

层理灰岩酸性溶蚀损伤特性试验研究

吴宗琴, 左双英, 王 露, 李本云, 刘 晶

Experimental study on acid dissolution damage characteristics of bedded limestone

WU Zongqin, ZUO Shuangying, WANG Lu, LI Benyun, and LIU Jing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202211077>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同赋存环境下碳酸盐岩溶蚀过程试验模拟研究

Experimental simulation of the carbonate dissolution process under different occurrence conditions

林云, 任华鑫, 武亚遵, 贾方建, 刘朋, 梁家乐 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 15-26

可溶岩化学溶蚀试验方法研究综述

Advances in the chemical dissolution methods of soluble rocks

郭静芸, 毕鑫涛, 方然可, 李守定 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 24-34

高应力区岩石统计损伤本构模型研究

A study of the statistical damage constitutive model of rock in high stress areas

贾逸, 魏良帅, 黄安邦, 和铭, 黄细超, 蓝康文 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 118-118

不同风化程度下灰岩抗剪强度特性及估算模型研究

A study of shear strength characteristics and estimation model of limestone under different weathering degrees

邓涛, 廖军, 王陈宾, 唐刚, 钱小龙, 龚洪苇 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 71-80

基于断裂及高温损伤的岩石蠕变模型研究

A study of the creep model of rock considering fractures and thermal damage

李修磊, 李起伟, 李倩 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 46-56

一种基于弹性能释放率的岩石新型统计损伤本构模型

A statistical damage constitutive rock model based on elastic energy release rate

刘文博, 孙博一, 陈雷, 张树光 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 88-95



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202211077

吴宗琴, 左双英, 王露, 等. 层理灰岩酸性溶蚀损伤特性试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(6): 193-203.

WU Zongqin, ZUO Shuangying, WANG Lu, *et al.* Experimental study on acid dissolution damage characteristics of bedded limestone[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(6): 193-203.

层理灰岩酸性溶蚀损伤特性试验研究

吴宗琴¹, 左双英^{1,2}, 王 露³, 李本云³, 刘 晶¹

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州大学喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550025; 3. 贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 碳酸盐岩在我国西南地区广泛分布, 其溶蚀特性为工程建设带来不少阻力。为研究层状碳酸盐岩在酸性溶蚀条件下的溶蚀损伤规律, 采用自制流动溶蚀系统对 4 种不同条件下的层理灰岩进行室内溶蚀试验, 获得层理灰岩溶蚀后的质量损失、纵波波速变化量、溶液中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 质量浓度、表面溶蚀带形态特征等状态指标。采用层理灰岩溶蚀前后质量损失率定义损伤变量, 通过多元统计回归分析方法, 建立起 4 个不同自变量(层理倾角、pH 值、溶液流速、溶蚀时间)和溶蚀损伤变量之间的关系, 结果表明: 层理灰岩的溶蚀损伤与层理倾角、溶液 pH 值、溶液流速、溶蚀时间之间存在良好的数学关系; 溶蚀时间对层理灰岩溶蚀损伤有显著影响, 溶液流速和 pH 值次之; 不同层理倾角的灰岩, 相同酸性环境下溶蚀效应呈现出 $90^\circ > 0^\circ > 45^\circ > 30^\circ > 75^\circ > 15^\circ > 60^\circ$ 的规律; 层理倾角对灰岩溶蚀影响较其他因素小, 但是对岩样表面溶蚀形态起到了决定性作用。研究结果可以为灰岩地区工程实践和地质灾害防治提供一定参考。

关键词: 层理灰岩; 酸性溶蚀; 岩石纵波波速; 溶蚀损伤; 溶蚀损伤变量

中图分类号: TU458

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)06-0193-11

Experimental study on acid dissolution damage characteristics of bedded limestone

WU Zongqin¹, ZUO Shuangying^{1,2}, WANG Lu³, LI Benyun³, LIU Jing¹

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 2. Key Laboratory of Karst Geological Resources and Environment, Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 3. Guizhou Transportation Planning Survey and Design Institute Co. Ltd., Guiyang, Guizhou 550081, China)

Abstract: In southwest China, carbonate rocks are widely distributed. It has unique dissolution features which bring a lot of resistance to engineering constructions. In order to explore the dissolution damage regular of layered carbonate rocks in acidic water, a self-made flow dissolution system was used to conduct laboratory dissolution tests on limestone cores under four different conditions. The mass loss, the change of p-wave velocity, the mass concentration of Ca^{2+} and Mg^{2+} and the morphology of the core surface were obtained. Mass loss rate after dissolution of layered limestone was used to define the damage variation. Through multivariate statistical

收稿日期: 2022-11-29; 修订日期: 2023-02-18

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42167025); 贵州省科学技术基金重点项目 ([2020]1Z052); 贵州省科技重大专项计划 ([2018]3011)

第一作者: 吴宗琴 (1996-), 女, 硕士研究生, 主要从事岩石力学方向的研究。E-mail: chin_wuzq@163.com

通讯作者: 左双英 (1977-), 女, 博士, 博士生导师, 主要从事地质工程方面的教学和科研工作。E-mail: syzuo@gzu.edu.cn

regression analysis, the relationship between four different arguments (bedding dip Angle, pH, velocity of flow, dissolution time) and dissolution damage variation was established. The results show that the dissolution damage of layered limestone has a good mathematical relationship between the four different arguments. The following conclusions can be drawn from the analysis: The time has a significant effect on the dissolution damage of bedded limestone, followed by the velocity and pH. Under the same acidic environment, the dissolution effect shows a rule of $90^\circ > 0^\circ > 45^\circ > 30^\circ > 75^\circ > 15^\circ > 60^\circ$ for limestone with different bedding inclination angles. The bedded angle has less effect on the dissolution of limestone than other factors, but plays a decisive role in the surface dissolution morphology of rock samples. The results of this study can provide some reference for engineering practice and geological disaster control in limestone areas.

Keywords: bedded limestone; acid corrosion; longitudinal wave velocity of rock; dissolution damage; dissolution damage variation

岩溶区岩体基本为层状结构碳酸盐岩,层理或层面的存在导致了岩体物理力学存在明显的不均匀性和各向异性^[1]。因此,层理在地下水对岩石的溶解路径及岩体工程失稳方式中起到了控制作用。由于部分大气污染及工业废水排放导致渗入地下的水呈现一定酸性,碳酸盐岩浸水后,其表面及层理充填物中的细小颗粒被酸性水溶蚀,岩石原有的微观结构遭到破坏^[2],内部矿物颗粒间联结被削弱,溶蚀物质被水溶液带走或被吸附沉淀,岩石孔隙、裂隙结构及渗透通道发生变化,渗透力或孔隙水压力增大^[3-4]。同时机械侵蚀、潜蚀作用增强,岩石力学强度及抵抗变形的能力逐渐损失,成为工程结构建设的安全隐患^[5]。因此,探究碳酸盐岩的溶蚀损伤特性及演化规律对了解溶蚀化岩体的变形和破坏问题具有重要意义。

有研究表明,水的化学作用对岩土体力学性质有着重要影响,会使岩土体抗压强度、断裂性质及破坏机制产生不可忽视的改变^[6]。目前,国内外学者主要基于化学溶蚀作用和溶质运移动力学原理,对不同水环境下 pH 演变^[7]和矿物蚀变^[8]等开展一系列研究,采用电镜扫描、X 射线衍射(XRD)、核磁共振、压汞实验等手段分析矿物颗粒^[9]、岩石内部的溶蚀程度^[10],利用次生孔隙率^[11]、胶结物含量^[12]、纵波波速^[13]或质量变化量^[14]等状态量推导化学溶蚀损伤规律。丁茜等^[15]、那金等^[16]、盛金昌等^[17]研究水岩化学作用过程中矿物的溶解和沉淀、黏土成矿、溶蚀速率的变化等,尝试揭示其化学作用机理和溶质运移规律;陈四利等^[18]、丁梧秀等^[19]进行了一系列不同水化学环境下花岗岩、砂岩、灰岩等溶蚀试验,通过电子显微镜、CT 扫描等手段,探讨了水化学溶液腐蚀下岩石表面裂隙的扩展机理、岩石的动态破裂特征和演化规律。

近年来,层理岩体溶蚀引起了学者们的关注,李

晓宁等^[20]利用 CT 扫描技术得到了岩石变形破裂全过程不同断面的实时图像,研究表明水对含层理页岩强度的损伤作用主要受层理控制;卢运虎等^[21]研究发现溶蚀页岩平行层理面表现为大量微纳米溶蚀孔伴生发育的原生裂隙膨胀、闭合、塌陷,而垂直层理面表现为大量微纳米长石矿物溶蚀孔隙;Xu 等^[22]、Hao 等^[23]研究表明岩石微观结构可以控制白云岩的酸-岩反应;凌斯祥等^[24]等通过研究不同酸性条件下,非平衡流动态腐蚀性试验和单轴压缩试验,探讨了酸性水对黑色页岩化学损伤和力学劣化的腐蚀效应及机制;苗胜军等^[25]通过扫描电镜与电子能谱技术观测花岗岩在酸性溶液中微观形态、纵波波速、溶液 pH、溶液化学组分等因素的变化,得出岩石受水化学溶液侵蚀的损伤机制。

上述研究主要涉及静态、非补给、非平衡流动条件下化学溶液对岩石宏、细观力学效应的影响,对正确认识岩体水化学作用溶蚀特征奠定了基础,但在层理发育且层理倾角不同的条件下开展的岩石溶蚀试验研究较为欠缺。本文选取含层理灰岩岩块,制备不同倾角的标准圆柱岩样进行室内溶蚀试验,研究层理灰岩在不同 pH 值、不同流速的酸性溶液中溶蚀不同时间后的质量损失、纵波波速变化、离子浓度变化等,探讨层理灰岩在不同因素作用下的溶蚀损伤规律,通过多元统计分析,建立溶蚀损伤变量与各因素之间的数学关系式,为确定溶蚀岩体参数提供依据。

1 试验材料及方法

1.1 试验制样与装置

岩石样品采自下三叠统永宁镇组(T_3y)一段中风化灰色中厚层灰岩。将水平层理长方体岩块摆放不同倾斜角度(0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 90°)钻取,

两端面打磨至平整, 形成直径 50 mm、高 100 mm 的标准圆柱体, 岩样全部取自同一岩块以保证不同倾角的试件具有相同的层理结构, 见图 1。

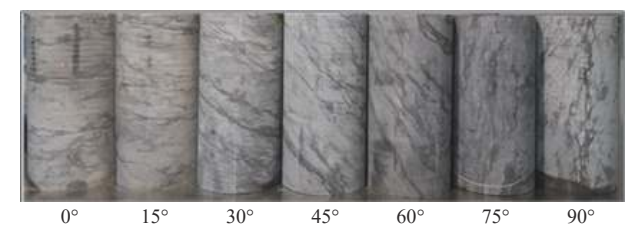
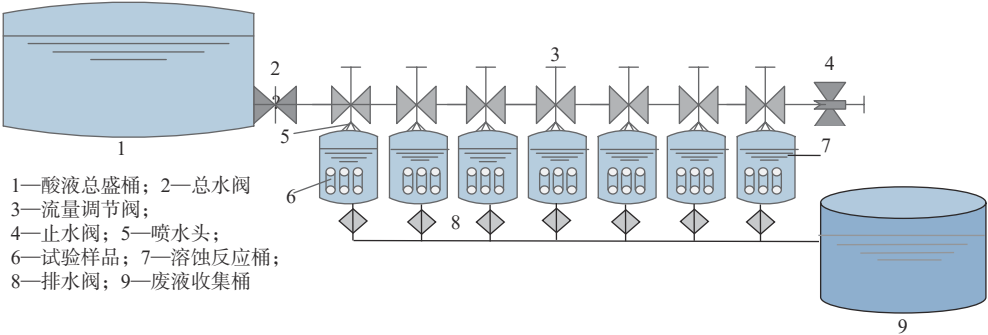


图 1 不同倾角灰岩岩样
Fig. 1 Limestone samples with different bedding angles



(a) 浸泡溶蚀水流系统示意图



(b) 浸泡溶蚀水流系统装置

图 2 试验装置

Fig. 2 System diagram of experiment

试验前用清水、纯水依次清洗试样, 在 105 °C 烘箱中烘干 12 h, 测定岩样的初始质量和纵波波速, 剔除波速离散性较大的试件, 保证试样均一性。将各组不同工况(表 1)的岩样分别放入图 2 装置的反应桶内进行试验。酸液总盛桶与反应桶之间由防腐塑料管连接, 通过位置高差产生水头, 调节各反应桶上方的流量调节阀控制流速, 反应后的溶液通过排水阀排至

1.2 试验方案

将各组工况不同(表 1)的岩样分别放入自主设计的浸泡溶蚀水流系统(图 2), 进行室内浸泡溶蚀试验。共进行 28 组试验(每组 3 个平行样), 分别考虑 pH、流速(v)、溶蚀时间(t)、层理倾角(φ)的影响。

表 1 试验工况对照表				
Table 1 Comparison table of test conditions				
试验组	pH	$v/(\text{cm s}^{-1})$	t/d	$\varphi/(^{\circ})$
pH组	2/3/4/5	2.6	14	0/45/90
v 组	2	0/2.6/4.7/6.8	14	30/75
t 组	2	2.6	7/14/22/31	15/60

废液收集桶待处置。总盛桶中酸液 pH 用 PHS-3C pH 计控制, 定时测定 H^{+} 浓度, 以便及时补充原酸, 酸液的流动性可以保持 H^{+} 的稳定补给, 以维持 pH 相对稳定, 反应桶中酸液始终浸没整个岩样。定时取溶蚀液 10 mL, 用原子吸收分光光度计测量 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 质量浓度。酸-岩反应至 7, 14, 22, 31 d 时间节点时, 根据不同工况所需反应时间将岩样取出, 取出的岩样用清

水、纯水依次清洗,在 105 °C 的烘箱中烘干 12 h,在测量完试样的质量、波速后,再次放入反应桶进行溶蚀,根据时间节点重复至试验结束。

2 试验结果

2.1 质量损失

试件溶蚀前称量质量为 m_1 , 酸-岩反应后质量为 m_2 , 其溶蚀量 $\Delta m = m_1 - m_2$, 溶蚀率 $\Psi = \Delta m / m_1$ 。按试验步骤,定时取出岩样用清水、纯水洗后烘干,测量不同条件下试样的质量变化。

2.1.1 不同层理倾角条件

当 pH=2, 流速为 0.026 m/s 时,在不同溶蚀时间内

得到的岩样溶蚀量、溶蚀率随层理倾角的变化规律如图 3 所示。

如图 3(a)所示:(1)相同时间段内的酸-岩化学作用过程中,溶蚀量呈现出随着岩样层理倾角的增大起伏不定的变化,均在倾角为 30°时达到峰值,在 60°时为最低值。(2)岩样溶蚀率在 0°、15°、30°之间变化较小,在 30°、45°、60°、75°之间起伏较大,变化急剧,75°与 90°之间相差较小,灰岩的层理倾角对其溶蚀率存在影响。(3)相同层理倾角的岩样,随着溶蚀时间的增加,溶蚀量显著增大,30°岩样在 7~22 d 内溶蚀率从 0.62% 增大到 1.15%;60°岩样溶蚀量相对最少,反应至 22 d 时溶蚀率为 0.86%。

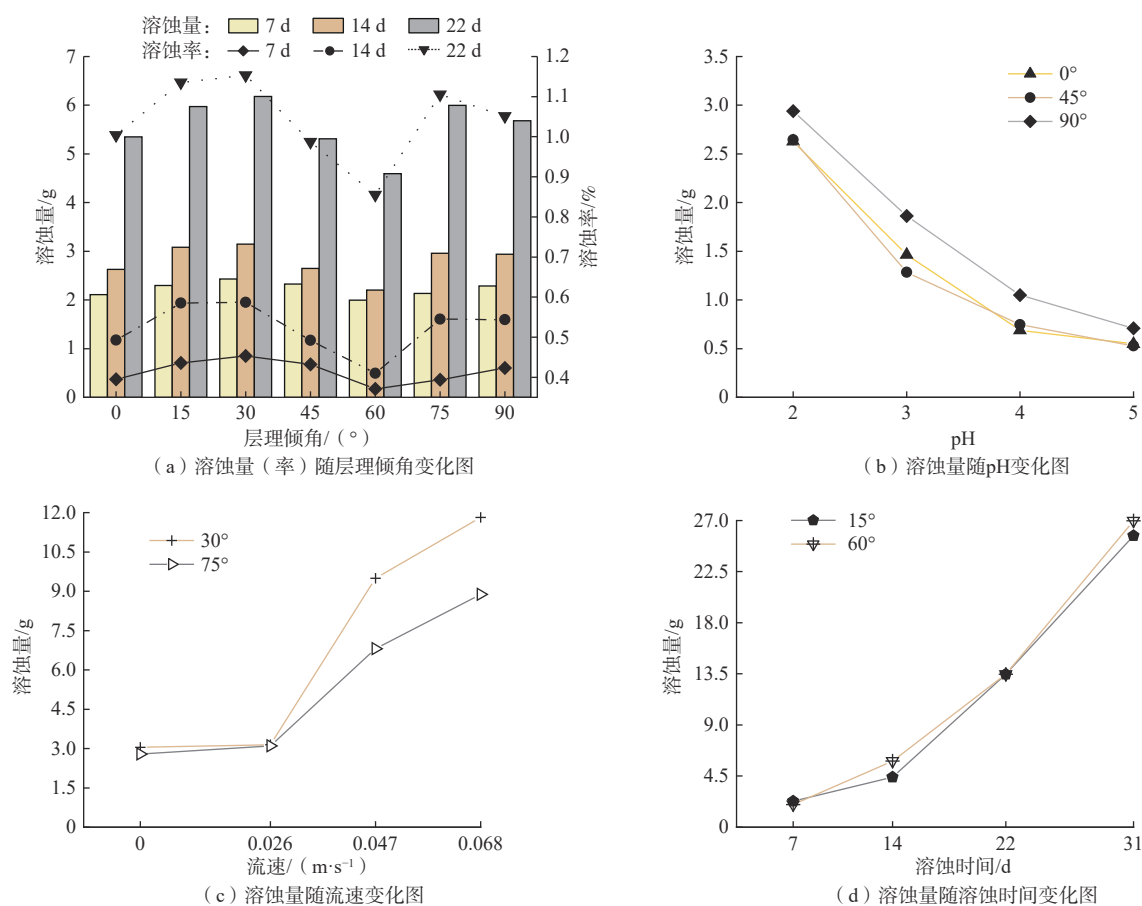


图 3 不同条件下溶蚀量的变化

Fig. 3 Variation of dissolution under different conditions

2.1.2 不同溶液 pH 条件

倾角为 0°、45°、90°岩样分别在 pH 为 2, 3, 4, 流速为 0.026 m/s 的酸液中浸泡 14 d, 得到溶蚀量变化特征如图 3(b)所示。可以看出:(1)在同样工况条件下,层理倾角为 90°的岩样相对于 0°、45°岩样的溶蚀程度更

高;(2)相同倾角岩样的溶蚀量随 pH 的增大而呈现出减小的趋势,层理倾角为 90°的岩样,在 pH=2 时其溶蚀率达到 0.54%, pH=5 时减小为 0.13%;(3)pH 为 2, 3 时, 0°、45°、90°岩样溶蚀量变化分别为 1.17, 1.36, 1.08 g, 曲线斜率大, pH 为 3, 4, 5 时斜率逐渐减小, 曲

线变化趋势变为平缓。

2.1.3 不同溶液流速条件

30°、75°倾角岩样在 pH=2, 溶液流速分别为 0, 0.026, 0.047, 0.068 m/s 酸液中浸泡 14 d 的溶蚀量如图 3(c) 所示: 30°岩样在酸性溶液静止的状态下, 溶蚀量仅为 3.04 g, 当流速较小($v=0.026$ m/s, 酸液为间断点滴状滴落)时, 岩样的溶蚀量没有显著提升, 而当流速达到 0.047 m/s(流出酸液为连续滴状)后, 溶蚀量得到显著提升, 达到 9.50 g, 当流速为 0.068 m/s(酸液为喷射状流出), 溶蚀量保持快速增加。2 种不同层理倾角岩样的溶蚀反应程度呈现出 $30^\circ > 75^\circ$ 的规律。

2.1.4 不同溶蚀时间条件

不同溶蚀时间的 15°、60°岩样在 pH=2, 流速为 0.026 m/s 环境下的溶蚀量如图 3(d) 所示。2 种层理倾角不同的岩样在各个时间节点的溶蚀量相差不大, 反应曲线均呈现出上升趋势。在溶蚀初期, 溶蚀速率缓慢上升, 经过 14, 22, 31 d 的试验, 溶蚀量增加变快, 层

理倾角为 15°的岩样在 14 d 时的溶蚀量仅为 4.39 g, 溶蚀反应至 31 d 时, 溶蚀量达到 25.65 g。试验现象表现为层理面附近溶孔、溶隙越来越多, 层间胶结物随着溶蚀作用逐渐脱落, 导致岩石试件的新鲜反应面积增加, 溶蚀作用加强, 反应速率加快。

2.2 纵波波速变化

岩石经酸性溶液浸泡后, 部分液体渗入内部, 发生化学反应后产生微孔隙, 测定纵波波速变化可直观体现岩石内部孔隙变化。

2.2.1 不同层理倾角条件

不同溶蚀时间、不同层理倾角岩样的纵波波速变化规律如图 4(a) 所示。90°试样初始波速(0 d)比 0°试样大 82.56 m/s; 试验进行至 7 d, 倾角为 30°的岩样波速最低, 为 5 464.51 m/s, 60°岩样波速最高, 为 5 675.34 m/s, 差值达到 210.83 m/s; 试验进行至 22 d, 60°与 30°岩样波速差值达到 317.59 m/s。随着层理倾角的增大, 相同浸泡时间的岩样波速变化规律与溶蚀量变化规律

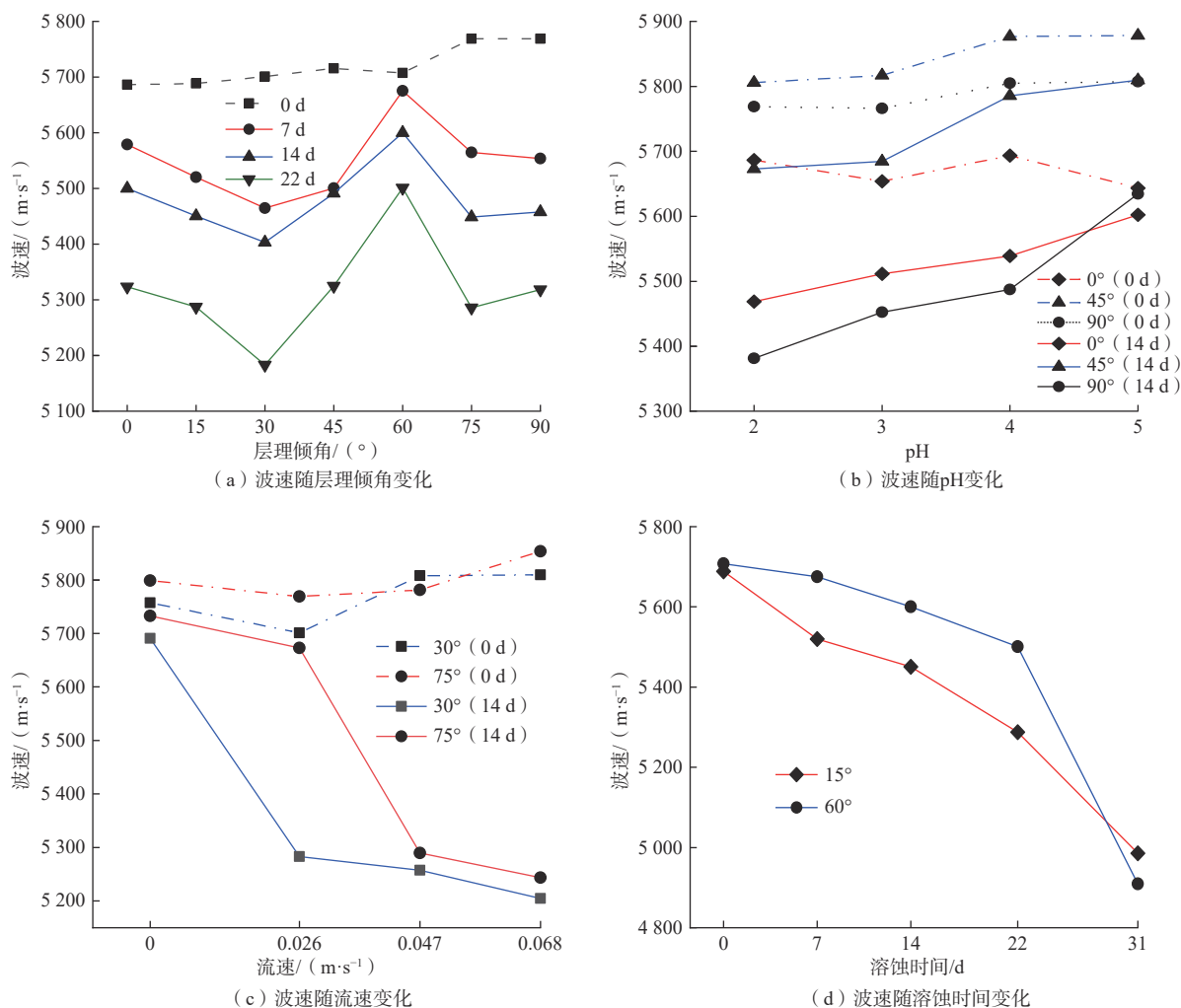


图 4 不同条件下纵波波速的变化

Fig. 4 Variation of P-wave velocity under different conditions

相反,皆呈现出 30°岩样波速最低,60°岩样最高的特征。相同倾角的试样,随着酸-岩化学作用的进行,波速随着时间的增长而降低。

2.2.2 不同溶液 pH 条件

在不同 pH 的酸性溶液中,岩样纵波波速变化如图 4(b)所示:3 种不同层理倾角的岩样在酸性溶液中浸泡 14 d 后,随着 pH 的增加,波速逐渐增大。层理倾角为 90°岩样的 2 条波速线条间隔最大,波速变化量在 pH=2 时达到 387m/s。层理倾角为 45°变化最小,波速变化量在 pH=2 时为 133 m/s,波速的变化量在不同层理角度方面呈现出 90°>0°>45°的规律,这与前述质量变化中讨论的结果相吻合。

2.2.3 不同流速条件

层理倾角为 30°、75°的岩样在不同流速条件下溶蚀 14 d 后,所得到的波速变化规律如图 4(c)所示。14 d 后,30°岩样在流速较低($v=0.026\text{ m/s}$)时波速呈现明显下降趋势,减小了 417 m/s。75°岩样在流速为 0.026~0.047 m/s 阶段波速开始明显下降,最大降低了 492 m/s。

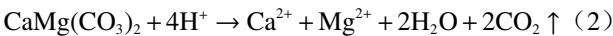
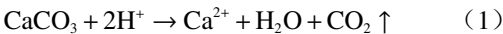
2.2.4 不同溶蚀时间条件

层理倾角为 15°、60°的岩样经过 pH=2,流速为

0.026 m/s 的酸性溶液浸泡后,随着水岩物理化学作用时间的增长,岩石内部缺陷逐渐增多,所测波速如图 4(d)所示。2 种倾角岩样初始波速变化较小,随着时间增加,波速均呈现下降趋势,在 0~22 d,15°岩样波速降低较 60°岩样多,但在此时间段内,2 种层理倾角的岩样波速变化均较缓慢,在 22~31 d,岩样波速均呈现急速降低的现象。

2.3 溶液中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度变化

岩石在酸性液体溶蚀之后的宏观变化主要体现在溶蚀量、波速变化量、溶蚀带的分布、岩石外观的变化等。已有研究表明^[26],灰岩与酸溶液溶解反应主要化学方程式如下:



方解石(CaCO_3)、白云石 [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] 作为灰岩主要反应物,试验样品溶蚀量可由 CaCO_3 、 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 的量来表征。本试验在不同工况下定时取 10ml 酸性溶液测试其离子浓度的变化,结果见表 2;根据化学反应方程,在(1)(2)化学反应方程中可求出 CaCO_3 和 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 溶解量,结果见表 3。

表 2 不同层理倾角岩样不同反应阶段 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 质量浓度

Table 2 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ concentration at different reaction stages in rock samples with different bedding dips

层理倾角/(°)	$\rho(\text{Mg}^{2+})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$			$\rho(\text{Ca}^{2+})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$			$\rho(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$		
	7 d	14 d	22 d	7 d	14 d	22 d	7 d	14 d	22 d
0	34.1	45.1	71.0	765	995	2 015	799.1	1 040.1	2 086.0
15	27.6	36.3	70.3	845	1 155	2 300	872.6	1 191.3	2 370.3
30	29.9	40.0	69.6	910	1 200	2 380	939.9	1 240.0	2 449.6
45	30.7	36.7	70.6	885	1 000	2 012	915.7	1 036.7	2 082.6
60	27.1	41.0	69.6	745	800	1 720	772.1	841.0	1 789.6
75	29.1	36.4	70.5	778	1 190	2 330	807.1	1 226.4	2 400.5
90	30.3	35.4	85.2	835	1 145	2 190	865.3	1 180.4	2 275.2

注:表中“ ρ ”为质量浓度。

表 3 不同层理倾角岩样不同反应阶段矿物溶解量

Table 3 Mineral dissolution amounts in different reaction stages of rock samples with different bedding dips

层理倾角/(°)	$m[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2+\text{CaCO}_3]/\text{g}$			称重法溶蚀量/g		
	7 d	14 d	22 d	7 d	14 d	22 d
0	2.03	2.65	5.29	2.11	2.63	5.35
15	2.21	3.01	6.00	2.30	3.08	5.97
30	2.38	3.14	6.19	2.43	3.15	6.18
45	2.32	2.63	5.28	2.32	2.65	5.31
60	1.96	2.14	4.54	1.99	2.20	4.59
75	2.05	3.10	6.07	2.14	2.96	6.00
90	2.19	2.99	5.77	2.29	2.94	5.68

注:表中“ m ”为质量。

岩石的水物理化学损失演化过程与其矿物颗粒和溶液发生反应的速率密切相关。从本文的试验结果(表 3)来看,灰岩中的方解石、白云石等可溶矿物颗粒与酸溶液间的化学反应和接触状态对试样的溶蚀程度影响较大,对岩样的水化学损伤起着主导作用,综合本试验对酸性溶液中离子浓度测定数据来计算岩样的方解石、白云石溶解量,与实际称重法所测定的数据相对比,2 种方法所得到的结果误差率在 5% 以内。

2.4 岩样表面溶蚀形态

试验中观察到层理倾角变化如图 5 所示,黄色虚线表示的层理在溶蚀后呈现出层理凸显于试件表面

的形态,这时难溶物聚集于层理,肉眼可见的淡黄色溶蚀带或宽或细的分布在岩样表层。

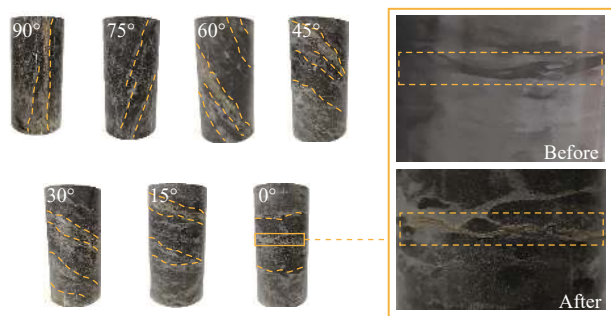


图 5 试验后溶蚀带分布

Fig. 5 Distribution of dissolution zone after test

3 损伤变量回归分析与溶蚀机理分析

3.1 损伤变量的定义

根据前述试验结果,本文选择岩样的溶蚀量即 $[(\text{CaCO}_3 + \text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)]$ 溶解质量来定义灰岩在酸性溶液下的水化学损伤变量(D_m)。根据损伤变量定义可得:

$$D_m = 1 - \frac{m_t}{m_0} \quad (3)$$

式中: m_0 ——溶蚀试验前岩样的初始质量/g;

m_t ——溶蚀试验进行中某一时刻岩样质量/g。

损伤变量与层理倾角、pH、流速、溶蚀时间各要素之间的关系经过回归分析的方法,拟合出损伤变量与各单因素之间的关系式,并进行检验,检验通过,则说明所选模型有意义。

3.2 单因素回归分析

3.2.1 损伤变量与层理倾角的关系

前文提到,灰岩层理倾角影响着溶蚀试验的结果,就层理因素而言,层间可溶矿物含量决定着溶蚀试验结果,通过测量溶蚀前后的质量变化可以得到溶蚀量,而溶蚀量可以反映层间溶蚀物的脱落情况,从而反映岩石的损伤程度。考虑样本数据与非线性拟合中的波动曲线拟合程度较高,得到损伤变量与层理倾角的关系如图 6 所示,相关系数 $R^2=0.633$,拟合效果较好。用 F 分布对拟合结果进行检验,取检验水平 $\alpha=0.05$, $F_\alpha=2.76 \times 10^{-4}$,远小于拟合检验中 $F=334.78$,检验通过,可建立模型。损伤变量与层理倾角单因素之间的关系表达式见式(4)。

$$D_m = 0.00514 + 7.501 \times \sin \left[\pi \times \left(\frac{\varphi - 4.44}{34.91} \right) \right] \quad (4)$$

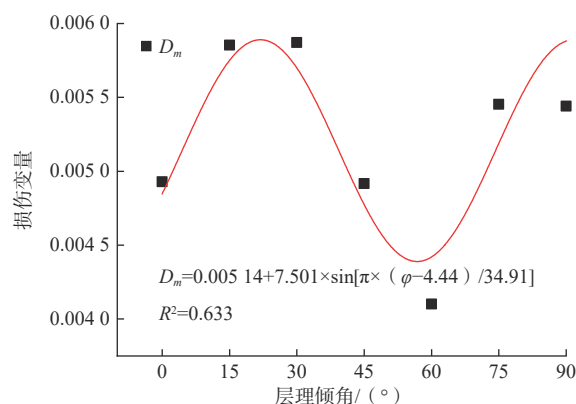


图 6 损伤变量与层理倾角间的拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve between D_m and φ

3.2.2 损伤变量与 pH 的关系

根据定义的损伤变量与 pH 之间样本数据的分布,考虑选取指数函数对样本数据进行拟合,相关系数 $R^2=0.995$,拟合效果非常好(图 7)。用 F 分布对拟合结果进行检验,取检验水平 $\alpha=0.05$, $F_\alpha=0.025$,远小于拟合检验中 $F=785.44$,检验通过,可建立模型。损伤变量与 pH 单因素之间的关系表达式见式(5)。

$$D_m = 4.74 + 0.018 \times 0.5^p \quad (5)$$

式中: p ——溶液 pH 值。

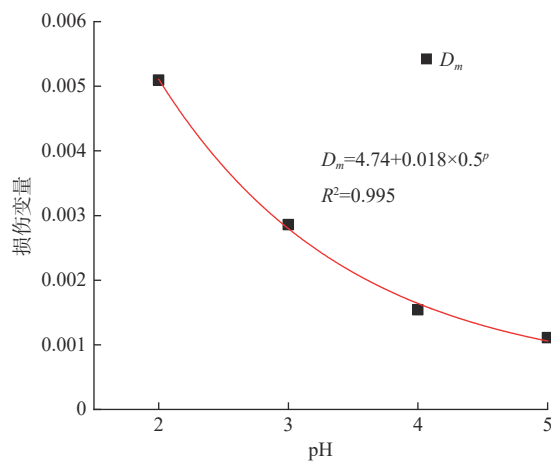


图 7 损伤变量与 pH 间的拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve between D_m and pH

3.2.3 损伤变量与流速的关系

随着流速的增加,损伤变量也随之增加(图 8)。根据计算所得样本数据,考虑选取多项式线性函数对样本数据进行拟合,相关系数 $R^2=0.776$,拟合效果较好。用 F 分布对拟合结果进行检验,取检验水平 $\alpha=0.05$, $F_\alpha=0.273$,小于拟合检验中 $F=6.196$,检验通过,可建立模型。损伤变量与流速单因素之间的关系表达

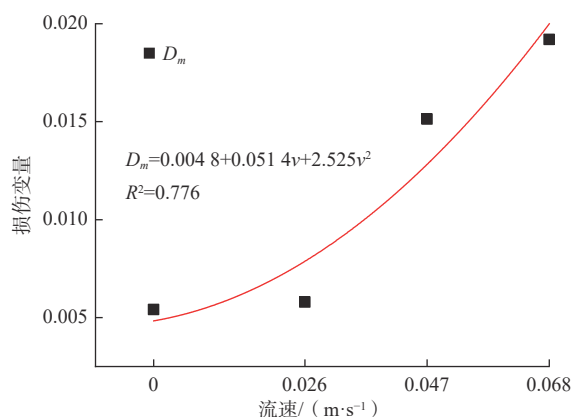


图 8 损伤变量与流速的拟合曲线

Fig. 8 Fitting curve between D_m and v

式见式(6)。

$$D_m = 0.0048 + 0.0514v + 2.525v^2 \quad (6)$$

3.2.4 损伤变量与溶蚀时间的关系

经过对损伤变量与溶蚀时间的样本数据进行分析,观察到样本分布呈现规律与多项式线性函数规律一致(图 9),采用多项式线性函数进行拟合,相关系数 $R^2=0.997$,拟合效果很好。用 F 分布对拟合结果进行检验,取检验水平 $\alpha=0.05$, $F_{\alpha}=0.029$,小于拟合检验中 $F=598.11$,检验通过,可建立模型。损伤变量与溶蚀时间单因素之间的关系表达式见式(7)。

$$D_m = 0.00268 - 2.737 \times 10^{-4}t + 5.755 \times 10^{-5}t^2 \quad (7)$$

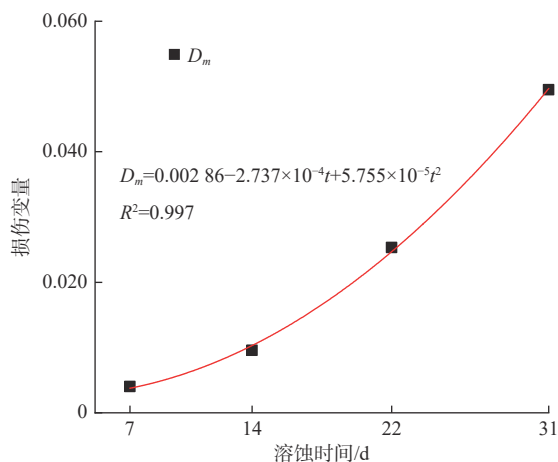


图 9 损伤变量与溶蚀时间的拟合曲线

Fig. 9 Fitting curve between D_m and t

3.3 多元回归分析

综上所述,建立损伤变量与层理倾角、pH、流速、溶蚀时间 4 个因素的多元回归方程可以定量描述层理灰岩溶蚀损伤。假设各单因素与损伤变量之间存在线性相关性^[27],根据式(4)~(7)简化,首先假设损伤

变量与 $\sin[\pi(\varphi-4.44)/34.91]$ 、 0.5^p 、 $v+49.17v^2$ 、 $t+0.21t^2$ 存在线性相关,则:

$$D = B_0 + B_1 \sin\left(\pi \times \frac{\varphi - 4.44}{34.91}\right) + B_2 0.5^p + B_3(t + 0.21t^2) + B_4(v + 49.17v^2) \quad (8)$$

利用多元线性回归的方法,可以求解出待定系数 $B_0=-0.09$ 、 $B_1=-0.001$ 、 $B_2=0.003$ 、 $B_3=0.001$ 、 $B_4=0.236$ 。最终得到层理灰岩损伤定量表达式为:

$$D = -0.09 - 0.001 \sin\left(\pi \times \frac{\varphi - 4.44}{34.91}\right) - 0.003 \times 0.5^p + 0.001(t + 0.21t^2) + 0.236(v + 49.17v^2) \quad (9)$$

其中,

$$0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ; 2 \leq p \leq 5; 0 \leq v \leq 0.068 \text{ m/s}; 0 \leq t \leq 31 \text{ d}.$$

对回归方程(9)进行 F 检验、相关性检验以验证回归方程的线性相关性假设,得到 $R^2=0.600$,相关检验结果见表 4。

表 4 层理灰岩溶蚀损伤回归方程式方差分析表

Table 4 Table of regression equation variance analysis of dissolution damage in bedding limestone

差异源	平方和	自由度	均方	F	显著性
回归	0.003	4	0.001	18.974	*
残差	0.002	44	0.000		
总计	0.005	48			

根据 F 服从自由度为(4,48)的分布,在显著性水平为 $\alpha=0.05$ 和 $\alpha=0.01$ 下,查表可得 $F_{0.05}(4,48)=2.565$, $F_{0.01}(4,48)=3.737$, $F > F_{0.01}(4,48)$ 。

综上所述,损伤变量与 $\sin[\pi(\varphi-4.44)/34.91]$ 、 0.5^p 、 $v+49.17v^2$ 、 $t+0.21t^2$ 存在良好的线性相关性,且回归相关性较高($R^2=0.6$),前述假设成立。

各因素对层理灰岩溶蚀损伤的影响因子可以利用标准化系数 β 来体现, $\beta > 0$ 时为正向影响,该值越大说明影响越大; $\beta < 0$ 时为负向影响,该值越小说明影响越大。上述模型中,回归方程的常数为-0.017,层理倾角、pH、流速、溶蚀时间的标准化系数分别为:-0.058、-0.244、0.249、0.696。说明层理倾角和 pH 对模型存在负向影响,其他 2 个因素为正向影响,影响程度为:溶蚀时间 > 流速 > pH > 层理倾角。

3.4 酸性溶蚀机理分析

从试验结果中可以看出,岩石在酸性环境下的溶蚀不是均质、匀速进行的。各因素共同作用时,岩石的溶蚀具有交叉叠加效应。

(1)层理因素:层理倾角将岩石划分为不同表面

积,所形成的直接溶蚀接触面不同,溶蚀作用进行初期优先溶蚀层间薄弱联结区域,在溶蚀进行过程中,层间难溶物质聚集在层理处,形成了明显凸显于试样表面的溶蚀带,溶蚀带分布越多的岩样有效溶蚀面积则越小,导致溶蚀量小,相反,则溶蚀量大。

(2)pH因素:岩石中可溶矿物与酸性溶液中 H^+ 发生反应,随着pH的增大, H^+ 与可溶矿物反应速率和程度逐渐减缓,岩石在溶蚀过程的损伤程度也逐渐降低。

(3)流速因素:岩样除了受到水化学作用之外,还受到明显水物理冲刷作用,溶液在试样溶蚀过程中可以携带沉淀物及部分细小矿物碎屑流走,使试样的新鲜反应面积增大,同时,较大的流速使得初始浓度的 H^+ 能够快速补给,避免反应液在短时间内达到饱和,加速溶蚀作用。

(4)溶蚀时间因素:从前述试验结果可以看出,溶蚀时间因素是层理灰岩化学溶蚀作用的显著影响因素。岩石的层间充填物本身是矿物碎屑颗粒之外的化学沉淀物质,其颗粒间联结程度较岩石松散,酸-岩反应初期,优先溶蚀此部分矿物,因此层理面附近溶孔、溶隙越来越多,层间胶结物随着溶蚀作用逐渐脱落,导致岩石试件的新鲜反应面积增加,溶蚀作用加强,反应速率加快,岩样表面逐渐凹凸不平。同时,酸液渗入岩石内部使水流通道变宽、溶蚀接触面增加,酸-岩反应加剧。说明岩样在酸性液体的溶蚀下具有累积效应,水岩化学作用时间越长,溶蚀作用越明显。

溶蚀作用初期,灰岩与酸性溶液接触,溶液的pH起着主要作用,岩石表面的可溶矿物与 H^+ 进行化学反应,此时pH可以较大程度决定岩石的损伤变化。随着试验的进行,因为有不断稳定补给的 H^+ 溶液,从实际长期作用来看,溶蚀时间发挥了更突出的作用。当流速因素共同参与,且达到一定流速时,水物理作用也参与到反应中来,水流的物理作用可以将岩石表面反应沉淀物质冲刷带走,使岩石的新鲜面与溶液接触,加速溶蚀反应,因此呈现出溶蚀量快速增加的现象。层理倾角因素在灰岩溶蚀试验中使得岩样有效溶蚀面积存在差异,影响较其他因素小。

在碳酸盐岩地区,岩石的水化学反应十分常见,由于人类工程活动对岩体的扰动使得岩体损伤、破裂,由此为岩石的化学溶解和溶质运移提供了通道,使得岩石中的裂隙在长期的水化学反应中进一步扩展,最终可能导致大规模岩体工程失稳。

4 结论

(1)层理倾角的存在使得岩石在溶蚀后形成不同形态的凸显于岩石表面的溶蚀带,表明层理倾角对岩石表面,由溶蚀作用形成的形态特征有决定性作用。

(2)不同层理倾角的岩样,相同酸性环境下溶蚀作用呈现出 $90^\circ > 0^\circ > 45^\circ > 30^\circ > 75^\circ > 15^\circ > 60^\circ$ 的规律。

(3)利用多元统计回归分析的方法,建立溶蚀损伤与层理倾角、pH、流速、溶蚀时间4个因素之间的数学关系,结果表明影响程度为:溶蚀时间>流速>pH>层理倾角。

参考文献 (References):

- [1] 王雁冰,付代睿.层理角度对天然岩石材料动态断裂行为的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(4):849-867. [WANG Yanbing, FU Dairui. Effect of bedding angle on dynamic fracture behavior of natural rock materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(4): 849-867. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 汤连生,王思敬,张鹏程,等.水-岩土化学作用与地质灾害防治[J].中国地质灾害与防治学报,1999,10(3):61-70. [TANG Liansheng, WANG Sijing, ZHANG Pengcheng, et al. Mechanical properties of rock and soil influenced by hydrochemical action and geological hazard control[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1999, 10(3): 61-70. (in Chinese with English abstract)]
- [3] HAXAIRE A, DJERAN-MAIGRE I. Influence of dissolution on the mechanical behaviour of saturated deep argillaceous rocks[J]. Engineering Geology, 2009, 109(3/4): 255-261.
- [4] 邓涛,廖军,王陈宾,等.不同风化程度下灰岩抗剪强度特性及估算模型研究[J].水文地质工程地质,2022,49(4):71-80. [DENG Tao, LIAO Jun, WANG Chenbin, et al. A study of shear strength characteristics and estimation model of limestone under different weathering degrees[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(4): 71-80. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 汤连生,王思敬.水-岩化学作用对岩体变形破坏力学效应研究进展[J].地球科学进展,1999,14(5):433-439. [TANG Liansheng, WANG Sijing. Progress in the study on mechanical effect of the chemical action of water rock on deformation and failure of rocks[J]. Advance in Earth Sciences, 1999, 14(5): 433-439. (in

- Chinese with English abstract)]
- [6] 冯夏庭, 王川婴, 陈四利. 受环境侵蚀的岩石细观破裂过程试验与实时观测 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 935 - 939. [FENG Xiating, WANG Chuanying, CHEN Sili. Testing study and real-time observation of rock meso-cracking process under chemical erosion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(7): 935 - 939. (in Chinese with English abstract)]
- [7] GUDBRANDSSON S, WOLFF-BOENISCH D, GISLASON S R, et al. An experimental study of crystalline basalt dissolution from $2 \leq \text{pH} \leq 11$ and temperatures from 5 to 75 °C[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(19): 5496 - 5509.
- [8] ABBASZADEH M, NASIRI M, RIAZI M. Experimental investigation of the impact of rock dissolution on carbonate rock properties in the presence of carbonated water[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(9): 791.
- [9] 刘琦, 顾展飞, 卢耀如, 等. 贵州施秉白云岩溶蚀特性及孔隙特征实验研究 [J]. 地球学报, 2015, 36(4): 413 - 418. [LIU Qi, GU Zhanfei, LU Yaoru, et al. The experimental study of dolomite dissolution and pore characteristics in Shibing, Guizhou[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2015, 36(4): 413 - 418. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 林云, 任华鑫, 武亚遵, 等. 不同赋存环境下碳酸盐岩溶蚀过程试验模拟研究 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(2): 15 - 26. [LIN Yun, REN Huaxin, WU Yazun, et al. Experimental simulation of the carbonate dissolution process under different occurrence conditions [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(2): 15 - 26. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 乔丽苹, 刘建, 冯夏庭. 砂岩水物理化学损伤机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2117 - 2124. [QIAO Liping, LIU Jian, FENG Xiating. Study on damage mechanism of sandstone under hydro-physico-chemical effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2117 - 2124. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 张强. 金沙江观音岩电站红层钙质砂岩类岩溶发育特征及渗透稳定性研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2010. [ZHANG Qiang. Semi-karst development characteristics and engineering seepage stability of the calcareous sandstone red beds of guanyinyan hydropower, Jinsha River[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 柴少波, 宋浪, 周炜, 等. 水岩作用对充填节理岩石劣化的影响 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2023, 53(5): 1510 - 1520. [CHAI Shaobo, SONG Lang, ZHOU Wei, et al. Effect of water-rock interactions on the deterioration of filled jointed rock[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2023, 53(5): 1510 - 1520. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 王露. 酸性环境下层状灰岩的溶蚀损伤特性试验研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2021. [WANG Lu. Experimental study on corrosion damage characteristics of layered limestone in acidic environment[D]. Guiyang: Guizhou University, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 丁茜, 何治亮, 沃玉进, 等. 高温高压条件下碳酸盐岩溶蚀过程控制因素 [J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 784 - 791. [DING Qian, HE Zhiliang, WO Yujin, et al. Factors controlling carbonate rock dissolution under high temperature and pressure[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(4): 784 - 791. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 那金, 许天福, 魏铭聪, 等. 增强地热系统热储层-盐水- CO_2 相互作用 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2015, 45(5): 1493 - 1501. [NA Jin, XU Tianfu, WEI Mingcong, et al. Interaction of rock-brine-supercritical CO_2 in CO_2 -EGS reservoir[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2015, 45(5): 1493 - 1501. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 盛金昌, 吴彦青, 白柯含, 等. 不同溶液渗透溶蚀作用下碳酸盐岩渗透特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊 2): 3279 - 3286. [SHENG Jinchang, WU Yanqing, BAI Kehan, et al. Study on the permeability evolution of carbonate rocks under seepage corrosion effect of different solutions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(Sup 2): 3279 - 3286. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 陈四利, 冯夏庭, 周辉. 化学腐蚀下砂岩三轴细观损伤机理及损伤变量分析 [J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1363 - 1367. [CHEN Sili, FENG Xiating, ZHOU Hui. Study on triaxial meso-failure mechanism and damage variables of sandstone under chemical erosion[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(9): 1363 - 1367. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 丁梧秀, 陈建平, 徐桃, 等. 化学溶液侵蚀下灰岩的力学及化学溶解特性研究 [J]. 岩土力学, 2015, 36(7): 1825 - 1830. [DING Wuxiu, CHEN Jianping, XU Tao, et al. Mechanical and chemical characteristics of limestone

- during chemical erosion[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(7): 1825 – 1830. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 李晓宁. 酸性环境下粉砂质泥岩宏细观损伤特性研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2016. [LI Xiaoning. A study on macro-meso damage characteristics of silty mudstone under acid corrosion[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 卢运虎, 梁川, 金衍, 等. 高温下页岩水化损伤的各向异性实验研究 [J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2017, 47(11): 138 – 145. [LU Yunhu, LIANG Chuan, JIN Yan, et al. Experimental study on hydration damage of anisotropic shale under high temperature[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2017, 47(11): 138 – 145. (in Chinese with English abstract)]
- [22] XU Peng, SHENG Mao, LIN Tianyi, et al. Influences of rock microstructure on acid dissolution at a dolomite surface[J]. *Geothermics*, 2022, 100: 102324.
- [23] ZHANG Hao, ZHONG Ying, ZHANG Jiang, et al. Experimental research on deterioration of mechanical properties of carbonate rocks under acidified conditions[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 185: 106612.
- [24] 凌斯祥, 巫锡勇, 孙春卫, 等. 水岩化学作用对黑色页岩的化学损伤及力学劣化试验研究 [J]. *实验力学*, 2016, 31(4): 511 – 524. [LING Sixiang, WU Xiyong, SUN Chunwei, et al. Experimental study of chemical damage and mechanical deterioration of black shale due to water-rock chemical action[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2016, 31(4): 511 – 524. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 苗胜军, 蔡美峰, 冀东, 等. 酸性化学溶液作用下花岗岩损伤时效特征与机理 [J]. *煤炭学报*, 2016, 41(5): 1137 – 1144. [MIAO Shengjun, CAI Meifeng, JI Dong, et al. Aging features and mechanism of Granite's damage under the action of acidic chemical solutions[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(5): 1137 – 1144. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 陈如冰, 罗明明, 罗朝晖, 等. 三峡地区碳酸盐岩化学组分与溶蚀速率的响应关系 [J]. *中国岩溶*, 2019, 38(2): 258 – 264. [CHEN Rubing, LUO Mingming, LUO Zhaohui. Response relationship between chemical composition and dissolution rate of carbonate rocks in the Three Gorges Area[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(2): 258 – 264. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 康孟羽, 朱月琴, 陈晨, 等. 基于多元非线性回归和 BP 神经网络的滑坡滑动距离预测模型研究 [J]. *地质通报*, 2022, 41(12): 2281 – 2289. [KANG Mengyu, ZHU Yueqin, CHEN Chen, et al. Research on landslide sliding distance prediction model based on multiple nonlinear regression and BP neural network[J]. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(12): 2281 – 2289. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 宗 爽