

DOI: 10.11779/CJGE20220682

水动力-溶蚀作用下灰岩结构面剪切力学特性

杨忠平^{1,2,3}, 向宫固^{1,2,3}, 赵 茜^{1,2,3}, 刘新荣^{1,2,3}, 赵亚龙^{1,2,3}

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室(重庆大学), 重庆 400045;

3. 库区环境地质灾害防治国家地方联合工程研究中心(重庆), 重庆 400045)

摘 要: 中国西南地区溶蚀岩体分布广泛。岩溶作用下, 结构面强度持续劣化是影响岩体稳定性的重要因素之一。为探究溶蚀作用下结构面的演化特征, 揭示岩溶作用对灰岩结构面剪切力学特性的影响, 以武隆鸡尾山溶蚀岩质坡体为例, 采用室内结构面渗流溶蚀试验和结构面直接剪切试验, 并结合三维形貌光学扫描技术, 阐明了水动力-溶蚀作用灰岩结构面的表观演化模式和剪切力学特性演化规律, 揭示了水动力-溶蚀作用下结构面劣化机理。结果表明: 灰岩结构面在化学溶蚀和物理冲蚀双重作用下, 先后经历“点式选择性溶蚀—细槽线式稳定渗流溶蚀—优势管道流强烈溶蚀—壁面缓慢溶蚀”4个阶段; 溶蚀过程中, 灰岩结构面表面粗糙度指数和溶蚀率指标随时长增大而增大, 并呈收敛趋势; 直剪过程中, 溶蚀结构面表现出初期锁固、后期剪摩阻滑的两阶段特征, 且时间越长、应力水平越高, 剪切硬化特征越显著; 随溶蚀时间增长, 结构面主要抗滑结构由刚性稳定微凸体发展为细微溶槽并最终演变为深大岩溶管道, 其极限抗剪强度呈现出“先减小, 后增大”的趋势; 基于 Barton 公式建立了灰岩溶蚀结构面抗剪强度预测模型。

关键词: 岩溶; 结构面; 剪切特性; 强度预测模型; 粗糙度; 鸡尾山

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)08-1555-09

作者简介: 杨忠平(1981—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事环境岩土与边坡稳定性方面的教学与研究工作。E-mail: yang-zhp@163.com。

Shear mechanical properties of limestone structural plane under hydrodynamic force-dissolution

YANG Zhongping^{1,2,3}, XIANG Gonggu^{1,2,3}, ZHAO Qian^{1,2,3}, LIU Xinrong^{1,2,3}, ZHAO Yalong^{1,2,3}

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction

of Cities in Mountain Area (Chongqing University), Ministry of Education, Chongqing 400045, China; 3. National Local Joint

Engineering Research Center for Prevention and Control of Environmental Geological Disasters in Reservoir Area (Chongqing),

Chongqing 400045, China)

Abstract: The dissolved rock mass is widely distributed in Southwest China. Under the action of karst, the continuous deterioration of structural plane strength is one of the important factors affecting the stability of rock mass. In order to explore the evolution characteristics of structural plane under dissolution and to reveal the influences of karstification on the shear mechanical properties of limestone structural plane, based on the example of the dissolution rock slope of Jiwei Mountain in Wulong, the apparent evolution patterns of limestone structural plane and the evolution laws of shear mechanical properties as well as the deterioration mechanism of structural plane are expounded by using the indoor seepage dissolution and direct shear tests on the structural plane and the three-dimensional morphology optical scanning technology. The results show that under the dual action of chemical corrosion and physical erosion, the limestone structural plane has experienced four stages: point selective dissolution, thin groove linear stable seepage dissolution, strong dissolution of dominant pipeline flow and wall slow dissolution. During the dissolution process, the surface roughness index and dissolution rate index of limestone structural plane increase with the increase of dissolution time, and exhibit a convergence trend. During the direct shear process, the corrosion structural plane shows two-stage characteristics of the initial locking and the later shear friction and sliding, and the longer the corrosion time and the higher the stress level, the more obvious the shear hardening characteristics. With the increase of the corrosion time, the main anti-sliding structure of the structural plane develops from a rigid stable microconvex to a fine solution groove and finally evolves into a deep karst pipeline,

基金项目: 国家重点研发计划课题(2021YFB3901402; 2018YFC1504802); 国家自然科学基金项目(41972266)

收稿日期: 2022-05-26

and its ultimate shear strength shows a trend of “first decreasing, then increasing”. The prediction model for shear strength of limestone dissolution structural plane is established based on the Barton's formula.

Key words: karst; structural plane; shear characteristic; strength prediction model; roughness; Jiwei Mountain

0 引言

结构面是漫长地质演化过程中形成的各种不连续地质界面,是制约岩体物理力学性状、变形破坏机制和控制岩体稳定性的重要因素之一。在自然界中,以风化、侵蚀作用为主的环境因素对岩体结构面力学性质的劣化作用是造成坡体失稳的重要原因之一。其中,中国西南碳酸盐岩地区,岩溶作用对结构面的弱化影响最为典型,已诱发多起大型滑坡灾害,如贵州关岭大寨滑坡^[1]、巫溪南门湾滑坡^[2]、重庆武隆鸡尾山滑坡^[3]、贵州纳雍普洒滑坡^[4]等,造成了重大人员伤亡和财产损失。因此,厘清岩体结构面溶蚀演变模式和溶蚀结构面力学劣化规律对灾害防治具有重要意义。

目前,针对溶蚀岩体的研究主要集中在细、微观结构研究和力学特性研究两个方面。众多学者采用数字图像处理^[5]、电镜扫描^[6]、计算机断层扫描^[7]和数值软件模拟^[5-9]等技术手段对细、微观结构展开研究,揭露了溶蚀作用下岩体的细观变形破坏机制、裂隙演化规律和微观破坏特征等。并在此基础上,学者们通过引入损伤力学^[9]、唯象理论^[10]、连续介质损伤力学^[11]等理论知识,构建了岩体损伤演化方程及本构模型。同时,部分学者分析了溶蚀岩体力学参数的变化规律,得到了 pH 值^[12-13]、溶蚀时长^[13]、层理角度^[14]、溶蚀率^[15]因素对单轴抗压强度及弹性模量等的影响,并编写了水影响下碳酸盐岩强度随时间退化的数值程序^[16]。然而,上述研究大多局限于对完整岩块的受溶特性研究,却忽视了实际岩质坡体中结构面对工程岩体稳定性的控制性作用。尽管许多学者采用不同指标对受溶结构面表面粗糙度进行了量化分析^[17-20],研究了普通岩体结构面剪切力学特性^[21-22],但揭露受溶结构面力学特性的研究仍鲜有报道。

鉴于此,以重庆武隆鸡尾山溶蚀岩质坡体为地质背景,通过室内结构面渗流溶蚀试验和结构面直接剪切试验,并结合三维形貌光学扫描技术,阐明了灰岩结构面表面水动力-溶蚀演变规律和剪切力学特性劣化规律,同时深入分析溶蚀演化模式和作用机理,提出了灰岩溶蚀结构面抗剪强度预测模型,以期对西南地区地质灾害防治提供参考。

1 鸡尾山溶蚀岩质坡体地质背景

武隆鸡尾山属重庆市东南部高海拔地区,具有多云雾、夜雨,空气湿度大、昼夜温差大等特点,其降

雨主要集中于 5—9 月,呈现出“雨量充沛,降雨集中,短时期强度高”等显著特征。区域内地形起伏大,山体自然坡度为 $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$,呈现出“南高北低、东高西低”的走势。研究区地层由志留系中统韩家店组泥岩 (S_2h)、二叠系下统梁山组粉砂岩 (P_1l)、二叠系下统栖霞组灰岩 (P_1q)、二叠系下统茅口组微晶灰岩 (P_1m) 及坡顶第四系松散堆积物 (Q_4^{el+dl}) 构成,如图 1 所示。

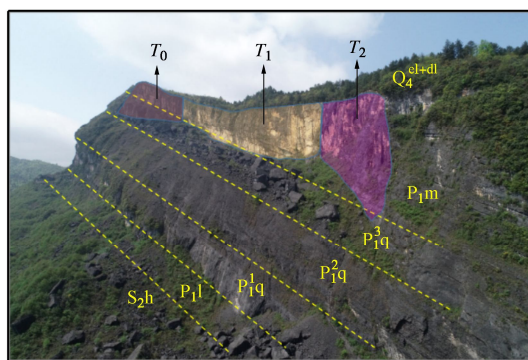


图 1 研究区地层出露情况

Fig. 1 Formation outcropping in research area

现场地质调查表明,鸡尾山盖层灰岩节理裂隙普遍发育,透水性良好。长期地质演化过程中,地下水追踪岩坡构造节理 ($J_1: 185^{\circ} \angle 75^{\circ}$, $J_2: 87^{\circ} \angle 80^{\circ}$) 逐渐形成 3 处空间分布特征、发育规模不同的深大溶蚀结构面: T_0 、 T_1 和 T_2 (如图 1 所示)。三者表面溶蚀特征明显,形成多种溶蚀结构 (如图 2 所示)。

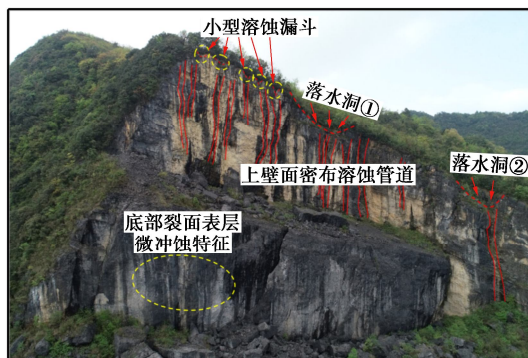


图 2 鸡尾山深大溶蚀结构面发育特征

Fig. 2 Development characteristics of large dissolved structural planes in Jiwei Mountain

2 试验设计及过程

2.1 结构面渗流溶蚀试验

(1) 试验材料及试件制备

试验岩样采自鸡尾山溶蚀岩质坡体现场原位地层, 采用高压水射流岩石切割机, 将毛石加工成 100 mm×100 mm×100 mm 标准试样尺寸, 且控制各对立面平行度小于 0.05 mm。由于鸡尾山岩坡空间结构多由剪节理组成, 结构面多平直光滑, 因此采用大型砂轮切割机沿试样中线位置进行人工锯切^[23], 以制成满足渗流试验要求的结构面试样, 如图 3 (a) 所示。试件切割后, 对其表面进行清洗烘干, 消除初始水分对试件产生的不良影响, 并对除结构面外其余面进行工业级透明防水胶胶封处理, 以保证试验过程中溶蚀部位的可控性, 如图 3 (b) 所示。

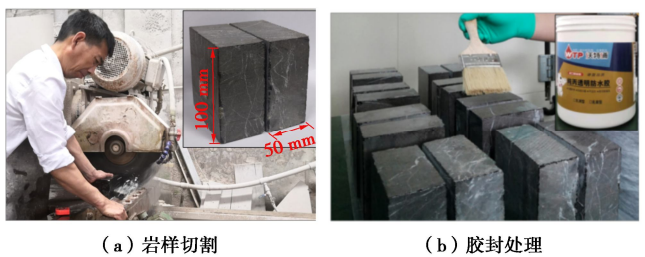


图 3 岩样前期制备

Fig. 3 Preparation process of rock samples

试验溶剂选用盐酸配制而成, 为保证溶蚀速率的可观测性, 对 pH 多次调整、试验, 最终确定 pH=1.8 的稀盐酸溶液作为试验加速溶蚀试剂。

(2) 试验设备

渗流溶蚀试验设备为自主研发的岩体结构面渗流装置, 其基本工作原理如图 4 所示。该装置主要由渗流系统和回流系统两部分组成, 其中主渗流装置集水头控制、渗流溶蚀、裂隙流量监测功能于一体, 能实现恒定水量下岩体结构面渗流溶蚀研究; 回流系统则由磁力泵(平均流量 5 L/min)和回流管两部分组成, 在实现渗流溶液循环使用的同时, 既保证了渗流场的稳定, 也极大提高了酸液利用效率。

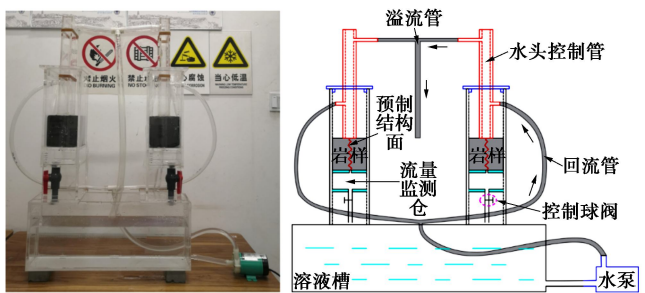


图 4 结构面渗流溶蚀试验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of structure plane seepage dissolution test devices

三维形貌扫描设备为 Cross Dual 三维形貌光学扫描仪, 如图 5 所示。该扫描仪基于三角测量原理, 通

过投影光栅装置向被测物体投射一组平行光束, 从而得到代表结构面表面微地貌的三角网格、点云等数字化特征。由此获得的点云点间距为 0.1 mm, 扫描精度为 0.02 mm。

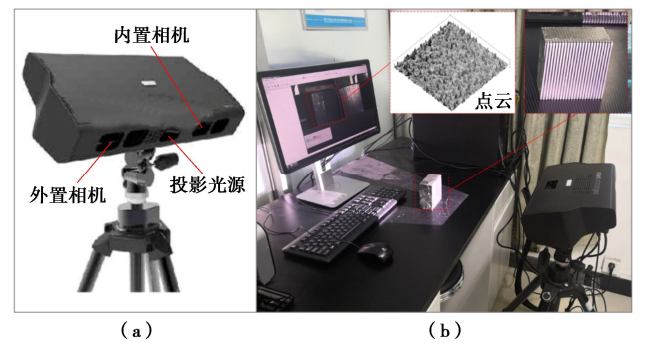


图 5 Cross Dual 三维形貌光学扫描仪

Fig. 5 Cronos Dual 3D morphometric optical scanner

(3) 试验设计

试验于常温常压下进行, 保持岩样、回流流量、初始隙宽等为常量, 溶蚀时长为单一变量, 并按照溶蚀时长将试验分 6 个工况分别进行, 溶蚀时长设置方案如表 1 所示。

表 1 不同工况下的溶蚀时长分布情况

Table 1 Dissolution duration distribution under different working conditions						
工况编号	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6
溶蚀时长/h	0	2	6	12	20	30

具体试验步骤如下: ①控制岩样初始隙宽为 1 mm^[24], 并使用防水双面胶对岩样两侧竖向裂缝进行固定, 同时使用胶贴将水头控制管按照图 4 所示固定于岩样裂缝正上方; ②将固定好的待溶蚀岩样放置于载样台合理位置处, 并用 PVC 管将各部件连接; ③取足量 pH=1.8 稀盐酸溶液注入溶液槽中; ④启动磁力泵, 同时开启秒表计时; ⑤将试验每 15 min 中断一次, 待回流完成后, 调节溶液 pH 至 1.8; ⑥溶蚀完成后, 将岩样从渗流装置中拆离, 并依次对结构面表面进行清洗、观察、记录; ⑦将已溶蚀结构面进行三维形貌光学扫描。

2.2 溶蚀结构面剪切力学特性试验

(1) 试验设备

试验所用设备为 WDAJ-600 型微机控制电液伺服岩土剪切流变试验机, 如图 6 所示。试验机轴向、切向最大荷载、最大加荷位移分别为 600 kN 和 100 mm, 其荷载施加方式分为应力控制式和应变控制式两种, 可控范围分别为 0.1 ~ 100 kN/min, 0.001 ~ 10 mm/min。试验所用剪切盒为自行设计, 如图 7 (b) 所示。

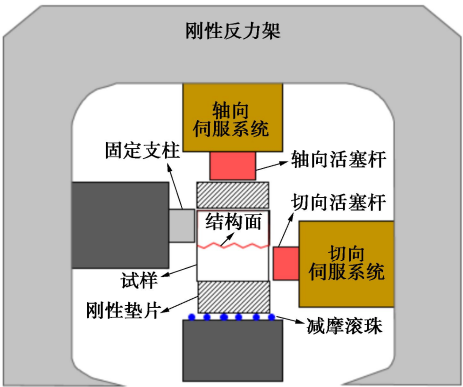


图 6 岩石剪切流变试验机

Fig. 6 Rock shear rheological testing machine

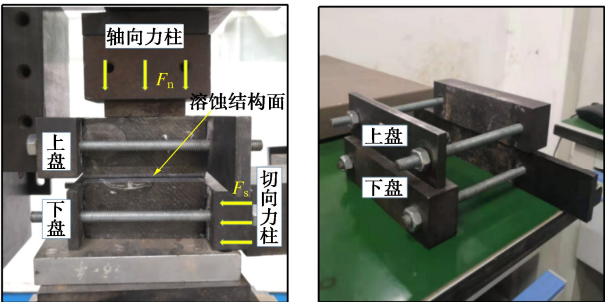


图 7 结构面剪切试验装置工作原理

Fig. 7 Working principle of structural plane shear test devices

(2) 试验设计

为揭露溶蚀情况对结构面剪切力学特性的影响规律，基于渗流溶蚀试验，对不同溶蚀程度试样分别在低、中、高 3 种轴压下，采用剪切流变试验机开展直接剪切试验。试验轴压取值如表 2 所示。

表 2 结构面直接剪切试验轴压试验值

Table 2 Axial compression test values of structural plane direct shear tests			
轴压	低水平轴压	中等水平轴压	高水平轴压
压力值/MPa	2	4	6

试验过程如下：①试验前将已溶蚀试样按图 6 所示进行安装，使其裂面水蚀结构展布方向与实际剪切方向垂直，并调节水平位置至试样中心与轴向伺服活塞杆中心在同一垂线上。②试验过程中采用应力控制式以 0.5 kN/min 的速率对试样施加法向荷载，如图 7 所示。由于岩石变形相对于荷载存在滞后性，为避免出现持续增长的外部荷载作用下因裂面细、微观结构来不及调整而出现测量结果偏小的现象，将试验荷载分三级进行施加，当施加达至预设值后，每 5 min 测读一次，若连续两次测读值差值不超过 0.01 mm，则施加下一级荷载，直至达到目标法向值。③待法向应力作用下试样变形稳定后，保持法向应力不变，采用应变控制式对下盘剪切盒以 0.2 mm/min 的速率施加切向荷载，直至达到目标位移值。

3 试验现象与分析

3.1 灰岩结构面表面溶蚀演化特征

通过渗流溶蚀试验初步得到不同溶蚀时长下灰岩结构面宏观受蚀情况如图 8 所示。将溶蚀面扫描结果经图元匹配、去噪和数字化处理后，导入软件 CloudCompare。绘成的溶蚀结构面表面溶蚀演化特征如图 9 所示。

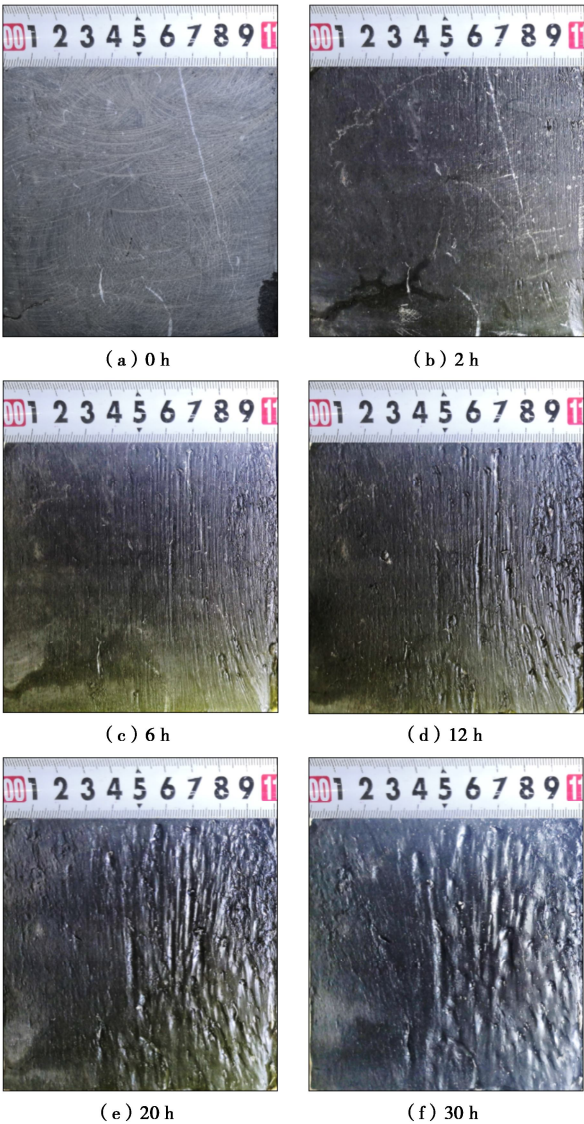


图 8 不同溶蚀时长下结构面溶蚀情况

Fig. 8 Surface erosions of structural plane under different corrosion durations

由图 8, 9 可知，在长期渗流溶蚀改造作用下，灰岩结构面表面形貌持续演化，但在不同溶蚀阶段具有明显的分异性：初始溶蚀阶段 ($t=2$ h)，结构面表面平直且隙宽较小，溶剂以层流形式沿结构面缓慢流动，此时溶蚀作用表现为全结构面多溶蚀核心同时溶蚀改造。由于溶剂对岩样内切式侵蚀作用有限，因此结构面表面溶槽深度较浅，粗糙度指数变化不明显，如图

9 (b) 所示; 当溶蚀进入中期时 ($t=6$ h), 随着溶剂冲蚀时间的增长和水动力强度的不断提升, 壁面难溶物被不断带走, 溶剂逐渐由结构面向结构体内部溶蚀, 在结构面表面上逐渐形成与溶剂流动方向基本一致的溶槽, 此时溶槽窄小、浅短但发育密集且明显, 结构面表面粗糙度有明显变大的趋势 (如图 9 (c)); 到了溶蚀中后期 ($t=12\sim 20$ h), 结构面表面溶槽进入迅速发展阶段, 在不断增强的裂隙水动力作用下, 壁面平行状溶槽间的“分水岭”结构被溶平或被改向, 原细密溶槽中较弱裂隙流逐渐跨越“分水岭”向邻近优势溶槽流去, 最终将壁面改造为由几条深大岩溶通道和若干条细小溶槽组成的复合溶蚀结构面, 结构面表面深大溶槽数目明显增多, 溶槽深度明显变大, 溶蚀结构面表面粗糙度相应提高 (如图 9 (e)); 当溶蚀达到后期时 ($t=30$ h), 结构面岩溶发育进入最终阶段, 结构面表面深大岩溶通道进一步发育, 而壁面细小溶槽逐渐退化、趋于平滑, 溶剂也从沿壁面似面状层流状态完全转变为沿溶槽管道流状态。随着溶蚀通道的不断扩大, 恒定流量下水、岩之间物质、能量交换作用相当微弱, 受溶结构面表面粗糙度指数几乎不再发生变化, 如图 9 (f) 所示。

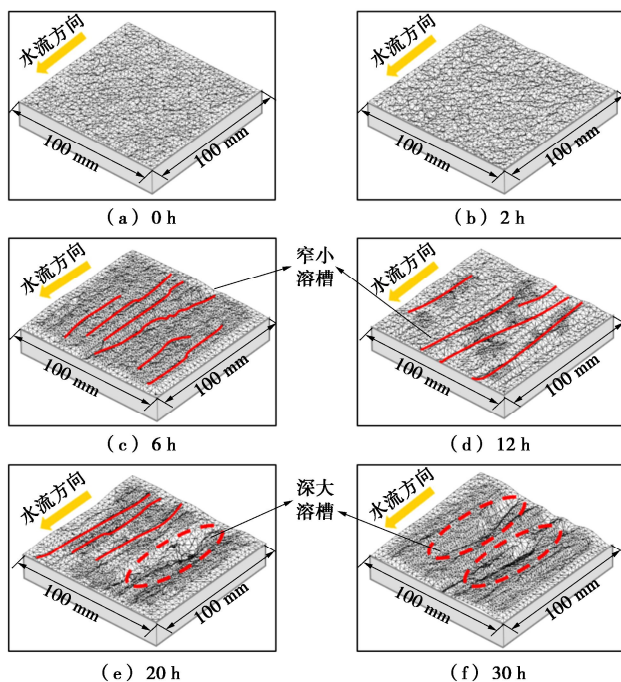


图9 溶蚀结构面表面溶蚀演化特征

Fig. 9 Evolution characteristics of surface of corrosion structural plane

3.2 溶蚀结构面典型渗流溶蚀演化模式

结合图 8, 9 分析可知, 在灰岩结构面溶蚀改造过程中, 结构面表面形貌发育过程规律性显著, 在阶段性水动力作用下, 灰岩结构面表面溶蚀情况呈现出阶

段性特征。根据特征的差异可将灰岩结构面溶蚀过程分为“点式选择性溶蚀—细槽线式稳定渗流溶蚀—优势管道流强烈溶蚀—壁面缓慢溶蚀”4 个阶段。

(1) 初溶阶段: 此时期处于溶蚀开始阶段, 水动力条件较弱, 且人工锯切结构面表面实质上并不平整, 因此溶蚀最先发生于结构面微凸体、微裂隙等表观粗糙结构处, 呈现出全截面多溶蚀核心同时改造的溶蚀特征。

(2) 稳定渗流溶蚀阶段: 随着水动力条件的不断增强, 动力冲蚀在溶蚀过程中的作用逐渐显现, 原溶蚀点沿水流方向相互连通, 在结构面表面形成若干条近平行于裂隙水渗流方向的细微溶槽。结构面处裂隙水逐渐由面状渗流向管状渗流转变。

(3) 强烈溶蚀阶段: 随着结构面内切式侵蚀作用不断加强, 裂面隙宽逐渐变宽, 水动力作用也发挥到极致, 并在溶蚀过程中占据主要作用。此时, 在长期冲蚀作用下, 溶槽间“分水岭”结构逐渐被磨平, 相邻溶槽逐渐融合, 溶槽规模不断扩大, 最终形成深大岩溶通道。

(4) 壁面缓慢溶蚀阶段: 在保持恒定水流条件下, 忽略其他外部条件影响, 溶蚀管道达到其最大规模。此时水流经岩溶管道笔直流下, 裂面处水-岩作用微弱。

然而, 实际工程中, 第四阶段并不是结构面溶蚀演化的终态。以鸡尾山前缘溶蚀结构面为例, 溶蚀过程中, 上部山体结构发生自适应调整, 后方山体不断向前缘挤压, 裂面被重新压密, 溶蚀演化将从初期重新开始。岩体结构面也将以壁面层流状态转变为管道流状态为一个周期, 持续进行周期循环。

3.3 溶蚀结构面表面特征量化分析

为更好表征结构面表面形貌溶蚀演化行为, 本文以结构面表面最小二乘面为基准面, 将高于基准面的部分定义为残余峰, 与基准面间距离定义为峰高 R_p ; 将低于基准面部分定义为溶蚀谷, 与基准面间距离定义为谷深 R_v , 取最大峰高和最大谷深之和作为最大溶槽深度, 并定义点云与基准面间距离的算术平均偏差 R_a 为表面粗糙度指数^[25]:

$$R_a = \frac{\sum_{i=1}^N |z(x_i, y_i)|}{N} \quad (1)$$

式中: x_i, y_i 为点云某点坐标; z 为该点高度; N 为扫描结构面上点云点数。由此得到的不同溶蚀时长下结构面表面形貌粗糙特征如表 3 所示, 灰岩结构面表面粗糙度指数 R_a 的溶蚀演化规律如图 10 所示。

分析图 10 可知, 随着溶蚀时长的增加, 结构面表面粗糙度指数不断增大, 并趋于一恒定值收敛。根据

这一规律,提出一种采用表面粗糙度指数等效表征结构面溶蚀程度的方法,并将其定义为结构面溶蚀率 C_r :

$$C_r = \frac{R_a - R_0}{R_\infty - R_0} \quad (2)$$

式中: R_a 为任一溶蚀状态下结构面表面粗糙度指数; R_0 , R_∞ 分别为初始时刻和最终溶蚀状态下结构面表面粗糙度指数。

表 3 溶蚀结构面表面粗糙度演化特征

Table 3 Evolution characteristics of surface roughness of dissolved discontinuities

溶蚀时长 t/h	最大峰高 R_p/mm	最大谷深 R_v/mm	最大溶槽深度 h_{max}/mm	表面粗糙度指数 R_a/mm
0	0.153	0.282	0.435	0.074
2	0.274	0.323	0.597	0.081
6	0.387	0.924	1.311	0.106
12	0.485	1.001	1.486	0.113
20	0.495	1.250	1.745	0.117
30	0.506	1.681	2.187	0.119

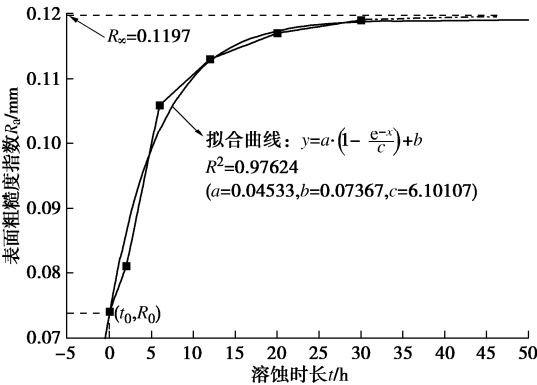


图 10 结构面表面粗糙度指数溶蚀演化规律

Fig. 10 Evolution laws of discontinuity surface roughness index dissolution

以本试验为例,计算得出 R_0 , R_∞ 分别为0.0740,0.1197,因此试验中所用灰岩结构面的溶蚀率计算公式为

$$C_r = \frac{R_a - 0.074}{0.0457} \quad (3)$$

计算所得研究区灰岩结构面溶蚀率与溶蚀时长之间的对应情况如表 4 所示。

表 4 结构面溶蚀率与溶蚀时长对应关系表

Table 4 Relation between discontinuity dissolution rate and dissolution time

溶蚀时长/h	0	2	6	12	20	30
R_a	0.074	0.081	0.106	0.113	0.117	0.119
C_r	0.000	0.153	0.700	0.853	0.941	0.985

由表 4 看出,在渗流作用下,结构面溶蚀率的变化趋势与表面粗糙度指数的变化具有较好的一致性,均随时间增长而增大并逐渐收敛。这是因为:溶蚀作用前期受弱水动力条件影响,表现微弱;其溶蚀改造主要发生于溶蚀中期,此时裂面处固相物质的溶失速

率达到峰值;进入结构面溶蚀消亡阶段后,整体溶蚀速率再次放缓,溶蚀率即趋于收敛。

3.4 溶蚀结构面剪切力学劣化规律

(1) 剪切特性分析

图 11 为轴压作用下,不同溶蚀时长结构面剪切应力-位移特性曲线。曲线依据剪切应力响应特征大致分为初始锁固、剪摩阻滑两个阶段。同时,在不同轴压作用下,各结构面的剪切特性曲线又呈现出不同变化规律。

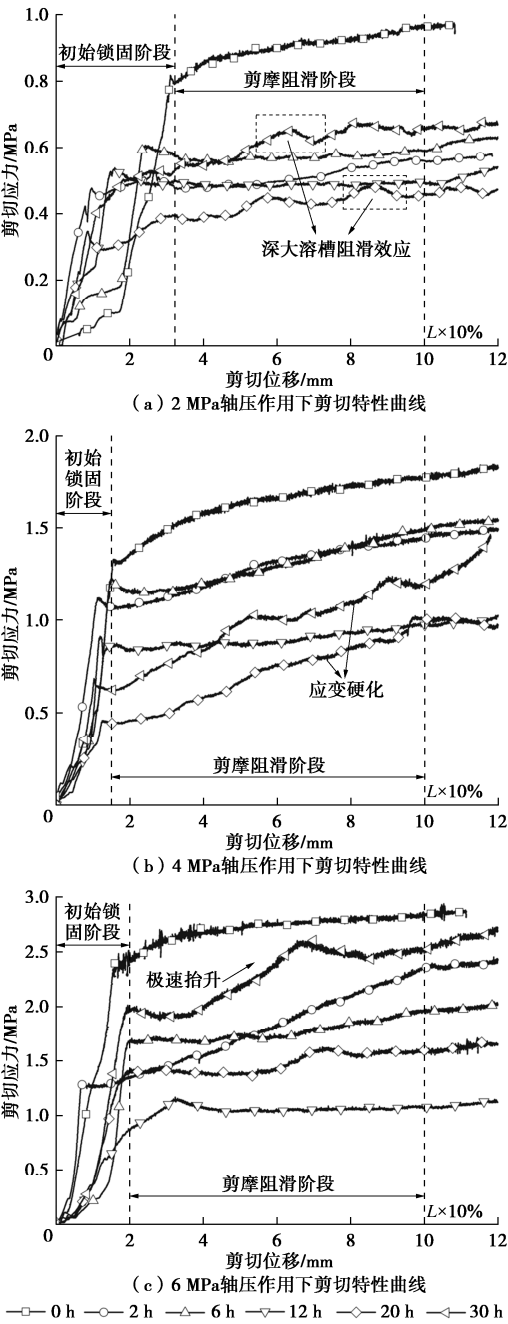


图 11 不同溶蚀时长下结构面剪切特性曲线

Fig. 11 Shear characteristic curves of discontinuities with different dissolution periods

如图 11 (a) 所示,在低水平轴压下 (2 MPa),将结构面切向刚度定义为剪切应力-位移曲线的切线

斜率^[26]。可以看出, 溶蚀结构面初始切向刚度普遍大于天然结构面, 这主要是在低轴压法向加载过程中, 溶蚀结构面表面溶槽等粗糙结构未被明显压碎, 因此在剪切过程中, 溶槽相互之间形成联合锁固效应, 切向变形受阻明显。随着水平剪切位移的增大, 初始锁固结构逐渐被破坏, 结构面发生相对错动。其中天然结构面表面由锯切产生的稳定微凸体在轴压下形成新的锁固结构, 出现明显的剪切硬化特征; 而经历溶蚀的结构面, 虽然其结构面表面粗糙结构存在较强稳定性, 但由于初期溶蚀结构面表面难溶物所形成的“泥膜”的存在, 结构面抗剪强度较天然结构面大大减弱; 对于溶蚀中期结构面, 其表面溶槽峰部起主要抗剪阻滑作用, 因峰高较小, 剪摩阶段曲线相对平缓; 相比之下, 溶蚀后期结构面在水平推剪过程中, 由于表面深大岩溶通道的影响, 其剪切特性曲线更为复杂, 溶槽处“跌落”、“爬坡”、“咬断”作用交替出现, 因此剪切特性曲线呈现出多拐点控制下的轻微硬化特征。

由图 11 (b) 可知, 在中水平轴压下 (4 MPa), 各结构面初始切向刚度差异明显减小。初溶阶段的结构面强度与初始结构面强度差距也明显变小, 这是因为随着轴压增大, 初溶阶段所形成的“泥膜”被挤出, 其对结构面强度的弱化作用降低; 但对于密布细槽控制的结构面 ($t=12\text{ h}$), 溶蚀管道较浅、窄, 阻滑效应相对较弱, 剪切曲线仍表现出相对稳定的变化特征; 而深大溶槽结构面 ($t=20, 30\text{ h}$) 随着轴压的增大, 剪切硬化特征进一步增强, 抗剪强度值以较大的斜率快速增长。

然而, 当轴压为 6 MPa 时, 由于溶蚀结构面表面粗糙结构被压密、压碎, 其初始刚度低于天然结构面, 如图 11 (c) 所示。在水平推剪过程中, 受稳定微凸体控制的自然结构面硬化特征越发明显; 而细微溶槽控制下的结构面硬化特征逐渐消失, 呈现出相对稳定的残余变形特征; 深大溶槽结构面仍保留较深溶槽, 因此出现短时间“跌落”现象, 但随后曲线出现极速抬升, 这是因为在高法向荷载下, 深大细槽槽壁在横向上相对稳定, 沿槽壁横向移动爬坡需要克服巨大阻力, 此时溶蚀结构面硬化特征达到最大。

(2) 抗剪强度分析

结合图 11 确定各阶段峰值抗剪强度, 对有明显峰值的结构面取峰值作为抗剪强度, 若无明显峰值则取剪切位移等于剪切面宽度 10% 时对应强度值, 由此得到不同溶蚀结构面极限抗剪强度值如表 5 所示。

由表 5 可知, 在轴压一定的情况下, 溶蚀结构面极限抗剪强度明显弱于天然结构面, 整体上呈现出“先减小, 后增大”的现象。其中, 当溶蚀时间为 12 h 时, 各轴压截面极限抗剪强度分别降低了 49.8%,

47.3%, 60.2%。此时, 极限抗剪强度趋于最小值。由于实际工程中, 自然界边坡失稳常发生于抗剪强度劣化阶段。鉴于此, 本部分仅对强度降低阶段 (0~12 h) 进行抗剪强度分析。

表 5 不同溶蚀时长结构面极限抗剪强度
Table 5 Ultimate shear strengths of structural plane with different dissolution durations

溶蚀时 长 t/h	各轴压下极限抗剪强度 τ/MPa			溶蚀率 C_r
	2 MPa	4 MPa	6 MPa	
0	0.977	1.841	2.938	0
2	0.581	1.502	2.360	0.153
6	0.633	1.490	2.045	0.700
12	0.490	0.970	1.169	0.853
20	0.479	1.023	1.712	0.941
30	0.672	1.465	2.520	0.985

库仑准则是描述抗剪强度的常用方法, 但其在复杂结构面力学性质的应用中存在一定缺陷, 无法考虑到结构面粗糙度、强度等因素对抗剪强度的影响。因此, 采用 Barton 提出的抗剪强度公式:

$$\tau = \sigma_n \tan \left[\text{JRC} \lg \left(\frac{\text{JCS}}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right] \quad (4)$$

式中: σ_n 为法向应力; JRC 为结构面粗糙度; JCS 为结构面强度; ϕ_b 为结构面基本摩擦角。

由前述分析可知, JRC, JCS, ϕ_b 均随溶蚀时长的增大而变化, 与结构面溶蚀率密切相关。因此, 三者均可表示为溶蚀率 C_r 的函数 $J_{rc}(C_r)$ 、 $J_{cs}(C_r)$ 和 $\phi_b(C_r)$ 。为进一步简化公式, 忽略式 (4) 中对数项分母法向荷载的影响, 并对 $J_{rc}(C_r)$ 、 $J_{cs}(C_r)$ 进行合并处理, 将原式简化为

$$\tau = \sigma_n \tan [J(C_r) + \phi_b(C_r)] \quad (5)$$

式中, ϕ_b 取图 12 所示抗剪强度线性拟合结果角度值。

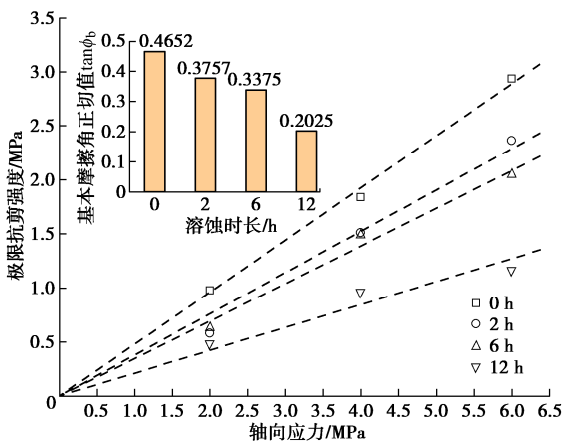


图 12 各溶蚀结构面基本摩擦角
Fig. 12 Basic friction angle of dissolving planes

为确定各项与溶蚀率之间的准确关系, 首先对 ϕ_b 的正切值进行拟合, 所得结果如图 13 所示。可以看出, $\tan \phi_b$ 与 C_r 之间线性相关关系良好, 故基本摩擦角与溶蚀率可表示为

$$\phi_b = \arctan(0.447 - 0.239C_r) \quad (6)$$

再通过统计软件对式(5)中的 $J(C_r)$ 项进行拟合,最后得到考虑溶蚀率的灰岩结构面抗剪强度经验预测模型:

$$\tau = \sigma_n \tan \left[e^{0.8C_r} + \arctan(0.447 - 0.239C_r) \right] \quad (7)$$

并用其进行预测值计算,结果对比情况如表6所示。可以看出,该模型所得结果与试验值吻合度高,具有一定适用性。

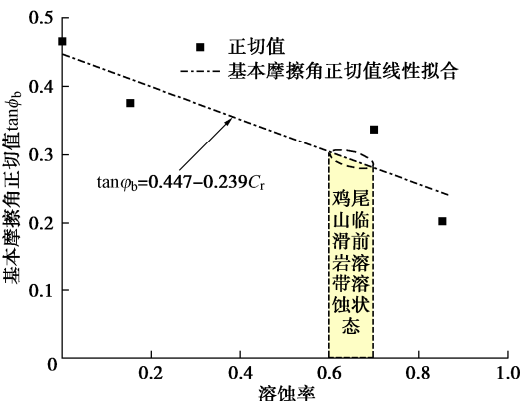


图 13 溶蚀结构面基本摩擦角拟合结果

Fig. 13 Fitting results of basic friction angle of dissolving planes

表 6 预测值-试验结果对比情况

Table 6 Comparison between predicted values and test results

溶蚀时 长/h	2 MPa		4 MPa		6 MPa		平均误 差/MPa
	试验值	预测值	试验值	预测值	试验值	预测值	
0	0.977	0.973	1.841	1.946	2.938	2.920	0.043
2	0.581	0.797	1.502	1.594	2.360	2.390	0.113
6	0.633	0.744	1.490	1.488	2.045	2.231	0.100
12	0.490	0.477	0.970	0.955	1.169	1.432	0.097

4 结 论

以武隆鸡尾山溶蚀岩质坡体为背景,通过对盖层灰岩进行结构面渗流溶蚀试验和溶蚀结构面直接剪切试验,揭示了灰岩结构面的渗流溶蚀演化模式和剪切力学特性溶蚀劣化规律,得到以下5点结论。

(1) 在水动力-化学溶蚀改造下,灰岩结构面表面溶蚀演化模式为:点式选择性溶蚀—细槽线式稳定渗流溶蚀—优势管道流强烈溶蚀—壁面缓慢溶蚀。

(2) 灰岩结构面表面微地貌在水动力-溶蚀过程中,呈现出显著的时序演化特征。在水动力-化学溶蚀作用下,其表面粗糙度指数和溶蚀率指标随时间增长而增大,并呈收敛趋势。

(3) 溶蚀结构面在剪应力作用下表现出初期锁固、后期剪摩阻滑的二阶段特征,且溶蚀时间越长、应力水平越高,剪切硬化特征越明显。

(4) 在溶蚀作用下,结构面抗剪结构随时间增长,

由刚性稳定微凸体发展为细微溶槽,并最终演变为深大岩溶管道,其极限抗剪强度前中期随表面粗糙体结构数量减少而变小,后期随表面溶槽深度变大而增大。

(5) 基于 Barton 公式和溶蚀率指标,建立了灰岩结构面抗剪强度经验预测模型,并通过对比预测值和试验值,验证了该模型具有良好的适用性。

参考文献:

[1] 殷跃平,朱继良,杨胜元. 贵州关岭大寨高速远程滑坡—碎屑流研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(4): 445-454. (YIN Yueping, ZHU Jiliang, YANG Shengyuan. Investigation of a high speed and long Run-out rockslide-debris flow at dazhai in Guanling of Guizhou Province[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(4): 445-454. (in Chinese))

[2] 郭静芸,李守定,李 滨,等. 岩溶山区崩滑灾害变形破坏地质模式分类[J]. 中国岩溶, 2020, 39(4): 478-491. (GUO Jingyun, LI Shouding, LI Bin, et al. Geological models classification of deformation and failures for collapses and landslides in Karst mountainous areas[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(4): 478-491. (in Chinese))

[3] 许 强,邓茂林,李世海,等. 武隆鸡尾山滑坡形成机理数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(11): 2012-2021. (XU Qiang, DENG Maolin, LI Shihai, et al. Numerical simulation for formation of Jiweishan landslide in Wulong County, Chongqing City of China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(11): 2012-2021. (in Chinese))

[4] 崔芳鹏,李 滨,杨忠平,等. 贵州纳雍普洒滑坡动力触发机制离散元模拟分析[J]. 中国岩溶, 2020, 39(4): 524-534. (CUI Fangpeng, LI Bin, YANG Zhongping, et al. Discrete element modelling on dynamic triggering mechanism of the Pusa landslide in Nayong County, Guizhou Province[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(4): 524-534. (in Chinese))

[5] 余逍逍,史文兵,王小明,等. 基于数字图像处理技术的溶蚀岩体细观变形破坏机制模拟研究[J]. 中国岩溶, 2020, 39(3): 409-416. (YU Xiaoxiao, SHI Wenbing, WANG Xiaoming, et al. Simulation on mesoscopic deformation and failure mechanism of dissolved rock mass using digital image processing technology[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(3): 409-416. (in Chinese))

[6] TAO M, WANG J, ZHAO H T, et al. The influence of acid corrosion on dynamic properties and microscopic mechanism of marble[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2022, 8(1): 36.

[7] QIAO L P, WANG Z C, HUANG A D. Alteration of mesoscopic properties and mechanical behavior of sandstone

- due to hydro-physical and hydro-chemical effects[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, **50**(2): 255-267.
- [8] LI S G, HUO R K, WANG B, et al. Experimental study on physicommechanical properties of sandstone under acidic environment[J/OL]. *Advances in Civil Engineering*, 2018: 1-15. <https://doi.org/10.1155/2018/5784831>.
- [9] 熊绍真, 史文兵, 王小明. 单轴压缩条件下岩溶化裂隙岩体损伤破坏特征研究[J]. *工程地质学报*, 2022, **30**(4): 1098-1110. (XIONG Shaozhen, SHI Wenbing, WANG Xiaoming. Damage and failure characteristics of Karst fractured rock mass under uniaxial compression[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2022, **30**(4): 1098-1110. (in Chinese))
- [10] PAN J L, CAI M F, LI P, et al. A damage constitutive model of rock-like materials containing a single crack under the action of chemical corrosion and uniaxial compression[J]. *Journal of Central South University*, 2022, **29**(2): 486-498.
- [11] CHEN Y L, XIAO P, DU X, et al. Study on damage statistical constitutive model of triaxial compression of acid-etched rock under coupling effect of temperature and confining pressure[J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2021, **14**(23): 7414.
- [12] HUO R K, LIANG Y L, LI S G, et al. The damage mechanism and deterioration characteristics of acid-corroded sandstone: an experimental study[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, **15**(6): 537.
- [13] LI S G, WU Y M, HUO R K, et al. Mechanical properties of acid-corroded sandstone under uniaxial compression[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, **54**(1): 289-302.
- [14] 穆成林, 李华东, 裴向军, 等. 溶蚀岩体各向异性力学性质的试验研究[J]. *西南交通大学学报*, 2022, **57**(5): 1070-1076, 1112. (MU Chenglin, LI Huadong, PEI Xiangjun, et al. Experimental study on anisotropy mechanical properties of corroded rock mass[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2022, **57**(5): 1070-1076, 1112. (in Chinese))
- [15] 朱雷, 王小群, 聂德新, 等. 基于随机模型溶蚀岩体强度参数研究[J]. *工程地质学报*, 2014, **22**(6): 1034-1038. (ZHU Lei, WANG Xiaoqun, NIE Dexin, et al. Stochastic method based evaluation of corrosion rock strength parameters[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, **22**(6): 1034-1038. (in Chinese))
- [16] GU D M, HUANG D, ZHANG W G, et al. A 2D DEM-based approach for modeling water-induced degradation of carbonate rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, **126**: 104188.
- [17] WANG L Q, WANG C S, KHOSHNEVISAN S, et al. Determination of two-dimensional joint roughness coefficient using support vector regression and factor analysis[J]. *Engineering Geology*, 2017, **231**: 238-251.
- [18] 尹宏, 王述红, 董卓然, 等. 引入因子分析的结构面粗糙度 RBF 复合参数模型[J]. *岩土工程学报*, 2022, **44**(4): 721-730. (YIN Hong, WANG Shuhong, DONG Zhuoran, et al. RBF composite parameter model for structural surface roughness with factor analysis[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, **44**(4): 721-730. (in Chinese))
- [19] LIU X G, ZHU W C, YU Q L, et al. Estimation of the joint roughness coefficient of rock joints by consideration of two-order asperity and its application in double-joint shear tests[J]. *Engineering Geology*, 2017, **220**: 243-255.
- [20] 陈冲, 陈胜宏. 结构面轮廓不等间距采样、向量表征与粗糙度[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, **40**(增刊 1): 2798-2805. (CHEN Chong, CHEN Shenghong. Unequal interval sampling, vector representation and roughness of joint profile[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, **40**(S1): 2798-2805. (in Chinese))
- [21] 刘新荣, 许彬, 黄俊辉, 等. 多形态贯通型岩体结构面宏观剪切力学行为研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, **43**(3): 406-415. (LIU Xinrong, XU Bin, HUANG Junhui, et al. Macro-meso shear mechanical behaviors of coalescent rock joints with different morphologies[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, **43**(3): 406-415. (in Chinese))
- [22] LIU X R, KOU M M, LU Y M, et al. An experimental investigation on the shear mechanism of fatigue damage in rock joints under pre-peak cyclic loading condition[J]. *International Journal of Fatigue*, 2018, **106**: 175-184.
- [23] 刘佑荣, 唐辉明. 岩体力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999. (LIU Yourong, TANG Huiming. *Rock Mechanics*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999. (in Chinese))
- [24] 邓建伟. 岩溶发育带岩体强度特征研究[D]. 西安: 长安大学, 2014. (DENG Jianwei. *The Rock Strength Characteristics Research of Karst Belt*[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014. (in Chinese))
- [25] 王旭东, 俞作辉, 裴强强, 等. 砂岩制样方法及误差影响研究[J]. *岩土力学*, 2020, **41**(增刊 2): 1-10. (WANG Xudong, YU Zuohui, PEI Qiangqiang, et al. Research on preparation method of sandstone sample and its error influence[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, **41**(S2): 1-10. (in Chinese))
- [26] BANDIS S C, LUMSDEN A C, BARTON N R. Fundamentals of rock joint deformation[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1983, **20**(6): 249-268.