

# 节理岩体剪切力学特性及裂纹扩展行为模拟研究

蒋宇静<sup>1,2</sup>, 魏加乐<sup>1</sup>, 陈小飞<sup>3</sup>, 栾恒杰<sup>1</sup>, 王长盛<sup>1</sup>, 李鑫鹏<sup>1</sup>, 张孙豪<sup>2</sup>

(1. 山东科技大学 露天煤矿灾害防治与生态保护全国重点实验室, 山东 青岛 266590;

2. 长崎大学 工学研究科, 日本 长崎 8528521; 3. 兖矿能源集团股份有限公司 东滩煤矿, 山东 邹城 273500)

**摘要:**节理参数对节理剪切力学行为和破坏模式具有显著影响,是评估工程岩体强度和稳定性的重要因素。为探究不同节理参数下断续节理岩体的剪切力学特性及裂纹扩展贯通机理,基于零厚度黏聚力单元构建了断续节理岩体直剪模型,开展了不同节理开度、节理连通率及法向应力下断续节理剪切数值模拟,系统探讨了节理开度、节理连通率对其剪切行为的影响。研究表明:剪切应力-剪切位移曲线呈双峰值特征,峰值剪切应力随节理连通率的增加逐渐降低,随法向应力的增加逐渐升高;模型两侧岩桥是裂纹萌生的集中区域,节理开度较大的模型通常更早萌生裂纹,节理连通率较小的模型其裂纹倾向于形成多个孤立的裂纹段,不同法向应力下裂纹萌生时间、位置和扩展过程大致相同;裂纹增长与剪切应力存在良好的对应关系,累计裂纹数量随节理开度和法向应力的增加而增多、随节理连通率的增加而降低,拉伸裂纹广泛分布于岩桥及其附近区域,剪切裂纹主要集中在断续节理面附近。

**关键词:**断续节理岩体;节理开度;剪切行为;数值模拟;黏聚力单元

中图分类号:TD313;TU45

文献标志码:A

## Simulation study of shear mechanical characteristics and crack extension behavior of discontinuous joint rock masses

JIANG Yujing<sup>1,2</sup>, WEI Jiale<sup>1</sup>, CHEN Xiaofei<sup>3</sup>, LUAN Hengjie<sup>1</sup>,

WANG Changsheng<sup>1</sup>, LI Xinpeng<sup>1</sup>, ZHANG Sunhao<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Ecology Protection in Open-pit Coal Mines, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Graduate School of Engineering, Nagasaki University, Nagasaki 8528521, Japan;

3. Dongtan Coal Mine, Yankuang Energy Group Co., Ltd., Zoucheng 273500, China)

**Abstract:** Joint parameters have a significant impact on the shear mechanical behavior and failure modes of joints, and are important factors in evaluating the strength and stability of engineering rock masses. To investigate the shear mechanical properties and crack propagation and coalescence mechanisms of discontinuous jointed rock masses under different joint parameters, a direct shear model of discontinuous jointed rock masses was constructed based on zero-thickness cohesive elements. A series of numerical simulations of discontinuous joint shearing were conducted under different joint openings, joint connectivity rates, and normal stresses. The influences of joint openings and joint connectivity rates on their shear behavior were systematically investigated. The research shows that the shear stress-shear displacement curves exhibit a bimodal characteristic, with the peak shear stress decreasing gradually with the increase of joint connectivity rate and increasing gradually with the

收稿日期:2025-03-15

基金项目:国家自然科学基金项目(52104093);山东省自然科学基金项目(ZR2024ME065);鄂尔多斯市重点研发计划项目(YF20240010)

作者简介:蒋宇静(1962—),男,江苏靖江人,教授,博士,主要从事矿山岩体力学方面的研究。

栾恒杰(1989—),男,山东烟台人,教授,博士,主要从事矿山岩体力学与围岩控制方面的研究,本文通信作者。

E-mail:luanjie0330@126.com

increase of normal stress. The rock bridges on both sides of the model are the main areas for crack initiation. Models with larger joint openings usually initiate cracks earlier, while models with lower joint connectivity rate tend to form multiple isolated crack segments. The crack initiation time, location, and propagation process are roughly the same under different normal stresses. There is a good correspondence between crack growth and shear stress. The cumulative number of cracks increases with the increase of joint openings and normal stress, and decreases with the increase of joint connectivity rates. Tensile cracks are widely distributed in rock bridges and their adjacent areas, while shear cracks are mainly concentrated near discontinuous joint surfaces.

**Key words:** discontinuous joint rock masses; joint opening; shear behavior; numerical simulation; cohesive element

天然岩体中广泛存在各类不同规模的节理、裂隙或断层等结构弱面,这些不连续面会弱化岩体强度,降低岩体工程的稳定性<sup>[1-3]</sup>。依据节理面是否贯通,可将其划分为贯通节理和断续节理,其中断续节理岩体剪切失稳破坏,本质是节理张开、闭合和扩展等行为引起的岩桥贯通和剪切滑移<sup>[4-5]</sup>。节理几何结构参数(以下简称节理参数)会显著影响岩体的剪切力学特性和破坏模式,深入探究节理参数对断续节理岩体剪切行为的影响,可为岩体工程建设和灾害防治提供有益参考<sup>[6-7]</sup>。

国内外学者在探究断续节理剪切行为时着重考虑了节理参数的影响。Gerolymatou等<sup>[8]</sup>采用石膏材料制备了不同节理起伏角的断续节理试样,通过直剪试验探究了节理倾角、法向应力对断续节理岩体抗剪性能和裂纹扩展行为的影响。陈庆芝等<sup>[9]</sup>对具有相同节理连通率、不同节理起伏角的断续节理岩体开展了相同法向应力下的直剪试验,试验结果显示,断续节理岩体的破坏形态、变形特征和强度特性受节理起伏角的影响显著。张志飞等<sup>[10]</sup>探究了不同粗糙度断续节理剪切过程中的裂纹扩展行为及破坏模式,结果显示,法向应力和节理粗糙度的增加均会促使岩桥破坏模式向剪切破坏转变。Fereshtenejad等<sup>[11]</sup>通过直剪试验探究了岩桥长度和节理面粗糙度对断续节理抗剪性能的影响,研究表明,岩桥长度的影响较节理粗糙度更为显著。已有关于断续节理岩体剪切行为的研究多集中于节理起伏角、节理粗糙度、岩桥长度、岩桥倾角等节理参数,围绕节理开度、节理连通率及二者组合作用的研究相对缺乏。此外,传统室内试验在观测细观裂纹扩展行为方面存在局限性,难以精确表征裂纹动态扩展过程<sup>[12]</sup>。

近年来,数值模拟技术凭借灵活性与可重复性,已成为研究断续节理剪切行为的重要手段,主流数值模拟方法涵盖有限元法、离散元法及有限元-离散元耦合方法等<sup>[13]</sup>。这些方法在解决实际工程问题时各有侧重,但模拟断续节理剪切过程仍存在一些不足。例如,传统有限元法难以准确刻画裂纹萌生与扩展,离散元法存在计算成本高、难以处理大规模问题的局限。而在有限元的实体单元之间嵌入基于黏聚力模型(cohesive zone model, CZM)的特殊单元的方法,将材料破坏过程中的裂纹萌生、扩展与断裂行为统一于连续介质力学框架内,为模拟岩石材料在荷载作用下的裂纹扩展提供了有效途径<sup>[14]</sup>。Wu等<sup>[15]</sup>基于黏聚力单元模拟了断续节理岩体的剪切破坏和裂纹演化过程,探究了节理连通率、节理分布形式和法向应力对断续节理岩体抗剪强度的影响。Han等<sup>[16]</sup>采用嵌入黏聚力单元的方法,模拟了剪切作用下含孔洞及断续节理岩体的断裂演化及破坏机理。尽管已有学者将黏聚力单元方法扩展至断续节理剪切领域以研究其细观剪切力学行为,但在探究节理开度、节理连通率等节理参数的应用方面还相对较少,尤其在多参数协同作用对岩桥损伤演化影响规律的研究方面仍存在不足。

基于以上认识,本研究采用在有限元模型实体单元之间嵌入零厚度黏聚力单元的方法,在ABAQUS软件中构建断续节理剪切模型;通过模拟不同工况下的断续节理直剪过程,综合探究了节理开度、节理连通率和法向应力对断续节理剪切力学特性和裂纹扩展贯通机理的影响。

## 1 数值模拟

### 1.1 牵引-分离模型

牵引-分离模型定义了黏聚力单元与实体单元之间的本构关系,使得黏聚力单元的应力或应变状态在满足损伤起始准则后发生损伤,到达损伤阈值后发生破坏并被删除<sup>[17]</sup>。本研究基于双线性牵引-分离模型开展数值模拟,将材料的强化行为和超载后软化行为描述为两段分离的函数。

在损伤起始前,黏聚力单元表现为线弹性行为,其应力-分离位移关系由本构方程(1)定义:

$$\mathbf{t} = \mathbf{K}\boldsymbol{\delta} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{t} = \{t_n, t_s, t_t\}^T$ ,为黏聚力单元所在界面内法向( $t_n$ )和两个相互垂直的剪切方向( $t_s, t_t$ )的名义应力分量; $\boldsymbol{\delta} = \{\delta_n, \delta_s, \delta_t\}^T$ ,为相应的分离位移向量; $\mathbf{K}$ 为弹性刚度矩阵。

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} & k_{nt} \\ k_{ns} & k_{ss} & k_{st} \\ k_{nt} & k_{st} & k_{tt} \end{bmatrix} \quad (2)$$

当黏聚力单元的牵引力或分离位移满足相应的损伤起始条件后,损伤演化正式开始。选用最大名义应力准则作为损伤起始条件,其适用于描述脆性材料的损伤起始行为,具体如式(3)所示:

$$\left\langle \frac{t_n}{t_{n0}} \right\rangle^2 + \left\langle \frac{t_s}{t_{s0}} \right\rangle^2 + \left\langle \frac{t_t}{t_{t0}} \right\rangle^2 = 1 \quad (3)$$

式中: $t_{n0}, t_{s0}, t_{t0}$ 分别为标称应力在法向和两个剪切方向的最大分量; $\langle \rangle$ 为麦克利括号, $\langle t_n \rangle$ 表示当 $t_n \leq 0$ 时, $\langle t_n \rangle = 0$ ,当 $t_n > 0$ 时 $\langle t_n \rangle$ 取原值; $t_s, t_t$ 同理。

损伤演化开始后,黏聚单元刚度将线性下降。在 ABAQUS 中,损伤标量  $D$  用于表示材料的损伤程度,其初始值为 0,当  $D$  从 0 单调演化为 1 后,材料完全失效。损伤变量  $D$  定义如式(4)所示:

$$D = \frac{\delta_{mf}(\delta_{mm} - \delta_{m0})}{\delta_{mm}(\delta_{mf} - \delta_{m0})} \quad (4)$$

式中: $\delta_{mm}$ 为加载过程中最大有效位移; $\delta_{m0}$ 为初始损伤位移; $\delta_{mf}$ 为最终分离位移。 $\delta_{mm}, \delta_{m0}, \delta_{mf}$ 是有效位移 $\delta_m$ 在不同损伤阶段的特征值。有效位移 $\delta_m$ 的函数表达式为:

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

式中: $\delta_n$ 为法向位移, $\delta_s, \delta_t$ 为相互垂直的切向位移。

## 1.2 模型建立与试验方案

为研究断续节理岩体剪切力学性质和损伤破坏行为,采用 ABAQUS 软件、通过在有限元模型实体单元之间嵌入零厚度黏聚力单元的方法,建立如图 1 所示的断续节理剪切数值模型。如图 1(a) 模型结构示意图所示,模型尺寸为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ,断续节理线中点与模型中心相重合,断续节理倾角为  $0^\circ$ ,断续节理长度为  $L$ ,节理连通率定义为  $L/100$ ,断续节理开度为上下节理面之间的距离。图 1(b) 为数值模型装配示意图,模型上下两侧均设置刚性剪切盒以保证模型受力均匀,模型下半部分岩石完全限制各向位移;对上半部分岩石施加垂直的法向荷载和自左向右的水平荷载,其中水平荷载的加载速率为  $0.01 \text{ mm/s}$ ;分析步 1 用于施加法向荷载,分析步 2 用于模拟剪切方向加载。

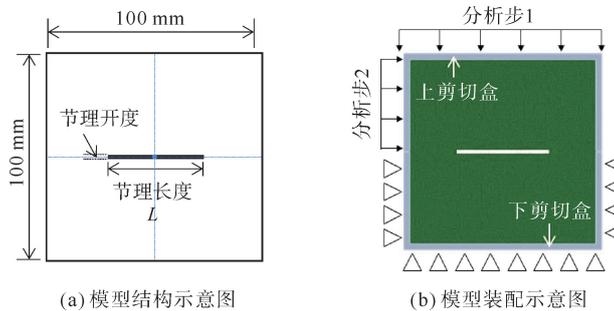


图 1 基于 ABAQUS 构建的断续节理剪切数值模型

Fig. 1 Numerical shear model of discontinuous joints constructed based on ABAQUS

在本研究所构建的有限元模型中,实体单元的截面属性选择线弹性均质体,黏聚力单元的截面属性选择黏性体并采用牵引-分离响应;模型各部分之间采用通用接触,法向接触定义为硬接触,切向接触定义为摩擦接触,摩擦系数设置为 0.2;选用全局布种方式为岩体模型布种,布种尺寸为  $1.5 \text{ mm}$ ;网格类型采用

三结点线性平面应变三角形单元(CPE3)和相应的零厚度黏聚力单元(COH2D4),模型单元总数约为 18 000~19 000 个,具体数量因节理开度不同略有变化。

通过开展不同节理开度、节理连通率和法向应力下断续节理剪切数值模拟,探究各因素影响下断续节理岩体的剪切力学特性和细观损伤演化行为,共设计 3 组数值试验方案,如表 1 所示。以 K1-L50-2 为例,方案中的编号依据为:K1 表示节理开度为 1 mm,L50 表示节理连通率为 50%,2 表示法向应力为 2 MPa。数值模拟过程中监测各模型的剪切应力-剪切位移曲线、裂纹演化过程、最终破坏模式等,对断续节理模型的剪切力学特性和裂纹扩展贯通机理做出分析。

表 1 断续节理剪切数值试验方案

Table 1 Discontinuous joint shear numerical experiment scheme

| 编号       | 节理开度/mm | 节理连通率/% | 法向应力/MPa | 编号       | 节理开度/mm | 节理连通率/% | 法向应力/MPa | 编号       | 节理开度/mm | 节理连通率/% | 法向应力/MPa |
|----------|---------|---------|----------|----------|---------|---------|----------|----------|---------|---------|----------|
| K0-L50-2 | 0       |         |          | K1-L40-2 |         | 40      |          | K1-L50-1 |         |         | 1        |
| K1-L50-2 | 1       | 50      | 2        | K1-L50-2 | 1       | 50      | 2        | K1-L50-2 | 1       | 50      | 2        |
| K2-L50-2 | 2       |         |          | K1-L60-2 |         | 60      |          | K1-L50-3 |         |         | 3        |
| K3-L50-2 | 3       |         |          | K1-L70-2 |         | 70      |          | K1-L50-4 |         |         | 4        |

### 1.3 材料力学参数标定

数值试验前,通过开展标准圆柱体单轴压缩试验、三轴压缩试验和巴西劈裂试验,获取适用于模拟天然红砂岩的基本物理力学参数,如表 2 所示。依据以上参数开展相应的数值模拟试验,采用“试错法”对数值模型参数进行校准。详细流程为:首先基于红砂岩基本物理参数(表 2)设定实体单元与黏聚力单元的初始参数组合,随后保持其他参数不变,依次调整黏聚力单元在法向和两个相互垂直的剪切方向的刚度( $K_{n0}$ 、 $K_{s0}$ 、 $K_{t0}$ )、名义应力( $t_n$ 、 $t_s$ 、 $t_t$ )及断裂能等参数,通过 ABAQUS 软件进行单轴压缩数值模拟;将模拟得到的应力-应变曲线、峰值强度及破坏模式与室内试验的结果对比,若差异较大则继续调整参数,直至数值模拟结果与试验结果的误差控制在 10%以内,最终确定合适的参数<sup>[18]</sup>。

表 2 红砂岩基本物理力学参数

Table 2 Basic physical and mechanical parameters of red sandstone

| 单轴抗压强度/MPa | 抗拉强度/MPa | 弹性模量/GPa | 泊松比   | 摩擦角/(°) | 黏聚力/MPa |
|------------|----------|----------|-------|---------|---------|
| 23.195     | 3.215    | 26.850   | 0.242 | 37.781  | 5.232   |

图 2 为校准模型参数所建立的数值模型及数值模拟与室内试验结果对比,包含单轴压缩试验和巴西劈裂试验,建模方法同样采用在实体单元之间嵌入零厚度黏聚力单元的方式。图 2(a)显示,单轴压缩数值模拟曲线的波动程度较室内试验曲线更大,二者曲线均在轴向位移 1.35 mm 左右到达峰值而后迅速下降,圆柱体丧失承压能力发生破坏。图 2(b)表明,巴西劈裂模型在加载过程中顶部黏聚单元首先受损,而后逐渐发展成为微裂纹,峰值应力后更多微裂纹在模型内部形成和扩展。图 2 中,室内试验和数值模拟的峰值应力及对应峰值位移均高度一致,破坏模式也大致相同,表明所采用的数值模型参数可以很好地模拟天然红砂岩材料,校准后获取的数值模型参数:实体单元密度  $2\ 155\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,弹性模量 20.96 GPa,泊松比 0.24;黏聚力单元  $K_{n0}$  为  $14.80\text{ GPa}\cdot\text{mm}^{-1}$ , $K_{s0}$  为  $6.39\text{ GPa}\cdot\text{mm}^{-1}$ , $K_{t0}$  为  $6.39\text{ GPa}\cdot\text{mm}^{-1}$ , $t_n$  为 5.65 MPa, $t_s$  为 19.10 MPa, $t_t$  为 19.10 MPa,I 型、II 型断裂能分别为 0.07 和 0.161 N/mm。

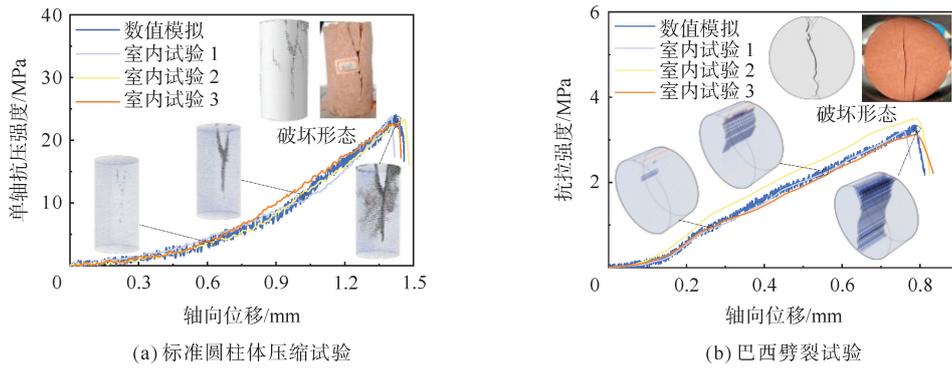


图 2 数值模型及数值模拟与室内试验的结果对比

Fig. 2 Numerical models and comparison of results between numerical simulations and laboratory tests

## 2 数值模拟结果分析

### 2.1 宏观剪切力学特性分析

不同节理开度、节理连通率和法向应力影响下断续节理剪切应力-剪切位移曲线如图 3 所示。可以发现,断续节理模型的剪切应力-剪切位移曲线均存在两个明显峰值,依据峰值剪切应力出现的先后顺序,本研究分别定义为第一峰值剪切应力  $\tau_1$  和第二峰值剪切应力  $\tau_2$ 。根据剪切应力-剪切位移曲线双峰值特征及其在不同剪切位移时的形态特征,将其划分为线弹性阶段(I)、裂纹起裂扩展阶段(II)、破坏阶段(III)和残余摩擦阶段(IV)。

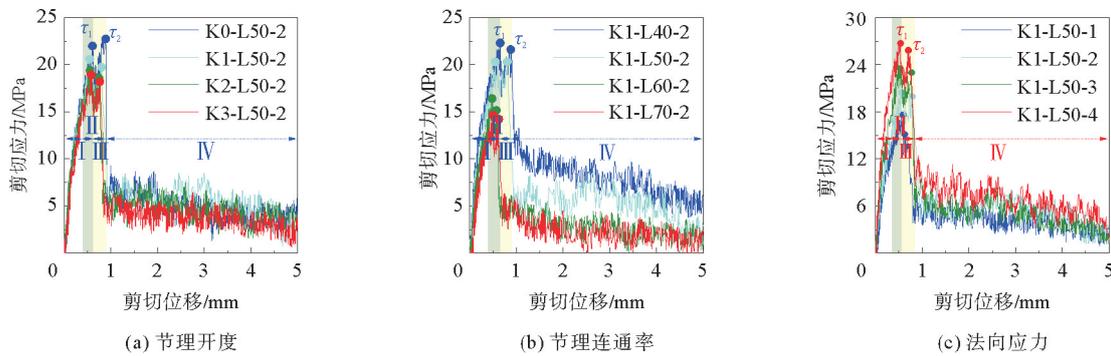


图 3 不同因素下断续节理剪切应力-剪切位移曲线

Fig. 3 Shear stress-shear displacement curves under different factors for discontinuous joints

图 3(a)为不同节理开度下各断续节理模型的剪切应力-剪切位移曲线。由图 3(a)可见,各曲线弹性阶段剪切刚度值(剪切应力-剪切位移曲线的斜率)大小相近,峰值剪切应力  $\tau_1$  和  $\tau_2$  对应的峰值剪切位移随节理开度的增加而略有增大。图 3(b)显示了节理连通率对剪切应力-剪切位移曲线的影响,节理连通率对峰值剪切位移的影响较为明显,节理连通率越大, $\tau_1$  和  $\tau_2$  对应的峰值剪切位移越大,在残余摩擦阶段,剪切应力曲线的波动幅度随节理连通率的增加呈减弱趋势,分析认为,沿岩桥断面的摩擦滑移是剪切应力曲线波动的主要原因,节理连通率的增加使得岩桥占比下降。图 3(c)对比了不同法向应力下各断续节理模型的剪切应力-剪切位移曲线,可以发现,虽然法向应力的大小不同,但剪切应力-剪切位移曲线的形态、峰值剪切位移及残余摩擦应力的波动幅度较为相似,剪切刚度随着法向应力的增加呈正向变化的趋势。

图 4 显示了各断续节理峰值剪切应力  $\tau_1$ 、 $\tau_2$  和残余剪切应力  $\tau_r$  分别随节理开度、节理连通率、法向应力的变化情况。图 4(a)表明,峰值剪切应力  $\tau_1$  和  $\tau_2$  均随节理开度的增大而减小,这是由于上下节理面之间的距离变大,从而导致节理面间的摩擦力减小;尽管节理开度较低的断续节理模型峰值剪切应力更

高,但不同节理开度下各模型的峰值应力值仍较为接近,残余剪切应力随节理开度无明显规律性变化。图 4(b)表明,峰值剪切应力随节理连通率的增加而逐渐降低,分析认为,节理连通率的增加会使得相对薄弱的节理面占比上升,岩桥占比下降,岩桥相较节理而言具有更好的抗剪性能,从而使得断续节理模型的整体抗剪强度降低;残余剪切应力随节理连通率的改变无明显规律性变化。由图 4(c)可以看出,随着法向应力的增加,断续节理模型的峰值剪切应力和残余剪切应力均随之增加,法向应力的增加导致节理面之间的接触更紧密,虽然加剧了岩桥的最终损伤,但也在一定程度上抑制了拉伸裂纹的萌生扩展,提升了岩桥在破坏前的承载能力及破坏后的残余强度。

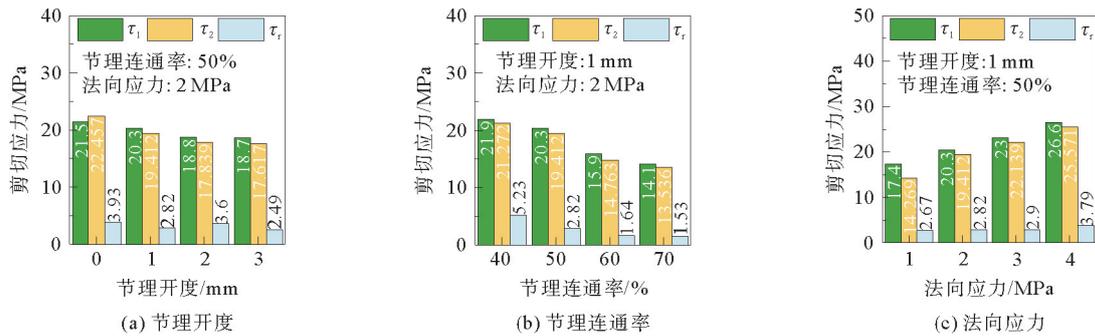


图 4 不同因素下断续节理峰值剪切应力、残余剪切应力变化情况

Fig. 4 Variation of peak shear stress and residual shear stress in discontinuous joints under different factors

## 2.2 裂纹扩展贯通行为分析

### 2.2.1 裂纹扩展路径演化

选取断续节理模型剪切过程中 5 个关键时刻的裂纹云图,如图 5 所示,以分析节理开度、节理连通率和法向应力对裂纹演化过程的影响。图 5 中 5 个关键时刻对应的剪切位移如下: $u_A$  对应裂纹首次萌生时的剪切位移, $u_B$  和  $u_C$  分别为  $\tau_1$  和  $\tau_2$  对应的峰值剪切位移, $u_D$  对应剪切过程进入残余摩擦阶段时的剪切位移, $u_E$  为剪切过程 2 mm 时的剪切位移。

图 5(a)为不同节理开度下各断续节理剪切模型裂纹演化过程。裂纹首先在岩桥左端应力集中区萌生,随后沿剪切方向向右扩展,随着节理开度增加,裂纹扩展区域逐渐减小且更集中于岩桥中部。模型 K0-L50-5、K1-L50-5、K2-L50-5 和 K3-L50-5 的裂纹起裂剪切位移  $u_A$  分别为 0.445、0.442、0.425 和 0.402 mm,不同节理开度下模型裂纹起裂时间相差无几,但节理开度较大的模型裂纹通常更早萌生起裂。纵向对比 E 时刻的裂纹云图可以发现,随着节理开度的增加,裂纹扩展区域减小,裂纹更多地集中于岩桥处。

图 5(b)显示了不同节理连通率下各断续节理剪切模型裂纹演化过程。具体表现为裂纹首先在左右岩桥端部萌生,随后沿岩桥轴向扩展并逐渐贯通,节理连通率较高时岩桥长度缩短,裂纹贯通路径更直接。模型 K1-L40-5、K1-L50-5、K1-L60-5 和 K1-L70-5 在左侧岩桥贯通时对应剪切位移  $u_B$  分别为 0.641、0.547、0.482 和 0.491 mm,右侧岩桥贯通时对应的剪切位移  $u_C$  分别为 0.872、0.807、0.594 和 0.618 mm。可以发现,随着节理连通率的增加,模型岩桥处的裂纹更易扩展、更早贯通,这也解释了节理连通率较大的断续节理抗剪强度较低的原因。纵向对比图 5(b)中  $u_D$ 、 $u_E$  时的裂纹云图可见,节理连通率较小的断续节理剪切模型中,裂纹更趋向于形成多个孤立的裂纹段,难以形成完整的贯通路程。

图 5(c)为不同法向应力下各断续节理剪切模型裂纹演化过程。裂纹首先在岩桥两侧同时萌生,随后沿剪切方向至模型中部扩展,法向应力增加会加速裂纹萌生速度但不改变扩展方向。不同法向应力下断续节理模型的裂纹演化云图基本相似,裂纹萌生时间、位置和扩展过程也大致相同。剪切过程于 A 时刻起进入裂纹起裂扩展阶段,模型 K1-L50-1、K1-L50-2、K1-L50-3 和 K1-L50-4 的裂纹起裂位移  $u_A$  分别为 0.427、0.442、0.365 和 0.262 mm,可见,法向应力的增加会加速裂纹的萌生起裂。纵向对比 E 时刻的裂纹云图,可见,随着法向应力的增加,裂纹数量增多,岩桥处的剪切断面愈为粗糙,模型损伤程度更为严重。

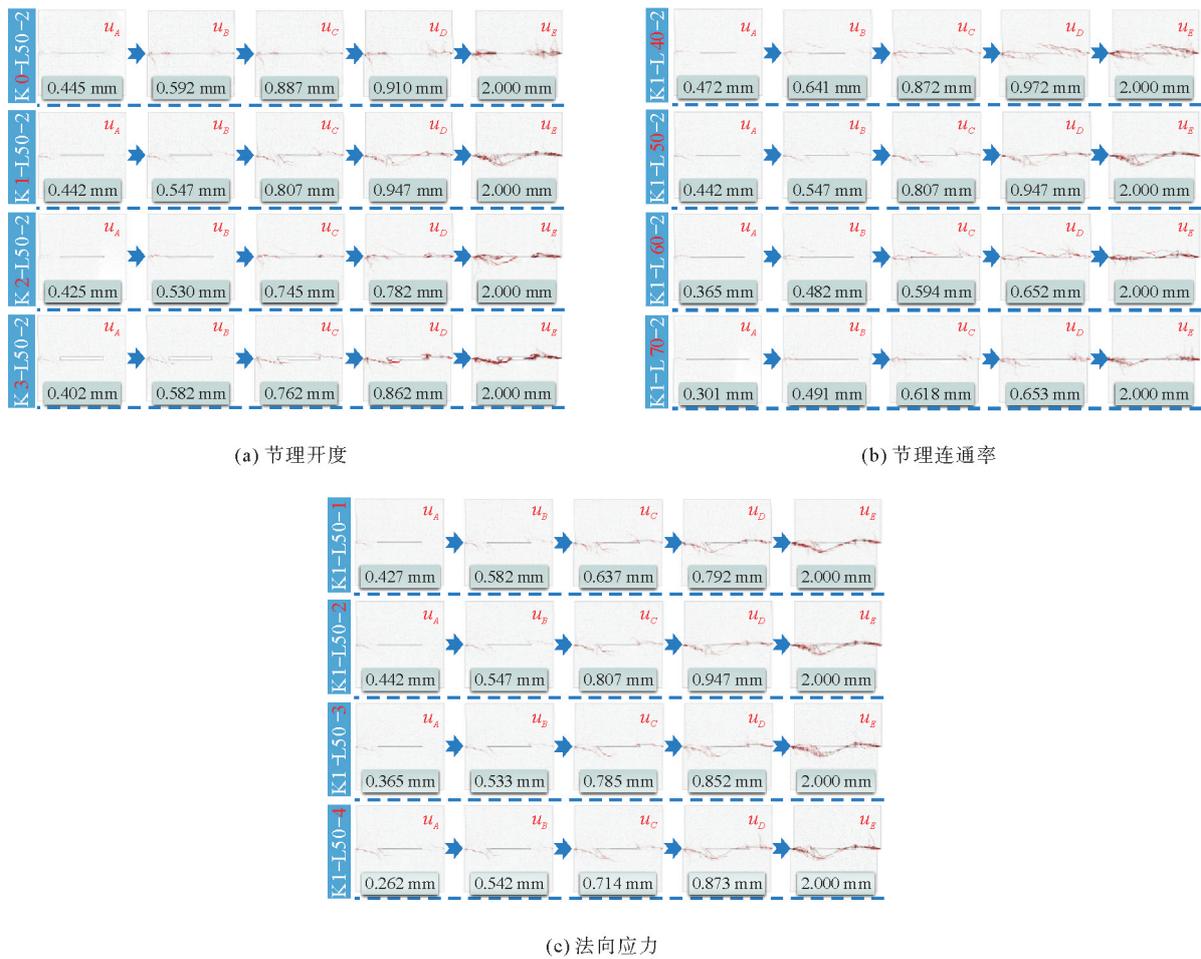


图 5 不同因素下断续节理模型裂纹演化过程

Fig. 5 Crack evolution process of discontinuous joint models under different factors

### 2.2.2 裂纹数量演化

岩石内部产生的宏观裂纹是由微观裂纹不断萌生、延伸、相互贯通所导致的,裂纹数量是衡量破裂效果的一个重要指标<sup>[19]</sup>。图 6~8 为断续节理剪切模型裂纹数量及剪切应力随剪切位移的变化情况。可以发现,裂纹增长与剪切应力存在良好的对应关系:弹性阶段(OA),模型处于线性变形阶段,断续节理两侧的岩桥仍具备良好的抗剪性能,模型表面并无明显的裂纹萌生迹象,裂纹数量趋近于 0;裂纹起裂扩展阶段(AB),模型由线性变形向非线性变形过渡,累计裂纹数量曲线随剪切位移开始爬升;破坏阶段(BD),累计裂纹数量快速增长,尤其在  $\tau_1$  和  $\tau_2$  之前,累计裂纹数量曲线近乎直线上升,这表明模型即将破坏;残余摩擦阶段(DE),剪切应力保持相对稳定,裂纹的发展趋于平稳,裂纹数量接近最大值,累计裂纹数量随着剪切位移的增加无显著变化。

图 6 显示了不同节理开度时断续节理模型的裂纹数量演化情况。在节理连通率 50%、法向应力 2 MPa 条件下,断续节理模型剪切破坏后裂纹数量(不同节理开度)依次为:1 834 条(0 mm)、2 028 条(1 mm)、2 162 条(2 mm)和 2 183 条(3 mm)。可以发现,随着节理开度的增加,模型累计裂纹数量增加,这是由于节理开度较小时,节理面之间的接触较为紧密,节理面附近的裂纹扩展阻力较大;而当节理开度增加时,节理面附近的裂纹扩展阻力减小,更容易产生新的裂纹。但整体而言,裂纹数量的变化随节理开度的变化并不明显,通过对比图 6 中不同节理开度下的裂纹云图可以解释这一现象:断续节理模型两端的岩桥是裂纹萌生的主要部位,而非节理面。

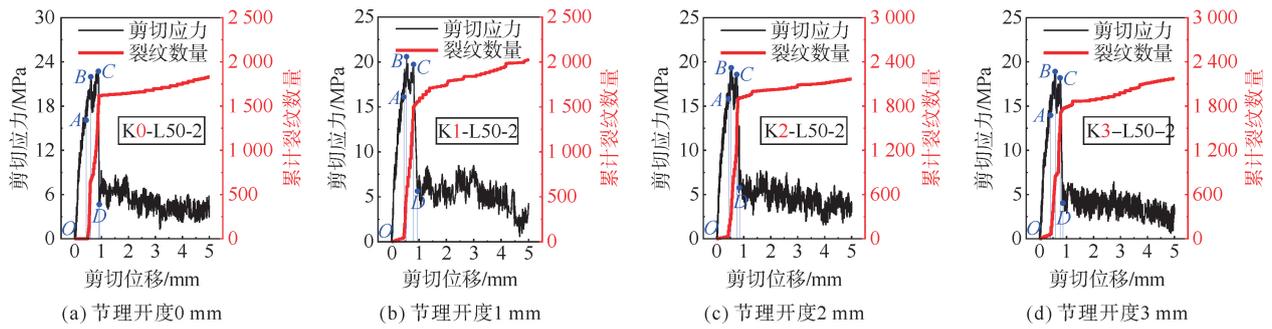


图6 不同节理开度下各断续节理模型裂纹数量-剪切位移曲线

Fig. 6 Crack number-shear displacement curves of discontinuous joint models under different joint openings

图7显示了不同节理连通率时断续节理模型的裂纹数量演化情况。在节理开度1 mm和法向应力2 MPa条件下,断续节理模型裂纹数量(不同节理连通率)依次为:2 282条(40%)、2 028条(50%)、1 745条(60%)和1 530条(70%)。可见,随着节理连通率的增加,模型累计裂纹数量显著降低,这是因为高节理连通率下,断续节理模型的岩桥占比下降,损伤区域减小,从而导致模型最终破坏时的裂纹数量减少。此外,岩桥占比下降还会使得断续节理模型剪切过程中更容易发生损伤,表现为裂纹增长速率随节理连通率的增加而加快。

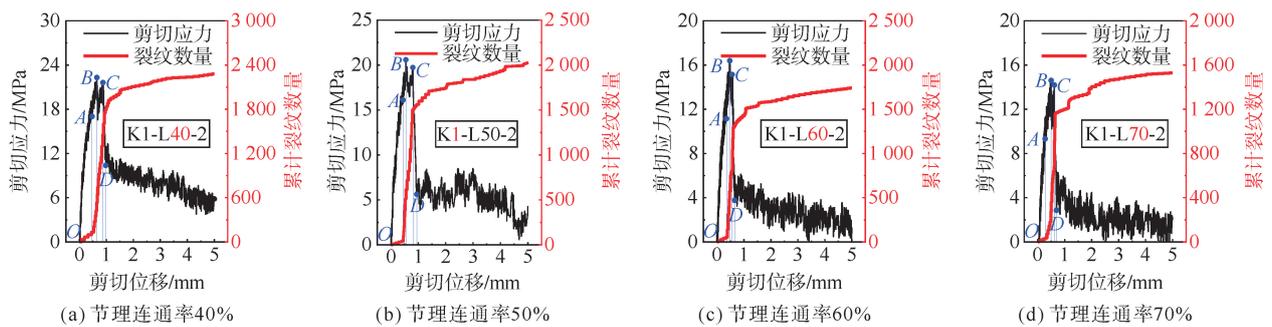


图7 不同节理连通率下各断续节理模型裂纹数量-剪切位移曲线

Fig. 7 Crack number-shear displacement curves of discontinuous joint models under different joint connectivity rates

图8显示了不同法向应力下断续节理模型的裂纹数量演化情况。在节理开度1 mm和节理连通率50%条件下,断续节理模型裂纹数量(不同法向应力)依次为:1 944条(1 MPa)、2 028条(2 MPa)、2 060条(3 MPa)和2 089条(4 MPa)。同裂纹数量随节理开度的变化趋势相似,断续节理模型累计裂纹数量也随着法向应力的增加而增多。分析认为,法向应力增加会导致节理面之间的摩擦力增大,在剪切过程中需要克服更大的阻力,从而更容易萌生裂纹。累计裂纹数量曲线增长最快时刻发生在 $\tau_1$ 和 $\tau_2$ 的峰前阶段,累计裂纹数量最大增长速率也随着法向应力的增加而增大。

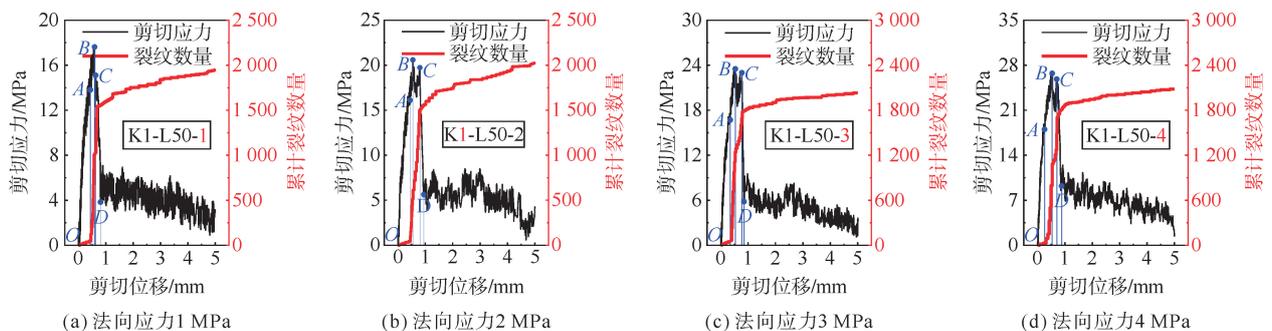


图8 不同法向应力下各断续节理模型裂纹数量-剪切位移曲线

Fig. 8 Crack number-shear displacement curves of discontinuous joint models under various normal stress conditions

### 2.2.3 裂纹类型分布

输出不同节理开度、节理连通率和法向应力下断续节理剪切模型最终破坏时的裂纹类型分布情况,如图9所示。图9(a)表明,随着节理开度的增加,节理面磨损破坏的比例减小,断续节理模型内剪切裂纹占比逐渐下降、拉伸裂纹占比逐渐上升。由图9(b)可知,节理连通率的改变对断续节理模型的破坏模式有显著影响,随着节理连通率的增加,断续节理模型内拉伸裂纹占比下降,剪切裂纹占比上升,变化趋势明显。图9(c)表明,法向应力对断续节理模型破坏模式的影响较弱,不同法向应力下断续节理模型内拉伸裂纹和剪切裂纹的分布区域相似。综合图5及图9可见,断续节理剪切模型最终破坏时拉伸裂纹数量显著高于剪切裂纹数量,其中,拉伸裂纹广泛分布在岩桥及其附近区域,剪切裂纹主要集中在节理附近和模型右端与上剪切盒接触的区域。岩桥处的黏聚力单元因受集中应力而断裂,断裂区域随着剪切位移的增加而不断扩展,最终导致岩桥区域的张拉破坏;节理面附近由于受水平荷载不断被磨损,其附近的破坏模式主要表现为剪切破坏。

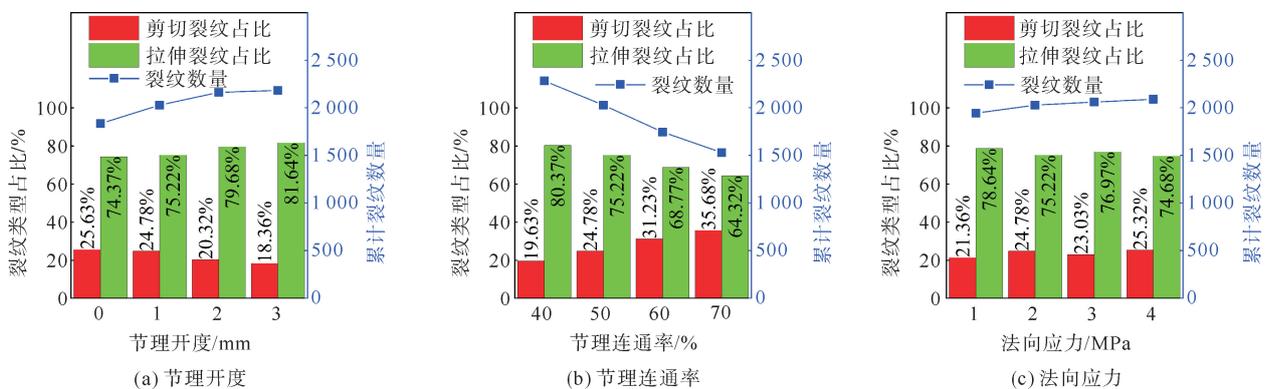


图9 不同因素下断续节理模型最终破坏时裂纹分布情况

Fig. 9 Crack distribution of discontinuous joint models at final failure under different factors

## 3 结论

采用在有限元模型实体单元之间嵌入零厚度黏聚力单元的方法,模拟了不同节理开度、节理连通率和法向应力下的断续节理直剪过程,分析了节理参数变化对断续节理剪切力学特性和裂纹扩展贯通机理的影响,得到以下主要结论。

1) 断续节理剪切应力-剪切位移曲线呈现双峰值特征,依据形态特征可划分为线弹性阶段、裂纹起裂扩展阶段、破坏阶段和残余摩擦阶段;峰值剪切应力随节理连通率的增加逐渐降低,随法向应力的增加逐渐升高,不同节理开度下各模型的峰值应力值较为接近。

2) 断续节理模型两端的岩桥是裂纹萌生的主要区域,节理开度较大的模型通常更早萌生裂纹,裂纹扩展区域随节理开度的增加逐渐减小;模型岩桥处的裂纹随节理连通率的增加更易扩展、更早贯通,节理连通率较小的模型,其裂纹趋向于形成多个孤立的裂纹段;不同法向应力下断续节理模型的裂纹演化过程基本相似,裂纹萌生时间、位置和扩展过程大致相同。

3) 断续节理模型的裂纹增长与剪切应力存在较好的对应关系,模型累计裂纹数量随节理开度和法向应力的增加而增多,随着节理连通率的增加而降低;拉伸裂纹广泛分布在岩桥及其附近区域,其占比与节理开度呈正相关关系;剪切裂纹主要集中在节理附近和模型右端与上剪切盒接触的区域,随节理连通率的增加其占比逐渐上升。

4) 为保障工程安全,需明确裂纹起裂扩展阶段及破坏阶段含断续节理岩体的抗剪破坏机制,对高开度或低连通率岩体强化岩桥张拉裂纹防控,高连通率岩体加强节理面剪切滑移控制,深部工程通过地应力调控降低岩桥拉应力集中,以优化灾害防治策略。

## 参考文献:

- [1] 李国锋,王九红,刘建荣,等. 巷道围岩锚固结构面剪切特性与破坏特征研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2022,41(4):47-55.  
LI Guofeng,WANG Jiuhong,LIU Jianrong,et al. Study on shear properties and failure characteristics of bolted joint of roadway surrounding rock[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2022, 41(4):47-55.
- [2] 王刚,刘廷方,王长盛,等. 贯通型标准 JRC 双节理剪切力学及声发射特性研究[J]. 岩土工程学报, 2024,46(4):500-509.  
WANG Gang,LIU Tingfang,WANG Changsheng,et al. Shear mechanics and acoustic emission characteristics of penetrating standard JRC double joints[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2024,46(4):500-509.
- [3] 左海峰,蒋宇静,李春平,等. 基于 Pile 单元改进模型的锚杆锚固角度效应数值模拟研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2023,42(5):30-39.  
ZUO Haifeng,JIANG Yujing,LI Chunping,et al. Numerical simulation of anchor angle effect of bolts based on modified model of Pile element[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Sciences), 2023,42(5): 30-39.
- [4] 陈绍杰,冯帆,李夕兵,等. 复杂开采条件下深部硬岩板裂化破坏试验与模拟研究进展和关键问题[J]. 中国矿业大学学报, 2023,52(5):868-888.  
CHEN Shaojie,FENG Fan,LI Xibing,et al. Research progress and key issues of laboratory test and numerical simulation for slabbing failure in hard rock under complex mining conditions[J]. Journal of China University of Mining and Technology,2023,52(5):868-888.
- [5] 康一强,张祥,贾文豪,等. 张开型节理角度和长度对类岩石材料动力学特性的影响[J]. 矿业科学学报, 2022,7(3):296-303.  
KANG Yiqiang,ZHANG Xiang,JIA Wenhao,et al. Effects of dip angle and length of open joints on dynamic properties of materials like rock[J]. Journal of Mining Science and Technology,2022,7(3):296-303.
- [6] 袁伟,李建春,李星. 花岗岩冲击剪切力学行为的试验及数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2024,45(6):1675-1685.  
YUAN Wei,LI Jianchun,LI Xing. Experimental and numerical study on mechanical behaviors of granite subjected to impact shear force[J]. Rock and Soil Mechanics,2024,45(6):1675-1685.
- [7] 彭岩岩,周崇,程啸,等. 不同节理倾角下灰岩应变场演化及裂纹发展规律[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2023,5(4): 54-64.  
PENG Yanyan,ZHOU Chong,CHENG Xiao,et al. Evolution of strain field and crack development of limestone under different joint inclination angles[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering,2023,5(4):54-64.
- [8] GEROLYMATOU E, TRIANTAFYLIDIS T. Shearing of materials with intermittent joints[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016,49:2689-2700.
- [9] 陈庆芝,张玉石,刘远明,等. 节理起伏角对非贯通节理岩体力学特性的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2020,16(2): 351-358.  
CHEN Qingzhi,ZHANG Yushi,LIU Yuanming,et al. Influence of joint undulation angle on mechanical properties of non-penetrated joint rock mass[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2020,16(2):351-358.
- [10] 张志飞,唐为民,贾洪彪. 不同粗糙度断续节理岩体直剪试验的颗粒流模拟[J]. 长江科学院院报, 2020,37(12):126-132.  
ZHANG Zhifei,TANG Weimin,JIA Hongbiao. Particle flow simulation of direct shear test on rock mass containing discontinuous joints with different roughness coefficients[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020,37(12):126-132.
- [11] FEREDHTENEJAD S,KIM J,SONG J J. Experimental study on shear mechanism of rock-like material containing a single non-persistent rough joint[J/OL]. Energies, 2021,14(4). DOI:10.3390/en14040987.
- [12] LIU T F,WANG G,WANG C S,et al. Experimental study on mechanical and acoustic emission characteristics of red sandstone containing combined flaws of hole-fissure under biaxial compression[J/OL]. Canadian Geotechnical Journal, 2025,62. DOI:10.1139/cgj-2024-0179.
- [13] 宫三朋,吴涛,高有进,等. 基于 FEM-DEM 弛张筛面和料群耦合系统动态特性研究[J]. 煤炭学报, 2023,48(增 1):381-

391.

GONG Sanpeng, WU Tao, GAO Youjin, et al. Study on dynamic characteristics of the coupling system of flip-flow screen panel and material group based on FEM-DEM[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(S1): 381-391.

- [14] WANG G, LIU T F, WANG C S, et al. Experimental and numerical study on the shear behaviour of standard JRC double-joint rock masses[J/OL]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2024, 183. DOI:10.1016/j.ijrmms.2024.105930
- [15] WU X L, WANG G, LI G X, et al. Research on shear behavior and crack evolution of symmetrical discontinuous rock joints based on FEM-CZM[J/OL]. Symmetry, 2020, 12(8). DOI:10.3390/sym12081314.
- [16] HAN W, JIANG Y J, Luan H J, et al. Fracture evolution and failure mechanism of rock-like materials containing cross-flaws under the shearing effect[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2020, 110(1). DOI:10.1016/j.tafmec.2020.102815.
- [17] 李军, 翟文宝, 陈朝伟, 等. 基于零厚度内聚力单元的水力裂缝随机扩展方法研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(1): 265-279.  
LI Jun, ZHAI Wenbao, CHEN Chaowei, et al. Research on random propagation method of hydraulic fracture based on zero-thickness cohesive element[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(1): 265-279.
- [18] 甄治国, 孙博文, 陈传平, 等. 灰岩三轴压缩力学特性试验及三维离散元模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(增2): 610-616.  
ZHEN Zhiguo, SUN Bowen, CHEN Chuanping, et al. Experimental and 3D DEM simulation on the triaxial compression mechanical behavior of limestone[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(S2): 610-616.
- [19] 赵环帅, 潘永泰, 余超, 等. 振动载荷对青砂岩冲击裂纹扩展及能量利用效率的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2024, 64(12): 2155-2165.  
ZHAO Huanshuai, PAN Yongtai, YU Chao, et al. Influence of vibration loading on impact crack propagation and energy utilization efficiency in green sandstone[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2024, 64(12): 2155-2165.

(责任编辑:吕海亮)