

DOI: 10.11779/CJGE20240361

循环荷载下粗糙节理剪切力学特性与剪切行程的关系研究

叶思哲^{1,2}, 张强^{*1,2}, 李涛^{1,2}, 代万里^{1,2}, 时林坡^{1,2}, 王红英^{1,2}

(1. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 为探究粗糙节理面受循环剪切作用下力学特性的演化规律, 采用自主研制的岩石节理双向动态循环剪切试验系统进行了循环剪切试验, 研究不同剪切行程下粗糙节理面的剪切应力、法向位移、剪胀角的演化规律。结果表明: ①正向剪切后的负向剪切峰值随着剪切距离的增大逐渐减小, 首次剪切负向峰值强度从 4.13 MPa 降低至 2.94 MPa; ②随着剪切行程的增加, 剪切刚度不断减小并趋于稳定, 正向剪切刚度均值从 473.69 MPa/m 降至 21.37 MPa/m, 负向剪切刚度均值从 413.82 MPa/m 下降至 8.95 MPa/m; ③剪切行程较小时, 法向位移随循环次数的增加趋于稳定; 剪切行程较大时, 随循环次数的增加, 法向位移会不断减小, 但剪应力、剪胀角等参数的变化已趋于稳定, 表明一定范围内的磨损作用对节理面力学性质的影响是有限的; ④剪胀角的变化趋势与节理面形貌相关, 总体上随着循环次数的增加剪胀角不断减小, 最后趋于稳定。

关键词: 岩石力学; 剪切试验; 节理面; 循环剪切; 剪胀角

中图分类号: TU458 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2025)08-1653-09

作者简介: 叶思哲(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩石力学方面的研究工作。E-mail: yesizhe@cumt.edu.cn。

Relationship between shear mechanical characteristics of rough joints and shear displacement under cyclic loading

YE Sizhe^{1,2}, ZHANG Qiang^{1,2}, LI Tao^{1,2}, DAI Wanli^{1,2}, SHI Linpo^{1,2}, WANG Hongying^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: To investigate the mechanical behavior of rough joint surfaces under cyclic shear, shear tests are conducted using the rock joint bi-directional dynamic cycling shear test system to study the evolution of shear stress, normal displacement and dilation angle of rough joint surfaces under different shear displacements. The results show that: (1) The peak negative shear stress after positive shear gradually decreases with an increase in the shear displacement, and the negative peak strength decreases from 4.13 MPa to 2.94 MPa. (2) The shear stiffness continuously decreases and tends to stabilize with an increase in the tangential displacement. The average shear stiffness of positive shear decreases from 473.69 MPa/m to 21.37 MPa/m, and that of negative shear decreases from 413.82 MPa/m to 8.95 MPa/m. (3) When the shear displacement is small, the normal displacement tends to reach a stable value with an increasing number of cycles. When the shear displacement is large, the normal displacement decreases continuously with an increasing number of cycles, but the changes in the shear stress, shear dilation angle and other parameters have already stabilized. It indicates that the influences of wear within a certain range on the mechanical properties of the joint surface are limited. (4) The change in the shear dilation angle is related to the morphology of joint surfaces. It decreases continuously with an increase in the cyclic times and finally tends to stabilize.

Key words: rock mechanics; shear test; joint surface; cyclic shear; shear dilation angle

0 引言

在地质运动作用下, 自然界岩石内部存在大量的

节理、裂隙结构, 这些弱面的存在会降低岩石的整体强度, 影响工程围岩稳定^[1-2]。节理岩体在受地震、爆

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52074269) This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.52074269).

收稿日期(Received): 2024-04-16 修回日期(Revised): 2024-08-15 接受日期(Accepted): 2024-10-12 网络出版日期(Online): 2024-10-13

*通信作者 (E-mail: qzhang@cumt.edu.cn)

破等荷载时,一方面会受到循环剪切作用,节理面的力学性质随着循环次数的增加而发生变化,产生复杂的非线性力学行为导致工程岩体失稳;另一方面,由于荷载的强度、烈度不同,对节理面产生了不同的剪切作用。荷载对节理岩体两方面作用表现为节理面受到的循环剪切行程和循环次数的不同,因此开展不同剪切行程的循环剪切试验对于评价工程围岩稳定性十分重要。

Lee 等^[3]研究了切向循环荷载花岗岩和大理岩预制节理剪切力学特性,获得了节理起伏角劣化与剪切耗散能间的幂指函数关系式。夏才初等^[4]通过对人工模拟节理在不同法向应力作用下的循环剪切试验,提出考虑循环剪切次数的节理峰值强度公式和JRC衰减经验公式。Jing 等^[5]采用类岩石材料复制的天然岩石节理试样进行了一系列的循环剪切试验,试验结果表明随着剪切变形的积累,岩石节理表面的粗糙度明显降低,岩石节理的强度也逐渐下降,并据此建立了岩石节理单一或循环剪切的二维本构模型。刘博等^[6-7]基于不同起伏角度、岩壁强度等级的人工节理试样在多种法向应力下的循环剪切试验结果,提出了表征节理表面凸起体形态变化过程的概括化破坏模型。Belem 等^[8-9]通过扫描等手段定量分析了 CNS 边界条件下岩石节理在循环剪切作用下的表面损伤,基于试验结果提出了两个广义的岩石节理表面粗糙度退化模型。Kana 等^[10]基于节理试样的循环剪切试验,分析了不同粗糙度节理试样循环剪切曲线的差异,并认为粗糙度是控制节理剪切力学特性的决定因素之一。班力壬等^[11]通过分析 CNL 条件下软岩节理剪切退化规律,提出适用于软岩的节理面剪胀曲线预测模型,认为最大可能剪胀角退化与节理面接触等效倾角退化有关,并量化了最大剪胀角演化规律。尹乾等^[12]以超硬石膏作为类岩石材料,在 CNS 边界条件下开展三维粗糙裂隙面剪切力学试验,研究了表面阻力系数的变化规律和法向应力演化路径。Homand 等^[13]研究了节理在循环剪切前后节理表面的磨损特征,提出用剪切前后的节理破坏表面面积变化来衡量节理磨损程度。刘日成等^[14]在 CNS 边界条件下开展了循环剪切试验,以法向刚度作为变量研究节理面力学特性。邓华锋等^[15]分析了节理面在重复剪切作用下的剪切力学特性及微观形貌特征劣化规律,发现抗剪强度劣化行为主要出现在前 2 次剪切过程中。

为研究节理岩石在地震、扰动等周期性荷载作用下节理面损伤破坏行为,开展了恒法向应力条件下不同剪切行程(2.5~15.0 mm)的循环剪切试验,循环次数 N 为 10 次,分析了循环剪切荷载作用下三维粗糙节理面的剪切应力、法向位移、剪胀角等力学特性

的变化规律及破坏机理,研究成果可为工程围岩稳定评价提供参考。

1 试验概述

1.1 试验设备

试验采用自主研制的岩石节理双向动态循环剪切试验系统进行^[16],如图 1 所示。该试验仪器主要由液压动作模块、伺服控制模块和剪切工装模块组成,垂向和上、下剪切盒各由一独立双向液压作动器驱动,每个作动器可提供最大 500 kN 的荷载;水平方向左右两侧及法向在试样四角落均设有位移引伸计,位移引伸计的精度为 0.1 μm,量程为 50 mm。试样尺寸为 200 mm×100 mm×100 mm,采用固定上剪切盒、推拉下剪切盒的方式进行循环剪切试验。

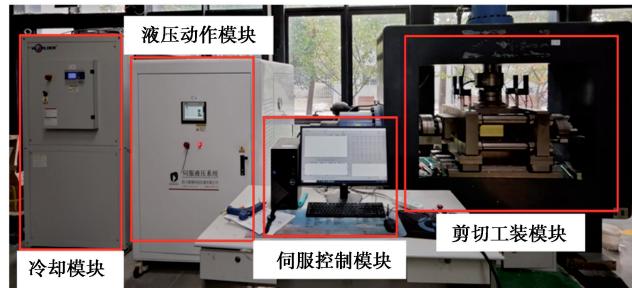


图 1 岩石节理双向动态循环剪切试验系统

Fig. 1 Rock joint bi-directional dynamic cycling shear test system

1.2 试样制备

试验采用以超硬高强石膏制作的相同节理面相貌试样进行试验,石膏与水按照质量比为 4:1 进行拌和,测得的自然固化完整石膏试样黏聚力和摩擦角分别为 4.7 MPa 和 41.5°,其强度特征与红砂岩类似。试验采用的节理表面采用红砂岩劈裂制备,然后利用硅胶对该节理面进行拓印形成硅胶模型。利用硅胶模型和试样模具通过两次翻模可制备一组试样。制备过程中利用振动台去除石膏内部的气泡,并对试样表面的脱模剂进行清洗,充分养护后备用。

采用高精度非接触式三维激光扫描仪对节理表面进行数字化扫描,得到节理面三维形貌如图 2 所示。

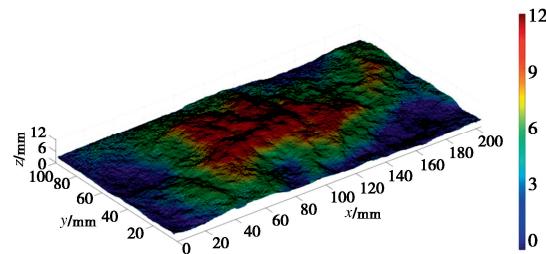


图 2 三维扫描节理面形貌

Fig. 2 Three-dimensional scanning of joint surface

根据国际岩石力学与工程学会建议方法评价节理面粗糙度系数^[17],沿 x 方向按 1 mm 间距取得二维剖

面, 再沿 y 方向对所取剖面按 0.5 mm 间距取值, 并根据下式计算粗糙度系数(JRC):

$$\text{JRC} = 32.2 + 32.47 \lg \sqrt{\frac{1}{M} \sum \left(\frac{z_{i-1} - z_i}{x_{i-1} - x_i} \right)^2} \quad (1)$$

式中: M 为沿着 x 方向选取的样本点个数; x_i 和 z_i 为二维轮廓线上样本点的坐标。

将计算得到的 JRC 平均值定义为节理面粗糙度系数, 本试验选取节理面的粗糙度系数为 $12.40^{[18]}$ 。

1.3 试验方案

本试验在恒法向应力条件下进行, 法向应力设置为 5 MPa 。在开始循环剪切试验之前, 已进行节理岩石直剪试验确定各项基本力学参数。峰值剪切强度出现在 $u = 1.6 \text{ mm}$ 处, 在 $u \geq 15 \text{ mm}$ 后剪切应力已趋于稳定。根据直剪试验结果, 循环剪切试验最大剪切行程分别设置为 $2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 15.0 \text{ mm}$ 。具体加载方式为: ①将试样固定在剪切盒内, 保证试样上、下块左右两侧均与剪切盒紧密固定, 设置水平方向剪切力始终保持为零; ②按 0.1 MPa/s 力控制方式将法向应力增加至 5.0 MPa , 改变上剪切盒为位移固定约束; ③以位移控制方式推动下剪切盒至目标距离 u_{\max} , 反向移动至 $-u_{\max}$, 然后正向移至初始位置, 此过程为一个完整循环, 每个试样重复该循环过程 10 次。

2 试验结果分析

2.1 剪切应力-位移曲线

图 3 为不同剪切行程下节理试样循环剪切应力-位移曲线。以剪切行程为 $2.5, 7.5, 15 \text{ mm}$ 为例, 循环剪切曲线整体表现较为一致, 但不同剪切行程导致循环剪切过程中节理表面形貌磨损程度存在差异, 使得剪切应力 τ 呈现不同的演化规律。在循环剪切的全过程中, 剪切应力并没有完全重合, 而是相较于上一循环略有增大, 同时增量逐渐减小并趋于稳定。在正向、负向剪切过程中, 不同循环次数的剪切试验前半程应力值有较明显差异, 在剪切后半程逐渐收敛并趋于相同值。

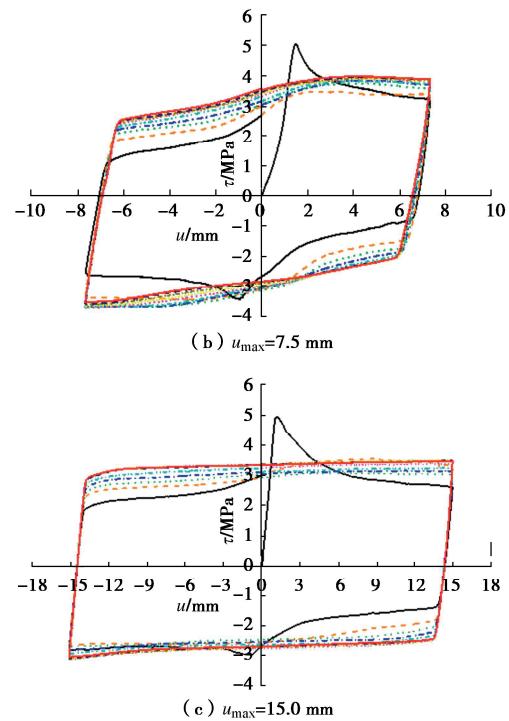
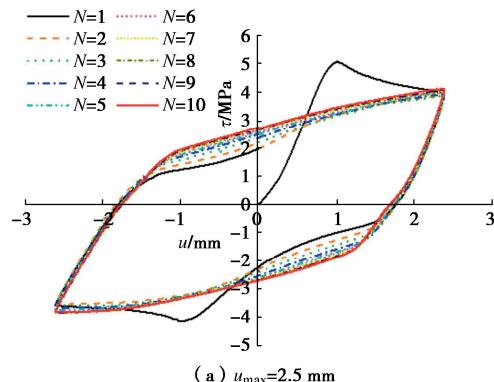
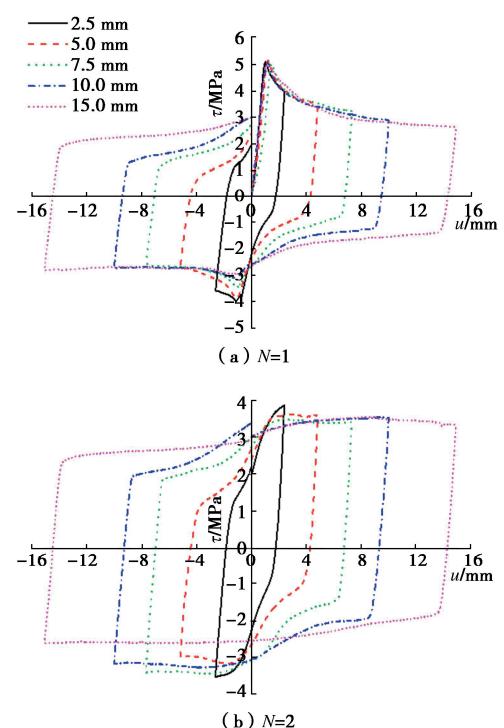


图 3 剪切应力-位移曲线

Fig. 3 Shear stress-displacement curves

图 4 为试样在不同循环次数条件下剪切应力-位移曲线。在循环过程中只有首次循环分别在正向和负向剪切出现了明显峰值。首次正向剪切过程中, 各组试样剪切应力曲线走势大致相同, 表明各组试样具有良好的均质性。相同循环次数条件下, 在剪切行程较小时, 剪切应力的上升趋势迅速, 随着剪切行程的增加, 剪切应力变化趋势逐渐平缓, 剪切应力-位移曲线所围成的图形接近矩形。



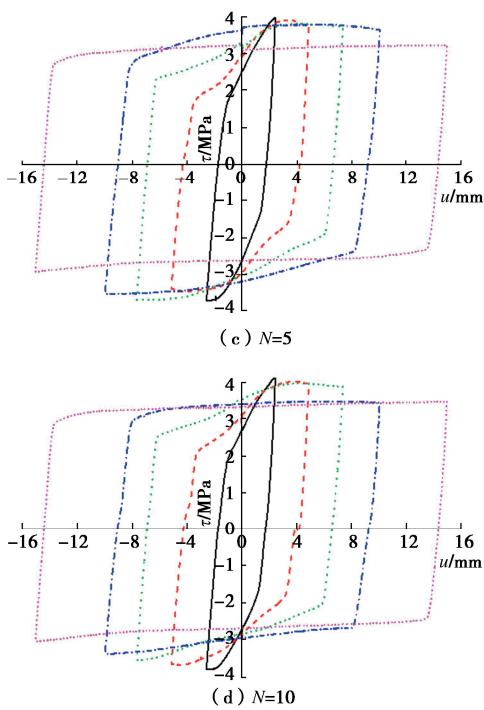


图 4 不同循环次数剪切应力-位移曲线

Fig. 4 Shear stress-shear displacement curves under different cycles

在 $N \geq 2$ 的循环中, 剪切行程为 5.0 mm 的试样在 $u = 2.9$ mm 处达到本次循环内的最大值, 剪切行程为 7.5, 10.0 mm 的试样在正向剪切位移 $u = 4.9$ mm 处出现了较小的应力下降, 其原因可能为节理面正向 $u = 2.9$ mm 存在大凸起体, 在剪切过程中沿此凸起向上爬坡, 在 $u = 4.9$ mm 处完整经过此凸起, 应力出现了小幅度的下降。剪切行程为 15.0 mm 时, 较大的剪切行程使此凸起在剪切过程中被磨平, 所以未出现上述现象。不同组试样在此凸起体附近的剪切行为有差异, 其中 5.0 mm 应力下降现象最为明显, 7.5, 10.0 mm 组存在不明显的应力下降, 这与 15.0 mm 组结果相对应。说明随着剪切行程的增大, 节理面受到了更严重的磨损作用, 表现出不同的力学性质。2.5 mm 组全剪切过程仍处于此凸起的爬坡阶段, 故未出现应力下降的现象。

2.2 剪切应力演化规律

随着剪切过程的进行, 在应力-位移曲线中沿顺时针围成闭合图形。将图形左下、右上定义为剪切终点, 左上、右下定义为拐点, 将拐点与终点连线的斜率定义为等效剪切刚度。

(1) 峰值应力

图 5 为不同剪切行程试样在首次循环中的正向与负向剪切峰值强度。如图 4 (a) 所示, 正向剪切峰值应力出现在 $u = 1.60$ mm 处, 负向剪切峰值应力出现在 $u = -0.80$ mm 处。正向峰值强度大致相同, 各组试验平均峰值强度 $\bar{\tau} = 5.06$ MPa。负向剪切峰值强度产

生明显差异, 不同剪切行程对应的负向峰值应力分别为 4.13, 3.88, 3.42, 3.10, 2.94 MPa。表明正向剪切行程越大, 负向峰值强度越低。这是因为部分凸起体同时在正向、负向剪切中提供抗剪能力, 更大的正向剪切位移使这些凸起体被磨损, 显著降低了负向剪切峰值强度。因此, 负向剪切峰值强度的最大值应出现在初始剪切方向为负向的剪切过程中, 此时节理面未受到剪切作用; 此外, 负向剪切峰值强度不会随着剪切距离的增加而无限减小, 其数值大小应接近节理面最终残余强度。结合室内试验结果, 负向峰值强度呈非线性变化趋势, 曲线宜采用指数形式进行拟合, 得到表达式如下:

$$\tau = 2.508 + 2.244e^{-0.117u_{max}} \quad (2)$$

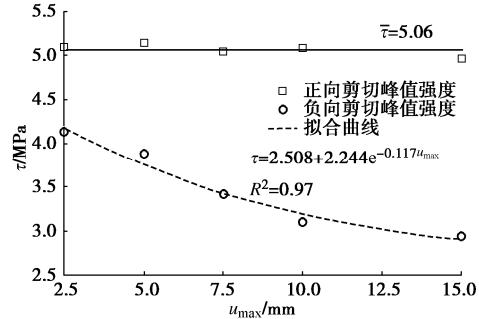


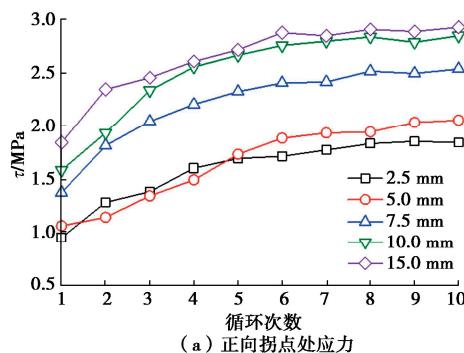
图 5 首次循环内峰值应力变化规律

Fig. 5 Variation of peak stress in first cycle

(2) 拐点应力与终点应力

在循环过程中, 剪切行程增加至目标值后回拉, 剪切应力卸载至 0, 随后沿反向加载, 开始负向剪切。在负向剪切的初始段中, 从应力为 0 处加载至拐点的过程处于线弹性加载阶段, 当接近拐点时, 弹性段结束, 进入弹塑性变形阶段, 此时剪切应力曲线的斜率逐渐降低, 应力的变化趋势平滑且连续, 没有明显的应力下降。弹塑性变形阶段结束后, 节理面进入滑移阶段, 剪切应力变化趋于平缓。拐点处应力值随剪切行程和循环次数的变化趋势如图 6 所示。

在经过 10 次循环后, 不同剪切行程的正向剪切拐点应力分别上升了 92.70%, 88.99%, 84.05%, 79.24%, 57.83%, 负向剪切拐点应力分别上升了 161.29%, 137.66%, 110.41%, 94.85%。



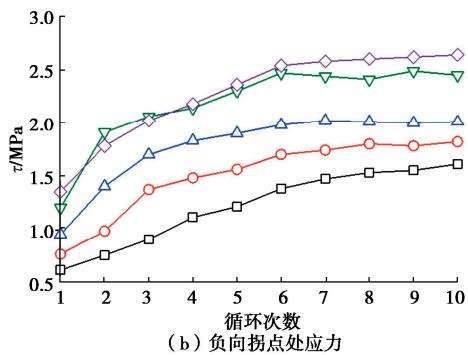


图 6 拐点应力随循环次数变化趋势

Fig. 6 Variation in inflection point stress with number of cycles

图 4, 6 表明: 当剪切行程较小时, 拐点处应力值较低, 拐点前线弹性段较短, 随着剪切行程增加, 拐点应力大小和弹性段长度逐渐增加。这表明节理面开始宏观滑动时施加的力随着剪切行程的增加而增加。为解释这一现象, 提出如图 7 所示的组合凸起磨损破坏模型。当循环次数较小时, 节理面上小凸起体还未完全磨损, 在线弹性段节理面沿小凸起体爬坡, 故循环次数较小时拐点应力低。随着循环次数的增加, 小凸起体被磨损, 起伏程度降低, 同时在剪切过程中, 磨损产生的碎屑会填补节理面的间隙, 各种因素的共同作用使小凸起体剩余部分和大凸起体重新组合。新凸起体有更大的受剪面积, 起伏程度略有降低, 线性段能提供更强的抗剪能力, 表现为拐点处应力值随循环次数逐渐增大。对于不同剪切行程而言, 剪切行程较小时, 剪切只对部分节理面产生磨损作用, 存在未被完全磨平的小凸起体, 这些凸起体提供的抗剪能力较低, 与试验结果中拐点应力值低的表现一致。剪切行程较大时, 节理面磨损程度不断增加, 此时小凸起体被完全磨平, 节理面抗剪能力主要由大凸起体提供, 故在剪切初始弹性阶段提供了更强的抗剪能力, 表现为拐点应力值随剪切行程的增加而增大。

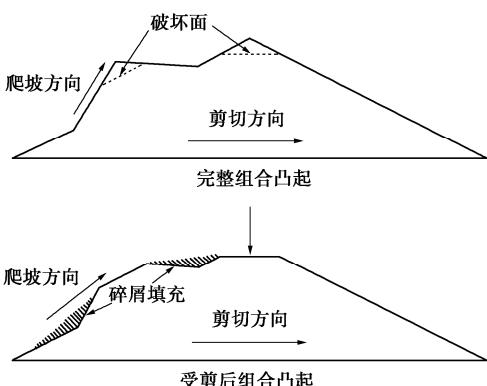


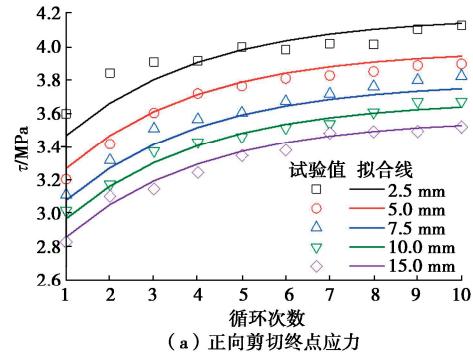
图 7 节理面组合凸起体破坏形态

Fig. 7 Failure patterns of composite asperity of rock joints

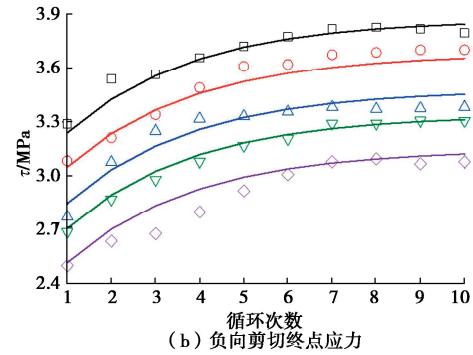
不同剪切行程条件下终点应力的变化趋势如图 8 所示。随着循环次数的增加, 终点应力不断上升, 最后趋于稳定值, 不同剪切行程的正向剪切终点应力分

别上升了 11.54%, 21.61%, 22.91%, 21.81%, 24.44%, 负向剪切拐点应力分别上升了 11.89%, 26.07%, 21.93%, 22.88%, 18.31%。这是因为节理面受剪切作用后形貌发生改变, 同时受到剪切碎屑填补作用的影响, 节理面总体起伏程度降低, 上、下面接触面积增大, 表现出剪切应力值出现逐渐增大。循环次数相同时, 不同剪切行程的终点应力呈现随剪切行程的增加而减小的趋势。在首次循环后, 节理面部分微凸体被破坏, 所以随着循环剪切次数的增加没有明显的峰值出现, 由于剪切行程的不同, 对节理面产生不同的磨损效果。在剪切行程较小时, 剪切只能对小凸起体和大凸起体的爬坡阶段进行磨损, 没有完全越过大凸起体, 磨损的区域有限, 节理面仍保留有一定的抗剪能力, 所以经过多次循环剪切后终点应力值较大。剪切行程较大时, 剪切过程会完全越过部分凸起, 在多次循环剪切后不仅将小凸起体完全磨平, 也对大凸起体产生了显著的磨损作用, 降低了节理面整体抗剪能力, 在应力-位移中表现为终点处应力值较低。根据终点应力变化趋势, 采用指数形式进行拟合, 拟合曲线如下:

$$\left. \begin{array}{l} \tau_{\text{正}} = 3.51 + 1.29e^{-0.20u_{\max}} - 0.71e^{-0.32(N-1)}, \\ \tau_{\text{负}} = 2.92 + 1.39e^{-0.12u_{\max}} - 0.63e^{-0.35(N-1)} \end{array} \right\} \quad (3)$$



(a) 正向剪切终点应力



(b) 负向剪切终点应力

Fig. 8 Variation in end stress with number of cycles

在循环剪切试验过程中, 剪切行程的不同导致拐点应力和终点应力呈现不同的变化趋势。而循环次数的增加加剧了节理面的磨损效果, 同时在剪切过程中凸起磨损产生的碎屑被填入节理面的凹陷中, 这在一定程度上增大了节理面的接触面积, 进而导致拐点应

力和终点应力的增加。以剪切行程为 5.0 mm 的正向剪切过程为例, 拐点应力上升了 88.99%, 终点应力上升了 21.61%, 可见拐点应力的变化幅度远大于终点应力的变化幅度, 认为对拐点应力的变化主要原因是节理面上的小凸起体形貌发生改变, 相比之下, 对终点应力的变化则主要受节理面再填充接触面积发生改变所影响。

2.3 剪切刚度演化规律

在剪切过程中, 剪切行程越小, 拐点应力越小, 终点应力越大。随着剪切行程的增加, 拐点应力逐渐增大, 而终点应力逐渐减小, 拐点应力与终点应力平均值变化趋势如图 9 所示。这一趋势表明随着剪切的增加, 拐点应力与终点应力变化趋势完全相反, 揭示了剪切过程中应力变化规律随剪切行程变化而出现的显著差异。

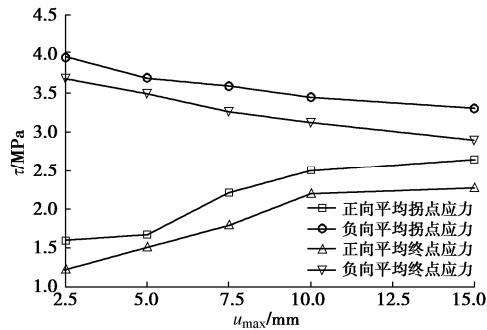


图 9 平均拐点应力和终点应力变化趋势

Fig. 9 Variation in average inflection point stress and endpoint stress with number of cycles

将终点应力与拐点应力的差值与剪切距离之比定义为剪切刚度, 其物理意义为终点应力与拐点应力连线的斜率。由于卸载段和线弹性加载段的剪切位移值很小, 不影响剪切刚度的计算结果, 因此可忽略不计, 在计算过程中剪切距离取 $2u_{\max}$ 。计算公式为

$$k_d = \frac{\Delta \tau}{2u_{\max}} \quad (4)$$

式中: k_d 为等效剪切刚度; $\Delta \tau$ 为终点应力和拐点应力的差值; u_{\max} 为剪切行程。

如图 10 所示, 总体上剪切刚度随着循环次数的增加稍有减小。在剪切行程为 2.5 mm 时, 剪切刚度表现为随循环次数增加逐渐下降, 在 10 次循环剪切后, 正向剪切的剪切刚度从 542.53 MPa/m 降低至 455.21 MPa/m, 负向剪切时剪切刚度从 444.16 MPa/m 下降至 390.77 MPa/m, 这说明较小的剪切行程在一次循环内对节理面产生的磨损作用有限, 随着循环次数的增加能够持续削弱节理面的抗剪能力。而其他组试验中剪切刚度的变化主要集中在前 3 次循环, 继续循环对剪切刚度产生影响很小。表明节理面受磨损程度与剪切行程有关, 在前 3 次循环中将节理面大部分提供抗剪能力的凸起体破坏, 表现为剪切刚度变化较平稳。在

不同剪切行程条件时剪切刚度差距较大, 正向剪切过程中, 不同剪切行程的剪切刚度分别为 542.53, 229.94, 125.68, 76.33, 29.37 MPa/m, 负向剪切过程中剪切刚度分别为 444.16, 217.45, 108.89, 69.99, 25.12 MPa/m。剪切刚度的变化趋势随着剪切行程的增加而迅速减小, 最后趋于不变。这说明剪切行程的增大使节理面受磨损程度逐渐提高, 抗剪能力迅速下降, 但逐渐趋于稳定, 不会因为增大剪切行程而继续降低。

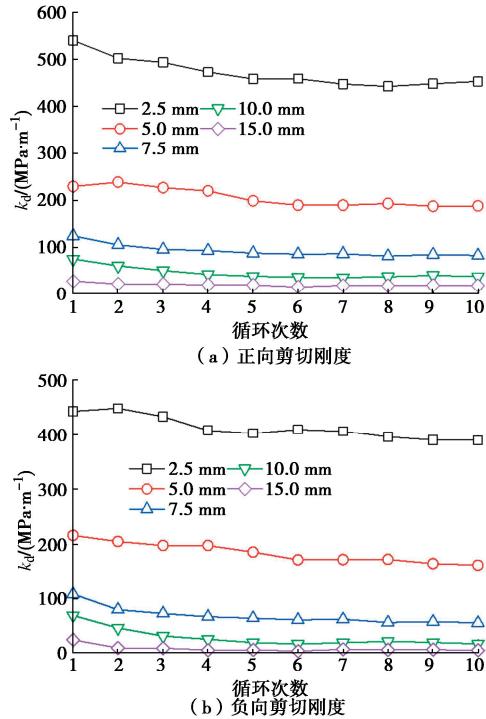


图 10 剪切刚度随循环次数变化趋势

Fig. 10 Variation in shear stiffness with number of cycles

2.4 法向变形特征

(1) 法向位移-剪切位移曲线

法向位移 v 变化如图 11 所示。以剪切行程 2.5, 7.5, 15 mm 为例。在剪切初始阶段, 法向位移出现负值, 这是因为节理处于弹性变形阶段。随着剪切位移的增加, 弹性阶段结束, 法向位移停止向负向增加, 节理面沿凸起向上爬坡, 法向位移逐渐增大, 出现剪胀现象。剪切至目标距离后开始负向剪切, 此时爬坡过程结束, 开始后退, 法向位移逐渐减小。负向剪切开始后, 直到剪切位移为 0 时, 节理面回到初始状态, 然后继续负向剪切, 沿负向出现剪胀现象。由于正向、负向剪切时节理面相对形貌不同, 所以正向和负向剪切过程中, 剪切位移-法向位移曲线并不对称, 负向剪切的剪胀现象比正向剪切更加明显。在上述过程中, 法向位移曲线在整体上呈现“V”字型, 在剪切位移绝对值最大处法向位移出现最大值。随着循环次数的增加, 节理面凸起不断被磨损, 法向位移仍为负值, 但剪胀现象依然存在。这种现象说明节理面被磨损后起伏程度有很大的降低。

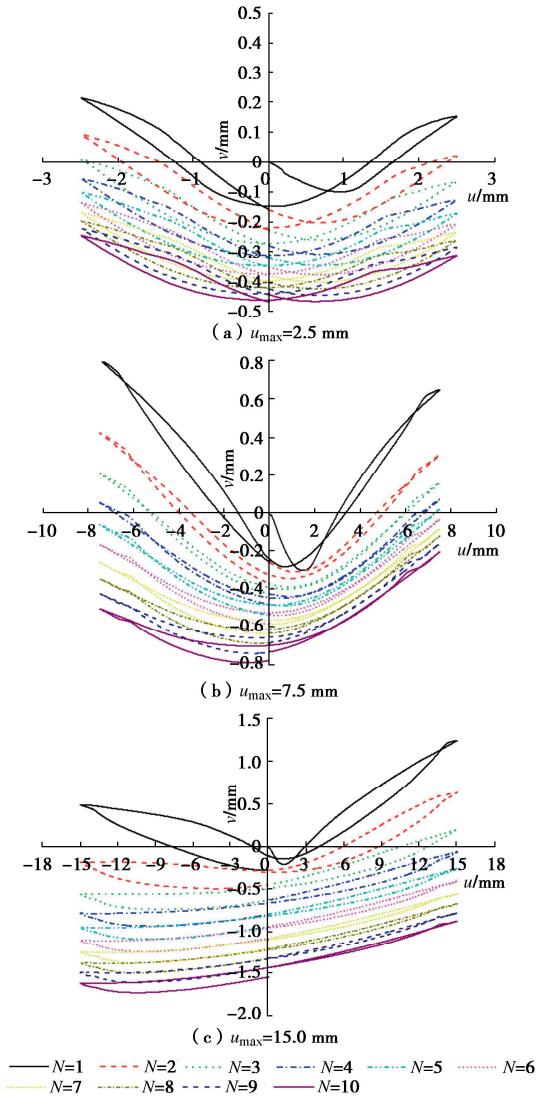


图 11 法向位移-剪切位移曲线

Fig. 11 Normal displacement-shear displacement curve

随着剪切行程和循环次数的增加, 节理面凸起逐渐被磨损、剪断, 在法向上表现为向下运动, 节理面上的小凸起体被磨平, 大凸起体整体起伏程度降低。试验结果表明剪切行程显著影响节理面的受磨损程度, 剪切行程越大节理面整体向下位移的现象越明显。在经过 10 次循环剪切后, 节理面各项力学参数已基本稳定, 节理面所有小凸起体已被破坏, 力学行为转为由大凸起体提供, 而大凸起体在承受一定程度的磨损时, 力学行为仍可保持稳定。

(2) 剪胀角演化规律

剪胀角是用于描述试样剪胀特性的物理量。在剪切过程中, 节理面产生了一部分可以恢复的弹性剪切位移和一部分不可恢复的剪切位移。要正确计算剪胀角, 需要得到试样在直剪过程中产生塑性形变量。节理面剪胀角计算公式为

$$\varphi = \arctan(\Delta v_p / \Delta u_p) \quad (5)$$

式中: φ 为剪胀角; Δv_p , Δu_p 分别为塑性法向位移增量和塑性剪切位移的增量。

随着循环剪切的进行, 在法向和切向上产生的塑性位移在不断变化。为更准确描述剪胀角变化规律, 研究者们采用了多种不同方法, 例如取剪切应力-位移曲线上局部数据计算剪胀角, 对全过程所有剪胀角的均值作为本次循环的剪胀角进行分析^[6]。或假设剪切过程中任意一点 A 所对应的剪切刚度 k_A 的大小和峰前弹性段的剪切刚度相等, 得到 A 点处塑性剪切位移的大小, 来计算剪胀角^[2]。

本文对剪切过程中应力为 0 的点进行分析。在每次循环中剪切位移增加至目标值后开始卸载, 正向、负向剪切的剪切应力-位移曲线会两次经过坐标轴, 此时这两点的剪切应力为 0, 不存在 u_e , 对应的剪切位移全部为 u_p 。对于法向位移, 基于弹性力学理论, 认为在剪切峰值出现前节理面处于弹性段, 峰值强度后在法向上开始出现塑性位移, 同时忽略剪切行为对法向塑性位移的影响, 取峰后段法向位移作为循环剪切过程中的塑性法向位移:

$$\nu_p = \nu - \nu_e \quad (6)$$

如图 12 所示, 剪切应力为 0 处的剪胀角随着循环次数的增加而逐渐减小, 在循环次数较小时各组剪胀角均呈急剧下降趋势, 在这一过程中节理面上凸起体不断被磨损, 剪胀现象逐渐减弱。随着循环次数的增大, 正向剪切过程中的剪胀角在经过多次循环剪切后趋于同一值。此时剪胀角的大小与节理面微凸体无关, 而是由宏观节理面起伏程度决定。负向剪切过程中剪胀角的变化趋势与正向剪切类似, 随着循环次数的增加剪胀角逐渐减小。由于剪切行程不同, 剪胀角的大小存在一定差异, 剪切行程较小的试样剪胀效应更为明显。

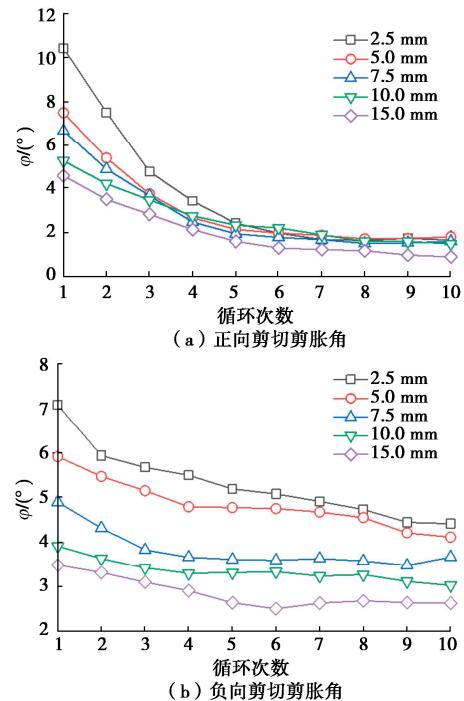


图 12 节理面剪胀角随循环次数变化趋势

Fig. 12 Variation in dilatancy angles with number of cycles

2.5 节理面表面破坏特征

剪切结束后对试样拍照, 通过图像处理软件对照片进行二值化处理, 如图 13 所示。其图 13 中黑色表示受剪区域, 计算受剪面积占节理面总面积的比值:

$$R_s = \frac{A_1}{A} \quad . \quad (7)$$

式中: R_s 为节理面剪切面积比; A_1 为受剪面积; A 为节理面总投影面积。

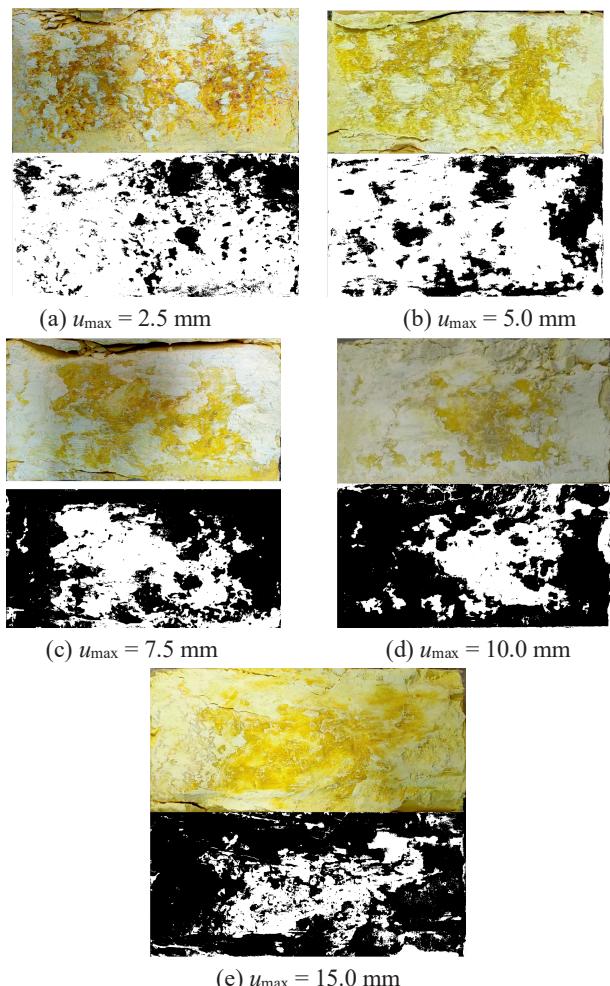


图 13 不同剪切行程节理面破坏形态

Fig. 13 Failure characteristics of joint surfaces

图 14 为不同剪切行程条件下剪切面积比 R_s 的变化曲线。剪切行程不同导致节理面受剪区域不同, 总体上剪切行程越长, 节理面受剪面积逐渐增加, R_s 从 22.65% 增加至 71.89%。其中 R_s 在剪切行程从 5.0 mm 增加至 7.5 mm 时变化最快, 表明在这一范围内节理面受剪面积快速增加。随着剪切行程的继续增加, 这一变化速度逐渐变慢, 在增加至 15.0 mm 后变化速度明显变慢, R_s 趋于稳定。由图 2, 13 可知, 随着剪切行程的变化, 受剪区域不完全相同, 这是因为不同的剪切行程对应磨损的凸起体不同, 随着循环次数的增加, 这一磨损过程被强化, 导致最终节理面受磨损区域出现了较大差距。

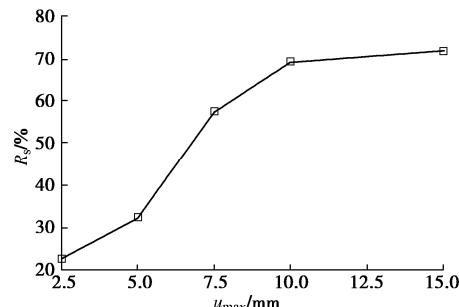


图 14 剪切面积比变化特征

Fig. 14 Variation in ratio of shear area of joint surfaces

3 结 论

通过三维粗糙节理面循环剪切试验, 对节理面剪切应力、法向位移、剪胀角等力学特性的演化规律进行了探究, 得到以下 3 点结论。

(1) 由于不同剪切行程对节理面磨损程度不同, 在首次循环内, 负向峰值强度随着剪切行程的增加而非线性地减小, 且负向峰值强度应存在最小值, 大小应趋于节理面最终残余强度。

(2) 随着剪切行程的增加, 节理面抗剪强度、剪切终点应力不断降低, 而拐点处应力逐渐增加。同时, 随着循环次数的增加, 等效剪切刚度逐渐降低至稳定值, 表明节理面残余的抗剪能力不会因为循环次数的继续增加而减小。

(3) 不同剪切行程的试样在 10 次循环后, 正向剪切过程的剪胀角趋于同一值, 负向剪切过程的剪胀角呈梯度变化, 总体上下降速度呈先快后慢的趋势, 表明剪胀角的劣化趋势与节理面形貌有关。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 叶思哲和张强参与实验设计和实验操作; 李涛、代万里、时林坡、王红英参与论文的写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。YE Sizhe and ZHANG Qiang conceptualized the research framework and performed the experimental work. LI Tao, DAI Wanli, SHI Linpo, and WANG Hongying contributed to the manuscript preparation through substantive drafting and critical revisions. All authors have thoroughly reviewed the final manuscript and unanimously approved its submission for publication.

参考文献:

- [1] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2013. (CAI Meifeng. Rock Mechanics and Engineering[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese))
- [2] 权晓威. 多产状岩石节理剪切力学特性研究[D]. 徐州: 中

- 国矿业大学, 2020. (QUAN Xiaowei. Study on Shear Mechanical Properties of Joints in Productive Rocks[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020. (in Chinese))
- [3] LEE H S, PARK Y J, CHO T F, et al. Influence of asperity degradation on the mechanical behavior of rough rock joints under cyclic shear loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, **38**(7): 967-980.
- [4] 夏才初, 宋英龙, 唐志成, 等. 反复直剪试验节理强度与粗糙度变化的研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, **43**(9): 3589-3594. (XIA Caichu, SONG Yinglong, TANG Zhicheng, et al. Shear strength and morphology characteristic evolution of joint surface under cyclic loads[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, **43**(9): 3589-3594. (in Chinese))
- [5] JING L, STEPHANSSON O, NORDLUND E. Study of rock joints under cyclic loading conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1993, **26**(3): 215-232.
- [6] 刘博, 李海波, 刘亚群. 循环剪切荷载作用下岩石节理变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(9): 2475-2481, 2488. (LIU Bo, LI Haibo, LIU Yaqun. Experimental study of deformation behavior of rock joints under cyclic shear loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(9): 2475-2481, 2488. (in Chinese))
- [7] 刘博, 李海波, 刘亚群, 等. 循环荷载作用下节理凸起体概化破坏模型及剪切强度计算分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(增刊2): 3000-3008. (LIU Bo, LI Haibo, LIU Yaqun, et al. Generalized failure model and shear strength calculation analysis of jointed convex body under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(S2): 3000-3008. (in Chinese))
- [8] BELEM T, HOMAND-ETIENNE F, SOULEY M. Quantitative parameters for rock joint surface roughness[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2000, **33**(4): 217-242.
- [9] BELEM T, SOULEY M, HOMAND F. Method for quantification of wear of sheared joint walls based on surface morphology[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2009, **42**(6): 883-910.
- [10] KANA D D, FOX D J, HSIUNG S M. Interlock/friction model for dynamic shear response in natural jointed rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1996, **33**(4): 371-386.
- [11] 班力壬, 杜伟升, 候宇航, 等. 考虑实际接触三维粗糙度退化的软岩节理剪胀规律预测模型[J/OL]. 岩土工程学报, 2024, **46**(5): 1008-1017. (BAN Liren, DU Weisheng, HOU Yuhang, QI Chengzhi, TAO Zhigang. Prediction model for dilation behaviors of soft rock joints considering degradation of actual contact 3D roughness[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, **46**(5): 1008-1017. (in Chinese))
- [12] 尹乾, 靖洪文, 孟波, 等. 恒定法向刚度条件下三维粗糙裂隙面剪切力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, **39**(11): 2213-2225. (YIN Qian, JING Hongwen, MENG Bo, et al. Shear mechanical properties of 3D rough rock fracture surfaces under constant normal stiffness conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, **39**(11): 2213-2225. (in Chinese))
- [13] HOMAND F, BELEM T, SOULEY M. Friction and degradation of rock joint surfaces under shear loads[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2001, **25**(10): 973-999.
- [14] 刘日成, 尹乾, 杨瀚清, 等. 恒定法向刚度边界条件下三维粗糙节理面循环剪切力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, **40**(6): 1092-1109. (LIU Richeng, YIN Qian, YANG Hanqing, et al. Cyclic shear mechanical properties of 3D rough joint surfaces under constant normal stiffness(CNS) boundary conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, **40**(6): 1092-1109. (in Chinese))
- [15] 邓华锋, 肖瑶, 李建林, 等. 重复剪切作用下节理强度和形貌特征劣化规律[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(增刊2): 183-188. (DENG Huafeng, XIAO Yao, LI Jianlin, et al. Deterioration law of joint strength and morphological characteristics under repeated shear[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(S2): 183-188. (in Chinese))
- [16] GU Q X, ZHANG Q, YE S Z, et al. Experimental investigation on the shear mechanical behavior and energy evolution of sandstone subjected to pre-peak cyclic loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2024, **177**: 108374.
- [17] Isrm. Rock characterization, testing and monitoring-ISRM suggested methods. In: Brown ET(Ed) Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses[M]. Pergamon: Oxford University Press, 1981: 3-52.
- [18] GU Q X, ZHANG Q, YE S Z, et al. Shear fracture behavior and damage constitutive model of rock joints considering the effect of pre-peak cyclic loading[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2024, **130**: 104289.