同层理倾角岩样的破坏形态试验与 FDEM 对比

Fig.9 Experiment vs. FDEM: failure morphologies of bedded rock specimens with varying bedding dip angles



(a) 应力-应变曲线



(b) 峰值荷载和弹性模量对比

图 8 不同层理倾角下应力-应变曲线、单轴抗压强度和弹性模量试验与 FDEM 对比

Fig.8 Experiment vs. FDEM: stress-strain curves, uniaxial compressive strength and elastic modulus under varying bedding dip angles

4.3 含孔洞层状岩样数值模拟

4.3.1 数值模拟方案

为了进一步揭示含孔洞层状岩样的细观破坏机制, 基于试验岩样尺寸建立了 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的含直墙半圆拱形单轴压缩二维数值模型, 如图 10 所示。直墙半圆拱形孔洞位于岩样几何中心, 根据实际岩样层理间距测量结果将层间距 t 设定为 5 mm , 在保证计算结果精度的同时提高计算效率, 采用渐变网格划分技术对孔洞周边区域进行局部加密处理, 最小网格尺寸为 1 mm , 边界区域最大网格尺寸为 4 mm , 实现了单元尺寸从 $1 \sim 4 \text{ mm}$ 的平滑过渡。当内聚力单元失效后, 采用通用接触来表征相邻单元之间的接触行为。对于模型的边界条件设置, 模型底部完全固定, 顶部按照试验加载条件以 0.5 MPa/s 的速率施加力控制的单轴压缩荷载。

双轴试验的建模流程参照单轴试验进行, 对于模型边界条件的设定, 如图 11(a)所示, 基于文献^[29]提出的地应力计算公式, 分别将侧向压力 σ_2 设定为 10 、 20 和 30 MPa 3 种工况。双轴加载路径如图 11(b)所示, 在加载过程中, 首先将侧压 σ_2 与轴向压力 σ_1 同步施加至预定侧压值; 随后保持 σ_2 恒定, 以 0.5 MPa/s 的速率持续增大 σ_1 直至岩样发生破坏。

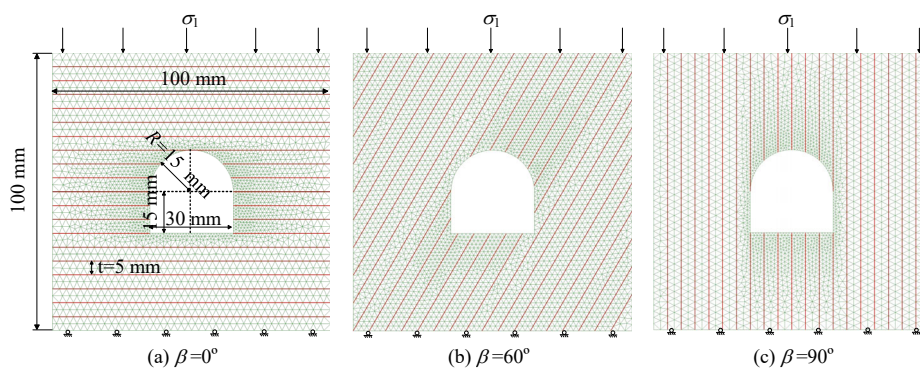


图 10 不同层理倾角下含孔洞岩样数值模型

Fig.10 Numerical model of cavity-containing rock specimens with varying bedding dip angles

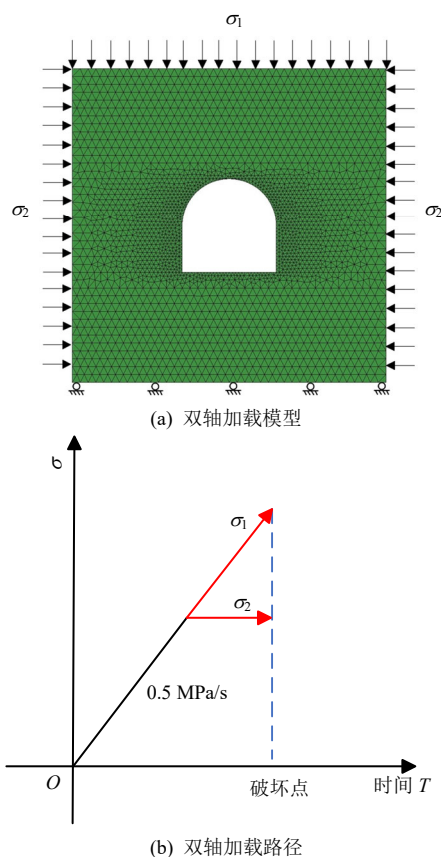


图 11 双轴加载模拟方案

Fig.11 Biaxial loading simulation scheme

4.3.2 双轴数值模拟结果

不同侧压下含孔洞层状岩样的破坏荷载随层理倾角变化规律如图 12 所示, 在相同侧压条件下, 不同倾角岩样破坏荷载呈先降后升趋势: 0° 倾角岩样破坏荷载最高, 60° 倾角最低, 90° 倾角破坏荷载较 60° 回升。随着侧压增大, 3 个倾角岩样破坏荷载均有所升高, 这是由于侧压提高了岩样的承载能力, 因此, 破坏荷载整体随侧压增大而升高。

随着侧压的增大, 破坏荷载随倾角变化的 U 型曲线变得更为平缓, 其强度各向异性率 (定义为最大强度与最小强度之比^[30]) 如图 13 所示。由图可知, 强度各向异性率从无侧压条件下的 1.6 降至侧

压 30 MPa 条件下的 1.07, 破坏荷载的各向异性随侧压增大而显著减弱, 这与 Niandou^[31]、Shu^[32]等的研究结果具有一致性。侧压增强了岩样内部的摩擦效应, 并抑制了沿层理弱面的张拉破裂, 在高侧压下, 岩样的破坏更多由剪切作用控制, 其行为逐渐趋近于各向同性材料。因此, 侧压越高, 层理面对强度的影响就越小, 从而导致 U 型曲线的下凹变缓, 各向异性率降低。

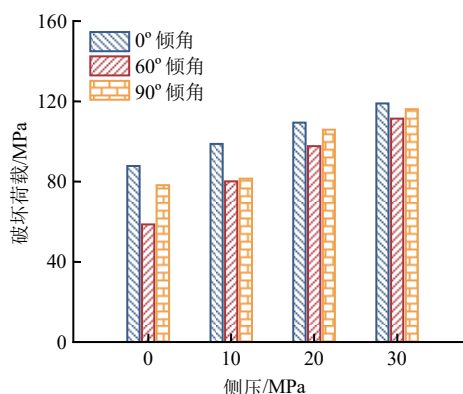


图 12 不同侧压不同倾角岩样破坏荷载

Fig.12 Failure loads of rock specimens with varying dip angles under various confining pressures

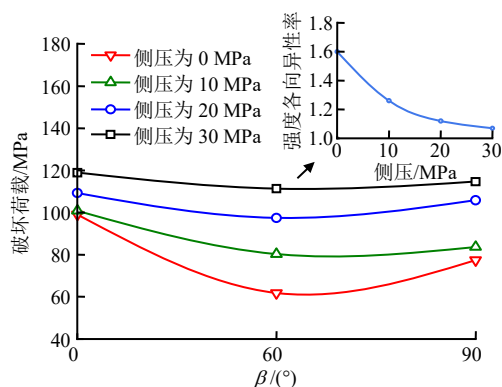


图 13 不同侧压破坏荷载随层理倾角变化及强度各向异性率随侧压变化

Fig.13 Variation of failure load with bedding angle under different confining pressures and variation of strength anisotropy ratio with confining pressure

双轴加载作用下不同倾角岩样呈现出一定的共性特征与差异性,如图14所示。所有倾角岩样在孔顶孔底高应力集中区均产生裂纹,但 0° 倾角为竖向穿层裂纹, 60° 倾角为平行层理面的斜向沿层裂纹, 90° 倾角为竖向沿层裂纹。侧压抑制孔顶、孔底裂纹扩展,且裂纹长度随侧压增大呈减小趋势,其力学本质主要源于最小主应力,可采用拉伸破坏准则描述岩石张拉破坏行为。在无侧压条件下,孔洞切向应力集中可轻易使最小主应力转变为拉应力并

超过岩石的抗拉强度,从而导致张拉裂纹产生,而施加侧压后,所有方向的最小主应力值均被显著提高,这使得孔周有效拉应力难以超过抗拉强度。以 0° 倾角为例,对比FDEM中侧压为0、30 MPa的最小主应力云图,如图15所示。由图可知,应力主要集中于孔顶与孔底区域,且侧压30 MPa工况下的最小主应力值为15.88 MPa,高于无侧压工况下的9.90 MPa,同时高侧压条件下孔顶与孔底的裂纹长度缩短。

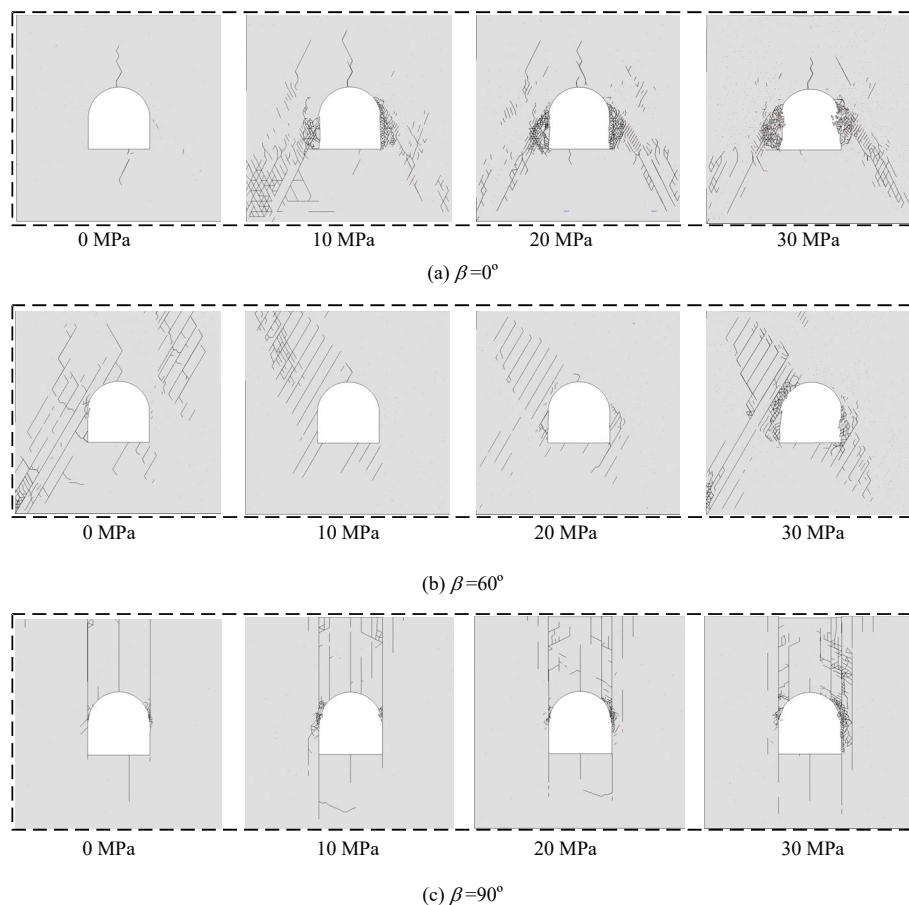


图14 不同倾角岩样双轴加载破坏模式

Fig.14 Failure patterns of rock specimens with varying dip angles under biaxial loading

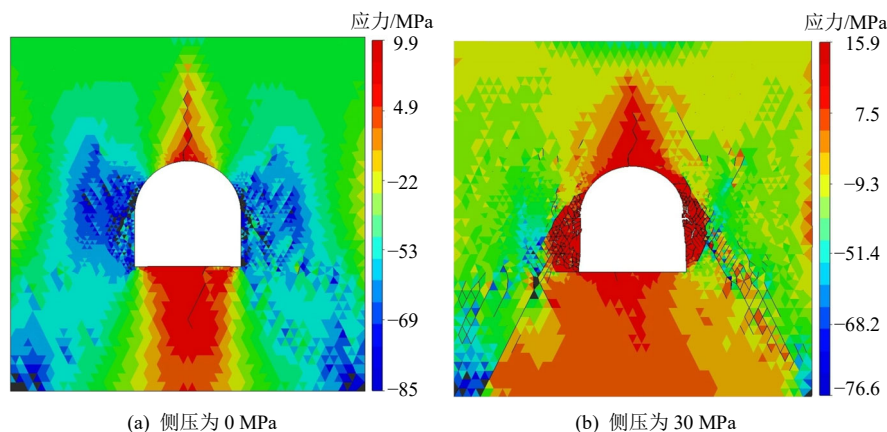


图15 0° 层理倾角不同侧压条件下最小主应力对比

Fig.15 Comparison of minimum principal stress under different confining pressure conditions with a bedding dip of 0°

当层理倾角为 0° ，无侧压时，竖向穿层裂纹主导破坏，侧压增大导致孔侧双向应力集中引发挤压破坏，临空面碎块状剥落，最终孔脚处产生斜向下的穿层裂纹并分别向岩样左下角与右下角贯通。当层理倾角为 60° ，岩样内部由于受到倾斜层理面的影响易产生非对称应力分布，无侧压时沿层裂纹为主控裂纹，侧压增大抑制应力集中较低区域的裂纹产生，但始终处于高应力集中区的孔左上侧和右孔脚处会加速形成“纺锤形”沿层裂纹区。当层理倾角为 90° ，平行层理面的竖向沿层裂纹始终为主控裂纹，引发孔两侧劈裂破坏及孔顶区域整体失稳塌落，在 4 种侧压工况下， 90° 倾角岩样破坏模式保持稳定，裂纹扩展路径与塌落形态未发生本质变化，这表明侧压增大对层理控制型劈裂破坏的抑制效应不显著。

5 讨论

5.1 含层理试样最易滑移倾角分析

室内试验和数值模拟结果均表明，含 60° 倾角层理的试样最易发生滑移剪切破坏。为了揭示这一现象的内在机制，本节对此进行简要分析，假设层理面是否发生滑移取决于其应力状态是否满足摩尔-库仑破坏准则：

$$\tau \geq c + \sigma_n \tan \varphi \quad (7)$$

式中： τ 为抗剪强度； σ_n 为法向应力； c 为内聚力； φ 为内摩擦角。

作用在层理面上的应力：

$$\sigma_n = \sigma_0 \cos^2 \beta \quad (8)$$

$$\tau = \sigma_0 \cos \beta \sin \beta \quad (9)$$

式中： σ_0 为单轴压缩荷载。

将式 (8)、(9) 代入式 (7) 整理得

$$\sigma_0 = c / (\cos \beta \sin \beta - \cos^2 \beta \tan \varphi) \quad (10)$$

当 $\beta = 45^\circ + \varphi/2$ 时， σ_0 取最小值。

根据先前所做基本力学试验，求得岩样的内摩擦角 $\varphi = 38.73^\circ$ ，此时 $\beta = 64.4^\circ$ ，强度最小值出现在层理倾角 64.4° 左右，因此 60° 倾角时层理弱面最易滑移剪切破坏。

5.2 DIC 监测结果与 FDEM 的应力场对比

DIC 技术可直观得到试样表面的应变场，FDEM 可以直接输出应力场数据。选取了如图 16 所示的 3 个层理倾角试样破坏时刻前后最大主应力云图，图中拉应力为正值，压应力为负值，可与图 4 中点⑤的 DIC 应变云图进行对比，FDEM 计算出的最大主应力集中区与 DIC 观测到的最大主应变集中带在位置上相对吻合。当层理倾角为 0° 时，拉应变与拉应力均集中分布于孔顶和孔底，而孔洞两侧则主要表现为压应变与压应力；当层理倾角为 60° 时，试样内部产生非对称应力分布，孔左侧一条与层理面方向一致的高压应力带清晰地分隔开了其上下两侧的高拉应力区，其交界面与拉应变集中带相对应。高压应力带引起滑移，而拉应力带促进了微裂纹的张开，二者共同作用形成最大剪应力作用面，最终导致沿该剪切面形成宏观的应变集中带；当层理倾角为 90° 时，在孔顶与孔底同时出现拉应变与拉应力的集中现象。FDEM 计算得到的应力分布，为解释 DIC 观测到的应变场和阐释最终的破坏机制提供了依据，有助于揭示含孔洞层状岩样的破坏机制。

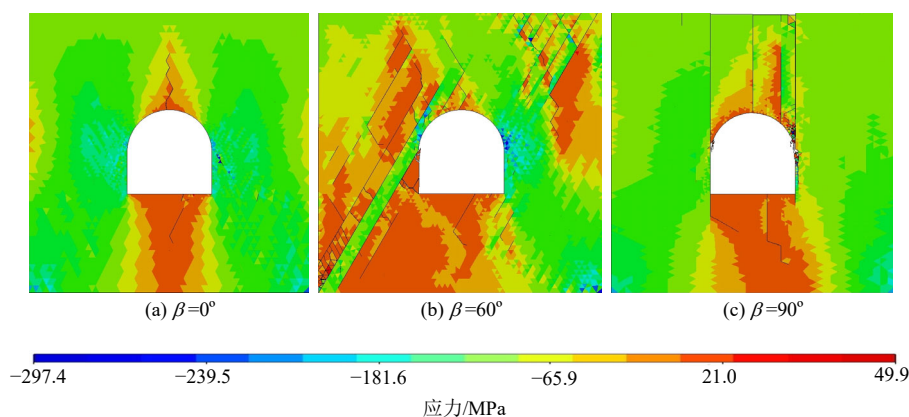


图 16 不同层理倾角 FDEM 最大主应力场

Fig.16 Maximum principal stress field from FDEM for different bedding dip angles

5.3 FDEM 在层状岩体隧洞开挖问题中的适用性

将无侧压条件下的数值模拟结果与室内试验结果进行对比，两者的应力-应变曲线与破坏形态如

图 17 所示，二者吻合良好，峰值荷载相对误差在 17% 以内，表明数值模型能够较好地反映含孔洞岩样的基本力学行为。

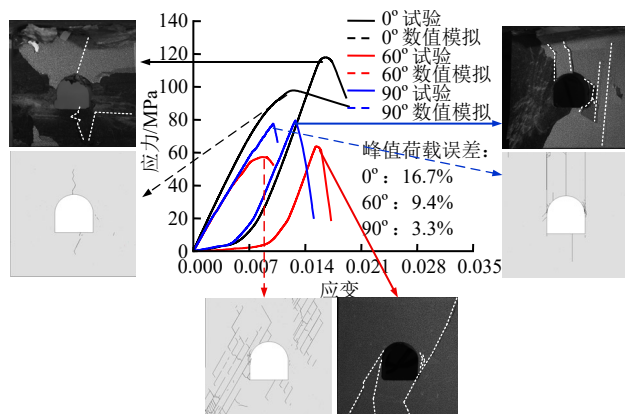


图 17 不同层理倾角下应力-应变曲线、破坏形态试验与数值模拟对比

Fig.17 Experiments vs. FDEM: stress-strain curves and failure morphology of bedded rock specimens

为进一步检验模型在复杂应力状态下的适用性,经调研发现,对于类似的各向异性岩体(如千枚岩或片岩)中的隧洞开挖问题,本研究所观测到的变形破坏规律与已有研究得到的结果吻合较好。例如, Si 等^[33]的研究表明,在侧压条件下,当层理与水平夹角为 0° 时,裂缝主要始于左拱肩,并逐渐向侧壁扩展,扩展过程中逐渐表现出与最大主应力平行的特征,同时右拱脚处裂缝也向侧壁延伸。当层理夹角为 60° 左右时,孔两侧沿层理面发生剪切滑移,断裂带主要集中在较弱的层理面附近,伴随岩石碎片从侧壁剥落,最终形成近似 V 型破裂带。当层理夹角为 90° 时,孔两侧的拉伸裂缝平行于最大主应力方向(层理方向)发展,岩石呈薄片状从侧壁剥离,表现为板状特征。丁秀丽等^[34]结合滇中引水工程某隧洞案例开展了分析,该隧洞穿越岩层倾角约 65° 的薄层状绿帘(泥)石片岩区,左拱肩处由于开挖卸荷易产生应力集中,且主压应力与片理面接近平行,岩体易发生弯折断裂,进而诱发边墙倾倒式坍塌破坏。本文数值模拟结果与文献[33-34]报道中室内试验和现场监测结果均吻合良好,进一步验证了本文数值模型在处理层状岩体隧洞开挖问题中的有效性与适用性。

需要说明的是,本文研究的核心目标在于提出并验证一种基于内聚力模型的 FDEM 方法,用于模拟层状岩体隧洞开挖过程中的围岩响应问题。在模型经过单轴工况严格验证的基础上,将其进一步拓展至侧压条件下进行应用,旨在表明该方法具备模拟复杂应力状态下围岩破裂过程的能力与变形预测潜力。该模型在侧压条件下的全面验证,仍需通过专门的双轴或三轴试验进行直接验证。

6 结 论

(1) 不同层理倾角含孔洞层状千枚岩的应力-应变曲线表明,单轴压缩条件下的力学响应均呈现出明显的初始压密、线弹性变形和破坏 3 阶段特征。随着层理倾角的增大,含孔洞千枚岩的破坏荷载先减小后增大,呈 U 型变化规律,并在层理倾角为 60° 时达到最小值,破坏荷载表现出明显的各向异性特征。

(2) DIC 全场应变分析表明,不同层理倾角含孔洞层状岩样的应变具有共性与差异性特征。所有岩样的孔洞周围均有显著的应变集中现象,层理倾角为 0° 和 45° 时,应变集中主要出现于孔顶和孔底处,并逐渐出现在孔侧,而层理倾角为 30° 、 60° 和 90° 时,应变集中区域则由孔脚逐渐向孔侧区域扩展,且应变集中均有向沿层理面扩展的趋势。

(3) 单轴压缩条件下,当层理倾角为 0° 时,千枚岩开挖孔洞周边的裂纹主要沿竖向加载方向萌生并穿切层理面扩展贯通;当层理倾角为 30° 、 45° 和 60° 时,岩样主要发生沿层理面的剪切滑移破坏,最终裂纹沿层理面贯通;当层理倾角为 90° 时,孔洞顶部和孔侧产生竖直裂纹,沿层理面方向扩展延伸,最终形成贯穿层理的宏观断裂面。

(4) 基于 FDEM 的双轴加载数值模拟结果表明,侧压作用不仅显著提高了层状岩样的承载能力,降低各向异性率,还促使不同倾角岩样的破坏模式发生转变。随着侧压增大,层理倾角为 0° 的岩样裂纹主要集中在孔侧,层理倾角为 60° 的岩样裂纹集中在孔左上侧和右孔脚区域,层理倾角为 90° 的岩样竖向沿层理裂纹始终为主控裂纹,且裂纹主要集中在孔侧和孔顶区域。

(5) 本研究主要聚焦于直墙半圆拱形孔洞,揭示的层理倾角影响破坏模式、侧压抑制各向异性、应力在层理面及孔洞周围重分布等的力学机制,对于理解水工隧洞围岩在复杂地应力条件下的变形破坏机制具有一定意义。下一步工作中,将系统开展圆形及城门洞形等不同孔洞形状的对比研究,以深入揭示孔洞几何效应与层面力学效应的共同作用机制。

参 考 文 献

- [1] 杨玉民, 蒋楠, 姚颖康, 等. 动静荷载下层状围岩隧道应力集中分布特征[J]. 浙江大学学报(工学版), 2025, 59(2): 319-331.
YANG Yu-min, JIANG Nan, YAO Ying-kang, et al. Characteristic of stress concentration distribution in

- layered rock of tunnel under dynamic and static load[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2025, 59(2): 319-331.
- [2] 张小波, 张雕, 姚池, 等. 考虑微拱效应的隧道洞口段管棚合理间距确定方法及参数分析[J]. **岩土力学**, 2023, 44(6): 1625-1635.
- ZHANG Xiao-bo, ZHANG Diao, YAO Chi, et al. Determination method and parameter analysis of reasonable spacing of pipe-shed support in tunnel portal section considering micro-arch effect[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(6): 1625-1635.
- [3] DENG H S, FU H L, SHI Y, et al. Countermeasures against large deformation of deep-buried soft rock tunnels in areas with high geostress: a case study[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2022, 119: 104238.
- [4] SINGH M, SAMADHIYA N K, KUMAR A, et al. A nonlinear criterion for triaxial strength of inherently anisotropic rocks[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2015, 48(4): 1387-1405.
- [5] 侯振坤, 杨春和, 郭印同, 等. 单轴压缩下龙马溪组页岩各向异性特征研究[J]. **岩土力学**, 2015, 36(9): 2541-2550.
- HOU Zhen-kun, YANG Chun-he, GUO Yin-tong, et al. Experimental study on anisotropic properties of Longmaxi formation shale under uniaxial compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(9): 2541-2550.
- [6] 朱元广, 王璇尧, 刘滨, 等. 层状岩石横观各向同性蠕变损伤本构模型研究[J]. **岩土力学**, 2025, 46(4): 1095-1108.
- ZHU Yuan-guang, WANG Xuan-yao, LIU Bin, et al. Transversely isotropic creep damage constitutive model for layered rocks[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2025, 46(4): 1095-1108.
- [7] 汪昕, 幸安康, 曾子强, 等. 层理铁矿石剪切力学性能试验研究[J]. **岩土力学**, 2025, 46(4): 1039-1048.
- WANG Xin, XING An-kang, ZENG Zi-qiang, et al. Experiment of shear mechanical properties of layered iron ore[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2025, 46(4): 1039-1048.
- [8] 李地元, 朱泉企, 李夕兵. 孔洞形状对大理岩渐进破坏力学特性影响研究[J]. **地下空间与工程学报**, 2018, 14(1): 58-66.
- LI Di-yuan, ZHU Quan-qi, LI Xi-bing. Research on the effect of cavity shapes for the progressive failure and mechanical behavior of marble[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2018, 14(1): 58-66.
- [9] 赵国彦, 王恩杰, 吴浩, 等. 单轴压缩下孔洞砂岩细观破裂演化规律[J]. **中南大学学报(自然科学版)**, 2019, 50(8): 1891-1900.
- ZHAO Guo-yan, WANG En-jie, WU Hao, et al. Micro-fracture evolution rule of sandstone specimens with a single hole under uniaxial compression[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2019, 50(8): 1891-1900.
- [10] CHEN S J, XIA Z G, FENG F, et al. Numerical study on strength and failure characteristics of rock samples with different hole defects[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2021, 80(2): 1523-1540.
- [11] WU H, FAN A Q, MA D, et al. Fracturing process and initiation mechanism of hard rock tunnels with different shapes: particle flow modeling and analytical study[J]. **Computational Particle Mechanics**, 2023, 10(6): 1859-1875.
- [12] LIU H M, LI X L, YU Z Y, et al. Influence of hole diameter on mechanical properties and stability of granite rock surrounding tunnels[J]. **Physics of Fluids**, 2023, 35(6): 064121.
- [13] 任富强, 谷金泽, 孙博, 等. 含不同孔洞类岩石材料的动力响应机制研究[J]. **岩土力学**, 2024, 45(增刊 1): 654-664.
- REN Fu-qiang, GU Jin-ze, SUN Bo, et al. Dynamic response mechanism of rock-like materials with different shape holes[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(Suppl.1): 654-664.
- [14] 苗胜军, 尚向凡, 常宁东, 等. 含孔洞砂岩双轴压缩力学特性及破裂机制[J]. **采矿与岩层控制工程学报**, 2025, 7(2): 63-76.
- MIAO Sheng-jun, SHANG Xiang-fan, CHANG Ning-dong, et al. Mechanical properties and fracture mechanism of porous sandstone under biaxial compression[J]. **Journal of Mining and Strata Control Engineering**, 2025, 7(2): 63-76.
- [15] 李地元, 高飞红, 刘濛, 等. 动静组合加载下含孔洞层状砂岩破坏机制探究[J]. **岩土力学**, 2021, 42(8): 2127-2140.
- LI Di-yuan, GAO Fei-hong, LIU Meng, et al. Research on failure mechanism of stratified sandstone with pre-cracked hole under combined static-dynamic loads[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(8): 2127-2140.
- [16] HAN G S, LIANG Q Y, BAO R Y, et al. Influence of circular hole diameter on deformation and failure of Longmaxi shale[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2022, 40(5): 2605-2613.
- [17] 邓鹏海, 刘泉声, 黄兴, 等. 水平层状软弱围岩破裂膨胀大变形机制有限元-离散元耦合数值模拟研究[J]. **岩土力学**, 2022, 43(增刊 2): 508-523.
- DENG Peng-hai, LIU Quan-sheng, HUANG Xing, et al. Combined finite-discrete element numerical study on the buckling failure mechanism of horizontally layered soft

- rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(Suppl.2): 508-523.
- [18] 舒晓云, 田洪铭, 陈卫忠, 等. 不同水平应力条件下层状软岩隧道开挖变形破坏模型试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2023, 42(增刊 2): 4204-4215.
- SHU Xiao-yun, TIAN Hong-ming, CHEN Wei-zhong, et al. Model tests for deformation and failure characteristics during layered soft rock tunnel excavation under different horizontal stress conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2023, 42(Suppl.2): 4204-4215.
- [19] 刘平, 刘泉声, 夏明铤, 等. 孔洞形状对层状岩石力学特性影响的 FDEM 数值模拟研究[J]. **中南大学学报(自然科学版)**, 2024, 55(2): 595-606.
- LIU Ping, LIU Quan-sheng, XIA Ming-tan, et al. Effect of hole shapes on mechanical behavior of layered rocks using FDEM numerical method[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2024, 55(2): 595-606.
- [20] 梁现军, 冯卫星, 韩伟歌, 等. 层理面强度对层状岩体隧道围岩变形的影响[J]. **科学技术与工程**, 2024, 24(35): 15233-15241.
- LIANG Xian-jun, FENG Wei-xing, HAN Wei-ge, et al. Influence of the strength of bedding plane on the deformation of the surrounding rock of layered rock tunnel[J]. **Science Technology and Engineering**, 2024, 24(35): 15233-15241.
- [21] FENG X H, LIU H L, WANG P T, et al. Failure behaviors of anisotropic shale with a circular cavity subjected to uniaxial compression[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2025, 17(1): 357-369.
- [22] 中华人民共和国水利部. SL/T 264—2020 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL/T 264—2020 Specification for rock tests in hydraulic and hydroelectric engineering[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2020.
- [23] MUNJIZA A, OWEN D R J, BICANIC N. A combined finite-discrete element method in transient dynamics of fracturing solids[J]. **Engineering Computations**, 1995, 12(2): 145-174.
- [24] 王刚, 张书博, 连莲, 等. 基于零厚度黏聚力单元节理面剪切破坏机理宏观研究[J]. **岩土工程学报**, 2019, 41(12): 2224-2232.
- WANG Gang, ZHANG Shu-bo, LIAN Lian, et al. Macro-micro study on shear failure mechanism of rock joint based on zero-thickness cohesive element[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(12): 2224-2232.
- [25] WANG H N, MA T S, LIU Y, et al. Numerical and experimental investigation of the anisotropic tensile behavior of layered rocks in 3D space under Brazilian test conditions[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2023, 170: 105558.
- [26] HUANG D, LI B, MA W Z, et al. Effects of bedding planes on fracture behavior of sandstone under semicircular bending test[J]. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, 2020, 108: 102625.
- [27] JIN Y Z, HE C, YAO C, et al. Experimental and numerical simulation study on the evolution of mechanical properties of granite after thermal treatment[J]. **Computers and Geotechnics**, 2024, 172: 106464.
- [28] JIANG H X, MENG D G. 3D numerical modelling of rock fracture with a hybrid finite and cohesive element method[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2018, 199: 280-293.
- [29] 谭成轩, 孙叶. 中国现今区域构造应力场与地壳运动趋势分析[J]. **地质力学学报**, 1995, 1(3): 1-12.
- TAN Cheng-xuan, SUN Ye. Analysis of current regional tectonic stress field and crustal movement trends in China[J]. **Journal of Geomechanics**, 1995, 1(3): 1-12.
- [30] SINGH J, RAMAMURTHY T, VENKATAPPA R G. Strength anisotropies in rocks[J]. **Indian Geotechnical Journal**, 1989, 2(19): 147-166.
- [31] NIANDOU H, SHAO J F, HENRY J P, et al. Laboratory investigation of the mechanical behaviour of tournemire shale[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1997, 34(1): 3-16.
- [32] SHU X Y, ZHU Z D, QU S, et al. Anisotropic characteristics and deformation behaviors of layered rocks surrounding tunnel: a review[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2025, 17(12): 8198-8223.
- [33] SI X F, LUO Y, LUO S. Influence of lithology and bedding orientation on failure behavior of "D" shaped tunnel[J]. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, 2024, 129: 104219.
- [34] 丁秀丽, 张雨霆, 黄书岭, 等. 隧洞围岩大变形机制、挤压大变形预测及应用[J]. **岩石力学与工程学报**, 2023, 42(3): 521-544.
- DING Xiu-li, ZHANG Yu-ting, HUANG Shu-ling, et al. Mechanism, prediction and application of large deformation of tunnel surrounding rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2023, 42(3): 521-544.