



## 拉剪作用下椭圆孔洞砂岩力学及破坏特征模拟研究

王海洋 李金滨 郑仕跃 周宴民 蒋文伟

### 引用本文:

王海洋, 李金滨, 郑仕跃, 等. 拉剪作用下椭圆孔洞砂岩力学及破坏特征模拟研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(8): 86–96.  
WANG Haiyang, LI Jinbang, ZHENG Shiyue. Simulation on mechanical and failure characteristics of sandstone with elliptical hole under tension–shear effect[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(8): 86–96.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0656>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 综放采动应力路径下单裂隙砂岩力学特性试验研究

Experimental study on mechanical properties of sandstone with single fracture under fully-mechanized top-coal caving mining stress path

煤炭科学技术. 2022, 50(2): 95–105 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/887041cc-82c3-44ae-a936-5116902afea6>

#### 锤式破碎机冲击速率对青砂岩破碎效果及断裂能利用效率的影响

Influence of impact velocities of hammer crusher on crushing effect and utilization efficiency of fracture energy in green sandstone

煤炭科学技术. 2024, 52(5): 289–300 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0006>

#### 层状岩石逆倾向与顺倾向剪切破坏特征的差异性研究

Differences between reverse and normal shear in failure characteristics of layered rocks

煤炭科学技术. 2024, 52(7): 37–47 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0222>

#### 高地力环境下聚能爆破动、静作用对岩石内裂纹起裂与扩展机理研究

Study on initiation and propagation mechanism of internal cracks caused by dynamic and static action of shaped charge blasting under in-situ stress

煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 50–64 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1042>

#### 深部高瓦斯煤层爆破致裂增透裂纹扩展规律研究

Study on propagation law of cracking and permeability enhancement caused by blasting in deep high-gas coal seams

煤炭科学技术. 2024, 52(7): 89–100 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1622>

#### 接菌对根土复合体抗剪拉作用机理及其矿山生态修复潜力

Mechanisms of shear tension resistance of root-soil complexes by inoculated bacteria and potential for ecological restoration in mines

煤炭科学技术. 2023, 51(1): 493–501 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2167>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

王海洋, 李金浜, 郑仕跃, 等. 拉剪作用下椭圆孔洞砂岩力学及破坏特征模拟研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(8): 86–96.

WANG Haiyang, LI Jinbang, ZHENG Shiyue, *et al.* Simulation on mechanical and failure characteristics of sandstone with elliptical hole under tension-shear effect[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(8): 86–96.

## 拉剪作用下椭圆孔洞砂岩力学及破坏特征模拟研究

王海洋<sup>1,2</sup>, 李金浜<sup>2</sup>, 郑仕跃<sup>3</sup>, 周宴民<sup>2</sup>, 蒋文伟<sup>2</sup>

(1. 重庆交通大学 山区桥梁与隧道工程国家重点实验室, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074;

3. 中海建筑有限公司, 广东 深圳 518005)

**摘要:** 受地质环境和工程扰动的影响, 椭圆孔洞缺陷广泛赋存在工程岩体中, 开挖卸荷会使部分岩体产生回弹拉应力, 在孔洞缺陷的影响下形成拉剪应力区, 诱导岩体的拉剪破坏, 导致工程岩体的稳定性大幅度降低。为研究椭圆孔洞岩体在拉剪作用下的力学特性和变形破坏规律, 基于室内岩石力学试验结果, 采用颗粒流程序建立数值模型, 对不同孔洞倾角  $\alpha$ 、长短轴之比  $k$  下的孔洞岩体进行了拉剪数值试验, 并结合应力张量揭示了裂纹演化的细观机理。结果表明: 当  $k$  不变时, 随着  $\alpha$  的增加, 剪切强度在低法向拉应力下 (1~3 MPa) 近似呈“W”型变化规律, 在  $\alpha$  为 120°或 150°取得最小值, 在  $\alpha$  为 90°取得最大值; 剪切强度在高法向拉应力下 (4~6 MPa) 呈先增大后减小的变化趋势, 分别在  $\alpha$  为 0°和 90°时取得最小值和最大值。当  $\alpha$  不变时, 对于  $\alpha$  为非 90°的孔洞岩体, 剪切强度随  $k$  的增大呈非线性下降。孔洞的应力集中程度对法向拉应力的敏感性随  $\alpha$  的增大而先减小后增大,  $\alpha$  为 0°时, 敏感性最高,  $\alpha$  为 90°时, 敏感性最低,  $\alpha$  为 120°和 150°时的敏感性高于  $\alpha$  为 30°和 60°时的敏感性, 孔洞岩体的强度相较于完整岩体有明显的劣化且劣化程度与法向拉应力呈正相关。裂纹起裂应力水平随法向拉应力的增大而增大, 起裂角随法向拉应力的增大而减小。孔洞岩体在拉剪作用下的破坏形式为反翼裂纹贯通导致的拉伸破坏, 拉剪作用下岩体内部拉应力和压应力耦合形成最大受拉区, 最大受拉区靠近剪切加载面一侧的边界为裂纹的扩展路径, 裂纹由孔洞处的塑性屈服而起裂, 裂纹起裂后, 颗粒接触断裂造成应力的释放与重分布, 裂纹再次沿重分布后的最大主应力方向扩展, 宏观上表现为裂纹的非线性扩展模式。

**关键词:** 砂岩; 拉剪作用; 椭圆孔洞; 离散元; 裂纹扩展; 应力张量

中图分类号: TD313; TU45

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)08-0086-11

### Simulation on mechanical and failure characteristics of sandstone with elliptical hole under tension-shear effect

WANG Haiyang<sup>1,2</sup>, LI Jinbang<sup>2</sup>, ZHENG Shiyue<sup>3</sup>, ZHOU Yanmin<sup>2</sup>, JIANG Wenwei<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory Breeding Base of Mountain Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. College of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. China Overseas Construction Co., Ltd., Shenzhen 518005, China)

**Abstract:** Under the influence of geological environment and engineering disturbance, elliptical hole-defects exist widely in engineering rock mass. Excavation unloading causes rebound tensile stress in rock mass. The tension-shear stress zone is formed under the hole defects, which induces the tension-shear failure of rock mass and greatly reduce the stability of engineering rock mass. In order to study the mechanical properties and failure behavior of the rock mass with an elliptical hole under tension and shear, the numerical model was built using discrete element numerical simulation based on the rock mechanics test results. Furthermore, the tension-shear numerical modelling tests of rock mass with an elliptical hole of different hole inclination angle  $\alpha$  and the ratio of long to short axis  $k$  were carried out, and the

收稿日期: 2022-05-03 责任编辑: 常 琛 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-0656

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

作者简介: 王海洋 (1988—), 男, 山东淄博人, 副教授, 博士。E-mail: wanghaiyang\_cq@cqjtu.edu.cn

通讯作者: 李金浜 (1997—), 男, 河南驻马店人, 硕士。E-mail: 1173749091@qq.com

meso-mechanism of crack evolution was revealed from the point of view of stress tensor. The results show that when  $k$  is constant, with the increase of  $\alpha$ , the shear strength approximately shows a “W” shape under low normal tensile stress (1–3 MPa), and the minimum value is obtained when  $\alpha$  is  $120^\circ$  or  $150^\circ$ , and the maximum value is obtained when  $\alpha$  is  $90^\circ$ . Under high normal tensile stress (4–6 MPa), the shear strength increases at first and then decreases, and the minimum and maximum values are obtained when  $\alpha$  is  $0^\circ$  and  $90^\circ$ , respectively. When  $\alpha$  is constant, for the rock mass with an elliptical hole if  $\alpha$  is not  $90^\circ$ , the shear strength decreases nonlinearly with the increase of  $k$ . The sensitivity of stress concentration of the elliptical hole to normal tensile stress decreases at first and then increases with the increase of  $\alpha$ , and the sensitivity is the highest when  $\alpha$  is  $0^\circ$ . The sensitivity is the lowest when  $\alpha$  is  $90^\circ$ , and the sensitivity is higher when  $\alpha$  is  $120^\circ$  and  $150^\circ$  than that when  $\alpha$  is  $30^\circ$  and  $60^\circ$ . The strength of the rock mass with an elliptical hole is obviously worse than that of intact rock mass, and the degree of deterioration is positively related to the normal tensile stress. The level of crack initiation stress increases with the increase of normal tensile stress, and the crack initiation angle decreases with the increase of normal tensile stress. The failure type of the rock mass with an elliptical hole under tension and shear is the tensile failure caused by anti-wing crack penetration. Under the effect of tension and shear, the maximum tensile zone is formed by the coupling of tensile stress and compressive stress in the rock mass, and the boundary near the side of the shear loading surface is the crack propagation path. The crack starts from the plastic yield at the elliptical hole. After the crack initiation, the stress is released and redistributed by the particle contact fracture, and the crack propagates along the direction of the maximum principal stress after the redistribution, which shows the nonlinear propagation mode of the crack macroscopically.

**Key words:** sandstone; tension-shear effect; elliptical hole; discrete element; crack propagation; stress tensor

## 0 引 言

天然岩体在地质活动、环境风化以及工程扰动等作用下,内部易形成不同程度的裂隙和孔洞缺陷,缺陷的几何参数及所处应力状态对岩体的强度及变形特征具有显著影响<sup>[1]</sup>。研究表明,工程岩体的开挖会导致开挖面附近一定范围内的岩体产生卸荷回弹<sup>[2]</sup>,如地下洞室和露天矿边坡开挖后,因荷载释放使开挖面附近岩体垂直于卸荷方向的应力状态逐渐由压应力向拉应力转变。受岩体缺陷的影响,卸荷产生的应力重分布使得局部岩体处于拉剪应力作用下,这一作用在开挖洞室的拱顶、边墙以及煤矿采空区顶板等处尤为突出<sup>[3-4]</sup>。除开挖卸荷外,陡峭危岩边坡在重力的作用下也极易产生沿主控结构面的拉剪应力,引发岩体的崩落、滑坡等地质灾害<sup>[5]</sup>。岩体的抗拉强度明显低于抗压强度的性质决定其在受拉状态下更容易发生破坏,特别在拉剪应力作用下,拉应力在缺陷处集中,使岩体的稳定性大幅度降低。因此研究拉剪应力作用下缺陷岩体的力学特性对岩土工程的稳定及安全具有重要意义。

国内外学者开展了一系列的岩石拉剪试验,最早对于拉剪应力的模拟是利用非规则几何形状试件诱导拉伸应力转变为拉剪应力,如李建林等<sup>[6]</sup>对非对称缺口岩石试件进行了轴向拉伸试验,利用岩桥之间形成的剪切面来进行拉剪应力的模拟。RAMSEY 等<sup>[7]</sup>采用狗骨头式样,通过增大式样侧向围压来模拟岩体的拉剪应力状态。但这种方式只能模拟局部的拉剪应力,导致试验结果与实际存有

一定的误差,而后岩石拉伸剪切试验装置及试验系统相继被研发,李夺定等<sup>[8]</sup>、郭静芸等<sup>[9]</sup>研制了岩石拉伸剪切伺服控制仪,实现了应力的单独控制及加载波形变化,并采用此装置结合激光扫描、数值仿真等手段研究了岩石拉伸剪切的破坏过程和强度准则,结果表明岩石在拉剪应力下整体表现更具脆性且破坏形式随法向应力的增大由拉伸剪切混合破坏到拉伸破坏演变。周辉等<sup>[10]</sup>通过自制的拉伸剪切试验系统结合岩体拉剪和压剪试验结果建立了考虑岩石法向拉应力的剪切破坏准则。岑夺丰<sup>[11]</sup>、HUANG 等<sup>[12]</sup>通过室内拉剪试验和数值模拟,对岩石在拉剪应力状态下的力学特征和破坏机理进行了深入分析。周超彪等<sup>[13]</sup>利用自主设计的拉伸剪切装置并结合声发射技术研究了岩石在拉剪应力下的损伤演化规律及破坏机制。

从上述分析可知,以往研究主要针对于完整岩体的拉剪特性,部分学者考虑到了岩体非均质性及缺陷的影响,王志文等<sup>[14]</sup>研究了非均质节理岩体的拉剪破裂机制,岑夺丰等<sup>[15]</sup>开展了单裂隙砂岩的拉剪试验,探究了裂纹的起裂和扩展规律,但仅研究了单一裂隙和节理,而实际工程中岩体缺陷的形态较为复杂,常出现微型椭圆孔洞赋存在岩体内部的情况,目前对于椭圆孔洞岩体在拉剪应力下的力学特性及破坏规律尚不明确。鉴于此,拟采用重庆市永川区黄瓜山隧道取芯砂岩进行室内试验,通过颗粒流程序建立椭圆孔洞砂岩数值模型,探究不同长短轴之比  $k$  及孔洞倾角  $\alpha$  的孔洞岩体在不同法向拉应力下的力学特性和变形破坏规律。



## 1 数值模拟方法

### 1.1 离散元原理

离散元模型由离散颗粒和颗粒之间的接触构成,其求解是基于力与位移基本原理,通过赋予颗粒之间不同的接触属性来模拟不同材料的力学行为。离散元中常用的接触模型包括接触黏结模型、平行黏结模型和平直节理模型。接触黏结模型是颗粒之间以点的形式作用,颗粒之间可以传递力但无法传递弯矩,常用于模拟散体类材料;平行黏结模型是颗粒之间以接触面的形式作用,颗粒之间可同时传递力和弯矩,常用于模拟抗拉强度较高的胶结类材料;平直节理模型将圆形颗粒设置为多边形,限制了颗粒之间的旋转,颗粒间的接触相当于平面,该模型能够较好的拟合材料的压拉强度比,适合压拉强度比较高的岩体材料。本文基于室内试验测试砂岩的抗压强度与抗拉强度的比值为 7.08,在比值较高的情况下更适合用平直节理接触模型。典型平直节理模型如图 1 所示,图中  $\sigma_c$  为黏结抗拉强度; $k_n$  和  $k_s$  分别为黏结法向刚度和切向刚度; $c$  和  $\varphi$  为黏聚力和内摩擦角; $\mu$  为黏结摩擦因数; $g_s$  为接触间隙。

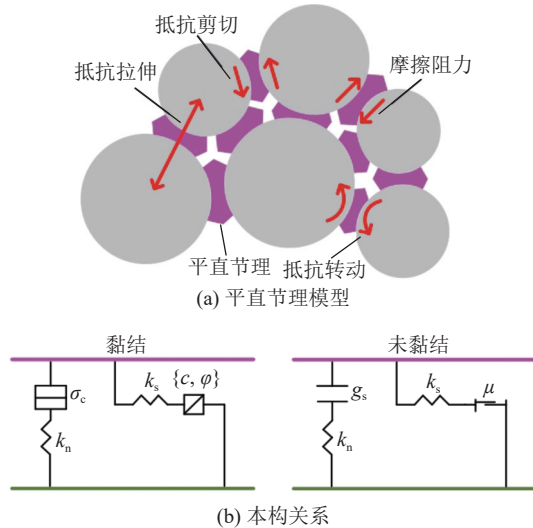


图 1 平直节理模型示意<sup>[16]</sup>

Fig.1 Schematic diagram of flat joint model<sup>[16]</sup>

### 1.2 数值模型构建与模拟方案

椭圆孔洞砂岩离散元模型尺寸参照朱谭谭<sup>[17]</sup>和 CHEN 等<sup>[18]</sup>的研究,模型整体宽度和高度均取 120 mm,椭圆孔洞长轴为  $2a$ ,短轴为  $2b$ ,长轴和短轴之比为  $k$ , $k$  为 1 时孔洞的长轴和短轴均为 20 mm,为了便于对比分析,不同长轴之比  $k$  下的孔洞面积近似相等,其余  $k$  值下的孔洞尺寸以  $k$  为 1 时的面积进行换算。拉剪模拟加载的边界由 8 块刚性墙体组成,

在刚性墙体构成的封闭边界内生成指定粒径范围的颗粒,并通过导入几何模型的方法构建孔洞缺陷。根据现有研究,当模型与颗粒的尺寸之比为 200 左右时粒径尺寸效应较小<sup>[19]</sup>,故数值模型颗粒最小尺寸取为 0.45 mm,最大颗粒尺寸为最小颗粒尺寸的 1.66 倍,共生成 11 867 个颗粒,30 976 个接触。

拉剪模拟的步骤为:在模型上下墙体和颗粒之间添加带有黏结的线性接触用于法向拉应力的施加,通过伺服控制施加法向拉应力至预订值并保持不变,随后对墙体 1、2、4 和墙体 5、6、8 施加大小相同方向相反的速度,墙体加载速率设置为 0.01 m/s,模型发生破坏后停止加载。模型尺寸及加载模式如图 2 所示。

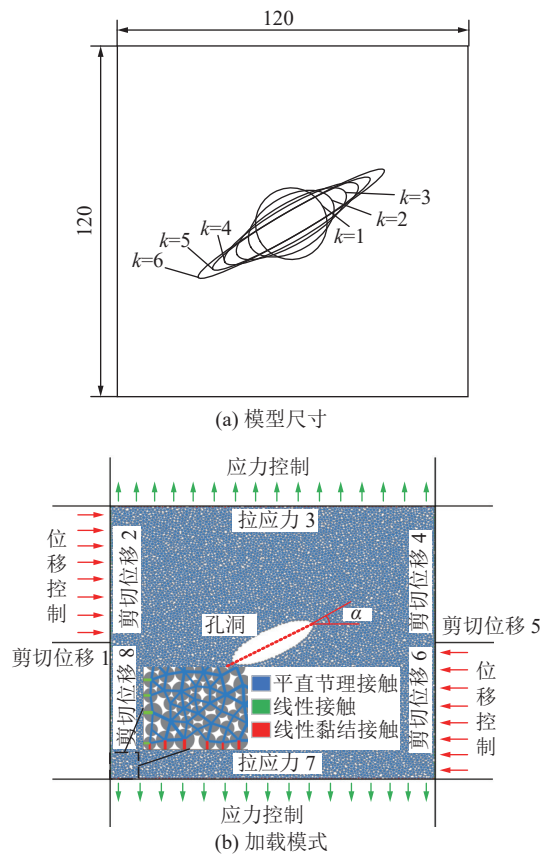


图 2 模型尺寸及加载模式

Fig.2 Model size and loading mode

数值模拟方案为:保持孔洞面积不变,改变椭圆孔洞长轴倾角  $\alpha$  分别为  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $150^\circ$ ,椭圆长短轴之比  $k$  分别为 1、2、3、4、5、6,法向拉应力为 1、2、3、4、5、6 MPa,研究椭圆长短轴之比  $k$  和倾角  $\alpha$  对椭圆孔洞砂岩力学特性及破坏规律的影响。

### 1.3 细观参数标定与验证

为准确模拟岩体的力学性质,需结合室内试验



进行模型细观参数的标定,离散元模型中需要设置的细观参数包括颗粒参数和接触参数。颗粒参数主要包括密度、粒径比、颗粒接触模量以及颗粒接触刚度比等;平直节理细观参数包括接触模量、刚度比、平直节理抗拉强度、黏聚力以及摩擦因数等。参数标定的大体步骤为<sup>[20]</sup>:初步分析材料细观参数对宏观力学参数的影响规律,以此确定出细观参数的大致取值范围,之后反复调节细观参数直至模拟计算的宏观参数与室内试验能够较好的拟合。

室内试验的砂岩式样取自重庆市永川区黄瓜山隧道岩层,该砂岩为均质黑砂岩,无细观节理和裂隙,主要成分为石英和长石,平均密度为 2 720.88 kg/m<sup>3</sup>。通过单轴压缩和间接拉伸测得砂岩的抗压强度、弹性模量、抗拉强度分别为 136.12 MPa、19.72 GPa、19.22 MPa、泊松比 0.16,反复调整数值模拟细观参数,计算出的同尺寸下砂岩的抗压强度、弹性模量、抗拉强度、泊松比分别为 137.48 MPa、18.71 GPa、19.06 MPa、0.16,最终细观参数取值见表 1。

表 1 砂岩数值模型细观参数

Table 1 Meso parameters of sandstone numerical model

模型	参数	数值
颗粒单元	最小颗粒半径/mm	0.45
	最大、最小颗粒粒径比	1.66
	颗粒密度 $\rho$ /(kg·m <sup>-3</sup> )	2 700
线性接触模型	有效模量/MPa	20 500
	刚度比	1.98
	摩擦因数	0.6
线性黏结接触模型	接触模量/MPa	20 500
	刚度比	1.98
	摩擦因数	0.6
	法向黏结力/N	100
	切向黏结力/N	100
平直节理接触模型	接触模量/MPa	20 500
	刚度比	1.98
	摩擦因数	0.5
	抗拉强度/MPa	39.8
	黏聚力/MPa	65.3
	半径系数	1
	交界面段数	4

为进一步验证参数的合理性,将室内单轴压缩和间接拉伸的应力应变曲线及破坏模式与数值模拟

进行对比,如图 3 所示,两者基本吻合,以上表明用该参数进行后续研究具备一定的合理性。

2 力学特征分析

2.1 孔洞倾角  $\alpha$  对强度的影响

椭圆孔洞砂岩的力学性质受倾角  $\alpha$  和长短轴之比  $k$  的双重影响,长短轴之比  $k$  为 3 时孔洞岩体力学参数随  $\alpha$  的变化情况如图 4 所示,法向拉应力为 1 ~ 3 MPa 时,剪切强度和峰值剪切位移随  $\alpha$  的增大呈先减小后增大再减小的变化趋势,在  $\alpha$  为 90°时达到最大值,在  $\alpha$  为 120°或 150°时达到最小值;法向拉应力为 4 ~ 6 MPa 时,剪切强度和峰值剪切位移随  $\alpha$  的增大而先增大后减小,在  $\alpha$  为 0°和 90°时分别取得最小值和最大值。剪切刚度在 0°~ 30°和 60°~ 90°范围内随  $\alpha$  的增大而增大,在 30°~ 60°和 90°~ 180°范围内随  $\alpha$  的增大而减小,说明岩体的抗变形能力与剪切强度没有直接对应关系且对于反倾椭圆孔洞,其抗变形能力相对较差。 $\alpha$  为 0°时,拉应力由 1 MPa 增至 6 MPa,剪切刚度由 39.79 MPa/mm 下降到 24.76 MPa/mm,相邻法向拉应力下剪切刚度的下降幅度分别为 5%, 5.8%, 6.9%, 10.4%, 17%,由此可知,对于  $\alpha$  为 0°时的椭圆孔洞岩体,越靠近强度极限,其抗变形能力越差。

需要说明的是,剪切强度和峰值剪切位移随  $\alpha$  的变化趋势几乎不受  $k$  的影响,但剪切刚度受  $k$  的影响较大,不同  $k$  下剪切刚度随  $\alpha$  的变化趋势不近相同,这与拉应力在孔洞处的集中程度有关。

2.2 长短轴之比  $k$  对强度的影响

图 5 为  $\alpha$  为 30°时孔洞岩体强度特征随  $k$  的变化规律,由图中可知,剪切强度、峰值剪切位移均随  $k$  的增大而呈非线性下降,降低幅度在  $k$  为 2 ~ 4 时较为平缓。剪切刚度随  $k$  的增大呈先减小再增大后减小的变化趋势,在  $k$  为 1 时取得最大值,在  $k$  由 4 增大至 6 时,剪切刚度的降低幅度较大且与法向拉应力呈正相关,分别为 8.4%, 14.2%, 22.1%, 29%, 37.5%, 46.4%,这说明拉应力越大,应力集中程度越大,孔洞岩体的抗变形能力越差。

以上规律在  $\alpha$  为 0°、60°、120°和 150°时均适用,但对于  $\alpha$  为 90°的孔洞岩体,其剪切强度随  $k$  的增大没有明显的下降趋势,而是呈波浪形变化,如图 6 所示。这一变化趋势与孔口塑性区有关,弹塑性力学认为缺陷岩体在压剪荷载作用下,应力集中于缺陷尖端部位<sup>[20]</sup>,研究表明椭圆孔洞长轴端点处的塑性

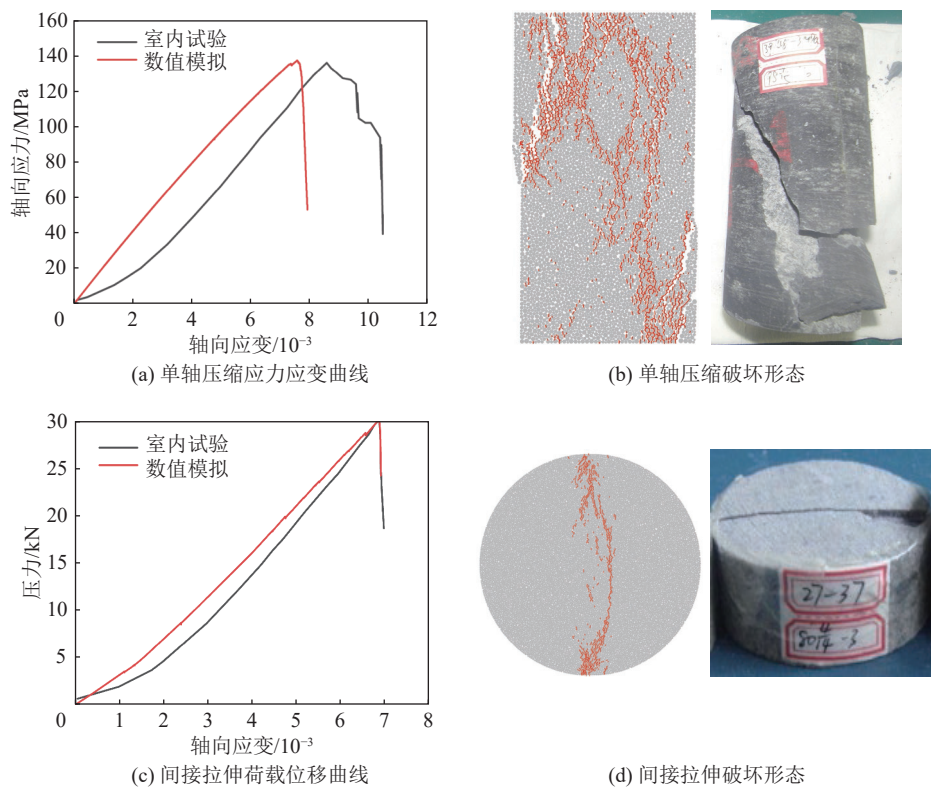
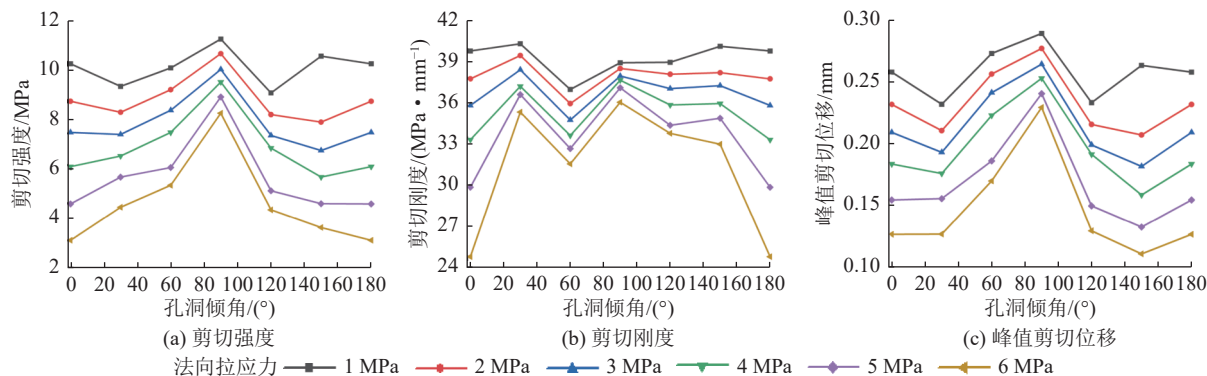


图 3 室内试验与数值模拟结果对比

Fig.3 Comparison between indoor test and numerical simulation results

图 4 不同倾角  $\alpha$  下孔洞岩体强度特征 ( $k=3$ )Fig.4 Strength characteristics of pore rock mass under different dip angle  $\alpha$  ( $k=3$ )

区半径随  $k$  的增大而增大<sup>[21]</sup>, 塑性区的增大使得岩体较早的产生屈服引发裂纹的起裂进而导致强度下降。该规律在拉剪荷载作用下同样适用, 区别在于在拉剪荷载作用下, 当  $\alpha$  不为  $0^\circ$  时, 拉应力并非完全集中在椭圆孔洞长轴端点, 而是集中在长轴端点下的一定区域, 这导致岩体在拉剪荷载作用下的强度变化与理论规律存有一定的偏差, 也是剪切强度在  $k$  为  $2 \sim 4$  时下降平缓 and  $\alpha$  为  $90^\circ$  时呈不规则变化的主要原因。

### 2.3 法向拉应力对强度的影响

法向拉应力主要通过影响岩体内部应力的集中

程度来间接的影响岩体的强度, 不同  $\alpha$  和  $k$  下孔洞岩体的应力集中程度对法向拉应力具有不同的敏感性, 这一特性可由剪切强度的差值体现, 剪切强度在低法向拉应力和高法向拉应力下的差值越大, 说明孔洞应力集中程度对法向拉应力的敏感性越高, 反之则相反。统计不同  $\alpha$  和  $k$  下的孔洞岩体在法向拉应力为  $1 \text{ MPa}$  和  $6 \text{ MPa}$  的剪切强度差值, 如图 7 所示, 根据统计结果可看出,  $k$  为  $1$  时, 孔洞不受  $\alpha$  的影响,  $k$  不为  $1$  时, 剪切强度差值在  $\alpha$  为  $0^\circ$  时最高, 在  $\alpha$  为  $90^\circ$  时最低,  $\alpha$  为  $120^\circ$  和  $150^\circ$  时的强度差值高于  $\alpha$  为  $30^\circ$  和  $60^\circ$  时的强度差值。

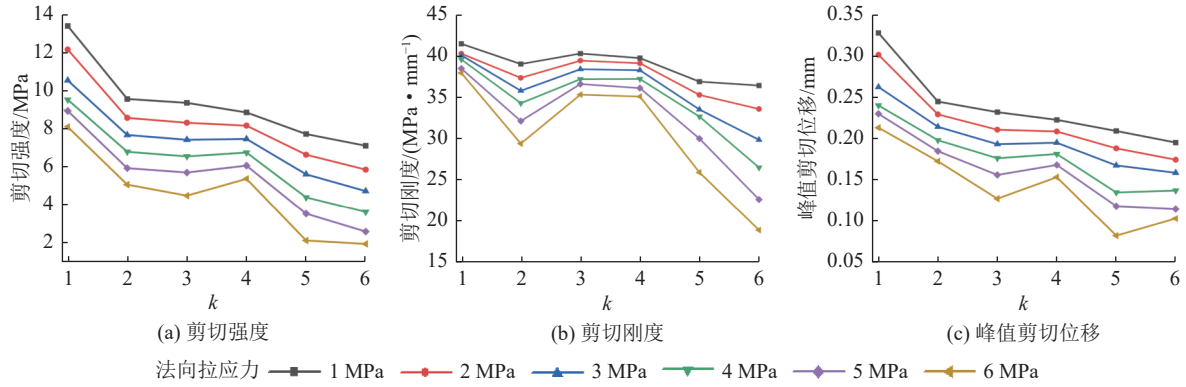
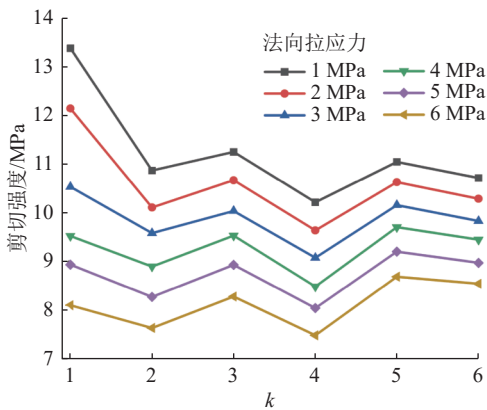
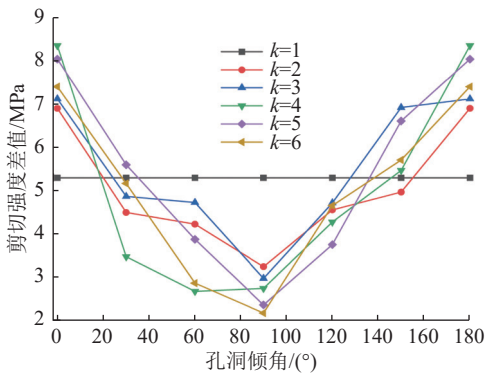
图5 不同长短轴之比  $k$  下孔洞岩体强度特征 ( $\alpha=30^\circ$ )Fig.5 Strength characteristics of hole rock mass under different long short axis ratio  $k$  ( $\alpha=30^\circ$ )图6 剪切强度随  $k$  的变化 ( $\alpha=90^\circ$ )Fig.6 Variation of shear strength with  $k$  ( $\alpha=90^\circ$ )

图7 剪切强度差值

Fig.7 Shear strength difference

相较于完整岩体,孔洞对岩体的剪切强度具有一定程度的劣化,劣化程度受孔洞形状和法向应力的影响<sup>[22-23]</sup>,定义剪切强度劣化系数  $\mu$ :

$$\mu = \frac{\tau_{\max} - \tau_i}{\tau_{\max}} \quad (1)$$

式中,  $\tau_i$  为孔洞岩体的剪切强度;  $\tau_{\max}$  为完整岩体的剪切强度。以  $\alpha$  为  $30^\circ$ ,  $k$  为 3 时的孔洞岩体为例,图 8

显示了完整岩体和孔洞岩体在不同法向拉应力下的剪切强度及剪切强度劣化系数,图中可以看出,法向拉应力从 1 MPa 增加至 6 MPa 时,剪切强度劣化系数从 0.67 增加到 0.79,这说明法向拉应力越大,岩体的劣化程度越明显,结合剪切强度随  $\alpha$  和  $k$  的变化规律可知,在  $\alpha$  为  $90^\circ$  或  $k$  为 1 时,岩体劣化程度最小;在  $\alpha$  为  $0^\circ$  或  $k$  为 6 时,岩体劣化程度最大。

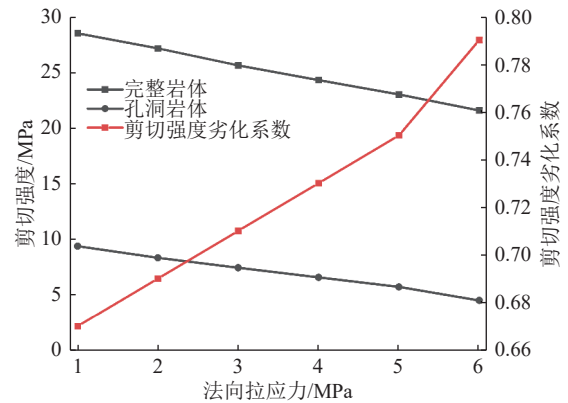


图8 剪切强度劣化

Fig.8 Deterioration of shear strength

综上分析可知,孔洞岩体的应力集中程度对法向拉应力的敏感性随  $\alpha$  的增大呈先减小后增大的变化趋势, $\alpha$  为  $0^\circ$  时,敏感性最高, $\alpha$  为  $90^\circ$  时,敏感性最低, $\alpha$  为  $120^\circ$  和  $150^\circ$  时的敏感性高于  $\alpha$  为  $30^\circ$  和  $60^\circ$  时的敏感性,孔洞岩体的强度相较于完整岩体有明显的劣化且劣化程度与法向拉应力呈正相关。

### 3 破坏特征分析

#### 3.1 起裂应力及起裂角

起裂应力是判断岩体脆性和结构差异的重要指标,目前对于起裂应力的判断尚无明确规定,相关研究学者分别通过宏观裂纹观测、局部应变转换以及



声发射定位等方法确定起裂应力<sup>[24]</sup>。裂纹的起裂往往伴随着局部的应变突增,对于孔洞岩体而言,裂纹在孔洞两端起裂,对岩体起裂点的竖向位移进行监测,竖向位移的突变点所对应的剪切应力即为起裂应力,起裂角  $\theta$  定义为左侧初始裂纹与剪切面的夹角  $\theta_1$  和右侧初始裂纹与剪切面的夹角  $\theta_2$  的平均值,具体如图 9 所示。

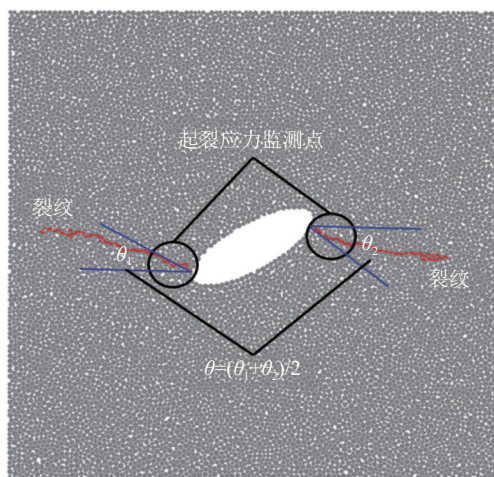


图 9 起裂应力及起裂角监测

Fig.9 Monitoring of crack initiation stress and crack initiation angle

$\alpha$  为  $30^\circ$ ,  $k$  为 3 时的剪切应力-位移曲线及局部竖向位移演化情况如图 10 所示,由图 10 可以看出在拉剪作用下岩体的起裂应力较高,几乎不存在塑性屈服阶段,裂纹从起裂到扩展贯通发生的较为迅速,峰后应力近乎垂直跌落。为定量描述法向拉应力对孔洞岩体裂纹起裂和扩展的影响,定义起裂应力水平  $\eta$ :

$$\eta = \frac{\tau_{ci}}{\tau_t} \quad (2)$$

式中,  $\tau_{ci}$  为孔洞岩体起裂时的剪切强度;  $\tau_t$  为孔洞岩体的剪切强度峰值。图 11 是  $\alpha$  为  $30^\circ$ ,  $k$  为 3 时起裂应力水平和起裂角的变化趋势,由图 11 可知,起裂角随法向拉应力的增大而减小,起裂应力水平随法向拉应力的增大而增大。起裂应力水平在法向拉应力为 1 MPa 时为 0.96,说明岩体在拉剪下以脆性断裂为主。

裂纹的起裂角不仅与法向拉应力相关,还受  $\alpha$  和  $k$  的影响,法向拉应力为 1~6 MPa 下起裂角的平均值随倾角  $\alpha$  和  $k$  的变化如图 12 所示。不同  $\alpha$  下的平均起裂角在一定范围内波动,  $\alpha$  为  $0^\circ$  和  $90^\circ$  时,平均起裂角较小,分布在  $6^\circ \sim 7.7^\circ$  和  $5^\circ \sim 12.3^\circ$  范围

内;  $\alpha$  为  $30^\circ$  和  $60^\circ$  时,平均起裂角相对较大,分布在  $20^\circ \sim 30^\circ$  和  $17^\circ \sim 29^\circ$  范围内,  $\alpha$  为  $120^\circ$  和  $150^\circ$  时,平均起裂角分布在  $14^\circ \sim 21^\circ$  和  $7^\circ \sim 28^\circ$  范围内。起裂角随  $k$  的变化没有明显的规律性,这是由于岩体起裂角度是由起裂点附近的应力状态所决定,不同  $k$  下的起裂点的应力状态具有较大差异。

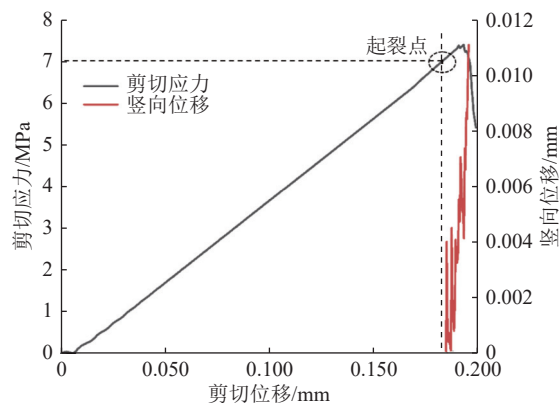


图 10 剪切应力-位移曲线

Fig.10 Shear stress-displacement curve

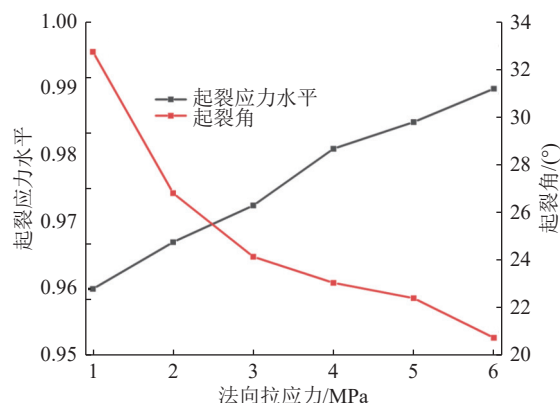


图 11 起裂应力水平及起裂角

Fig.11 Crack initiation stress level and crack initiation angle

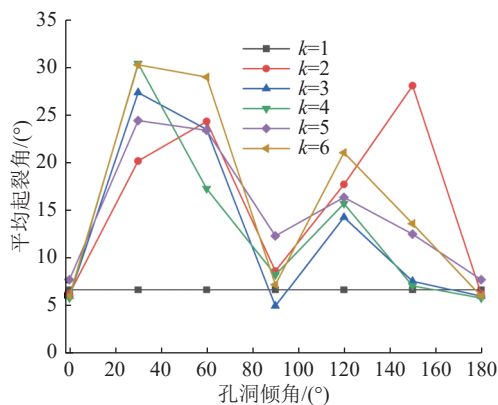


图 12 平均起裂角

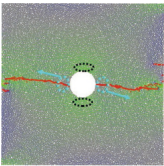

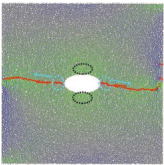
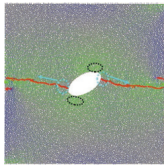
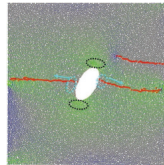
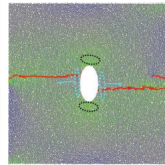
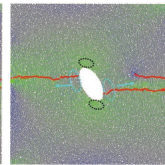
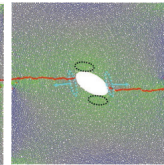
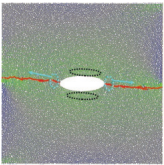
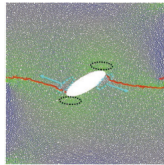
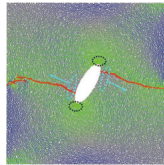
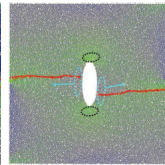
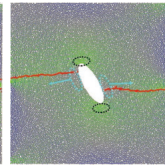
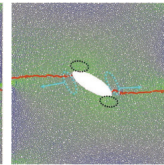
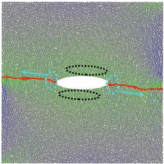
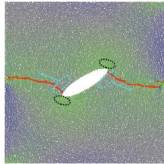
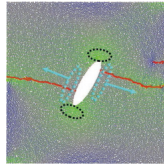
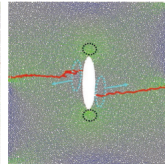
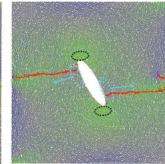
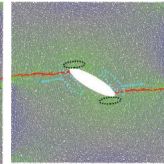
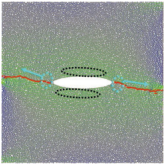
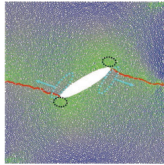
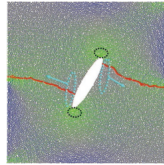
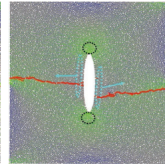
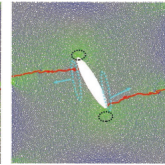
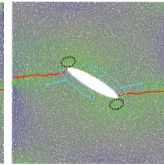
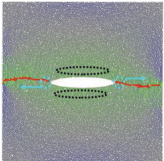
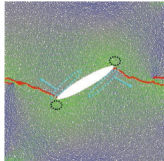
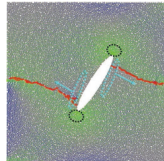
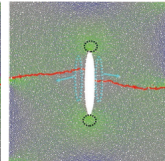
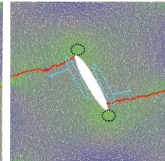
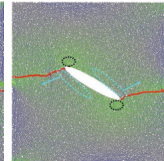
Fig.12 Average crack initiation angle

### 3.2 裂纹扩展规律

由于不同法向拉应力下岩体内部应力的分布形态以及裂纹的扩展模式整体相似,故仅列出在法向拉应力为 3 MPa 时椭圆孔洞岩体破坏后的裂纹形态

以及接触力分布,见表 2,图中红色代表微裂纹,灰色代表岩体基质,蓝色线条代表拉应力,绿色线条代表压应力,线条的粗细程度代表应力的大小,蓝色虚线和黑色虚线分别代表拉应力和压应力集中区。

表 2 裂纹扩展模式  
Table 2 Crack propagation mode

椭圆孔洞长短 轴之比 $k$	椭圆孔洞倾角					
	0°	30°	60°	90°	120°	150°
1						
2						
3						
4						
5						
6						

孔洞岩体的拉剪破坏过程可分为 2 个阶段,第 1 阶段为线弹性阶段,剪切应力呈线性增加,无微裂纹产生;第 2 阶段为裂纹扩展阶段,该阶段裂纹迅速扩展贯通,剪切应力近乎呈直线跌落。在  $\alpha$  为 0° 时,压应力和拉应力分别集中于孔洞的左右和上下两侧,初始裂纹在孔洞两侧剪切面处起裂,法向拉应力较小时,初始裂纹与剪切面呈一定角度扩展,随着法向拉应力的增大,起裂角度近乎平行于剪切面;随着  $k$  的增大,拉应力集中程度增加,压应力集中程度减小,

裂纹的整体扩展模式无明显差异。在  $\alpha$  为 30° 和 60° 时,压应力和拉应力集中区呈非对称平行分布, $k$  越大,拉应力集中区越靠近椭圆长轴端点。当  $\alpha$  为 90° 时,压应力集中区分布长轴端点处,拉应力集中区分布在椭圆孔洞曲率半径最大值和最小值之间且拉应力的集中程度随着  $k$  的增大而减小。当  $\alpha$  为 120° 和 150° 时,应力集中区的位置与 30° 和 60° 大体相似,裂纹起裂角小于 30° 和 60°,裂纹起裂后向相反方向扩展直至贯通。



总体而言,孔洞岩体的最终破坏模式均是由反翼裂纹贯通所导致的拉伸破坏, $\alpha$  和  $k$  主要通过影响拉应力集中区的位置及大小来影响裂纹的起裂和扩展,岩体裂纹的扩展是其内部拉应力集中区不断释放和转移直至消散的过程。对于非  $0^\circ$  的孔洞岩体,反翼裂纹扩展到一定程度后,边界拉应力集中区导致岩体屈服,进而引起剪切面边界处产生少量次生裂纹,次生裂纹会随着加载进一步与孔洞顶部的压应力集中区贯通,但此过程由于拉应力的迅速下降,已不属于拉剪应力作用范畴,而是具有剪胀效应的非规则剪切面的直剪作用,因而对此不作过多赘述。

### 3.3 裂纹扩展机理

岩体内部的孔洞导致了应力的集中现象,从而诱导了裂缝的扩展模式。大多数学者从应力场的角度研究了裂纹演化的细观机理,然而应力的分布具有方向性且对裂纹的扩展具有导向作用<sup>[25]</sup>,从应力张量的角度分析一点的应力状态更能揭示裂纹扩展的细观机理,二维平面中一点的应力张量形式如图 13 所示。

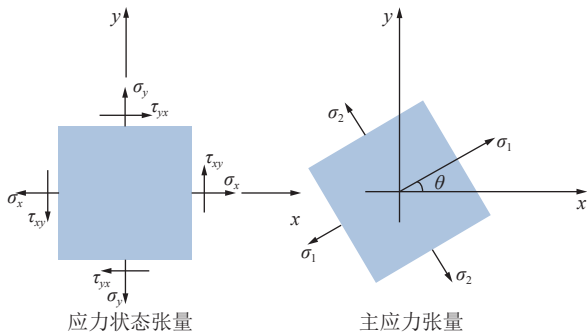


图 13 平面一点应力状态

Fig.13 Stress state at one point in the plane

二维平面中一点的应力张量矩阵表示:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \sigma_y \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据应力分量,大主应力 $\sigma_1$ 和小主应力 $\sigma_2$ 由下式求出:

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \left[ \sigma_x + \sigma_y + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \right] \quad (4)$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2} \left[ \sigma_x + \sigma_y - \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \right] \quad (5)$$

主应力方向角 $\theta$ 由下式求出:

$$\tan 2\theta = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (6)$$

当 $\sigma_x$ 大于 $\sigma_y$ 时,主应力方向角为 $\theta$ ,当 $\sigma_x$ 小于 $\sigma_y$ 时,主应力方向角为 $\theta + \pi/2$ 。

离散元程序无法直接获取应力的状态,需通过测量圆工具监测应力的状态,等距布置 676 个测量圆,每个测量圆直径为 4.6 mm,内部约包含 15~20 个颗粒,通过测量圆获取局部的应力状态。

限于篇幅,仅对 $\alpha$  为  $30^\circ$ , $k$  为 3、法向应力为 3 MPa 时的孔洞岩体随加载过程的应力张量进行详细分析,如图 14 所示,其规律不失为一般性。图 14 显示了孔洞岩体在加载前(剪切应力 0)、加载中(剪切应力 2 MPa)、裂纹起裂(剪切应力 7.2 MPa)以及裂纹贯通(剪切应力 5.5 MPa)4 个节点的应力张量演化,图中应力十字架的长轴代表大主应力,短轴代表小主应力,长轴倾角为大主应力方向角。在加载初始阶段,未施加剪应力,岩体内部的应力状态以受拉为主,大主应力方向近乎垂直,受拉作用下应力的集中效应引起了孔洞周围应力大小的差异。施加剪切应力之后,远离孔洞处的应力状态变化不大,拉应力和压应力的耦合作用使得孔洞边缘至剪切边界处形成较大的受拉区和受压区,受压区大主应力方向为水平,受拉区大主应力随着剪切应力的增加由竖向转变为横向且剪切应力越大,大主应力倾角越小,拉应力集中于孔洞长轴端点以下的一定区域,最大受拉区靠近剪切加载面一侧的边界即为拉应力集中区的移动路径。在裂纹起裂后,最大受拉区中大主应力方向发生较大倾斜,说明此时剪切应力占主导,大主应力方向为裂纹的扩展方向。裂纹贯通之后,法向拉应力迅速下降,由于最大受拉区在反向剪切应力的作用下仍然存在,因而剪切面边界处会产生拉应力集中,进而萌生次生裂纹,次生裂纹沿着最大受拉区的另一侧边界向孔洞处扩展,次生裂纹的扩展使得受拉区拉应力得到释放,这与裂纹的宏观扩展规律一致。

综上所述,孔洞岩体裂纹的扩展是其内部拉应力不断释放和重分布的过程,拉剪荷载作用下,岩体内部拉应力和压应力耦合形成最大受拉区,最大受拉区靠近剪切加载面一侧的边界为裂纹的扩展路径,裂纹因孔洞处的塑性屈服而起裂,裂纹起裂后,颗粒接触断裂造成应力的释放与重分布,裂纹再次沿重分布后的最大主应力方向扩展,宏观上即表现为裂纹的非线性扩展模式。



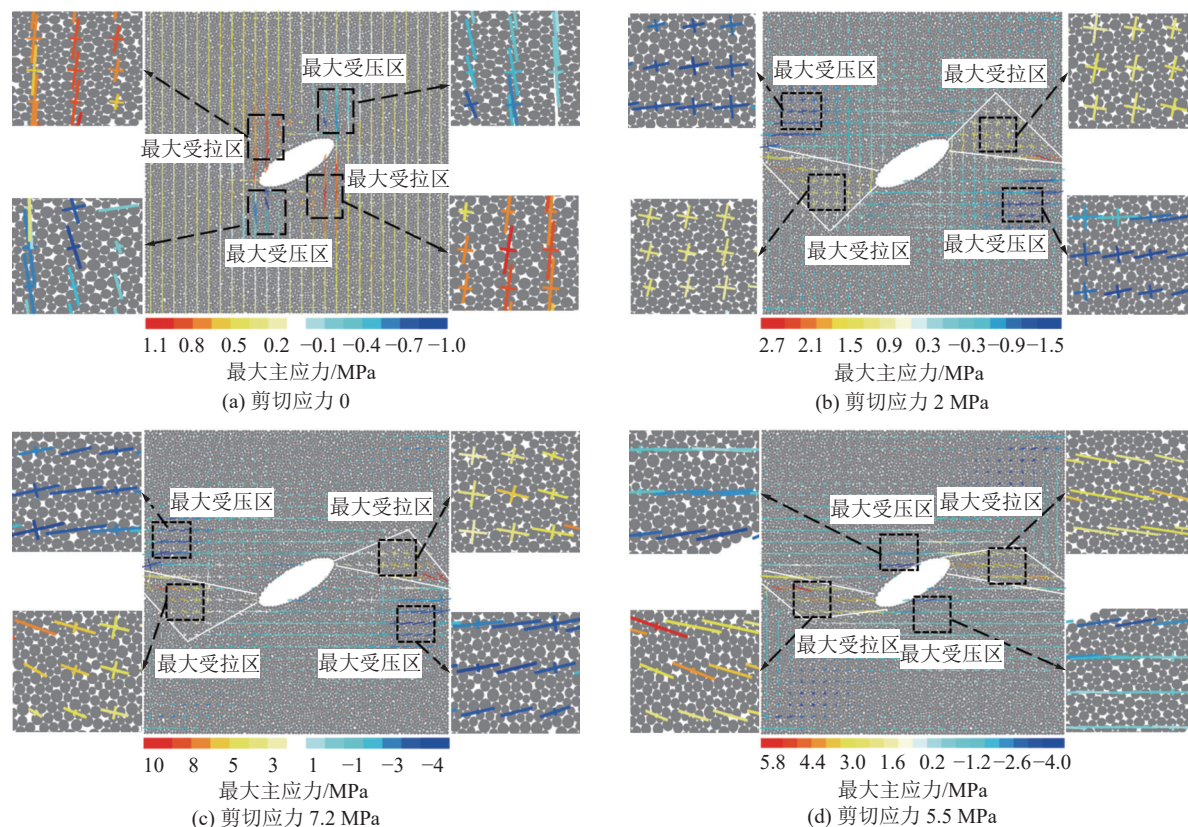


图 14 应力张量演化

Fig.14 Evolution of stress

## 4 结 论

1) 相同长短轴之比  $k$  下, 剪切强度随孔洞倾角  $\alpha$  的变化规律受法向拉应力的影响, 法向拉应力为 1~3 MPa 时, 剪切强度随  $\alpha$  的增大而先减小后增大再减小; 法向拉应力为 4~6 MPa 时, 剪切强度随  $\alpha$  的增大呈先增大后减小的变化趋势, 剪切强度与峰值剪切位移随  $\alpha$  的变化规律相同且不受  $k$  的影响, 剪切刚度受  $k$  的影响较大, 不同  $k$  下的剪切刚度随  $\alpha$  的变化趋势不近相同。

2) 相同孔洞倾角  $\alpha$  下, 在  $\alpha$  为非 90° 时, 剪切强度和峰值剪切位移随  $k$  的增大而非线性下降, 当  $\alpha$  为 90° 时, 受应力集中程度的影响, 剪切强度的变化无明显规律, 剪切刚度随  $k$  的增大呈先减小再增大后减小的变化趋势。

3) 孔洞的应力集中程度对法向拉应力的敏感性随  $\alpha$  的增大呈先减小后增大的变化趋势,  $\alpha$  为 0° 时, 敏感性最高,  $\alpha$  为 90° 时, 敏感性最低,  $\alpha$  为 120° 和 150° 时的敏感性高于  $\alpha$  为 30° 和 60° 时的敏感性, 孔洞岩体的强度相较于完整岩体有明显的劣化且劣化程度与法向拉应力呈正相关。

4) 裂纹的起裂应力水平随法向拉应力的增大而增大, 起裂角随法向拉应力的增大而减小, 平均起裂

角在  $\alpha$  为 0° 和 90° 时最小,  $\alpha$  为 30° 和 60° 时的平均起裂角差异不大且高于  $\alpha$  为 120° 和 150° 时的平均起裂角。

5) 孔洞岩体在拉剪作用下的破坏模式为反翼裂纹贯通所导致的拉伸破坏,  $\alpha$  和  $k$  主要影响岩体内部应力集中区的分布, 拉剪作用下岩体内部拉应力和压应力耦合形成最大受拉区, 最大受拉区靠近剪切加载面一侧的边界为裂纹的扩展路径, 裂纹由孔洞处的塑性屈服而起裂, 裂纹起裂后, 颗粒接触断裂造成应力的释放与重分布, 裂纹再次沿重分布后的最大主应力方向扩展, 宏观上表现为裂纹的非线性扩展模式。

## 参考文献(References):

- [1] 刘晓丽, 王思敬, 王恩志, 等. 单轴压缩岩石中缺陷的演化规律及岩石强度[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 7.  
LIU Xiaoli, WANG Sijing, WANG Enzhi, et al. Evolutionary rules of flaws in rock subjected to uniaxial compression and rock strength[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6): 7.
- [2] WU F Q, LIU T, LIU J Y, et al. Excavation unloading destruction phenomena in rock dam foundations[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2014, 68(2): 257-262.
- [3] HUANG R Q, WANG X N, CHAN L S. Triaxial unloading test of rocks and its implication for rock burst[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2001, 60(1): 37-41.

- [4] ZHU T T, HUANG D. Experimental investigation of the shear mechanical behavior of sandstone under unloading normal stress[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 114: 186–194.
- [5] SIMAN-TOV S, KATZ O, MATMON A. Examining the effects of ground motion and rock strength on the size of boulders falling from an overhanging cliff[J]. *Engineering Geology*, 2017, 220: 164–174.
- [6] 李建林. 三峡工程岩石拉剪断裂特性的试验研究[J]. 地下空间, 2002(2): 149–152, 189.  
LI Jianlin. Experimental study on tensile shear fracture characteristics of rocks in the Three Gorges Project[J]. *Underground space*, 2002(2): 149–152, 189.
- [7] RAMSEY J M, CHESTER F M. Hybrid fracture and the transition from extension fracture to shear fracture[J]. *Nature*, 2004, 428(6978): 63–66.
- [8] 郭静芸, 李 晓, 李守定, 等. 拉伸剪切条件下岩石的工程地质力学特性[J]. 工程地质学报, 2012, 20(6): 1020–1027.  
GUO Jingyun, LI Xiao, LI Duoding, *et al.* The engineering geology mechanical properties of rock in tension-shear state[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2012, 20(6): 1020–1027.
- [9] 李守定, 李 晓, 郭静芸, 等. 岩石拉伸剪切破裂试验研究[J]. 工程地质学报, 2014, 22(4): 655–666.  
LI Duoding, GUO Jingyun, LI Xiao, *et al.* Research of rock failure testing under combined shear and tension[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(4): 655–666.
- [10] 周 辉, 卢景景, 徐荣超, 等. 硬脆性大理岩拉剪破坏特征与屈服准则研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 305–314, 349.  
ZHOU Hui, LU Jingjing, XU Rongchao, *et al.* Research on tension-shear failure characteristics and yield criterion of hard brittle marble[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(2): 305–314, 349.
- [11] 岑夺丰, 刘 超, 黄 达. 砂岩拉剪强度和破裂特征试验研究及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(7): 1333–1342.  
CEN Duofeng, LIU Chao, HUANG Da. Experimental and numerical study on tensile-shear strength and rupture characteristics of sandstone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(7): 1333–1342.
- [12] HUANG D, CEN D F, SONG Y X. Comparative Investigation on the compression-shear and tension-shear behaviour of sandstone at different shearing rates[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(7): 3111–3131.
- [13] 周超彪, 刘 东, 姜清辉. 拉剪作用下类岩石试样的力学特性与损伤破坏机制[J]. 岩土力学, 2021, 42(12): 3335–3344.  
ZHOU Chaobiao, LIU Dong, JIANG Qinghui. Mechanical properties and damage failure mechanism of rocklike specimens under tension-shear[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(12): 3335–3344.
- [14] 王志文, 赵海军, 马凤山, 等. 非均质共面断续节理岩体拉伸剪切破裂机制研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(5): 11.  
WANG Zhiwen, ZHAO Haijun, MA Fengshan, *et al.* Numerical study on tension-shear failure mechanism of heterogeneous coplanar intermittent jointed rock mass[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(5): 11.
- [15] 岑夺丰, 刘 超, 黄 达. 拉剪应力作用下单裂隙砂岩裂纹扩展规律试验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S2): 731–739.  
CEN Duofeng, LIU Chao, HUANG Da. Experimental investigation on crack propagation law of sandstone containing a single fissure under tensile-shear stress[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(S2): 731–739.
- [16] ALEFELD G, MAYER G. Interval analysis: theory and applications[J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2000, 121(1/2): 421–464.
- [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 Tantan, JING Hongwen, SU Haijian *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.
- [18] CHEN S, XIA Z, 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(6): 1–15.
- [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 Hui, YANG Jiaqi, HU Baowen, *et al.* Study of particle size effect of rock model based on particle discrete element method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(12): 4642–4650.
- [20] 张 权, 饶秋华, 沈晴晴, 等. 基于中心组合设计的颗粒流平直节理模型宏观参数相关性研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2021, 52(3): 11.  
ZHANG Quan, RAO Qiuhua, SHEN Qingqing, *et al.* Study on correlation of macro-meso parameters of flat joint model of particle flow code based on central composite design method[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2021, 52(3): 11.
- [21] 郭佳奇, 乔春生. 椭圆孔口塑性区及其在岩溶隧道工程中的应用[J]. 铁道学报, 2013, 35(3): 7.  
GUO Jiaqi, QIAO Chunsheng. Plastic zone around elliptical hole portal and its application in karst tunnel[J]. *Journal of the China rail way society*, 2013, 35(3): 7.
- [22] 杜明瑞, 靖洪文, 苏海健, 等. 含预制椭圆形孔洞砂岩强度及破坏特征试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(6): 1164–1171.  
DU Mingrui, JING Hongwen, SU Haijian, *et al.* Experimental study of strength and failure characteristics of sandstone containing prefabricated elliptical hole[J]. *Journal of China university of mining ang technology*[J], 2016, 45(6): 1164–1171.
- [23] 朱泉企, 李地元, 李夕兵. 含预制椭圆形孔洞大理岩变形破坏力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S1): 2724–2733.  
ZHU Quanqi, LI Di yuan, LI Xibing. Experimental study on failure and mechanical characteristics of marble containing a prefabricated elliptical hole[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(S1): 2724–2733.
- [24] HAN W, JIANG Y, LUAN H, *et al.* Numerical investigation on the shear behavior of rock-like materials containing fissure-holes with FEM-CZM method[J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, 125: 103670.
- [25] LUO X Y, CAO P, LIN Q B. Mechanical behaviour of fracture-filled rock-like specimens under compression-shear loads: An experimental and numerical study[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2021, 113: 102935.