

文章编号:1673-9469(2023)02-0057-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.02.009

## 裂隙岩体断裂破坏扩展数值模拟研究

罗沙<sup>1,2</sup>,朱珍德<sup>1,2</sup>,石崇<sup>1,2\*</sup>,陈晓<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210024;

2. 河海大学 岩土工程科学研究所,江苏 南京 210024)

**摘要:** 为进一步了解复杂裂隙断裂破坏过程,基于断裂力学理论,采用PFC2D软件对不同裂隙数量岩体进行数值试验,分析裂隙倾角、围压等因素对岩体强度及裂纹扩展的影响规律。研究表明:随着裂隙倾角增大,单裂隙峰值应力和起裂应力先减小后增大,当围压由2 MPa增加到8 MPa时,峰值应力约从120 MPa增大到160 MPa,且起裂应力随着围压增大而增大,与理论分析结果一致;双裂隙倾角为30°和45°裂隙扩展以翼型裂纹和次生斜裂纹为主,裂隙倾角为60°和90°时主要为共面次生裂纹;不同围压下,随着预制裂隙数量增多,裂隙岩体试样峰值应力逐渐减小。研究成果为进一步探索裂隙岩体失稳破坏规律提供参考。

**关键词:** 裂隙岩体;断裂力学;破坏形式;PFC2D

**中图分类号:** TU45

**文献标识码:** A

## Study on Fracture Failure Propagation of Fractured Rock Mass Based on Numerical Simulation

LUO Sha<sup>1,2</sup>, ZHU Zhende<sup>1,2</sup>, SHI Chong<sup>1,2\*</sup>, CHEN Xiao<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024, China; 2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University,

Nanjing, Jiangsu 210024, China)

**Abstract:** To further understand the fracture damage process of complex fractures, this paper uses PFC2D software to conduct numerical tests on rock masses with different number of fractures based on the fracture mechanics theory, and analyses the influence of fracture dip angle, surrounding pressure and other factors on the strength and fracture expansion of rock masses. The study shows that the peak stress and initiation stress of single fracture decrease and then increase as the fracture inclination angle increases, and the peak stress increases from 120 MPa to 160 MPa when the surrounding pressure increases from 2 MPa to 8 MPa. In cases of 60° and 90°, the fracture inclination is mainly coplanar secondary fractures, and the peak stress of multiple fractures decreases significantly with the increase of the number of prefabricated fractures at different surrounding pressures. The research results can provide reference for further exploration of the destabilization damage law of fractured rock masses.

**Key words:** fractured rock masses; fracture mechanics; damage forms; PFC2D

岩体长期受地质力作用,内部往往赋存大量天然裂隙,在荷载作用下,岩体裂隙从尖端起裂,并延伸扩展直至贯通,最终导致岩体断裂破坏,许多工程岩体灾害,如深部隧洞中的岩爆,大型洞室高边墙的劈裂等,其成因均与裂隙岩体断裂破坏

过程密切相关<sup>[1-2]</sup>。因此,开展裂隙岩体断裂破坏机制研究,对评价工程岩体稳定性具有重要意义。

目前,国内外学者对裂隙岩体断裂破坏机制主要从理论分析、室内试验以及数值模拟角度进行研究,在理论方面,基于断裂力学理论分析,得

收稿日期:2022-09-30

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41831278);国家自然科学基金面上项目(51679071)

作者简介:罗沙(1997-),女,贵州铜仁人,硕士研究生,主要从事岩土力学与工程方面的研究工作。

\* 通讯作者:石崇(1978-),男,山东沂水人,博士,教授,主要从事岩土力学与工程方面的研究工作。

到单个裂隙起裂强度及翼型裂纹扩展长度解析解,发现裂隙扩展角度约为  $70.5^\circ$ <sup>[3-5]</sup>。为进一步分析不同因素下岩石强度变形特征,一些学者采用室内试验方法展开研究<sup>[6-8]</sup>,如孙冰等<sup>[9]</sup>发现单、双裂隙试样倾角在  $0^\circ$  到  $90^\circ$  之间变化时,峰值强度先减小后增大呈下凹型,倾角为  $45^\circ$  时试样峰值强度最低;刘学伟等<sup>[10]</sup>研究表明随侧向压力逐渐增大,单裂隙试样应力-应变曲线延性增强,抗压强度呈现抛物线增长趋势。周辉等<sup>[11]</sup>通过试验得到裂隙位于试件中间时峰值剪切强度和黏聚力最小,位于试件后端时峰值剪切强度和黏聚力最大;张波等<sup>[12]</sup>研究发现裂隙数量增加对含等长多裂隙试件的强度降低作用非常明显,且含单一裂隙试件破坏面为剪切裂隙,含交叉多裂隙试件破坏面以张拉裂隙为主。在数值模拟方面,颗粒流方法被广泛用于岩石破坏机理研究<sup>[13-16]</sup>,如田文岭等<sup>[17]</sup>通过对不同倾角共面双裂隙砂岩进行模拟,研究表明当围压从 0 MPa 增至 12 MPa,试样的峰值强度不断上升;Shi 等<sup>[18]</sup>采用颗粒流软件对不同倾角裂隙岩石压缩试验进行模拟,发现随着裂隙倾角增大,试样峰值应力和起裂应力先减小后增大,当裂隙间距、裂隙长度增大时,试样强度逐渐降低;姜兆华等<sup>[19]</sup>通过数值试验发现试样沿对角线方向易产生破坏面,且裂隙倾角为  $45^\circ$  时产生微裂纹数目最多;范祥等<sup>[20]</sup>利用颗粒流软件建立含两条断续节理数值计算模型,发现接触力易在节理的端部和岩桥处聚集,节理倾角为  $90^\circ$  时,试样岩桥均未贯通。

综合来看,目前对于多裂隙岩体的研究相对较少,且理论分析存在困难,对此本文基于断裂力学相关理论,通过颗粒离散元法,分别考虑单裂隙、双裂隙以及多裂隙岩体裂纹对扩展破坏过程的影响,探讨不同裂隙倾角、围压、裂隙数量等因素下岩体强度及变形特征,为裂隙岩体失稳灾害防治及控制提供参考。

## 1 裂纹起裂扩展机理

单裂隙岩体在压剪应力状态下的受力情况如图 1 所示,  $\sigma_1$  为最大主应力,  $\sigma_3$  为最小主应力。

则裂隙面上的法向应力和剪应力分别为:

$$\begin{cases} \sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\beta \\ \tau_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta \end{cases} \quad (1)$$

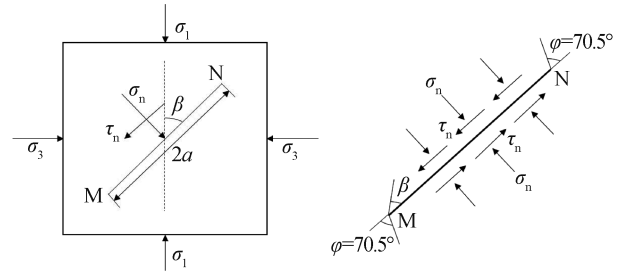


图 1 单裂隙应力状态模型

Fig. 1 Single crack stress state model

式中:  $\beta$  为裂隙倾角,由于裂隙表面存在摩擦力,作用在裂隙面的剪应力为有效剪应力。

最大周向应力准则认为:当裂纹尖端周向应力达到临界值时,裂纹尖端开始产生翼型裂纹,方向与最大周向应力的方向一致,以裂纹尖端为坐标原点,与裂纹逆时针成  $\varphi$  角的一点  $(r, \varphi)$  周向应力  $\sigma_\varphi$  为:

$$\sigma_\varphi = \frac{3}{2} \frac{(\tau_n - \mu \sigma_n) \sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \varphi \cos \frac{\varphi}{2} \quad (2)$$

式中:  $a$  为原生裂隙半长度,  $m; \mu$  为摩擦系数,  $\varphi$  为起裂角,  $(^\circ)$ 。

沿  $\varphi$  方向裂隙尖端应力强度因子  $K_I$  为<sup>[21]</sup>:

$$K_I = \frac{3}{2} (\tau_n - \mu \sigma_n) \sqrt{\pi a} \sin \varphi \cos \frac{\varphi}{2} \quad (3)$$

由于裂隙沿着  $K_I$  最大方向扩展,对周向应力  $\sigma_\varphi$  求偏导可得到  $\varphi = 70.5^\circ$ , 此时应力强度因子  $K_I$  为:

$$K_I = \frac{\sqrt{\pi a}}{\sqrt{3}} (\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta - \frac{\sqrt{\pi a}}{\sqrt{3}} \mu [(\sigma_1 + \sigma_3) - (\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta] \quad (4)$$

令  $K_I = K_{IC}$ , 得到起裂强度:

$$\sigma_{IC} = \frac{K_{IC} \sqrt{3}}{\sqrt{\pi a}} + \sigma_3 (\sin 2\beta + \mu + \mu \cos 2\beta) \quad (5)$$

式中:  $K_{IC}$  为张拉破坏断裂韧性指标。

从式(5)可以看出,影响裂隙起裂强度因素有裂隙倾角、围压、裂隙长度、摩擦系数等,根据理论分析便可得到不同因素变化规律,但多个裂隙岩体破坏机理理论分析较为复杂,没有明确的解析解,因此需要借助数值模拟分析裂隙倾角、围压等因素对多裂隙岩体强度和变形影响规律。

## 2 模型建立与验证

### 2.1 模型建立

采用二维颗粒流程序(PFC2D)建立高为 100 mm、

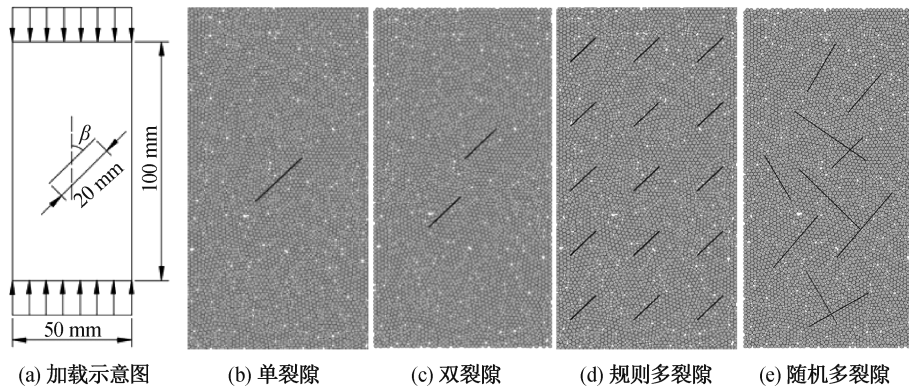


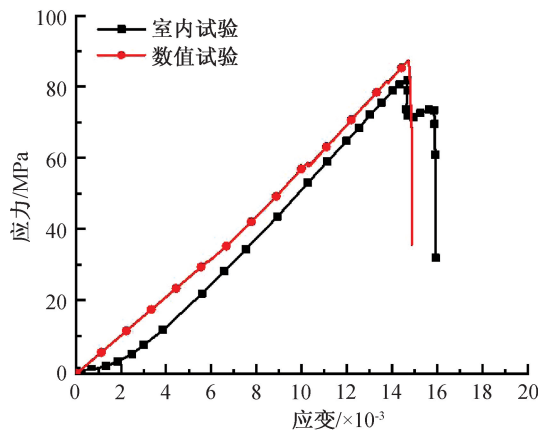
图 2 不同类型试样数值模型

Fig.2 Numerical models of different types of specimens

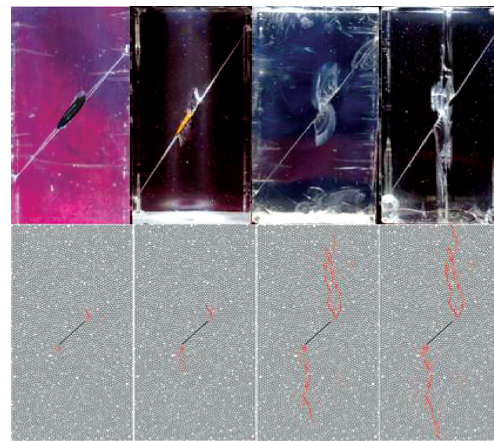
宽为 50 mm 的岩石试样数值模型,共包含 4 499 个颗粒,颗粒粒径为 0.2~0.25 mm,如图 2 所示,在单裂隙岩石中心设置长度为 20 mm、倾角为 60°的预制裂隙;对双裂隙岩石设置裂隙长度均为 15 mm 的不重叠裂隙,倾角为 45°;规则多裂隙等间距预制,裂隙长度为 10 mm,倾角为 45°,不规则多裂隙按函数随机分布,裂隙长度 10~30 mm。

### 2.2 模型验证

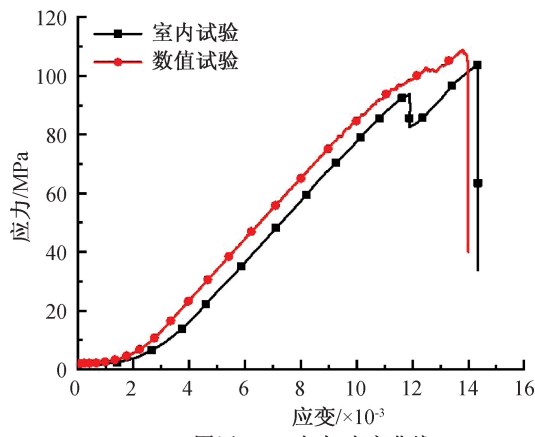
通过相似材料选取和配比,室内试验采用透明度良好、脆性与天然砂岩相接近的环氧树脂材料,试样尺寸高为 100 mm,宽为 50 mm,在模具中心预先放置云母片,生成倾角为 45°的预制裂隙,得到试验过程中岩体应力应变曲线及裂纹扩展情况如图 3 所示。为了得到合理的细观参数,采用



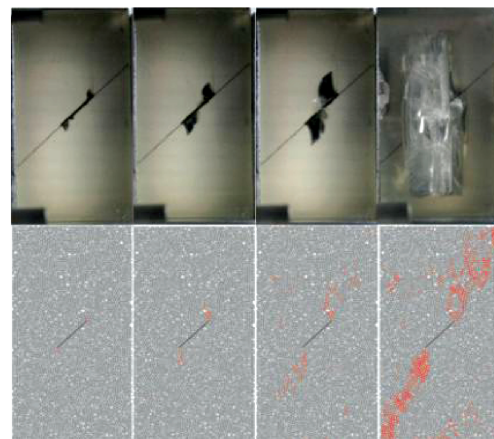
(a) 单裂隙60°应力-应变曲线



(b) 单裂隙60°裂隙演化规律



(c) 围压2 MPa应力-应变曲线



(d) 围压2 MPa裂隙演化规律

图 3 压缩试验数值模拟与室内试验对比图

Fig.3 Comparison between numerical simulation of compression test and indoor test

表 1 细观模型参数属性

Tab. 1 Properties of meso model parameters

颗粒参数	取值	平行黏结参数	取值	光滑节理裂隙参数	取值
颗粒最小半径/mm	0.2	有效模量/GPa	50	法向刚度/(GPa·m <sup>-1</sup> )	20
颗粒最大半径/mm	0.25	法向黏结强度/MPa	80	切向刚度/(GPa·m <sup>-1</sup> )	20
颗粒密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	2 500	切向黏结强度/MPa	64	摩擦系数	0.35
颗粒刚度比	1.5	刚度比	1.5	黏结内聚力/MPa	0
阻尼 N/(m·s <sup>-1</sup> )	0.1	摩擦角/(°)	40	黏结内摩擦角/(°)	0

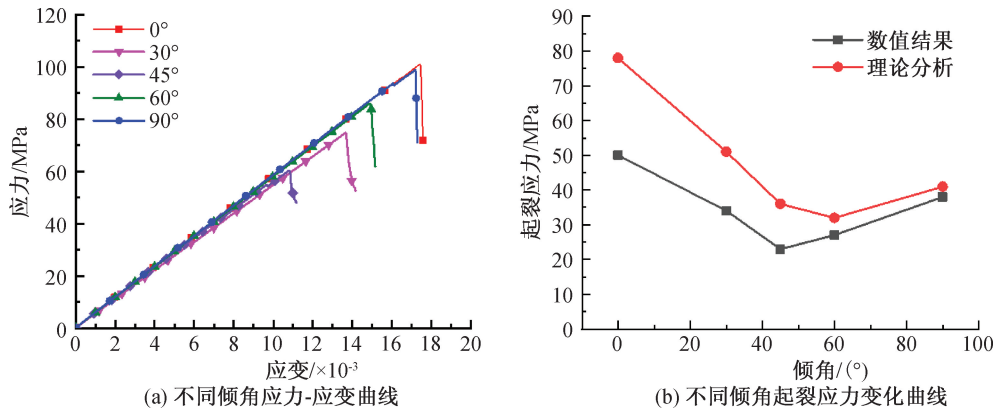


图 4 不同倾角单裂隙数值模拟结果

Fig. 4 Numerical simulation results of single fracture with different inclinations

试错法对岩石试样进行参数标定,经过反复调试,数值试验与室内试验曲线基本保持一致如图 3(a)(c),且两者裂纹扩展变化过程相吻合如图 3(b)(d),验证了细观参数的可行性。具体细观模型参数属性见表 1。

### 3 数值模拟结果分析

#### 3.1 单裂隙结果分析

预制裂隙的存在,导致裂隙端部出现应力集中,当应力超过临界值时,裂隙从端部开始起裂,随着荷载的逐渐增大,裂隙慢慢扩展直至试样彻底破坏。图 4 为不同倾角裂隙岩石应力应变曲线以及起裂应力变化曲线,从图可以看出,裂隙的存在使得岩体的峰值应力受到削弱,岩体裂隙角度不同,其峰值应力降低的幅度也不同。当裂隙的倾角为 45°时,岩体的峰值应力受到的削弱最大,降低至 60 MPa 左右,当裂隙的倾角为 30°、60°时,其峰值应力几乎相同约为 80 MPa;当裂隙倾角为 0°和 90°时,岩体的峰值应力降幅最小,峰值应力约为 100 MPa。随着裂隙倾角增大,裂隙起裂应力先减小后增大,与理论分析得到的变化趋势一致。

不同倾角裂隙扩展情况如图 5 所示,从图可以看出当预制裂隙倾角为 0°时,裂隙扩展方向近似沿着最大主应力方向扩展。预制裂隙倾角为 30°、

45°,裂隙扩展与预制裂隙呈一定夹角方向,被称为次生倾斜裂纹。预制裂隙倾角为 60°,裂纹萌发于裂隙尖端,扩展方向与裂隙走向一致,被称为次生共面裂纹。预制裂隙倾角为 90°,端部裂纹扩展很少,主要在预制裂隙两侧产生不同程度的扩展裂纹,说明 90°预制裂隙对岩体影响较小。通过单轴压缩数值模拟试验可知,试样在破坏过程中产生的裂隙主要为张拉裂隙,裂隙扩展和破坏模式随预制裂隙倾角变化而变化。

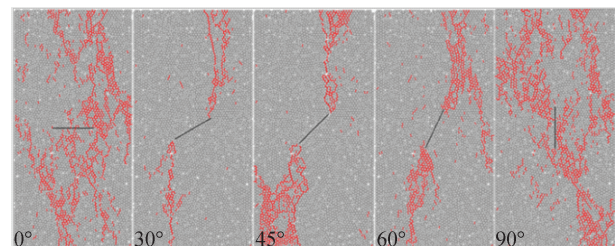


图 5 不同倾角单裂隙裂隙扩展分布

Fig. 5 Distribution of single fracture expansion at different angles

不同围压试样数值模拟结果如图 6 所示,由图可知,不同围压应力应变曲线变形特征基本一致,均表现为较少的压密段、弹性阶段和屈服段。初始阶段内部微裂纹被压密,岩样体积略微减小,随着应力不断增加,试样发生可恢复弹性变形,随后转化为弹塑性混合变形,内部裂纹不断萌生扩展,峰值强度后,岩样内部预制裂隙与新生裂纹相互

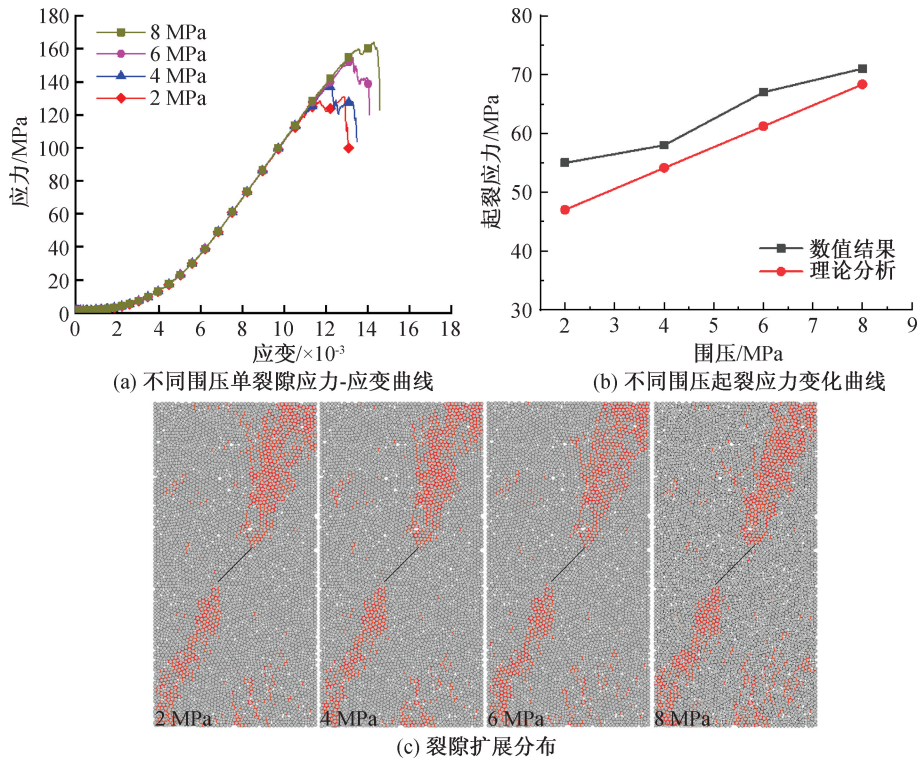


图 6 不同围压单裂隙数值模拟结果

Fig. 6 Numerical simulation results of single fracture under different confining pressures

贯通,导致试样破坏。当围压由 2 MPa 增加到 8 MPa 时,试样的峰值应力约从 120 MPa 增大到 160 MPa,起裂应力由 55 MPa 增至 71 MPa,与理论分析结果相差不大。围压主要影响试样峰后变形,对峰前弹塑性变形影响较小,随着围压增大试样峰后塑性逐渐增强。

受围压作用裂隙与颗粒之间摩擦因数提高,抑制微裂纹扩展,导致裂隙起裂扩展更困难。如图 6(c) 为不同围压下试样裂隙扩展情况,从图中可以看出,不同围压下试样沿对角线裂隙数量分布较多,易形成破坏面,裂隙起裂扩展角度约为  $70.5^\circ$ ,与理论分析结果一致。

### 3.2 双裂隙结果分析

图 7(a) 为不同倾角双裂隙试样应力应变关系曲线,裂隙倾角为  $45^\circ$  的试样峰值强度最低,强度达到峰值时应变最小为 0.012 m。裂隙倾角为  $30^\circ$  和  $60^\circ$  的试样应力应变曲线变化接近,峰值强度约为 85 MPa,裂隙倾角为  $0^\circ$  和  $90^\circ$  试样的应力应变曲线变化类似,峰值强度相差不大约为 100 MPa。

不同围压双裂隙试样应力应变曲线如图 7(b) 所示。由图可知,相比单裂隙试样,双裂隙应力应变曲线后期波动明显。当围压从 2 MPa 增至 8 MPa 时,峰值应力约从 110 MPa 逐渐增加到 140 MPa,围压较低时塑性阶段变形比高围压塑性

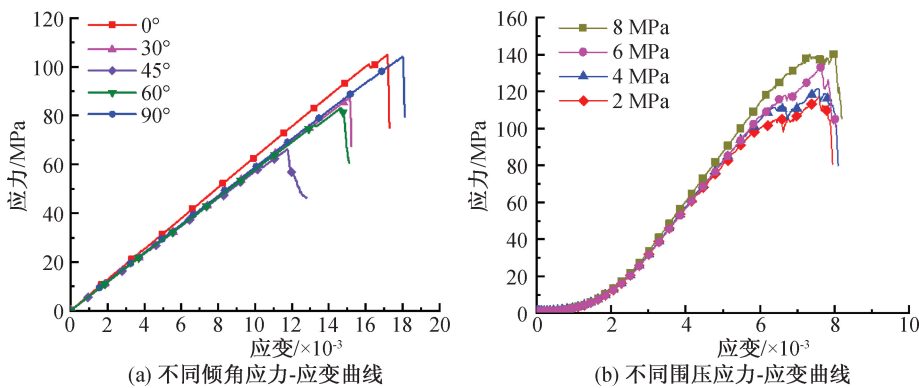


图 7 双裂隙试样数值结果

Fig. 7 Numerical results of double crack specimens

阶段要大,说明围压对微裂隙扩展起抑制作用。峰值过后,低围压状态下塑性变形小于高围压状态下塑性变形。

图8为不同倾角双裂隙试样裂隙扩展情况,0°倾角试样裂隙平行竖向主应力方向扩展;30°倾角试样裂隙扩展以翼型裂纹和次生斜裂纹为主,岩桥贯通与预制裂隙形成破坏面;45°倾角试样裂纹萌生和扩展与预制裂隙成一定夹角,裂隙之间相互连接,沿着岩桥向底部逐渐贯通;60°倾角试样裂纹沿着预制裂隙方向扩展,从中间岩桥向上下两端延伸扩展破坏;90°倾角试样在预制裂隙尖端产生共面次生裂纹,裂隙间岩桥贯通不明显。

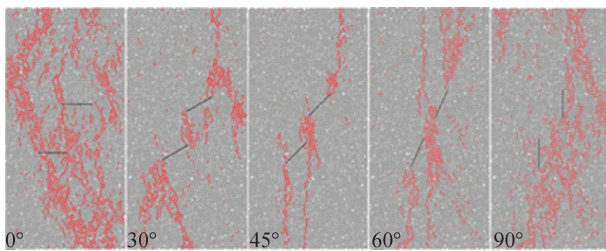


图8 不同倾角双裂隙微裂纹扩展分布  
Fig. 8 Distribution of double crack microcrack growth at different angles

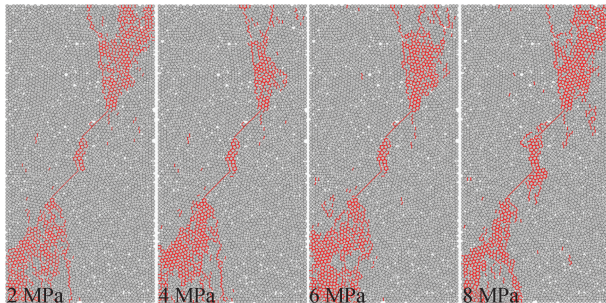
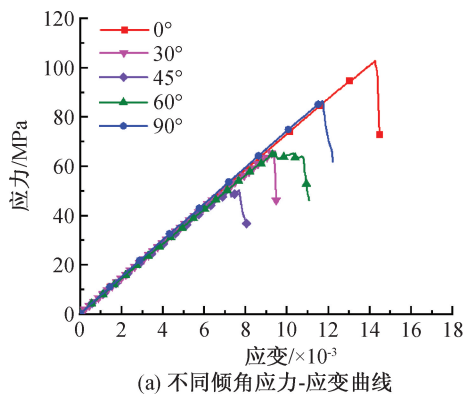
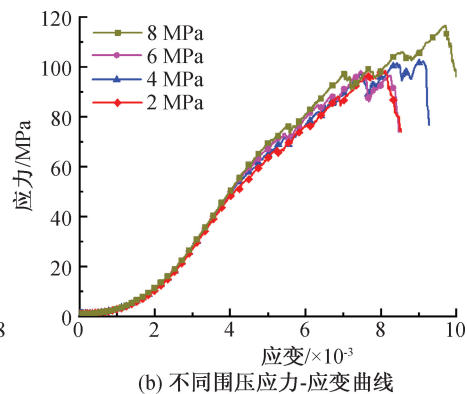


图9 不同围压双裂隙裂纹扩展分布  
Fig. 9 Distribution of double crack propagation under different confining pressures



(a) 不同倾角应力-应变曲线



(b) 不同围压应力-应变曲线

图10 规则多裂隙试样数值结果

Fig. 10 Numerical results of multi crack specimens

图9为不同围压双裂隙试样裂隙分布情况,从图中可以看出,裂隙从两端开始起裂,扩展角度与理论值一致约为70.5°,岩桥相互连接贯通,随着荷载的增加,裂隙逐渐沿着对角线扩展,最终形成破坏面。在有围压的状态下,裂隙扩展相对集中,局部裂隙分布较少且破坏面比较明显。

### 3.3 多裂隙结果分析

图10(a)为规则多裂隙试样应力应变关系曲线图,当裂隙倾角为0°和90°的试样峰值应力相对较高,分别达到了101.41、90.86 MPa,裂隙倾角为45°峰值应力最低约为50 MPa,而30°和60°试样的峰值应力类似分别为69.42和68.74 MPa。其中裂隙倾角为0°和90°试样裂隙扩展与垂直加载方向平行,相对滑动的剪切力较小,不容易被破坏,所以峰值应力较大些。30°、45°、60°的预制裂隙分布更有利于翼型裂纹的扩展贯通,因此峰值应力相对较低。

不同围压多裂隙试样应力应变曲线如图10(b)所示,预制裂隙数量越多,加载过程中裂隙扩展越复杂,得到的应力应变曲线波动越明显。从图中可以看出,当围压由2 MPa增至8 MPa时,试样的峰值应力约从90 MPa增加到120 MPa,与单裂隙、双裂隙试样相比,多裂隙试样峰值应力明显减小。随着围压的增大,试样后期塑性阶段变形增大。

图11为不同倾角多裂隙试样裂隙分布情况,0°倾角裂隙沿着垂直加载方向扩展,岩桥相互贯通形成破坏面。30°和45°裂隙倾角破坏主要以翼型裂纹扩展为主。60°裂隙倾角是由尖端翼型裂纹和次生共面裂纹共同扩展导致破坏。90°倾角试样裂隙沿对角线呈阶梯形状分布,有利于翼型裂纹萌生扩展,导致在对角线形成较明显的贯通面。

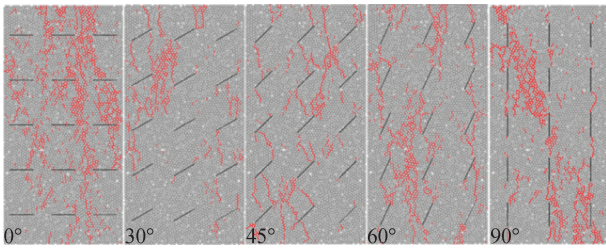


图 11 不同倾角多裂隙裂纹扩展分布

Fig. 11 Distribution of multi crack growth at different angles

图 12 为多裂隙试样在不同围压下裂纹扩展情况,与单裂隙和双裂隙相比,多裂隙裂纹扩展更为复杂。在无围压状态下,随着荷载的增加,裂隙扩展形式主要受预制裂隙分布影响,由扩展的翼型裂纹与预制裂隙共同形成破坏面导致试样破坏。在有围压状态下,试样主要是相邻岩桥连接贯通导致试样局部破坏。

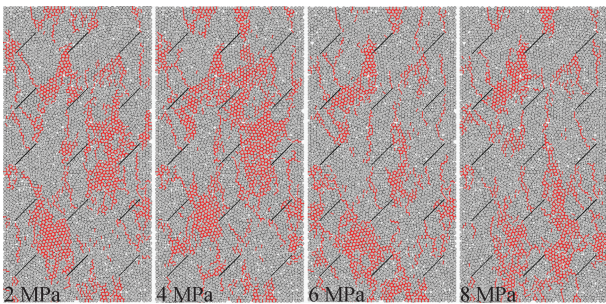
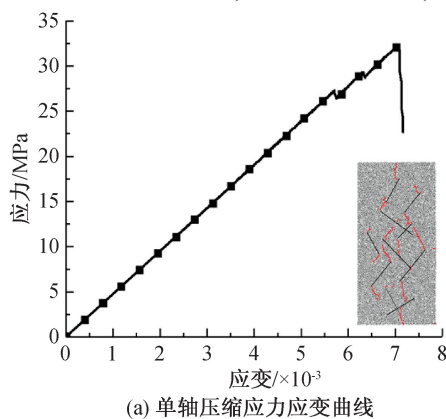


图 12 不同围压多裂隙裂纹扩展分布

Fig. 12 Distribution of multi crack growth under different confining pressures

随着裂隙分布形式改变,裂纹扩展及强度呈现不同变化,如图 13 为随机分布多裂隙数值结果,与规则分布多裂隙相比,单轴压缩过程中不规则多裂隙峰值应力相对较低,后期曲线出现波动,裂隙尖端呈翼型裂纹扩展,相互连接贯通导致破坏。围压作用下岩桥处裂隙分布密集,随着围压增大,



(a) 单轴压缩应力应变曲线

试样峰值应力约从 55 MPa 逐渐增大到 70 MPa 左右,相比规则多裂隙整体强度较低。

通过对不同类型裂隙岩体研究可以看出,岩体破坏本质均是裂隙的扩展演化贯通,在不同倾角、围压、裂隙数量等影响因素下,岩体的裂隙扩展、破坏形式以及强度变化均呈现出不同的变化规律,可针对不同工况条件对裂隙岩体破坏采取相应的控制措施,为工程裂隙岩体失稳问题提供借鉴。

#### 4 结论

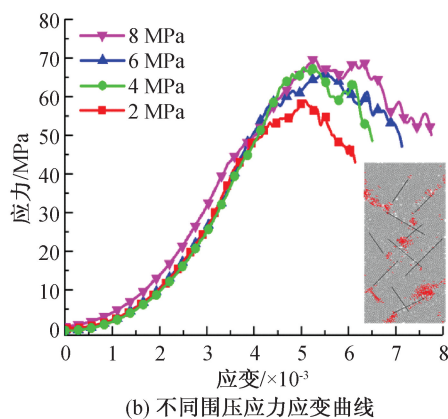
1) 随着裂隙倾角增大,单裂隙峰值应力先减小后增大,45°峰值应力最小约为 60 MPa;当围压由 2 MPa 增加到 8 MPa 时,峰值应力约从 120 MPa 增大到 160 MPa。裂隙起裂应力随着围压增大而增大,当裂隙倾角增大,起裂应力先减小后增大,与理论分析结果一致。

2) 不同倾角双裂隙强度变化规律与单裂隙类似,但随着围压增大,双裂隙应力应变曲线后期逐渐波动,塑性变形增大;当裂隙倾角为 30°、45°时,裂隙扩展以翼型裂纹和次生斜裂纹为主,裂隙倾角为 60°、90°主要为共面次生裂纹。

3) 对于多裂隙试样,当裂隙倾角为 30°、45°、60°时更有利于翼型裂纹扩展贯通,峰值应力较低;不同围压下,随着预制裂隙数量增多,试样最大峰值应力由 160 MPa 减小至 120 MPa;与规则分布多裂隙相比,不规则多裂隙整体强度较低。

#### 参考文献:

[1] 陈卫忠,王鲁瑀,谭贤君,等. 裂隙岩体地下工程稳定性研究发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40 (10): 1945-1961.



(b) 不同围压应力应变曲线

图 13 随机多裂隙数值结果

Fig. 13 Numerical results of random multiple cracks

- [2] 刘志芳,李小双. 裂隙岩体破裂演化研究进展[J]. 有色金属科学与工程,2020,11(4):77-81.
- [3] 唐红梅,张金浩,陈洪凯. 含裂隙岩石的受压破坏机理研究[J]. 工程地质学报,2016,24(3):363-368.
- [4] 王超,张建东,陈晓宜,等. 岩体裂纹扩展断裂理论与试验研究进展[J]. 采矿技术,2021,21(6):45-50+55.
- [5] 寇苗苗. 卸荷渗流耦合作用下裂隙岩体破坏机理研究[D]. 重庆:重庆大学,2019.
- [6] 杨圣奇,温森,李良权. 不同围压下断续预制裂纹粗晶大理岩变形和强度特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007(8):1572-1587.
- [7] 袁树成. 围压作用下裂隙岩体变形破坏及碎胀特性研究[J]. 铁道建筑技术,2019(12):21-27.
- [8] 刘学伟,刘泉声,陈元,等. 裂隙形式对岩体强度特征及破坏模式影响的试验研究[J]. 岩土力学,2015,36(S2):208-214.
- [9] 孙冰,邹春海,曾晟,等. 不同裂隙形式类岩体单轴压缩破坏特征研究[J]. 防灾减灾工程学报,2018,38(6):959-966.
- [10] 刘学伟,刘泉声,刘滨,等. 侧向压力对裂隙岩体破坏形式及强度特征的影响[J]. 煤炭学报,2014,39(12):2405-2411.
- [11] 周辉,孟凡震,张传庆,等. 不同位置和尺寸的裂隙对岩体破坏影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(S1):3018-3028.
- [12] 张波,李术才,杨学英,等. 含交叉多裂隙类岩石材料单轴压缩力学性能研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(9):1777-1785.
- [13] 张梅丽,梁正召,高敏,等. 含交叉裂隙岩体力学性质数值模拟研究[J]. 地下空间与工程学报,2020,16(3):758-769.
- [14] 袁丽景. 不同倾角裂隙砂岩单轴压缩颗粒流模拟分析[J]. 中原工学院学报,2019,30(4):55-59+63.
- [15] 李勇,蔡卫兵,朱维申,等. 单轴压缩条件下平行双裂隙演化机理的颗粒流分析[J]. 中南大学学报:自然科学版,2019,50(12):3035-3045.
- [16] 宋文超. 裂隙岩体力学特性及损伤演化颗粒流模拟研究[D]. 武汉:华中科技大学,2019.
- [17] 田文岭,杨圣奇,黄彦华. 不同围压下共面双裂隙脆性砂岩裂纹演化特性颗粒流模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报,2017,34(6):1207-1215.
- [18] SHI C,ZHANG C,JIN C,et al. Experimental Study and Numerical Simulation of Propagation and Coalescence Processes of Pre-existing Flaws in a Transparent Rock-Like Material[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2019,11(5):863-888.
- [19] 姜兆华,林山泉. 单裂隙岩体单轴压缩颗粒流数值模拟[J]. 建筑结构,2018,48(S2):940-943.
- [20] 范祥,谢永利,来弘鹏,等. 含两条节理岩样压缩破坏行为的颗粒流模拟[J]. 地下空间与工程学报,2018,14(2):461-469.
- [21] LAJTAL E Z. Brittle Fracture in Compression[J]. International Journal of Fracture,1997,10(4):12-15.

(责任编辑 周雪梅)