

压剪作用下椭圆孔洞砂岩的裂纹扩展规律研究

邓逸¹ 李壮² 何运¹ 刘帅² 刘广川¹

(1. 中交二航局第二工程有限公司, 重庆 400042; 2. 重庆交通大学土木工程学院, 重庆 400074)

【摘要】 为揭示压剪作用下椭圆孔洞砂岩的裂纹扩展规律及其主控因素作用机制, 依据室内试验结果, 标定砂岩的数值模拟细观力学参数, 开展不同孔洞倾角和长短轴比下的压剪数值试验, 并对裂纹扩展规律及影响因素作用机制进行分析。研究表明: (1) 峰值剪切应力、起裂应力及二者差值均随孔洞倾角增大呈先减后增趋势; 当孔洞倾角为 60° 时, 三者均达到最小值, 试件最易达到破坏状态。(2) 平均起裂角随孔洞倾角的增加表现为先增大、后减小、再增大的趋势, 并在孔洞倾角为 30°, 120° 时分别取得最大、最小值; 起裂角与长短轴比之间未表现出明显相关性。(3) 孔洞倾角和长短轴比显著影响裂纹扩展行为, 但其作用机制不同。其中, 孔洞倾角通过改变应力分布主导裂纹起裂位置和扩展路径, 长短轴比通过改变孔洞几何形状影响局部应力状态, 进而控制裂纹扩展行为。研究结论可为含孔洞岩体工程稳定性控制与评估提供理论依据。

【关键词】 裂纹扩展; 砂岩; 压剪作用; 椭圆孔洞; 数值模拟

【中图分类号】 TU45

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0210

Crack propagation laws in sandstone containing elliptical holes under compression-shear loading

DENG Yi¹ LI Zhuang² HE Yun¹ LIU Shuai² LIU Guangchuan¹

(1. China Communications Second Navigation Bureau Second Engineering Co., Ltd., Chongqing 400042, China;

2. College of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

【Abstract】 To reveal the crack propagation patterns and the underlying mechanisms of controlling factors in sandstone containing elliptical holes under compression-shear loading, mesoscopic mechanical parameters for the sandstone's numerical model were calibrated based on laboratory test results. Numerical tests under compression-shear loading were conducted for various hole inclination angles and aspect ratios, followed by analysis of crack propagation behavior and the mechanistic effects of influencing factors. The research findings indicate: (1) Peak shear stress, crack initiation stress, and their difference all exhibit a trend of first decreasing and then increasing with increasing pore inclination angle. When the hole inclination angle reaches 60°, all three parameters reach their minimum values, indicating that specimens are most prone to reaching a failure state under this condition. (2) The average crack initiation angle follows a triphasic trend with increasing inclination angle: initial increase, followed by decrease, and final resurgence, reaching maximum (30°) and minimum (120°) values at specific orientations. No significant correlation exists between initiation angles and aspect ratios. (3) While both cavity inclination and aspect ratio significantly govern crack propagation behaviors, their mechanistic controls differ fundamentally. Inclination angle dictates stress redistribution patterns, thereby controlling crack nucleation positions and propagation trajectories. In contrast, aspect ratio modulates localized stress states through geometric confinement effects, ultimately regulating crack evolution dynamics. These findings establish a theoretical foundation for stability assessment and control in cavity-containing rock mass engineering.

【Key words】 crack propagation; sandstone; compression-shear loading; elliptical holes; numerical simulation

0 引言

在岩体工程中, 压剪破坏是诱发滑坡、硐体塌陷、

岩柱失稳等灾害的主要原因^[1], 常见于矿山开采、隧道开挖等场景。围岩受扰后发生应力重分布, 将加剧

基金项目: 国家自然科学基金(51804058); 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201800729)

作者简介: 邓逸, 男, 1978 年生, 大学本科, 高级工程师, 主要从事岩土工程、地下工程等领域的研究工作。E-mail: 3560115641@qq.com

通信作者: 刘帅, 男, 2001 年生, 在读硕士研究生, 主要从事地下工程等领域的研究工作。E-mail: 1505695343@qq.com

孔洞的发育、扩展与贯通,甚至导致岩体塌落^[2]。深部煤矿开挖时,高地应力环境下的能量高速释放易使孔洞尖端萌生裂纹^[3],其扩展和贯通最终引发岩体失稳。我国西部煤层赋存区域的顶底板岩层以泥岩、粉砂岩等软岩为主^[4],其抗压强度较低、抗变形能力弱,在压剪复合应力下更易发生破坏。卸荷作用会导致岩体应力重分布,加剧岩体内部原生裂隙失稳扩展^[5],这一现象在煤矿采空区顶板等区域尤为显著。且自然环境中的岩石内部常存在裂隙、孔洞等缺陷,这些缺陷会显著改变局部应力场分布,进而影响裂纹的起裂、扩展路径及最终破坏模式。因此,研究压剪作用下含缺陷岩体的裂纹扩展规律,对于煤矿开挖时岩体的稳定性评估和安全控制具有重要意义。

国内外学者针对岩石的裂纹扩展规律开展了大量研究,大多集中于单轴压缩试验上,对压剪复合作用下的裂纹扩展行为研究相对较少。在单轴压缩条件下,刘招伟和李元海^[6]开发了数字照相量测分析软件系统,并首次将其运用到含孔洞岩石试件表面位移场、应变场及总体变形的观测中。杨圣奇等^[7]通过对含单个孔洞大理岩进行单轴压缩试验,研究了加载过程中裂纹的萌生、扩展、演化和贯通特征。Zhao 等^[8]采用数字图像相关(DIC)方法,获得了类岩石试样的应变和裂纹扩展路径,并发现应变准则适用于模拟裂纹起裂应力、峰值强度和裂纹扩展的研究。此外,祁敬茗等^[9]结合离散元数值模拟与模型试验,分析了三裂纹岩石的峰值应力、应力-应变曲线及裂纹扩展特性,并验证了该模拟方法的可靠性。陈美玲等^[10]结合试验与数值模拟,研究了含层理页岩的损伤演化规律;冯豪天等^[11]采用 PFC2D 软件,研究了直剪条件下含交叉裂隙岩石的裂纹演化规律和剪切特性。赵程等^[12]通过室内试验对含预置单裂纹的类岩石材料的裂纹扩展规律及岩体细观损伤演化机制进行了研究,发现不同预制单裂纹倾角试件的起裂受不同的应力控制。黄诗渊等^[13]建立了非闭合裂缝的压剪-张拉断裂准则,解释了闭合裂缝和非闭合裂缝的差异化起裂行为。在压剪复合作用方面,柴肇云等^[14]基于变角剪切试验,提出了破裂块体的分形特征;王汉元等^[15]利用 RFPA2D 软件模拟了预制裂隙大理岩的压剪破坏过程;王志亮等^[16]基于损伤力学等理论建立了岩石损伤软化统计本构模型,用于描述爆破导致的塑性压剪损伤。

综上所述,目前对于含缺陷岩体的裂纹扩展研究较少,且现有针对缺陷岩体的研究主要集中在裂隙和节理,而对实际工程中常见的椭圆孔洞岩体的裂纹

扩展模式研究较为匮乏。基于此,本文以椭圆孔洞砂岩为研究对象,从孔洞倾角 α 和长短轴比 k 两个关键参数出发,系统研究压剪作用下椭圆孔洞砂岩的裂纹扩展规律,旨在揭示岩体失稳机理,为岩体工程的安全开挖提供理论依据。

1 数值模拟原理及细观参数标定

1.1 离散元原理

离散元模型通过定义颗粒间的接触类型模拟材料的力学特性。本研究采用平行黏结模型,该模型能够描述接触块之间的弹性相互作用,并通过圆形颗粒之间的接触来实现法向力、切向力以及力矩的传递,常用于模拟岩体胶结材料。如图 1 所示,平行黏结模型模拟了大小不均的圆形颗粒之间的力学性质,颗粒之间可以平移和旋转,其中 σ_c 表示抗拉强度, k_n 和 k_s 分别为法向、切向刚度, c 和 φ 分别代表黏聚力和内摩擦角, μ 为黏结摩擦系数, g_s 为接触间隙。

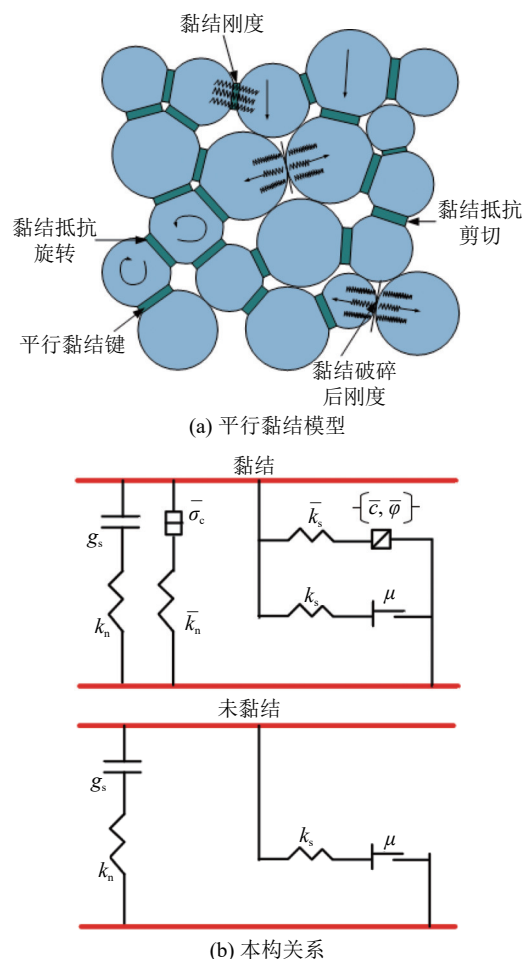


图 1 平行黏结模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of parallel bonding model

1.2 数值模型构建与模拟方案

参考朱谭谭^[17]和 Chen 等^[18]的研究,将椭圆孔

洞砂岩的二维离散元模型宽、高均设为 120 mm, 利用 CAD 软件构建椭圆孔洞几何模型, 并导入离散元软件 PFC2D 中进行模拟。孔洞面积恒定为 300 mm²。

压剪模拟加载的边界由 8 块刚性墙体组成, 对上下、左右两侧刚性墙体分别进行应力控制和位移控制, 位移速率为 0.01 mm/s。根据宿 辉等^[19]的研究, 模型与颗粒尺寸比控制在 200 左右, 颗粒尺寸采用均匀分布, 范围设定为 0.45 ~ 0.75 mm, 共生成颗粒 11037 颗, 接触 28845 个, 模拟图形如图 2 所示。

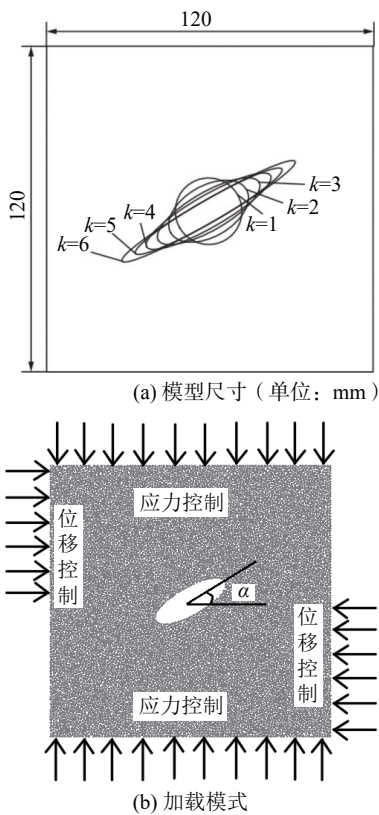


图 2 数值模拟模型
Fig. 2 Numerical simulator

本研究数值模拟方案设计如下: 几何参数方面, 固定孔洞面积不变, 设置孔洞倾角 α 为 0°, 30°, 60°, 90°, 120° 和 150°, 长短轴比 k 为 1 至 6; 力学参数方面, 对模型上下两侧施加 1 ~ 6 MPa 的法向压应力, 左右两侧施加位移控制。

1.3 数值模型细观参数标定

基于室内单轴压缩试验结果, 对离散元模型细观参数进行标定, 以提高模拟的可靠性。试验采用标准圆柱形砂岩试样, 通过 MTS815 试验机进行单轴压缩试验, 获取砂岩的宏观力学参数, 如表 1 所示。根据陈鹏宇等^[20]的研究, 采用试错法进行细观参数的标定, 初步设定刚度、刚度比、弹性模量、黏聚力、摩擦系数等细观参数的初始值, 通过公式进行反复调

整以匹配宏观参数, 直至与试验数据吻合, 具体细观参数见表 2。细观、宏观参数之间的关系式如下:

表 1 平行黏结模型宏观参数
Tab. 1 Macroscopic parameters of parallel bond model

场景	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
室内试验	71.23	7.08	12.04	0.185
数值模拟	73.24	7.83	11.97	0.185

表 2 平行黏结模型细观参数
Tab. 2 Mesoscopic parameters of parallel bond model

颗粒参数	取值	黏结参数	取值
颗粒最小半径/mm	0.45	平行黏结弹性模量/GPa	5.5
颗粒最大半径/mm	0.75	平行黏结刚度比	1.6
颗粒密度/(kg·m ⁻³)	2574	平行黏结法向强度/MPa	15
颗粒摩擦系数	0.5	平行黏结黏聚力/MPa	28
颗粒接触刚度比	1.6	平行黏结内摩擦角/(°)	35
颗粒接触模量/GPa	5.5	平行黏结半径系数	1

$$\frac{k_n}{k_s} = e^{(5.504v-0.101)} \tag{1}$$

$$E_c = 0.861E + 0.238 \tag{2}$$

$$\sigma_b = 1.242\sigma_t + 0.070 \tag{3}$$

$$c_b = 0.611\sigma_f - 9.125 \tag{4}$$

图 3、图 4 对比了试验和数值模拟获取的应力-应变关系、破坏形态, 二者良好的一致性证实了参数设置的合理性。

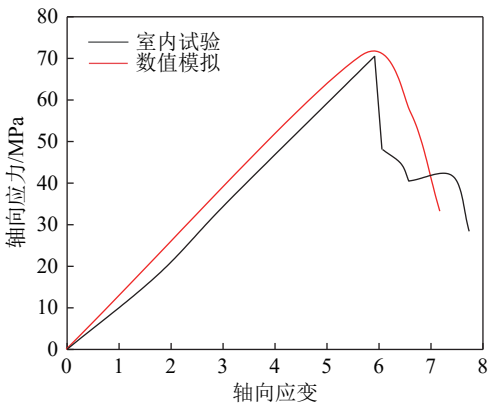


图 3 应力-应变曲线
Fig. 3 Stress-strain curve

2 岩体起裂应力与起裂角

岩体裂纹起裂常伴随局部应变突增。孔洞岩体裂纹多萌生于孔洞端部, 端部竖向位移突变点对应的剪切应力即为起裂应力。起裂应力与峰值剪切应力

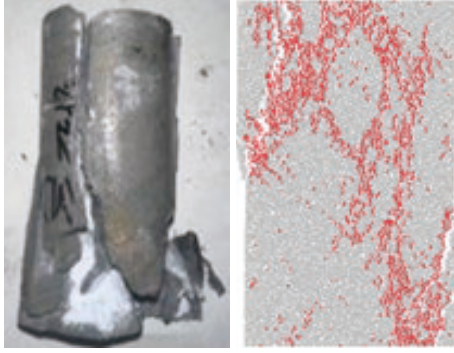


图4 破坏形态
Fig. 4 Destruction form

随法向压应力 σ_c 变化情况见图5, 峰值剪切应力、起裂应力及二者差值均随法向压应力增大而增加, 表明法向压应力可通过增强颗粒间界面摩擦力, 使裂纹起裂需承受更大的剪切应力, 克服更多的塑性变形阻力, 从而抑制裂纹扩展, 体现了岩体韧性随法向压应力增大而增强的本质特征。

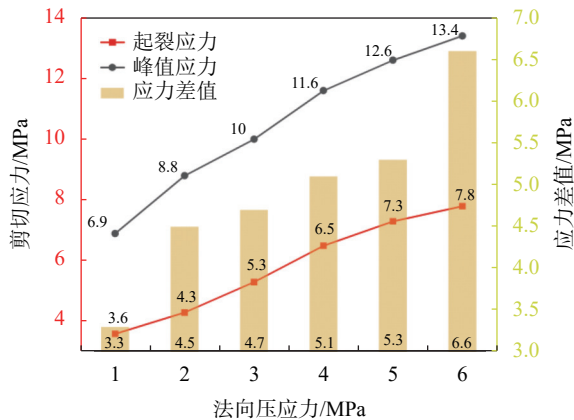


图5 起裂应力随法向压应力变化图($\alpha=30^\circ$, $k=3$)
Fig. 5 Crack initiation stress vs. normal compressive stress variation diagram ($\alpha=30^\circ$, $k=3$)

起裂应力与峰值剪切应力随孔洞倾角 α 的变化如图6所示, 峰值剪切应力、起裂应力及二者差值均随孔洞倾角增大而呈现“先减小后增大”的变化趋势。当孔洞倾角为 60° 时, 峰值剪切应力、起裂应力及二者差值均达到最小值, 这是由于该倾角下孔洞长轴与剪切加载方向的夹角使得孔洞两端拉应力集中系数达到最大值, 拉应力集中, 从而降低了裂纹起裂所需应力值, 且缩短了从起裂到破坏的能量积累过程。由于裂纹扩展过程不仅受几何参数(孔洞倾角 α)控制, 还与裂纹起裂前的能量积蓄等因素密切相关, 因此起裂应力与峰值剪切应力的变化趋势虽相似, 但存在一定差异。

如图7所示, 起裂角 θ 为椭圆孔洞两端初始裂纹与水平面夹角的均值, 用于表征裂纹扩展的初始方向

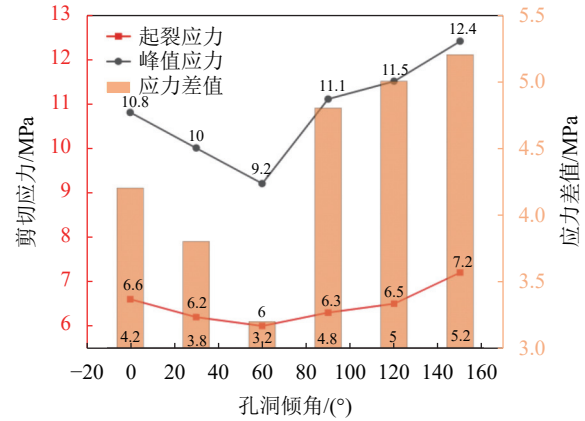


图6 起裂应力随孔洞倾角变化图($k=3$, $\sigma_c=3$ MPa)
Fig. 6 The variation diagram of crack initiation stress with hole inclination angle ($k=3$, $\sigma_c=3$ MPa)

特征。椭圆孔洞砂岩起裂角随孔洞倾角 α 和长短轴比 k 的变化见图8。从图中可以看出, 平均起裂角随孔洞倾角的增大呈现为非线性波动, 整体表现为先增大、后减小、再增大的趋势。当孔洞倾角为 120° 时, 平均起裂角较小, 其值介于 $7.5^\circ \sim 18.4^\circ$; 孔洞倾角为 30° 时, 平均起裂角较大, 介于 $26^\circ \sim 49^\circ$; 孔洞倾角为 0° , 60° , 90° 和 150° 时, 平均起裂角分别介于 $25^\circ \sim 30^\circ$, $26.5^\circ \sim 32^\circ$, $10^\circ \sim 19^\circ$ 和 $10.2^\circ \sim 14^\circ$ 。起裂角与长短轴比之间未表现出明显的相关性, 这主要归因于岩石起裂角主要取决于起裂点附近的局部应力状态, 而不同长短轴比下起裂点的应力分布存在显著差异。

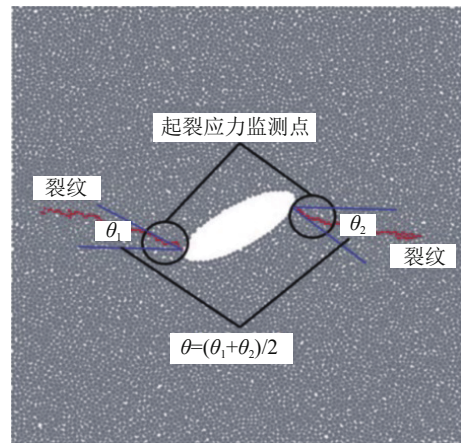


图7 起裂角监测
Fig. 7 Cracking angle monitoring

3 裂纹扩展行为分析

3.1 裂纹扩展特征

压剪数值试验的应力-应变曲线及裂纹扩展可分为4个阶段, 如图9所示。

(1) 初始平静阶段(AB), 对应剪切应力-应变曲线的线弹性阶段^[21], 应力呈线性增长, 随着剪切应力的增加, 椭圆孔洞砂岩加载部位靠近剪切面的区域及

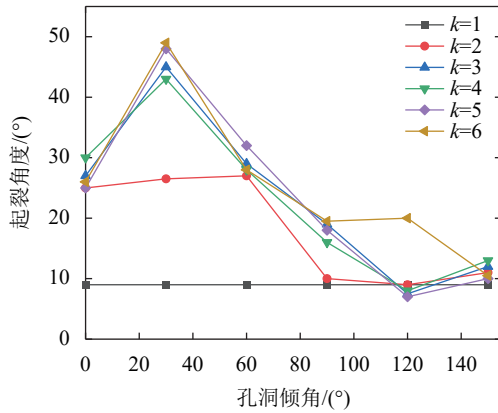
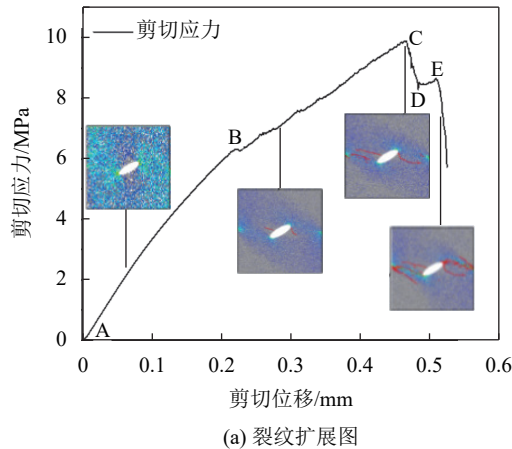
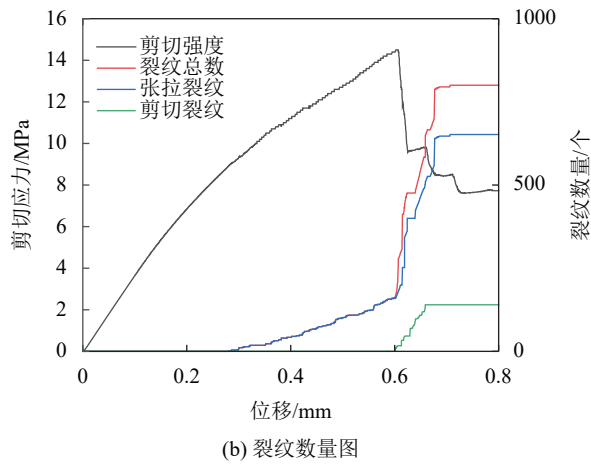


图8 平均起裂角

Fig. 8 Average crack initiation angle



(a) 裂纹扩展图



(b) 裂纹数量图

图9 裂纹扩展破坏情况($\alpha=30^\circ$, $k=3$, $\sigma_c=3$ MPa)Fig. 9 Crack propagation failure ($\alpha=30^\circ$, $k=3$, $\sigma_c=3$ MPa)

孔洞长轴端点处均出现应力集中现象。随着加载进行,应力集中位置基本没有发生变化。

(2) 裂纹稳定扩展阶段(BC), 此阶段剪切应力-应变曲线出现明显的波动, 孔洞两端应力集中区域的应力强度因子达到临界值, 裂纹开始萌生并沿最大拉应力方向扩展; 裂纹扩展模式单一、扩展过程稳定, 且扩展方向逐渐与剪切面平行。

(3) 裂纹不稳定扩展阶段(C点前后), 此阶段应

力-应变曲线达到峰值, 裂纹扩展趋于复杂化。裂纹萌生于孔洞两端靠近剪切面处, 并向岩石内部扩展, 形成多条分支裂纹。此时, 裂纹扩展受拉应力和剪切应力的共同控制。

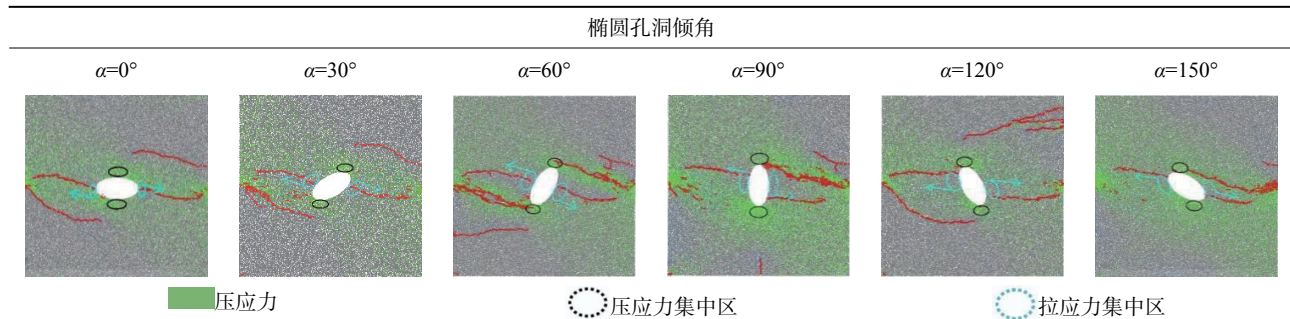
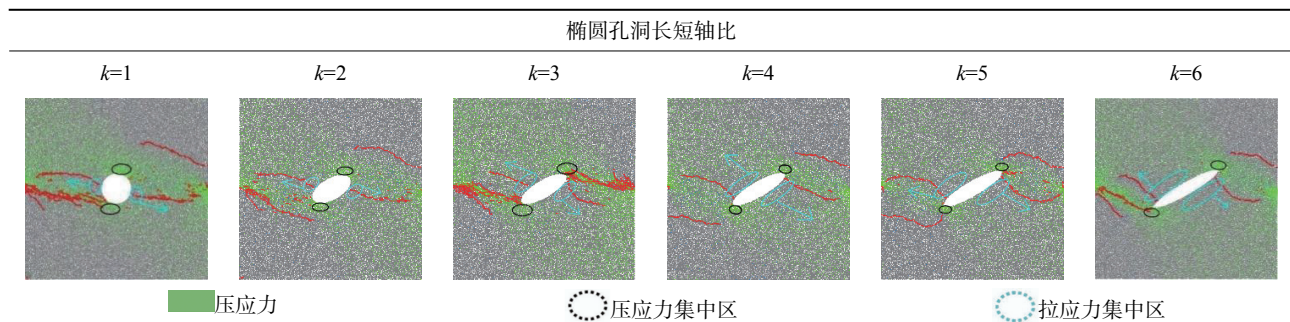
(4) 破坏阶段(E点之后), 此阶段应力-应变曲线急剧下降, 试件进入破坏阶段。裂纹快速扩展并贯通, 表现为试样两侧裂纹多路径内扩, 并连通孔洞端部裂纹, 形成明显的剪切破碎带。值得注意的是, 尽管已形成剪切破碎带, 但由于裂纹间的摩擦力作用, 试件仍能保持一定的残余强度。部分岩石试件在第一次应力跌落后, 会因为局部裂纹的扩展增大了裂纹面间的接触力而仍有较高的承载能力, 甚至超过上一应力峰值。此外, 峰后阶段的张拉裂纹增速显著高于剪切裂纹, 表明试件在此阶段的破坏模式以张拉破坏为主导。

3.2 孔洞倾角 α 对裂纹扩展行为的影响

由于不同法向压应力下岩体响应相似, 本研究选取 3 MPa 法向压应力下的椭圆孔洞岩体破坏的裂纹形态与应力分布(见表 3)作为典型示例予以展示。由表 3 可知, 孔洞倾角 α 对应力分布和裂纹扩展模式具有显著影响。当 $\alpha=0^\circ$ 时, 拉、压应力集中区在孔洞长短轴端点两侧对称平行分布, 裂纹沿剪切应力集中区域起裂; 当 $\alpha=30^\circ$ 和 60° 时, 拉、压应力集中区呈非对称平行分布, 压应力集中区由孔洞短轴端迁移至长轴端, 裂纹优先萌生于拉应力集中区域, 扩展方向沿最大拉应力方向, 且因倾角导致应力非对称, 裂纹模式呈非对称性; 当 $\alpha=90^\circ$ 时, 压应力集中区分布于长轴两端, 拉应力集中区则呈非对称状错位于椭圆两侧, 裂纹起裂位置向长轴端点偏移; 当 $\alpha=120^\circ$ 和 150° 时, 应力分布模式与 60° 和 90° 相似, 裂纹起裂位置为靠近长轴端点处, 起裂后向相反方向扩展直至贯通。上述现象符合断裂力学能量释放率理论, 裂纹扩展路径受局部应力状态主导, 拉应力集中区域的能量释放率较高, 驱动裂纹沿最大拉应力方向扩展; 孔洞倾角本质上通过改变应力分布调控岩体裂纹扩展行为。

3.3 长短轴比 k 对裂纹扩展行为的影响

表 4 展示了不同长短轴比 k 下的裂纹扩展的应力分布特征。随着长短轴比增大, 拉应力集中区从长轴中部向两端迁移, 孔洞长轴方向拉应力集中效应增强, 而压应力集中程度减弱。拉应力集中区向长轴端点迁移, 导致裂纹起裂位置从长轴中部向两端移动。然而, 起裂角未发生显著改变, 这是由于起裂角主要

表 3 不同倾角 α 下裂纹扩展模式 ($k=3$)Tab. 3 Crack propagation modes under different inclination angles α ($k=3$)表 4 不同长短轴比 k 下裂纹扩展模式 ($\alpha=30^\circ$)Tab. 4 Crack propagation mode under different long-short axis ratio k ($\alpha=30^\circ$)

由局部应力状态控制,而不同长短轴比下起裂点的应力分布具有相似性。值得注意的是,尽管长短轴比的变化显著改变了应力分布格局,但裂纹扩展模式未发生本质改变,这表明裂纹扩展行为更多受局部应力状态而非几何参数的影响。

4 结论

(1)峰值剪切应力、起裂应力及二者差值均随孔洞倾角增大而先减小后增大;当孔洞倾角为 60° 时,三者均达到最小值,试件最易达到破坏状态。

(2)平均起裂角随孔洞倾角的增加表现为先增大、后减小、再增大的趋势,并在孔洞倾角为 30° 、 120° 时分别取得最大、最小值。平均起裂角与长短轴比之间未表现出明显的相关性,这主要归因于岩石起裂角主要取决于起裂点附近的局部应力状态,而不同长短轴比下起裂点的应力分布存在显著差异。

(3)裂纹扩展过程的 4 个阶段及其特点:初始平静阶段(AB),应力线性增长,无裂纹生成;裂纹稳定扩展阶段(BC),裂纹沿最大拉应力方向稳定扩展;裂纹不稳定扩展阶段(C 点前后),多条分支裂纹向内部延伸;破坏阶段(E 点之后),裂纹贯通形成剪切破碎带,且峰后以张拉破坏为主。

(4)孔洞倾角和长短轴比显著影响裂纹扩展行为,但其作用机制不同。孔洞倾角通过改变应力分布

主导裂纹起裂位置和扩展路径,孔洞倾角为 0° 时裂纹沿剪切应力集中区域起裂,孔洞倾角为 $30^\circ \sim 150^\circ$ 时裂纹优先在拉应力集中区域起裂并沿最大拉应力方向扩展;长短轴比变化虽导致拉应力集中区向长轴端点迁移,但起裂角和扩展模式未发生显著改变,其主要通过改变孔洞几何形状影响局部应力状态,进而控制裂纹扩展行为。

参 考 文 献

- [1] 张钦礼, 韩森. 基于颗粒流数值方法的岩石压剪破坏细观特征研究[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(1): 91-97. (ZHANG Q L, HAN S. Meso-characteristic research on the rock of compression and shear failure based on the particle flow numerical method[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(1): 91-97. (in Chinese))
- [2] 李传龙, 俞然刚, 马国良, 等. 含裂隙岩石微裂纹起裂扩展及损伤演化分析[J]. 水电能源科学, 2023, 41(8): 166-169, 179. (LI C L, YU R G, MA G L, et al. Analysis of microcrack initiation, propagation and damage evolution in fractured rock[J]. Water Resources and Power, 2023, 41(8): 166-169, 179. (in Chinese))
- [3] 曹平, 曹日红, 赵延林, 等. 岩石裂纹扩展-破断规律及流变特征[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(8): 1737-1762. (CAO P, CAO R H, ZHAO Y L, et al. Propagation-coalescence and rheologic fracture behavior of rock

- cracks[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2016, 26(8): 1737-1762. (in Chinese))
- [4] 徐文彬, 陈伟. 不同倾角充-岩组合体三轴压缩力学特性及破坏特征[J]. *矿业科学学报*, 2023, 8(5): 633-641. (XU W B, CHEN W. The triaxial compressive mechanical properties and failure characteristics of backfill-rock combined bodies with different interface angles[J]. *Journal of Mining Science*, 2023, 8(5): 633-641. (in Chinese))
- [5] 张正波, 王东坡, 何思明. 岩体裂隙开挖卸荷扩展机理研究[J]. *西藏科技*, 2012(4): 59-63. (ZHANG Z B, WANG D P, HE S M. Research on unloading expansion mechanism of rock mass fracture excavation[J]. *Tibet's Science and Technology*, 2012(4): 59-63. (in Chinese))
- [6] 刘招伟, 李元海. 含孔洞岩石单轴压缩下变形破裂规律的实验研究[J]. *工程力学*, 2010, 27(8): 133-139. (LIU Z W, LI Y H. Experimental investigation on the deformation and crack behavior of rock specimen with a hole undergoing uniaxial compressive load[J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(8): 133-139. (in Chinese))
- [7] 杨圣奇, 吕朝辉, 渠涛. 含单个孔洞大理岩裂纹扩展细观试验和模拟[J]. *中国矿业大学学报*, 2009, 38(6): 774-781. (YANG S Q, LÜ C H, QU T. Investigations of crack expansion in marble having a single pre-existing hole: experiment and simulations[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2009, 38(6): 774-781. (in Chinese))
- [8] ZHAO C, MA C C, ZHAO C F, et al. Crack propagation simulation of rock-like specimen using strain criterion[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2018, 22(S1): S228-S245.
- [9] 祁敬茗, 张红丹, 周磊, 等. 基于离散元法三裂纹岩石裂纹扩展特征的试验与数值研究[J]. *矿业安全与环保*, 2024, 51(3): 107-115. (QI J M, ZHANG H D, ZHOU L, et al. Experimental and numerical study of crack propagation characteristics of tri-cracked rocks based on distinct element method[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2024, 51(3): 107-115. (in Chinese))
- [10] 陈美玲, 郭红光, 董治, 等. 单轴荷载下含层理页岩损伤破坏过程及破坏模式研究[J]. *重庆大学学报*, 2024, 47(8): 152-166. (CHEN M L, GUO H G, DONG Z, et al. Damage process and failure mode of stratified shale under uniaxial load[J]. *Journal of Chongqing University*, 2024, 47(8): 152-166. (in Chinese))
- [11] 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. (FENG H T, CHEN J Z, REN C F. Numerical study on crack propagation and shear properties of rock with flaws[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2022, 18(6): 134-140. (in Chinese))
- [12] 赵程, 刘丰铭, 田加深, 等. 基于单轴压缩试验的岩石单裂纹扩展及损伤演化规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(S2): 3626-3632. (ZHAO C, LIU F M, TIAN J S, et al. Study on single crack propagation and damage evolution mechanism of rock-like materials under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(S2): 3626-3632. (in Chinese))
- [13] 黄诗渊, 王俊杰, 王爱国, 等. 压剪作用下压实黏土断裂破坏机理及断裂准则[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(3): 492-501. (HUANG S Y, WANG J J, WANG A G, et al. Fracture failure mechanism and fracture criterion of compacted clay under compression and shear action[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(3): 492-501. (in Chinese))
- [14] 柴肇云, 康天合, 陈维毅, 等. 泥岩压剪破坏裂隙演化规律及其分形特征[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(S2): 3844-3850. (CHAI Z Y, KANG T H, CHEN W Y, et al. Fracture evolutionary rules of mudstone under coupled compression and shear and its fractal characteristics[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(S2): 3844-3850. (in Chinese))
- [15] 王元汉, 苗雨, 李银平. 预制裂纹岩石压剪试验的数值模拟分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(18): 3113-3116. (WANG Y H, MIAO Y, LI Y P. Numerical simulation of the experiment on rock with preexisted cracks under compression and shearing[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(18): 3113-3116. (in Chinese))
- [16] 王志亮, 黄景忠, 范书群, 等. 岩石爆破中塑性压剪损伤的数值模拟[J]. *火炸药学报*, 2006, 29(5): 1-4, 16. (WANG Z L, HUANG J Z, FAN S Q, et al. Numerical simulation on blast-induced plastic compression and shear damage in rock blasting[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2006, 29(5): 1-4, 16. (in Chinese))
- [17] 朱谭谭, 靖洪文, 苏海健, 等. 孔洞-裂隙组合型缺陷砂岩力学特性试验研究[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(7): 1518-1525. (ZHU T T, JING H W, SU H J, et al. Experimental investigation on mechanical behavior of sandstone with coupling effects under uniaxial compression[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(7): 1518-1525. (in Chinese))
- [18] CHEN S J, XIA Z G, FENG F. Numerical simulation of

- strength, deformation, and failure characteristics of rock with fissure hole defect[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 2020: 7048645.
- [19] 宿 辉, 杨家琦, 胡宝文, 等. 颗粒离散元岩石模型的颗粒尺寸效应研究 [J]. *岩土力学*, 2018, 39(12): 4642-4650. (SU H, YANG J Q, HU B W, et al. Study of particle size effect of rock model based on particle discrete element method[J]. *Geotechnical Mechanics*, 2018, 39(12): 4642-4650. (in Chinese))
- [20] 陈鹏宇, 孔 莹, 余宏明. 岩石单轴压缩 PFC^{2D} 模型细观参数标定研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2018, 14(5): 1240-1249. (CHEN P Y, KONG Y, YU H M. Research on the calibration method of microparameters of a uniaxial compression PFC^{2D} model for rock[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2018, 14(5): 1240-1249. (in Chinese))
- [21] 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. (CHEN J R, ZHOU C T, ZHOU T, et al. Experimental study on strain evolution and failure behavior of sandstone containing a single pre-existing flaw under compressive-shear loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(7): 1743-1758. (in Chinese))

收稿日期: 2025-05-09