

• 水利与土木工程 •

DOI:10.15961/j.jsuese.201800088

水力耦合作用下岩体3维裂隙的起裂扩展模式研究

杨磊¹, 梅洁¹, 李术才¹, 李邦翔¹, 郭孔灵¹, 张波², 杨为民¹, 张强勇¹

(1.山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061; 2.山东大学土建与水利学院, 山东 济南 250061)

摘 要:岩体裂隙在高地应力、强渗透压作用下极易发生扩展、贯通, 导致岩体破裂失稳。为研究水力耦合作用下 3 维裂隙的起裂扩展模式, 采用 3 维断裂分析软件 FRANC3D 建立水力耦合数值模型, 进行数值模拟研究, 并开展相应的含裂隙透明树脂类岩石材料室内破裂试验。通过对比模拟与试验结果, 分析了不同断裂准则的适用性, 验证了数值模型的可靠性。基于数值模拟调查了不同加载条件下裂隙前缘断裂参数的分布特征, 获得了水压、侧压等关键因素对裂隙起裂角及扩展长度的影响规律。结果表明: 采用优化的能量释放率准则模拟的 3 维裂隙空间起裂扩展模式与试验现象具有良好的一致性; 裂隙长轴端点处的翼裂纹为 I - II (张拉 - 滑移) 型复合裂纹, 短轴端点处的平面扩展为 I - III (张拉 - 撕裂) 型复合裂纹, 除长、短轴端点外的其余位置发生 I - II - III 型复合断裂; 水压的存在显著改变了裂隙前缘的应力分布状态, 水压增大可提高拉应力水平, 明显促进张拉断裂的发生, 使裂隙倾向于沿原裂隙面方向起裂, 并导致裂隙前缘各处扩展速率趋于均衡; 侧向压应力增大可显著促进张拉断裂, 抑制滑移与撕裂断裂, 并使裂隙前缘能量释放率呈降低趋势, 从而抑制裂隙扩展, 而侧向拉应力起相反作用, 由此认为岩体在双向受压状态比拉压受力状态更为安全; 侧向压应力与水压共同导致翼裂纹偏转角度明显减小, 改变了 3 维裂隙的空间起裂扩展模式及岩体的宏观破裂形态。

关键词:3 维裂隙; 水力耦合; 应力强度因子; 能量释放率; 起裂扩展模式

中图分类号: TU458

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2018)06-0174-10

Research on the Initiation and Propagation Modes of 3-D Crack Under Hydro-mechanical Coupling

YANG Lei¹, MEI Jie¹, LI Shucan¹, LI Bangxiang¹, GUO Kongling¹, ZHANG Bo², YANG Weimin¹, ZHANG Qiangyong¹

(1. Research Center of Geotechnical and Structural Eng., Shandong Univ., Ji'nan 250061, China;

2. School of Civil Eng., Shandong Univ., Ji'nan 250061, China)

Abstract: It is easy for the cracks in rock masses to propagate and coalesce under the combination of high ground stress and seepage pressure, which leads to the failure of rock masses. In order to investigate the initiation and propagation modes of 3-D crack under hydro-mechanical coupling, a numerical model was established by the 3-D fracture analysis code of FRANC3D. The numerical simulation and the corresponding laboratory failure experiments based on the transparent resin rock-like material were carried out. The applicability of different fracture criteria was analyzed by comparing it with laboratory results, and then the reliability of the model was validated. Based on the numerical simulation, the distribution characteristics of fracture parameters along the crack fronts under different loading conditions were analyzed. The influences of key factors such as water pressure and lateral stress on the angles and lengths of 3-D crack propagation were obtained. The results showed that the numerical results are in good agreement with the test results by using the optimized energy release rate criterion. The wing cracks at end points of crack long axis are the I - II (tensile-slip) mixed cracks, whereas the plane extensions at end points of crack short axis are the I - II (tensile-tearing) mixed cracks, and I - II - III mixed fracture occur in the rest of the positions. The existence of water pressure significantly changes the stress distribution of crack fronts. The increase of water pressure can enhance the tensile stress and promote the tensile fracture, resulting in the crack initiation being inclined to the original surface and the propagation rates along the crack fronts tending to be uniform. The increase of later-

收稿日期: 2018 - 01 - 26

基金项目: 国家自然科学基金青年资助项目(51509146); 国家自然科学基金面上项目资助(51379114; 51479107); 泰山学者工程专项经费资助

作者简介: 杨磊(1982—), 男, 副教授, 博士。研究方向: 裂隙岩体力学特性; 地下工程水害防治。E-mail: yanglei@sdu.edu.cn

网络出版时间: 2018 - 10 - 22 17 : 09 : 00 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20181019.1319.009.html>

<http://jsuese.ijournals.cn> <http://jsuese.scu.edu.cn>

al compressive stress can significantly facilitate tensile fracture and inhibit slip and tearing fracture. The energy release rates of crack fronts show a decreasing trend under lateral compressive stress, thus restraining the crack propagation, while the lateral tensile stress has an opposite impact on the energy release rates, which indicates that the fractured rock mass is much safer under the biaxial compressive stress state than the tensile-compressive stress state. The lateral compressive stress and water pressure jointly lead to the decrease of the deflection angle of wing crack, which changes the spatial propagation mode of crack and the macro failure pattern of rock mass.

Key words: 3-D crack; hydro-mechanical coupling; stress intensity factor; energy release rate; initiation and propagation modes

中国地形和地质条件极端复杂,大量深长隧道(隧洞)、地下硐室的修建呈现大埋深、高地应力、强渗透压的显著特点,给工程建设带来极大挑战^[1-2]。在高地应力和强渗透压的耦合作用下,岩体内裂隙极易发生扩展演化,导致岩体强度弱化和工程结构破裂失稳,进而诱发工程事故。因此,明确水力耦合作用下岩体裂隙的起裂扩展规律,揭示岩体的破裂机理,是控制事故灾难发生、保障工程建设与运营安全所亟需解决的关键问题。

岩体中赋存的裂隙通常具有3维的形态特征和扩展模式,故3维裂隙的扩展演化机理是当前研究的重点。截至目前,国内外学者已开展了大量基础研究,基于室内试验、数值模拟与理论分析等方法研究了3维裂隙在纯应力条件下的起裂扩展模式和贯通过程,分析了岩体强度变化规律,并建立相应的裂隙扩展模型及破坏准则^[3-7]。

相对而言,水力耦合作用下岩体3维裂隙的扩展演化机理比纯应力条件下更为复杂。针对该问题,国内外学者进行了有益探索^[8-16]。赵延林等^[8-9]提出压剪和渗流共同作用下岩体裂隙渗流-劈裂-损伤耦合模型,并研究了分支裂纹的相互作用。郑少河^[10]研究了应力场与渗流场共同作用下的岩体损伤演化机制,建立了含水裂隙岩体的弹脆性和弹塑性断裂损伤本构模型。Zhou等^[11]采用理论和试验方法分析了裂隙萌生及裂隙尖端应力强度因子的变化规律,揭示了裂隙岩体在静(动)荷载及渗流压力共同作用下的突水机制。Zhou等^[12]基于修正的拉破坏模型研究了水力耦合条件下裂隙的扩展规律,并分析了裂隙扩展对围岩变形特征的影响。Wang等^[13]分析了水压作用下裂隙宽度对其扩展和闭合的作用,提出裂隙扩展的闭合准则,并建立了连续-离散介质模型。付金伟等^[14-15]开展了含裂隙透明树脂类岩石材料的水压裂试验及数值模拟研究,分析了裂纹扩展形态及产生机制。蒲成志等^[16]研究了复合型裂纹应力分布特征及断裂破坏机制,提出高低渗透压环境判定准则及相应的裂纹起裂特征。

鉴于水力耦合作用与3维裂隙空间扩展等问题的复杂性,现有研究仍不充分,考虑水压与地应力不同组合情况下3维裂隙起裂扩展模式的研究较为匮乏,特别是针对3维裂隙的空间扩展形态缺少深入的

量化分析,对裂隙岩体破裂机理的认识尚不清晰,难以为工程实践提供直接有效的理论指导。

相对于理论分析与室内试验,数值模拟为水力耦合作用下3维裂隙起裂扩展模式的深入研究提供了便捷有效的途径。数值模拟方法能够处理复杂边界条件下的3维断裂问题,可量化分析裂隙前缘关键断裂参数的分布规律,进而明确3维裂隙的空间扩展模式及其主要影响因素。

采用3维断裂分析软件FRANC3D V7.0(FRacture ANalysis Code for 3D)研究水力耦合作用下3维裂隙的起裂扩展模式。为验证数值模型的准确性,首先开展水力耦合岩体破裂室内试验,对复合型断裂准则的适用性进行评价和优化;进而,通过数值模拟研究3维裂隙前缘的应力强度因子与能量释放率两个关键断裂参数的空间分布规律,为裂隙起裂扩展模式量化分析提供基础;最后,调查水压与加载形式这两个关键因素对断裂参数分布及裂隙起裂扩展的影响机制。主要研究成果在水力耦合条件下岩体破裂机理及工程安全评价的方面具有一定的理论意义和参考价值。

1 室内试验及数值模型验证

为验证FRANC3D数值模型对水力耦合作用下岩体3维裂隙起裂扩展模拟的适用性和准确性,开展相应的室内验证试验。通过数值模拟与试验结果的对比,对不同复合断裂准则进行了适用性评价及参数优化,确保了数值模拟结果的可靠性。

1.1 室内试验与结果分析

岩石的非透明性为内部裂隙起裂扩展过程的观测带来了极大困难。为此,利用文献^[14]中研发的透明树脂类岩石材料制备试件,其力学性质与岩石相近,低温下具有良好的脆性,且透明度高,能够清晰地观测裂隙的起裂和扩展演化过程^[14]。

透明树脂试件及试验加载装置如图1所示。长方体试件尺寸为长×宽×高=70 mm×70 mm×140 mm,3维裂隙位于试件几何中心位置。在试件浇筑过程中,采用预埋薄片法预置3维裂隙,将两片椭圆形云母片重叠并周边密封后,用细棉线固定于试件中心,形成中空裂隙^[14]。椭圆形裂隙的长、短轴长度分别为24和12 mm,其倾角(裂隙面与水平面夹角)分别设

为30°、45°和60°。同时,将内径1.5 mm的塑料软管埋设于试件轴线,下端与中空裂隙连通,上端与高压注水装置连通,形成注水通道。

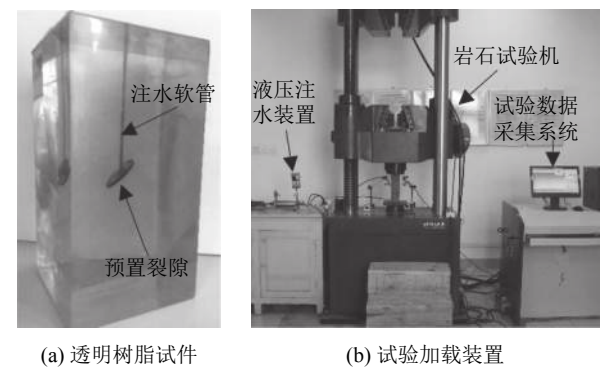


图 1 透明树脂试件与加载装置

Fig. 1 Transparent resin specimen and the loading apparatus

试验开始前,将试件低温冷冻至-45 ℃,使其力学性质与真实岩石相近。之后,对试件开展单轴压缩试验,同时采用高压注水装置通过预埋的塑料软管向中空裂隙内注入压力为2.0 MPa的红色墨水,以模拟裂隙水压力,见图1(b)。在轴压荷载和裂隙水压的作用下,试件内置3维裂隙发生起裂扩展,导致试件破裂演化,模拟岩体的破裂过程和破裂模式。试验中,通过观察红墨水在试件内的扩散可更直观地判断3维裂隙的起裂扩展状况。

图2为试验观测的3维裂隙起裂扩展的基本模式。在轴向压缩荷载及裂隙水压力的作用下,3种倾角的预置裂隙在长轴上、下尖端分别生成对称的包裹状翼裂纹,其起裂方向与原裂隙面呈较大角度。随翼裂纹扩展长度逐渐增大,其扩展逐渐偏转为竖直加载方向。同时,在预置裂隙短轴处观察到沿原裂隙面的侧向扩展模式。

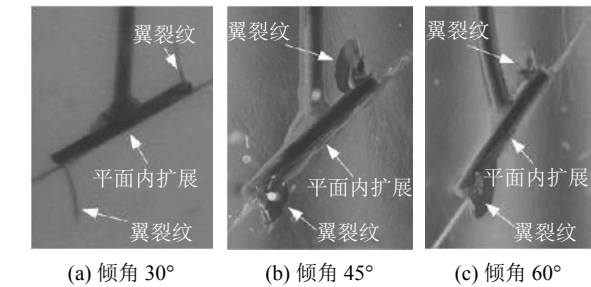


图 2 试验观测的3维裂隙起裂扩展模式

Fig. 2 Initiation modes of 3-D cracks observed in tests

试验发现,3维裂隙沿其前缘起裂扩展,而裂隙前缘不同位置处的起裂角和扩展长度决定了3维裂隙的空间扩展模式。为便于量化分析,选择裂隙长轴和短轴端点两个关键位置的起裂角和扩展长度作为评价裂隙空间扩展模式的指标。当轴向荷载达到试

件峰值强度(约108~118 MPa)的1/3时,裂隙发生起裂并形成一定长度翼裂纹,可观察到明确的起裂扩展模式,此时两个特征指标的测量值见表1。表1中,裂隙长轴端点记为A点,短轴端点记为B点,将起裂角定义为新裂隙面和原裂隙面之间的夹角(锐角)。试验结果表明:3种倾角的裂隙在A点的起裂角分别为68.1°、67.0°和63.9°,且随倾角增大而逐渐减小;B点处的起裂角基本为0°;B点处平面内扩展程度远小于A点处的翼裂纹扩展,两点扩展长度之比 $\Delta l_B/\Delta l_A$ 分别为0.086、0.058和0.048。可见裂隙长轴端点处的翼裂纹扩展是导致水力耦合作用下岩体破裂的主要原因。

表 1 试验观测的3维裂隙起裂角与扩展长度

Tab. 1 Angles and lengths of 3-D crack extension in tests

裂隙倾角/(°)	起裂角 $\alpha/(^\circ)$		扩展长度 $\Delta l/\text{mm}$		$\Delta l_B/\Delta l_A$
	α_A	α_B	Δl_A	Δl_B	
30	68.1	0.0	10.5	0.9	0.086
45	67.0	0.0	12.0	0.7	0.058
60	63.9	0.0	12.5	0.6	0.048

1.2 数值模型的建立

基于FRANC3D V7.0建立水力耦合数值计算模型。FRANC3D是美国FAC公司开发的专业断裂分析软件,其基本原理为:建立有限元模型并定义边界条件,计算应力强度因子等断裂参数;之后根据断裂准则预测裂隙前缘任意位置的扩展角度和长度,并实现复杂形状3维裂隙空间扩展的模拟。该软件利用交互积分方法对裂隙尖端奇异单元进行计算,能精确计算复合型应力强度因子^[17-18],同时采用自适应网格划分技术,使裂隙扩展不受模型形状、网格类型和扩展方向等因素制约,确保了网格质量和裂隙扩展模拟的精度。

FRANC3D数值模拟所针对的物理模型及加载条件与室内试验一致。所建数值模型具有与试验物理模型(图1)相同的外观尺寸、材料参数^[14]及裂隙布设形式。数值模型和裂隙面的网格划分情况如图3所示,在靠近裂隙区域及裂隙面处划分细密网格以确保断裂参数计算及裂隙扩展模拟的精度。在对裂隙前缘进行分析时,鉴于数值模型的几何对称性,选择裂隙前缘从长轴上端点到短轴右端点的1/4段(AB段)作为分析对象,并引入位置角 $\theta(0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ)$ 定义裂隙前缘的任意位置^[6],见图3(c)。

在数值模拟研究中,模型边界条件的设置与室内试验一致。在模型底面设置竖向位移约束,顶面施加竖向压应力,以模拟轴压加载条件。同时,在裂隙内表面施加2.0 MPa的均匀张拉应力,以模拟裂隙水

压力作用。在轴压和裂隙水压加载条件下,模拟分析3维裂隙的起裂扩展模式和断裂特征。

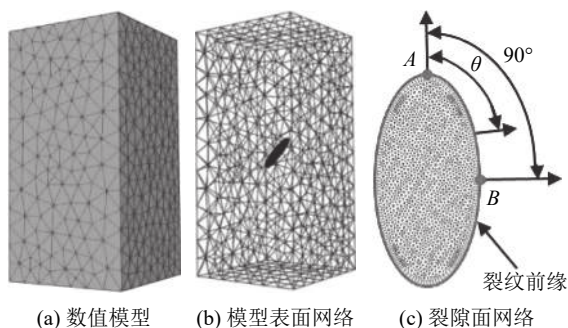


图3 数值模型及网格划分

Fig. 3 Numerical model and mesh generation

1.3 断裂准则适用性分析

断裂准则的选择对于数值模拟的可靠性至关重要。为确定不同断裂准则的适用性,选择3种典型复合断裂准则分别模拟裂隙的起裂扩展模式,包括周向拉应力准则、最大剪应力准则和能量释放率准则。通过对照试验结果,明确了适用的断裂准则,为后续计算分析奠定了基础。

图4为基于不同断裂准则模拟获得的3维裂隙起裂扩展模式,虚线表征初始裂隙面的前缘。分析认为:采用周向拉应力准则时,在原裂隙面前缘的上半部和下半部分别产生对称的半环状翼裂纹,沿上、下方向扩展,导致在裂隙短轴端点处形成空间扭结区,不同位置的翼裂纹扩展长度接近,与试验结果(图2)差异较大;应用最大剪应力准则时,裂隙呈现沿原裂隙平面的起裂扩展模式,无法表征翼裂纹的空间扩展,与实际情况明显不符;基于能量释放率准则模拟时,裂隙长轴上下尖端分别形成对称的包裹状翼裂纹,短轴端点处出现少量平面内扩展,翼裂纹的扩展长度沿裂隙前缘呈现不均衡性,自长轴端点到短轴端点,翼裂纹扩展长度逐渐减小,与试验现象基本吻合。综合分析认为,能量释放率准则对于水力耦合作用下3维裂隙起裂扩展的模拟具有较好的适用性。

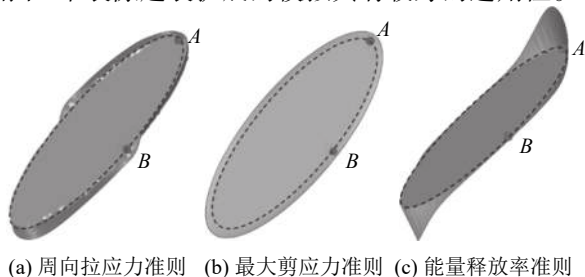


图4 基于不同断裂准则模拟获得的3维裂隙起裂扩展模式(以45°倾角为例)

Fig. 4 Initiation and propagation modes of 3-D crack simulated by using different fracture criteria (e.g., dig angle is 45°)

1.4 3维裂隙起裂扩展参数优化

能量释放率准则综合考虑了Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ型基本断裂模式对3维裂隙空间起裂扩展的作用。在平面应变条件下,裂隙前缘的能量释放率(energy release rate, ERR)表示为^[19]:

$$ERR = \frac{1-\nu^2}{E} (K_I^2 + K_{II}^2) + \frac{1+\nu}{E} K_{III}^2 \quad (1)$$

式中, E 和 ν 分别为材料的弹性模量和泊松比, K_I 、 K_{II} 、 K_{III} 分别为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ型应力强度因子。

该准则认为裂隙沿能量释放率最大的方向起裂。考虑到3种基本断裂模式对3维裂隙空间扩展的贡献程度不同,在数值模拟中通过权重系数对3类应力强度因子进行调整,并基于式(2)判断裂隙前缘的起裂角^[17]:

$$G = (\gamma_I K_I)^2 + (\gamma_{II} K_{II})^2 + (\gamma_{III} K_{III})^2 \quad (2)$$

式中, γ_I 、 γ_{II} 和 γ_{III} 分别为Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ型应力强度因子对应的权重系数, G 达到最大值的方向角即为裂隙的起裂角。

另一方面,裂隙前缘任意点*i*的扩展长度 Δl_i 由等效应力强度因子确定^[17]:

$$\Delta l_i = \Delta l_m (K_i^e / K_m^e)^n \quad (3)$$

式中: K_i^e 为裂隙前缘*i*点处的等效应力强度因子; K_m^e 为裂隙前缘等效应力强度因子中值; Δl_m 为 K_m^e 对应的扩展长度,为保证计算条件的一致性,统一将单步中值扩展长度 Δl_m 设为0.6 mm(即裂隙短半轴长度的1/10); n 为指数,本文取2。

式(3)中,裂隙前缘任意点*i*的等效应力强度因子 K_i^e 可表示为^[17]:

$$K_i^e = \sqrt{(\gamma_I K_I)^2 + (\gamma_{II} K_{II})^2 + (\gamma_{III} K_{III})^2} \quad (4)$$

综合考虑Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ型应力强度因子的贡献权重,获得调整后的能量释放率为:

$$ERR' = \frac{1-\nu^2}{E} \left[(\gamma_I K_I)^2 + (\gamma_{II} K_{II})^2 \right] + \frac{1+\nu}{E} (\gamma_{III} K_{III})^2 \quad (5)$$

水力耦合作用下3维裂隙的空间起裂扩展模式主要由裂隙前缘任意点的起裂角和扩展长度决定。通过FRANC3D计算获得裂隙前缘的应力强度因子后,确定其合理的权重系数,成为确保数值模拟结果准确性的关键。

3维裂隙受轴压荷载与裂隙水压力的作用,裂隙前缘张拉与剪切变形较大,撕裂变形较小,分析认为 K_I 与 K_{II} 对裂隙扩展的贡献显著, K_{III} 的贡献相对较小。对照试验结果,通过大量数值模拟研究发现:当 $\gamma_I:\gamma_{II}:\gamma_{III}=1.0:1.0:0.1$ 时,数值模拟获得的3维裂隙起

裂扩展模式，特别在起裂角与扩展形态方面，与试验结果吻合程度较高。

表2为基于参数优化的能量释放率准则模拟获得的裂隙起裂角与扩展长度。对于椭圆裂隙，其长、短轴端点的扩展特征控制着其总体扩展模式，因此通过裂隙长、短轴端点处的起裂角和扩展长度之比定量评价试验与数值模拟结果之间的差别。当裂隙倾角分别为30°、45°和60°时，模拟预测的裂隙长轴端点起裂角分别为67.68°、67.24°和65.83°，短轴端点起裂角均为0°，与试验结果的平均误差约为1.3%。数值模拟获得的裂隙长短轴扩展长度之比 $\Delta l_B/\Delta l_A$ 分别为0.088、0.055和0.054，与试验值的平均误差约为6.7%，进一步证明了数值模拟的准确性和可靠性。数值模拟结果与试验结果仍存在微小误差，推测主要是由材料非均质性、试件加工及数值计算精度等因素导致的。

表 2 基于能量释放率准则模拟的裂隙起裂角和扩展长度
Tab. 2 Angles and lengths of 3-D crack propagation simulated by using the energy release rate criterion

裂隙倾角/(°)	起裂角 $\alpha/(^{\circ})$		扩展长度 $\Delta l/\text{mm}$		$\Delta l_B/\Delta l_A^{-1}$
	α_A	α_B	Δl_A	Δl_B	
30	67.68	0.00	2.15	0.19	0.088
45	67.24	0.00	2.36	0.13	0.055
60	65.83	0.00	2.40	0.13	0.054

由此可见，采用能量释放率准则，且选取合理的应力强度因子权重系数时，可获得准确度较高的3维裂隙起裂扩展模式。需要说明的是，权重系数基于试验结果确定，对于不同边界条件、裂隙形状及空间分布，需根据实际情况进行验证与判断。

2 水压对裂隙起裂扩展模式的影响

裂隙水压力对裂隙扩展和岩体破裂具有明显促进作用。为深入研究水压对3维裂隙起裂扩展模式的影响，选取45°倾角裂隙为研究对象，在保持轴向荷载($\sigma=30\text{ MPa}$)恒定的条件下，将裂隙水压力 p_w 分别设置为0(无水压)、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 MPa，分析应力强度因子与能量释放率两个关键断裂参数在裂隙前缘的分布规律，调查裂隙前缘应力分布、裂隙起裂角与扩展速率的变化特征，研究不同水压条件下3维裂隙的起裂扩展模式。

2.1 水压对断裂参数分布的影响

图5为不同水压条件下裂隙前缘 I、II、III 型应力强度因子与能量释放率的分布曲线，横坐标为裂隙前缘位置角 θ (图3)，其范围 $0^{\circ}\leq\theta\leq90^{\circ}$ 对应裂隙长轴上端点到短轴右端点的1/4周长。

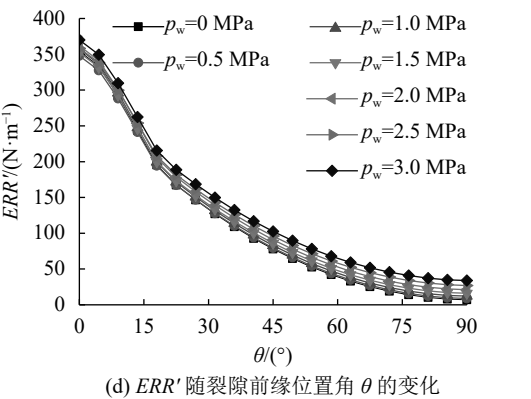
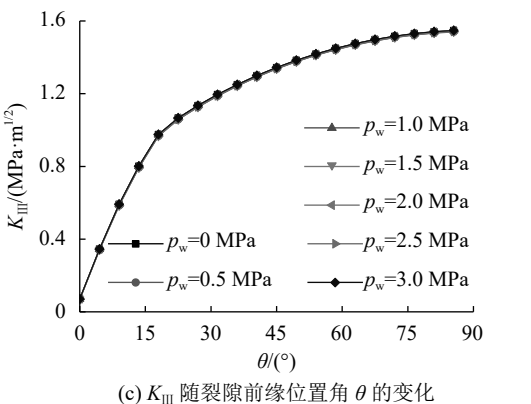
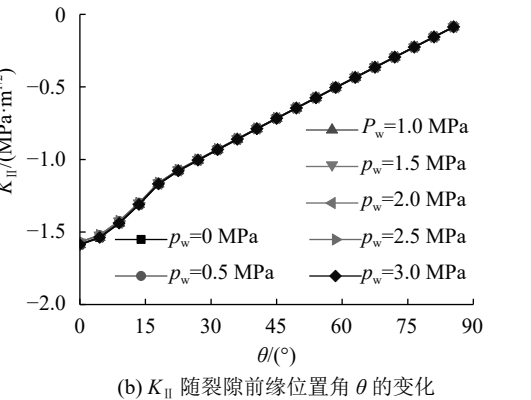
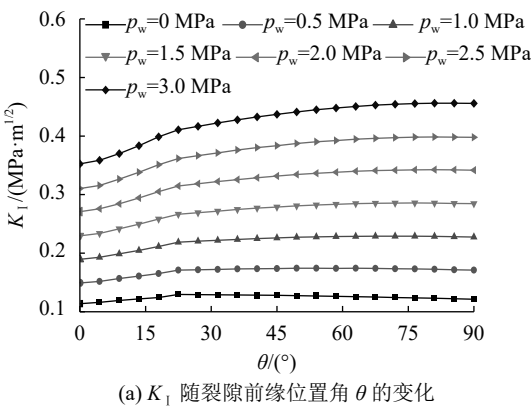


图 5 不同水压下裂隙前缘应力强度因子与能量释放率分布
Fig. 5 Distribution of stress intensity factors and energy release rates along the crack front with different water pressures

由图5(a)可知, 裂隙前缘的 K_I 值受位置角与裂隙水压力的影响显著。当裂隙水压力为0时(无水情况), 在轴压荷载作用下, K_I 随位置角增大呈现先增后减趋势, 其最大值出现在 $\theta=20^\circ$ 附近, 为张拉断裂的优势位置。随着水压增大, K_I 最大值逐渐向较大的位置角处转移。当水压升至1.5 MPa后, K_I 随位置角增大而持续增大, 最大值均出现在 $\theta=90^\circ$ 处, 说明当水压增大至临界值后, 裂隙短轴端点处为 I 型张拉断裂的优势位置。此外, 随着水压升高, 裂隙前缘任意位置处 K_I 均明显增大, 表明裂隙内部水压力加剧了裂隙面的张开趋势, 极大地促进了 I 型张拉断裂的发生。由图5(b)可知, 裂隙前缘的 K_{II} 值随着位置角增大呈近似线性变化趋势。在长轴端点($\theta=0^\circ$)处, K_{II} 绝对值最大, II 型滑移断裂最易发生; 在短轴端点处($\theta=90^\circ$), K_{II} 为0, 不发生滑移型断裂。此外, 不同水压下的 K_{II} 曲线几乎重合, 说明水压改变对裂隙前缘的滑移断裂几乎无影响。由图5(c)可知, 裂隙前缘的 K_{III} 值随位置角的增大而持续增大, 其最小值($K_{III}=0$)出现在裂隙长轴端点处($\theta=0^\circ$), 最大值位于短轴端点处($\theta=90^\circ$), 表明该处撕裂型断裂最易发生, 导致裂隙发生沿原裂隙面的侧向扩展。类似地, 裂隙水压力改变对 K_{III} 几乎无影响。

综合分析应力强度因子分布规律可知, 在轴压荷载与裂隙水压力作用下, 3维椭圆裂隙呈高度复杂的复合型断裂模式。在裂隙长轴端点处发生 I - II (张拉-滑移)型复合断裂($K_{III}=0, K_I, K_{II} \neq 0$), 导致裂隙扩展方向与原裂隙面成一定夹角, 最终形成包裹状翼裂纹。由此可推测, 试验观测的翼裂纹为 I - II 复合型裂纹, 非传统认为的纯张拉裂纹。在裂隙短轴端点处发生 I - III (张拉-撕裂)型复合断裂($K_{II}=0, K_I, K_{III} \neq 0$), 使该处发生沿原裂隙面的平面扩展。除长短轴端点外, 裂隙前缘其他位置均发生 I - II - III 复合型断裂, 最终导致整个裂隙扩展成为空间扭曲面。此外, 水压力对裂隙起裂扩展的积极作用主要体现在促进了 I 型张拉断裂的发生。

应力强度因子反映了裂隙前缘 3 类基本断裂模式的发生状态, 能量释放率是其综合体现, 其分布规律控制着3维裂隙的空间起裂扩展模式。图5(d)为能量释放率沿裂隙前缘的分布曲线(由式(5)获得)。分析可知, 自裂隙长轴端点至短轴端点的1/4周长范围内, 能量释放率逐渐减小, 其最大值位于长轴端点处, 表明该处裂隙首先起裂并优先扩展。在位置角 $0^\circ<\theta<20^\circ$ 范围内, 能量释放率数值较大, 表明裂隙长轴端点附近的一定区域内裂隙扩展显著, 这与试验观察的翼裂纹扩展现象吻合较好。在短轴端点处, 能量释放率较小, 说明裂隙起裂扩展程度弱, 与试验中短轴端点的平面内扩展情况相吻合。此外, 随水压增

大, 裂隙前缘的能量释放率持续增大, 表明水压能够有效驱动裂隙的起裂扩展, 且受 K_I 变化影响, 水压升高对裂隙短轴端点处起裂的作用更为显著。

2.2 水压对裂隙前缘应力分布特征的影响

裂隙前缘应力分布特征是表征裂隙效应的关键指标, 而最大主应力分布在很大程度上反映了裂隙前缘应力集中程度及其对裂隙起裂扩展的影响。

表3为不同水压作用下裂隙长轴、短轴端点的最大主应力(压应力为正, 拉应力为负)。当无裂隙水压力作用时($p_w=0$ MPa), 轴压荷载使裂隙面闭合, 上、下裂隙面接触并发生挤压和错动, 导致前缘产生较大程度的应力集中。其中, 长轴端点处应力集中系数(最大主应力与轴压应力之比)为3.763, 短轴端点处达4.595。当存在裂隙水压力作用时, 水压促使裂隙张开, 上、下裂隙面之间的相互作用减弱, 导致裂隙前缘应力集中程度降低。同时, 裂隙长轴和短轴端点处的最大主应力由压应力转为拉应力。由于岩石等脆性材料具有较低的抗拉强度, 裂隙水压力的存在极大促进了张拉断裂发生, 增大了岩体失稳破裂风险。

表 3 不同水压条件下裂隙前缘关键位置的最大主应力
Tab. 3 Maximum principal stresses at key positions of crack front under different water pressures

水压 p_w /MPa	最大主应力 $\sigma_{\max}$ /MPa	
	A点	B点
0	112.89	137.85
0.5	-2.90	-4.97
1.0	-6.07	-9.80
1.5	-9.24	-14.62
2.0	-12.01	-19.44
2.5	-15.57	-24.26
3.0	-18.74	-29.08

图6为裂隙前缘长轴与短轴端点处的最大主应力随水压的变化趋势。

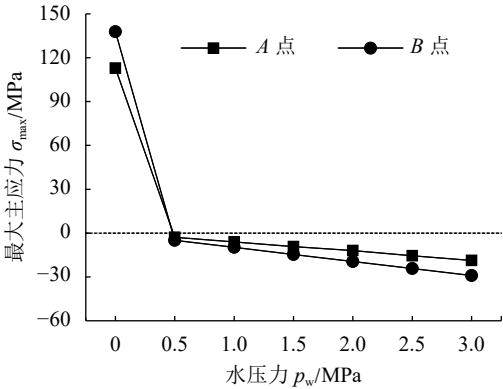


图 6 裂隙前缘关键位置的最大主应力随水压的变化
Fig. 6 Variation of maximum principal stresses at key positions of crack front with the water pressure

由图6可知,水压的增大显著提升了裂隙前缘的拉应力水平。此外,在水压作用下,短轴端点处拉应力增大程度较长轴端点处更为明显,这与 K_I 的变化趋势相吻合,说明水压增大对短轴端点处张拉断裂的促进作用更为显著。

2.3 水压对裂隙起裂扩展特征的影响

裂隙水压力是控制裂隙前缘应力状态和断裂参数分布的关键因素之一,从而对裂隙的起裂扩展模式产生直接影响。裂隙前缘的起裂角和扩展速率是反映裂隙空间起裂扩展模式的重要指标,其随裂隙水压力的变化趋势如表4和图7所示。

表 4 不同水压条件下的裂隙起裂角与扩展长度
Tab. 4 Initiation angle and propagation length of crack under different water pressures

水压力 p_w /MPa	起裂角 $\alpha/(^{\circ})$		扩展长度 Δl /mm	
	A点	B点	A点	B点
0	69.09	0.00	2.71	0.04
0.5	68.68	0.00	2.65	0.06
1.0	68.20	0.00	2.57	0.08
1.5	67.72	0.00	2.47	0.10
2.0	67.24	0.00	2.36	0.13
2.5	66.76	0.00	2.25	0.16
3.0	66.29	0.00	2.13	0.19

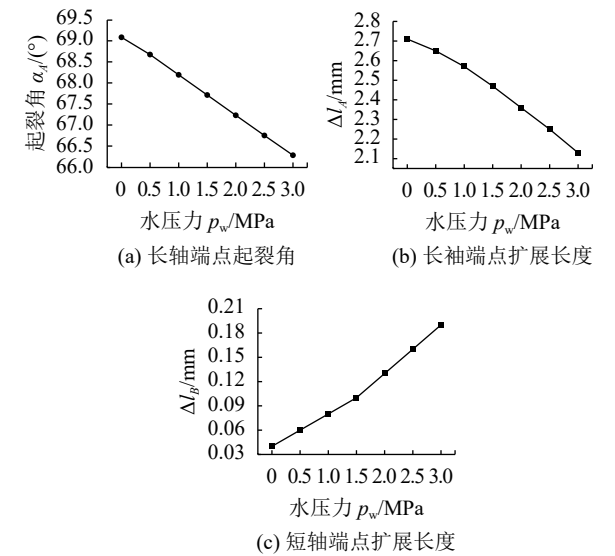


图 7 水压对裂隙起裂扩展特征的影响
Fig. 7 Effects of water pressure on the crack initiation and propagation characteristics

由图7(a)可知,长轴端点A处的起裂角 α_A 随水压增大而持续减小。分析认为,由于A点发生张拉-滑移型复合断裂,水压提升使该点 K_I 值增大,对 K_{II} 值几乎无影响,因此水压升高增大了张拉断裂在复合型断裂中的比例,使得翼裂纹扩展偏向于原裂隙面方向,导致起裂角降低。在短轴端点处发生张拉-撕裂型复合断裂,裂隙起裂和扩展沿原裂隙平面方向,水压增

大虽促进了该处的张拉断裂,但不改变起裂角 α_B ,其值保持为 0° 。分析图7(b)、(c)可知,随着裂隙水压力增大,裂隙长轴和短轴端点处的扩展长度均有明显变化,表现为长轴端点的扩展长度减小,短轴端点呈现一定的增大趋势。分析认为,随水压增大,B点处的拉应力增幅显著,A点处增幅较小,因此水压对B点处扩展的促进作用更大,导致B点扩展速率提升,A点扩展速率有所减缓。

综合分析裂隙空间起裂扩展特征可知,裂隙水压力可显著降低翼裂纹的偏转角度,并促使裂隙前缘各处的扩展速率逐渐趋近,进而改变裂隙的空间扩展演化模式,最终导致岩体破裂。

3 侧压对裂隙起裂扩展模式的影响

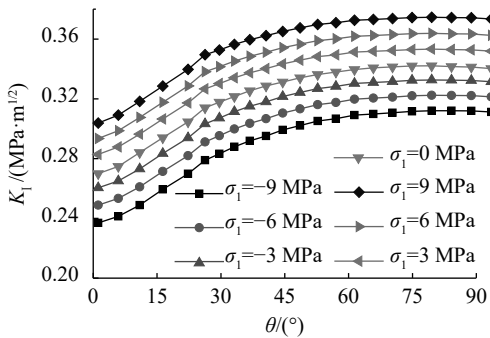
岩体的受力状态对其破裂行为具有显著影响。与单轴压缩相比,隧道、边坡等工程中常见的双向受力状态使岩体裂隙的空间扩展模式更加复杂^[7,9]。为研究侧压对裂隙起裂扩展模式的影响,选取 45° 倾角裂隙为研究对象,在保持轴压荷载($\sigma=30$ MPa)恒定的条件下,在模型左、右两侧施加侧压 σ_1 ,大小分别为-9、-6、-3、0、3、6、9 MPa(压应力为正,拉应力为负),分析断裂参数的分布规律,调查裂隙起裂角与扩展长度的变化特征,研究不同外部加载条件下3维裂隙的起裂扩展模式。

3.1 侧压对断裂参数分布的影响

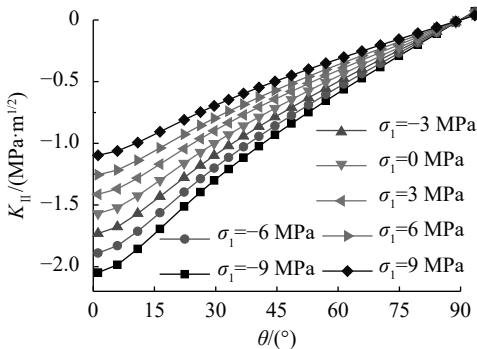
图8为当裂隙水压力保持恒定($p_w=2.0$ MPa)时,不同侧压条件下裂隙前缘 I、II、III 型应力强度因子与能量释放率的分布曲线。由图8(a)可知,侧压对裂隙前缘的 K_I 分布影响显著。在裂隙前缘 0° 到 90° 范围内, K_I 值持续增大,最大值均出现在 $\theta=90^{\circ}$ 处,即不同侧压条件下裂隙短轴端点始终为张拉型断裂的优势位置。此外,侧向拉压应力对 K_I 的作用机制不同。当 σ_1 为拉应力时($\sigma_1<0$), K_I 随拉应力绝对值增大而减小,表明侧向拉应力对 I 型张拉断裂起抑制作用;当 σ_1 为压应力时($\sigma_1>0$), K_I 随压应力增大而增大,说明侧向压应力对 I 型张拉断裂起促进作用。分析图8(b)可知,在裂隙前缘 0° 到 90° 范围内, K_{II} 绝对值持续减小。其中,长轴端点处 K_{II} 绝对值最大,短轴端点处其值始终为0,说明双向受力状态下短轴端点仍不发生 II 型滑移断裂。此外, K_{II} 绝对值随侧向拉应力增大而增大,随侧向压应力增大而减小,表明侧向压应力可显著抑制裂隙前缘尤其是长轴端点附近的滑移断裂。

如图8(c)所示,在裂隙前缘 0° 到 90° 范围内, K_{III} 值逐渐增大。其中,短轴端点处 K_{III} 值最大,长轴端点处为0,说明双向受力状态下长轴端点仍不发生

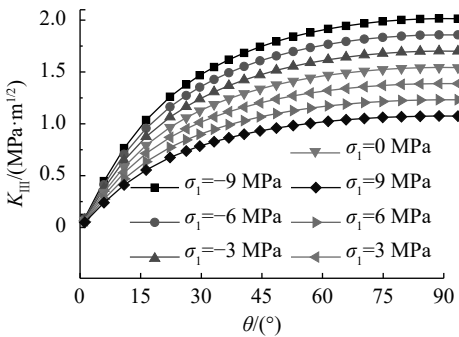
Ⅲ型撕裂断裂。类似地, $K_{\text{Ⅲ}}$ 值随侧向拉应力增大而增大, 随侧向压应力增大而减小, 表明侧向压应力可显著抑制裂隙前缘尤其是短轴端点附近的撕裂断裂。



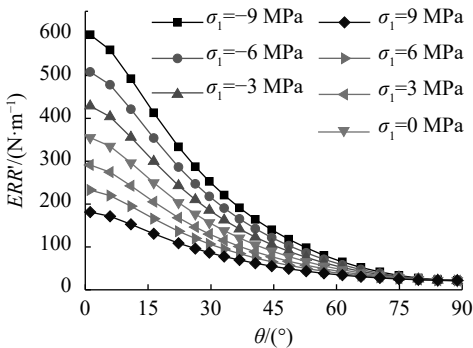
(a) K_I 随裂隙前缘位置角 θ 的变化



(b) $K_{\text{Ⅱ}}$ 随裂隙前缘位置角 θ 的变化



(c) $K_{\text{Ⅲ}}$ 随裂隙前缘位置角 θ 的变化



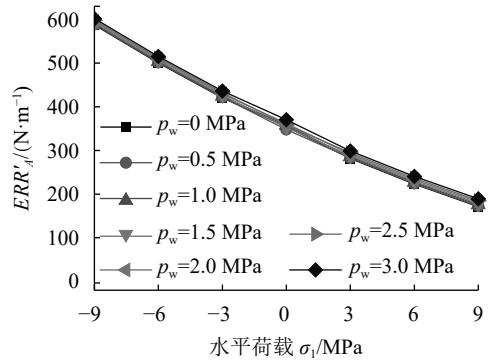
(d) ERR' 随裂隙前缘位置角 θ 的变化

综合分析 I、Ⅱ、Ⅲ型应力强度因子在裂隙前缘的分布规律及变化趋势可知, 侧向压应力促进张拉型断裂, 抑制滑移与撕裂型断裂; 侧向拉应力对基本断裂模式具有相反作用。研究同时表明, 侧压对能量释放率影响显著, 进而改变裂隙的空间起裂扩展特征。

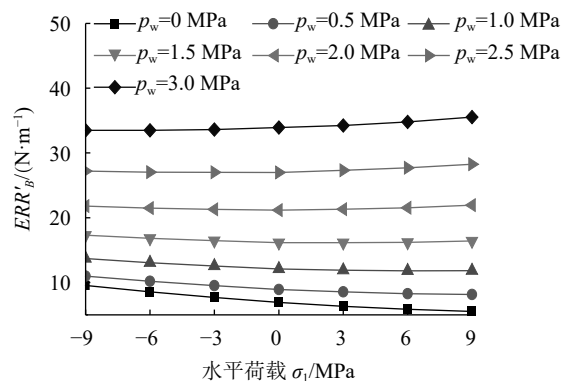
图8(d)为裂隙前缘能量释放率的分布曲线, 为 I、Ⅱ、Ⅲ型基本断裂发生趋势的综合表征, 控制着裂隙的宏观起裂扩展模式。在裂隙前缘 0° 到 90° 范围内, 能量释放率逐渐减小, 其最大值出现在长轴端点处, 表明双向加载作用下, 裂隙长轴端点为优先起裂位置。在短轴端点处, 能量释放率较小, 说明裂隙起裂扩展程度较弱。此外, 随侧压的改变, 短轴端点处的能量释放率无明显变化, 其余位置随侧压数值增大而持续减小, 表明侧向压应力对裂隙起裂扩展有显著的抑制作用, 侧向拉应力起促进作用, 由此可认为双向受压状态下的裂隙岩体较单轴加载时更为安全, 拉压共同作用时则更易破裂。

裂隙的长轴和短轴端点是控制裂隙前缘能量释放率整体分布规律的关键位置。

图9为不同水压与侧压条件下裂隙长、短轴端点处能量释放率的变化趋势。



(a) 长轴端点处的能量释放率变化



(b) 短轴端点处的能量释放率变化

图 8 不同侧压下裂隙前缘应力强度因子与能量释放率分布
Fig. 8 Distribution of stress intensity factors and energy release rates along the crack front with different lateral stresses

图 9 水压与侧压对裂隙长短轴端点处能量释放率的影响
Fig. 9 Effects of water pressure and lateral stress on the energy release rates at end points of crack long and short axes

由图9分析可知,长轴端点能量释放率受侧压影响显著,随侧压增大近似线性减小,且不同水压作用下其变化不大,表明在长轴端点处,能量释放率对侧压作用更为敏感。在短轴端点处,当水压较小时,能量释放率随侧压增大呈现一定的减小趋势;当水压力升至2.0 MPa后,短轴端点处能量释放率受侧压影响较弱。同时,随水压增大,短轴端点的能量释放率显著增大,表明短轴端点处的能量释放率对水压作用更为敏感。综合认为,水压与侧压对裂隙前缘不同位置的的能量释放率产生不同影响,加剧了裂隙起裂及扩展演化形态的复杂性。

3.2 侧压对裂隙起裂扩展特征的影响

侧压改变了裂隙前缘应力强度因子与能量释放率的分布,进而影响裂隙的起裂扩展特征。图10为双向加载条件下,不同侧压对应的裂隙长、短轴端点起裂角及扩展长度变化规律。

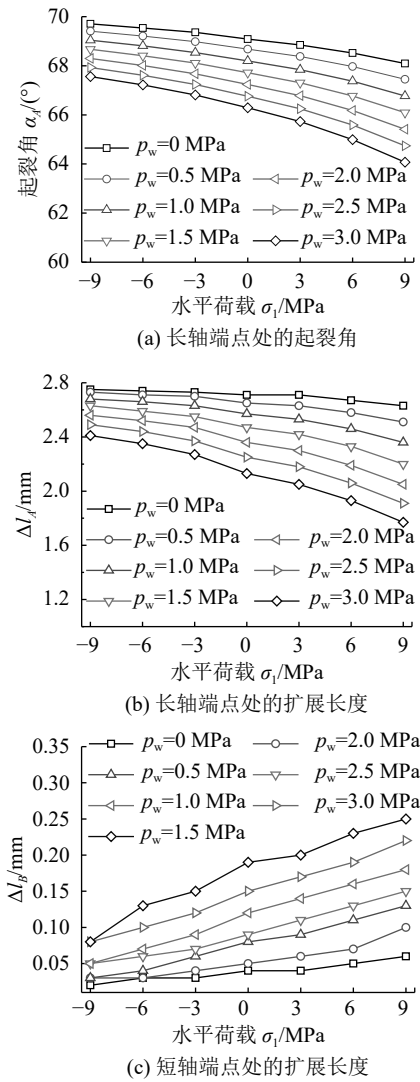


图 10 水压和侧压对裂隙起裂扩展特征的影响

Fig. 10 Effects of water pressure and lateral stress on the crack initiation and propagation characteristics

由图10(a)、(b)可知,长轴端点处的起裂角及扩展长度均随侧压增大而持续减小,且水压越大,减小趋势越明显。通过分析可认为,长轴端点发生 I - II (张拉-滑移)型复合断裂,侧压和水压的提升均促进该处张拉断裂的发生,且侧压可显著抑制滑移断裂,因此二者同时作用可有效增大张拉断裂在复合型断裂中的比例,使得翼裂纹的扩展倾向原裂隙面方向,导致起裂角减小。另外,由于侧压很大程度上抑制了长轴端点处的滑移型断裂,导致翼裂纹扩展程度有所降低。

由图10(c)可知,短轴端点处扩展长度随侧压增大而增大,且水压越大,增大趋势越明显。分析可知,短轴端点处发生 I - III (张拉-撕裂)型复合断裂,水压与侧压均可有效促进张拉型断裂的发生,且当裂隙水压存在时,侧压增大使该处的能量释放率呈现增大趋势,导致其扩展程度随之增大。

综合认为,侧压与水压同时作用可更大程度地减小翼裂纹偏转角度,抑制翼裂纹扩展,并使裂隙前缘各处扩展速率趋于均衡,进而影响3维裂隙空间起裂扩展特征,导致裂隙岩体破裂模式的改变。

4 结 论

1) 基于3维断裂分析软件FRANC3D建立了水力耦合岩体破裂数值模型,通过开展室内试验,验证了模型的可靠性,并对能量释放率准则进行了适用性评价及参数优化,综合考虑张拉、滑移及撕裂型断裂对裂隙起裂扩展的贡献程度,获得了与实际情况吻合较好的模拟结果。

2) 裂隙水压对裂隙前缘断裂参数的分布具有显著影响。 K_I 随水压增大而增大, K_{II} 与 K_{III} 受水压影响很小,表明水压促进了 I 型张拉断裂的发生;能量释放率在裂隙前缘1/4范围内持续减小,且随水压增大而增大,长轴端点为裂隙空间扩展的优势起裂位置。

3) 翼裂纹的形成成为张拉-滑移型复合断裂。裂隙扩展均从长轴端点开始,以较大角度起裂,逐渐延伸到短轴并形成包裹状翼裂纹。水压使裂隙前缘翼裂纹的扩展角度减小,长、端轴扩展速率趋于均衡,从而促进了裂隙前缘整体的空间扩展。

4) 双向加载条件下,侧向压应力可促进张拉断裂,抑制滑移与撕裂断裂,拉应力具有相反的作用;侧向压应力的增大使裂隙长轴端点的起裂角与扩展长度明显减小,短轴扩展长度呈一定的增大趋势。总体认为,侧向压应力可抑制翼裂纹的扩展,使裂隙岩体更加安全。

参考文献:

[1] Zhao Yu,Lu Yiyu,Huang Cheng,et al.Analysis of solid-flu-

- id coupling for tunnel excavation in complicated fractured rock masses[J]. *Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering*, 2010, 32(2): 35–39. [赵瑜, 卢义玉, 黄诚, 等. 隧道开挖过程中复杂裂隙围岩的固流耦合分析[J]. *土木建筑与环境工程*, 2010, 32(2): 35–39.]
- [2] Xu Dongdong, Wu Aiqing, Sun Yujie. Simulation of sudden blow in diversion tunnel of some hydropower station[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2010, 27(8): 44–49. [徐栋栋, 邬爱清, 孙玉杰. 某水电站引水隧洞突水数值模拟[J]. *长江科学院院报*, 2010, 27(8): 44–49.]
- [3] Fu Jinwei, Zhu Weishen, Cao Guanhua, et al. Experimental study and numerical simulation of propagation and coalescence process of a single three-dimensional flaw in rocks[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(3): 411–417. [付金伟, 朱维申, 曹冠华, 等. 岩石中3维单裂隙扩展过程的试验研究和数值模拟[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(3): 411–417.]
- [4] Cao Chenxi, Wang Xiangdong, Wu Jing. Relationship between stress intensity factor and strain energy release rate of I - II - III mixed mode cracks[J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2016, 33(4): 10–13. [曹晨曦, 王向东, 吴京. I - II - III复合型裂缝应力强度因子与能量释放率的关系[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2016, 33(4): 10–13.]
- [5] Dyskin A V, Germanovich L N, Ustinov K B. A 3-D model of wing crack growth and interaction[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1999, 63(1): 81–110.
- [6] Yang L, Jiang Y J, Li S C, et al. Experimental and numerical research on 3D crack growth in rocklike material subjected to uniaxial tension[J]. *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, 2013, 139(10): 1781–1788.
- [7] Sahouryeh E, Dyskin A V, Germanovich L N. Crack growth under biaxial compression[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2002, 69(18): 2187–2198.
- [8] Zhao Y L, Cao P, Wen Y D, et al. Damage fracture failure mechanism of compressive-shear rock cracks under seepage pressure[J]. *Journal of Central South University*, 2008, 39(4): 838–844.
- [9] Zhao Yanlin, Cao Ping, Ma Wenhao, et al. Coupling model of seepage-splitting-damage of rock mass fractures and its application[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2017, 48(3): 794–803. [赵延林, 曹平, 马文豪, 等. 岩体裂隙渗流-劈裂-损伤耦合模型及应用[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(3): 794–803.]
- [10] Zheng Shaohe. Research on coupling theory between seepage and damage of fractured rock mass and its application to engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(3): 422–193. [郑少河. 裂隙岩体渗流场-损伤场耦合理论研究和工程应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(3): 422–193.]
- [11] Zhou Z H, Cao P, Ye Z Y. Crack propagation mechanism of compression-shear rock under static-dynamic loading and seepage water pressure[J]. *Journal Central South University of Technology*, 2014, 21(4): 1565–1570.
- [12] Zhou L, Hou M Z. A new numerical 3D-model for simulation of hydraulic fracturing in consideration of hydro-mechanical coupling effects[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2013, 60(2): 370–380.
- [13] Wang C, Zhang Q Y. Study of the crack propagation model under seepage-stress coupling based on XFEM[J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 2017, 35(5): 2433–2444.
- [14] Fu Jinwei, Zhu Weishen, Zhang Xinzong, et al. Fracturing experiment and numerical simulation study on new material containing a hollow internal crack under internal water pressure[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2017, 49(4): 78–85. [付金伟, 朱维申, 张新中, 等. 内水压下含中空裂隙新型材料的压裂试验及数值模拟研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2017, 49(4): 78–85.]
- [15] Fu J W, Zhang X Z, Zhu W S, et al. Simulating progressive failure in brittle jointed rock masses using a modified elastic-brittle model and the application[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, 178: 212–230.
- [16] Pu Chengzhi, Cao Ping, Zhang Chunyang, et al. Fracture failure mechanism of rock with closed crack and judging criterion of seepage pressure under biaxial compression[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(1): 56–60. [蒲成志, 曹平, 张春阳, 等. 双向压缩条件下闭合裂隙岩体断裂破坏机制及渗透压环境判定准则[J]. *岩土力学*, 2015, 36(1): 56–60.]
- [17] FRANC3D Reference Manual. Version 7[R]. Fracture Analysis Consultants, Inc. 2016.
- [18] Li F Z, Shih C F, Needleman A. A comparison of methods for calculating energy release rates[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21(2): 405–421.
- [19] 李世愚, 和泰名, 尹祥础, 等. 岩石断裂力学导论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010.

(编辑 李轶楠)

引用格式: Yang Lei, Mei Jie, Li Shucai, et al. Research on the initiation and propagation modes of 3-D crack under hydro-mechanical coupling[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(6): 174–183. [杨磊, 梅洁, 李术才, 等. 水力耦合作用下岩体3维裂隙的起裂扩展模式研究[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(6): 174–183.]