

顾展飞, 黄冰砚, 刘之葵, 等. 振动荷载及温度对白云岩和石灰岩溶蚀影响试验研究[J]. 中国岩溶, 2023, 42(4): 834-841.
DOI: 10.11932/karst202304y01

振动荷载及温度对白云岩和石灰岩溶蚀影响试验研究

顾展飞^{1,2}, 黄冰砚¹, 刘之葵^{1,2}, 全鑫¹, 谢永雄¹

(1. 桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西桂林 541004; 2. 南方石山地区矿山地质环境修复工程技术创新中心, 广西南宁 530029)

摘要:在岩溶地区, 列车运行期间的振动会对白云岩和石灰岩的水岩作用过程产生影响, 再加上复杂的外界条件, 这一影响会更加显著。以桂北岩溶石山地区白云岩和石灰岩为研究对象, 利用自主设计的试验装置进行室内模拟试验, 分别研究振动荷载及不同温度条件对白云岩和石灰岩的溶蚀的影响规律。研究发现: ①常温常压条件下, 在静止的酸性溶液中, 白云岩的溶蚀速率小于石灰岩; ②在H⁺充足的条件下, 随着温度(0~45℃)的升高, 石灰岩和白云岩的溶蚀速率都会增大, 温度变化对于白云岩溶蚀影响更为显著; ③白云岩和石灰岩的溶蚀受振动条件的强烈影响, 二者的溶蚀量都随着振动次数的增加而增大, 且在相同振动条件下石灰岩的溶蚀速率始终大于白云岩。该研究可为桂北岩溶石山地区的工程设计和建设提供理论依据。

关键词:石灰岩和白云岩; 振动荷载; 温度; 溶蚀特性

中图分类号: P642.25; U212.22 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2023)04-0834-08

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

岩溶是指水对可溶性岩石进行的溶解作用, 及其形成的地表及地下各种奇异的景观与现象。在岩溶作用过程中, 经常伴随着地表侵蚀、地下潜蚀、冲蚀以及崩塌、塌陷与滑动, 和化学与物理的风化、搬运、堆积与沉积等作用^[1-2]。中国岩溶地貌分布广、面积大, 是世界上最大的岩溶地区之一, 分布着大片连续的石灰岩和白云岩。在岩溶地区, 由于岩体矿物和化学成分的不同, 内部结构和孔隙特征的差异, 以及地下水赋存情况、温度、振动荷载等外界条件的影响, 其分布的石灰岩和白云岩存在着差异性溶蚀。差异性溶蚀常常破坏岩体的完整性, 影响岩体

的力学性能及稳定性, 对附着在其上建筑物和构筑物的安全有着很大的影响。随着我国经济实力的不断增强和西部地区发展战略的持续推进, 大量隧道及地下工程不断修建, 列车(高速列车、城市轨道交通)运行的速度和频次都在显著提高。列车运行期间振动的反复作用, 会改变水岩作用的程度和方向, 导致岩体内部产生节理、裂隙及孔洞不断扩展。再加上复杂的外界因素(温度、气候等)影响, 会加速这一过程, 降低白云岩和石灰岩的强度, 进而对列车的运行安全产生隐患。

关于温度及荷载条件对碳酸盐岩溶蚀的影响, 国内外学者进行了大量的研究, 且取得了一些重要的成果。Nomeli et al.^[3]研究了50~100℃的温度范

基金项目: 国家自然科学基金(41867039); 南方石山地区矿山地质环境修复工程技术创新中心项目(CX2X2020002); 广西岩土力学与工程重点实验室资助课题(桂科能20-Y-XT-03)。

第一作者简介: 顾展飞(1985—), 男, 博士, 副教授。E-mail: guzhanfei2005@163.com。

通信作者: 刘之葵(1968—), 男, 博士, 教授。E-mail: liuzhikui@126.com。

收稿日期: 2022-09-08

围内和 600 巴的压力下方解石的溶解速率,确定了方解石溶解跟温度、压力和盐度之间的关系。Eliwa et al.^[4]研究了碳酸盐岩溶解过程中的热力学和动力学问题。Mutlutuk et al.^[5]通过反复的循环冻融实验,发现温度的变化会使岩石完整性遭到破坏,且冻融循环进行的次数越多、频率越高,岩石完整性损失越大,损伤及破坏特征越显著。余敏等^[6]研究发现随着温度的升高,碳酸盐岩的溶蚀量具有缓慢下降—缓慢上升—快速下降的特征。丁梧秀等^[7]以石灰岩为研究对象,考虑石窟区灰岩渗水溶液的侵蚀和冬季冻融损伤的影响,进行不同水化学溶液及冻融耦合作用下的力学试验。杨云坤等^[8]研究发现随着地层温度、压力升高,石灰岩表现为明显的胶结沉淀,白云岩在高温高压的酸性地层流体条件下不比灰岩更易溶蚀。Xie et al.^[9]研究了地震和高速列车耦合作用下的地面振动,发现二者耦合会增加地面的动态位移,当列车速度超过一定临界值时,耦合效应显著。盛金昌等^[10]通过设计不同工况试验,在改变渗透压以及化学溶液的条件下,得出了在应力作用下裂隙渗透性质的变化情况。陈功奇^[11]基于现场测试数据,分析了列车运行引起的振动对地基的影响。

综上所述,关于碳酸盐岩溶蚀的研究较多,有的关注温度条件,有的关注水动力条件,还有的关注溶蚀时的压力(气压)条件。但列车行驶振动条件下的白云岩和石灰岩溶蚀,尤其是多因素耦合作用下的溶蚀特征、溶蚀机制等科学问题还需要进一步加强。所以系统的开展石灰岩和白云岩结构特征及溶蚀试验,探索振动荷载条件下白云岩和石灰岩差异性对

岩溶地质灾害的影响机制,对桂北地区可持续发展具有重要的理论意义和实践意义。

1 试验材料与试验方法

1.1 试验材料

本次试验所采用的是白云岩与石灰岩,主要矿物成分是白云石和方解石,反应后溶液中析出的Ca²⁺、Mg²⁺是碳酸盐岩被溶蚀的结果^[12]。反应生成的Ca²⁺分别来自于白云岩与石灰岩,通过测定溶液中钙离子与浓度即可确定两种岩石的溶蚀性。碳酸盐与盐酸反应的离子方程式如下:



Ca²⁺浓度的快速增加可归因于最初岩石表面存在易溶、精细且非胶结的碳酸盐晶体或晶粒和不稳定且活性高的矿物^[13]。

在广西北部采集岩石样品(柳州轨道交通 1 号线某站白云岩: C₂d; 桂林某铁路线附近石灰岩: D₃r), 每组 4 块, 取回后切割成圆柱形薄片, 各组岩石样品尺寸及规格如表 1 所示。取回的岩石样品首先在实验室进行化学成分鉴定, 化学成分及含量如表 2 所示。每组数据均采用平均值。

1.2 试验方法

本试验所采用的装置为自主设计(图 1), 主要有振动设备, 恒温箱, 温控仪, 流量计, pH 测定仪, Ca²⁺、Mg²⁺的测定设备及有关药品和试剂等。恒温箱和温

表 1 岩石样品尺寸及规格

Table 1 Size of rock samples

组别	质量/g	厚度/mm	直径/mm	表面积/mm ²	体积/mm ³
1 白云岩	120.31	68.91	12.17	10 093.18	45 391.46
2 石灰岩	120.49	68.30	12.53	10 017.34	45 913.67
3 白云岩	119.82	68.83	12.35	10 112.29	45 951.51
4 石灰岩	120.27	68.91	12.29	10 118.69	45 830.40

表 2 岩石样品化学成分含量

Table 2 Chemical contents of rock samples

组别	CaO	MgO	SiO ₂	其他	烧失量
1 白云岩	32.14	20.27	0.24	1.59	45.76
2 石灰岩	53.65	0.39	0.90	2.54	42.52
3 白云岩	34.27	20.04	0.56	2.01	43.12
4 石灰岩	52.71	0.52	0.71	3.75	42.31

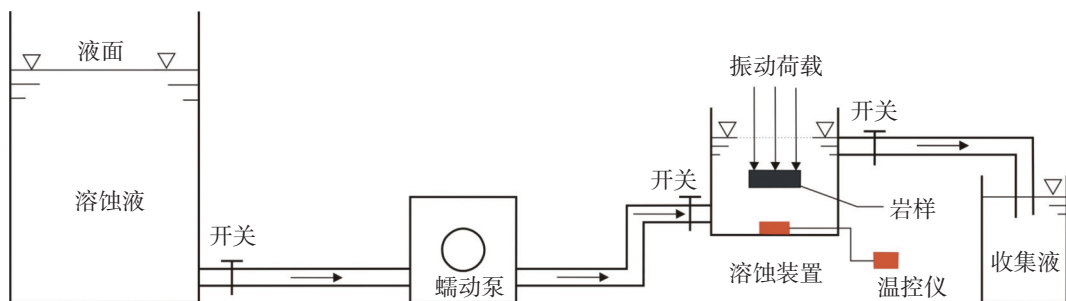


图 1 溶蚀试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the corrosion test device

控仪可以使试验的环境始终处于稳定的温度条件下,减少由于外部环境所产生的影响。在城市轨道交通站点之间,列车运行要经历加速~匀速~减速三个阶段,这一过程中振动的振幅会随着速度的变化而变化。列车每间隔 8 分钟会出发一趟,在运行过程中,产生的有水平向和竖向振动,但主要引起的是竖向振动。在试验室内为便于操作,振动条件借助于震击式振摆筛选机,震幅为 10 mm,震击次数约为 150 次·min⁻¹,频率为 2.5 次·s⁻¹。在筛选机上部固定一横杆,用一细棉线把岩样系在横杆的一端,以此来带动岩样振动。每间隔半小时振动一次,持续时间 2~3 min。

考虑到野外试验的不确定性,故在室内环境下进行试验。碳酸溶蚀在自然界分布十分普遍,且发生在 CO₂-H₂O-CaCO₃-MgCO₃ 体系中。考虑到碳酸的不稳定性及硫酸的综合溶蚀效应,以及为了加快试验的进程,本试验选用了化学性质较为稳定的盐酸溶液进行溶蚀试验^[14-17]。具体试验步骤如下:

(1) 用游标卡尺测量试件的直径、厚度后,将试件放入 105 ℃ 烘箱中烘干至恒重后取出,用高精度电子秤称取质量。所有试件的尺寸及规格精确到百分位,记录于表 1。

(2) 在用蒸馏水冲洗过的长方形玻璃容器中加入 pH=3.0 的盐酸溶液 5 L,每个试样单独放置一个容器中,并将容器放入恒温箱中,四个恒温箱依次设置温度为 15 ℃、25 ℃、35 ℃、45 ℃。实验过程中要定时检测溶液的 pH 值。

(3) 静止放置 72 h,并每间隔 2 h 抽取 50 mL 的盐酸溶液用 0.025 N 的 EDTA 溶液进行滴定试验,记录溶液中 Ca²⁺、Mg²⁺浓度的变化情况。最后一次滴定试验后取出试件并用蒸馏水冲洗后烘干称重,烘干条件同上。

(4) 最终试验结果以溶液中 Ca²⁺、Mg²⁺的浓度大

小及变化程度来反映两种盐酸盐的溶蚀特性。为保证试验数据的可靠性、试验结果采用平均值。

2 试验结果对比分析

2.1 静止状态下白云岩和石灰岩溶蚀特性研究

将试验条件设置为温度 25 ℃, pH=3.0,开展白云岩与石灰岩的溶蚀试验,试验结果见图 2。从表中可以得到,白云岩的溶蚀量始终小于石灰岩。岩性是影响两种岩石发育的主要因素,决定了两种岩石自身的溶解能力和程度。白云岩与石灰岩的主要矿物成分分别为白云石与方解石。碳酸盐矿物成分与含量的变化将导致其溶蚀能力的差异^[18]。

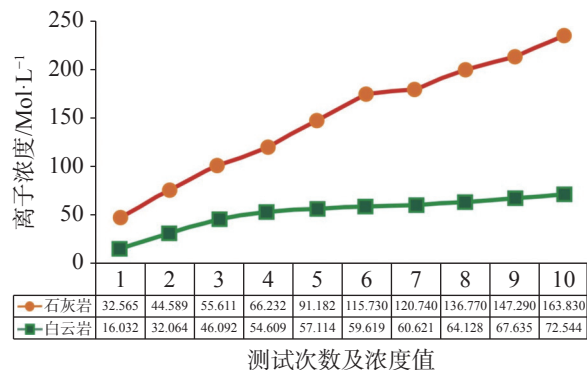


图 2 白云岩与石灰岩钙离子浓度析出对比示意图

Fig. 2 Comparison of precipitation concentrations of calcium ion between dolomite and limestone

2.2 不同温度条件下溶蚀特性试验研究

在地下工程活动的范围内,年平均地温与年平均气温正相关。过去 50 年桂北地区年平均气温约为 8.0~29.8 ℃,地面以下 80 cm 处年平均地温约为 12.8~27.2 ℃^[19]。因此,将试验条件设置为 pH=3.0,分别将温度设置为 5 ℃、15 ℃、25 ℃、35 ℃、45 ℃。

进行白云岩与石灰岩的溶蚀试验,测定 72 h 后溶液中最终钙离子含量。试验结果见图 3。

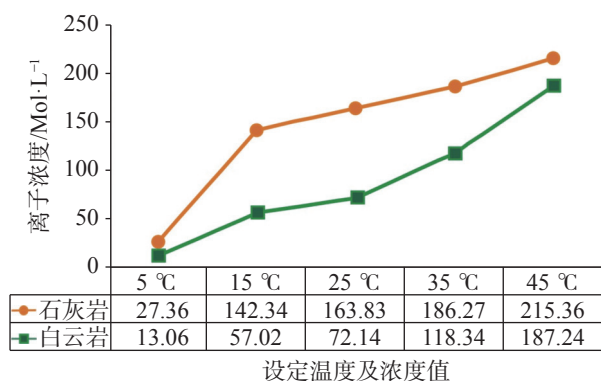


图 3 不同温度下石灰岩与白云岩钙离子析出浓度对比示意图

Fig. 3 Comparison of precipitation concentrations of calcium ion between limestone and dolomite at different temperatures

从图 3 中可以得到: 在设定的试验温度内, 两种岩石的溶蚀率都随着温度上升而增大, 在 45 °C 时白云岩与石灰岩的溶蚀量为最大, 15 °C 时溶蚀量最低。出现这样的原因是因为温度升高分子的活化能增加, 一方面增强了盐酸溶液的溶解性, 另一方面温度升高增加了两种岩石内的分子动能, 提高了化学反应速率, 加快了溶蚀的过程。

在表生或相对较浅埋藏的条件下, 方解石的溶解速率大大超过白云石, 随着温度和压力的升高, 白云岩的溶解速率增大, 两者的溶解速率差值变小^[20-21]。本研究也基本符合这个研究结果: 15 °C 时石灰岩溶蚀量是白云岩的 2.496 倍, 45 °C 时石灰岩溶蚀量是白云岩的 1.150 倍。随着温度的升高, 两者溶蚀量差异逐渐减小, 温度变化对白云岩溶蚀性的影响更大。由于试验温度最高只有 45 °C, 没有达到白云岩的最佳溶解条件, 没有出现白云岩的溶蚀强度大于石灰岩的情况^[22]。

2.3 振动条件下白云岩和石灰岩溶蚀特性研究

溶蚀作用包括了化学溶解和机械破坏两方面, 振动荷载属于机械破坏的一种。随着经济社会的快速发展和国家战略的调整, 越来越多的高速铁路、公路需要经过岩溶区域。在建设及运营过程中, 车辆 (尤其是高速列车, 城市轨道交通) 等动荷载的影响更有利于提高白云岩和石灰岩的溶蚀速率, 在水动力条件较好的地段, 尤为明显。列车振动会加大岩体的变形, 特别是有裂隙或有连通孔隙岩体的变形;

同时, 振动荷载会加剧水岩化学溶蚀作用的程度, 机械破坏作用与化学溶蚀作用相耦合, 导致岩石内部产生次生矿物和次生孔隙, 加快溶蚀反应的速率。

考虑到野外试验条件的不稳定性, 决定采用室内模拟振动条件进行试验, 试验装置及试验方法如 1.2 所述, 试验结果见图 4。测定 72 h 后溶液中最终钙离子含量。由图 4 可以得出: 碳酸盐岩的溶蚀作用受到振动条件的强烈影响。白云岩与石灰岩的溶蚀量都随着振动次数的增加而增大, 且在相同振动条件下石灰岩的溶蚀量始终大于白云岩。振动可以加快岩石与溶蚀溶液的接触频次, 也相当于增加了酸性溶蚀的流速。一般认为: 流速越快, 碳酸盐岩在水中的扩散边界层越薄, 侵蚀速率越大, 越有利于碳酸盐岩的溶蚀作用的发生; 相反, 流速越慢, 侵蚀速率越小, 越不利于溶蚀作用的发生^[23]。

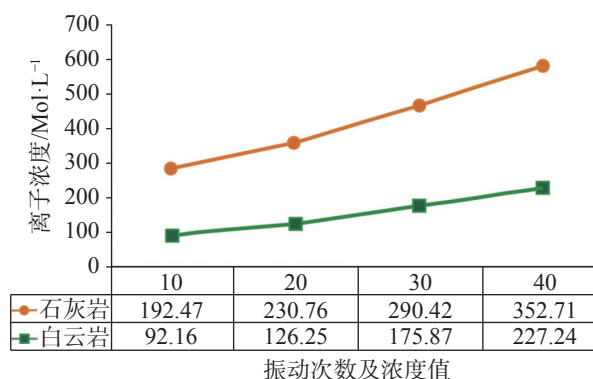


图 4 不同振动次数下石灰岩与白云岩钙离子析出浓度对比示意图

Fig. 4 Comparison of precipitation concentrations of calcium ion between limestone and dolomite under different vibration times

3 试验结果分析与讨论

(1) 碳酸盐岩溶蚀特性的决定性因素在于其自身岩性。不同的离子化学性状受外界环境的影响程度是不同的, 在晶体化学中, 常用晶格能来衡量晶体的稳性, 晶格能越大, 则晶体的稳定性越大。白云石的晶格能大于方解石, 这也许就是方解石和白云石溶解速度差异的内在原因^[24]。

从微观结构层面上来看, 在与酸性溶液发生反应时, 两种岩石表面受到的侵蚀程度相较内部更为剧烈。以白云岩反应前后电镜照片为例(图 5), 溶蚀前表面结构致密, 孔隙较少, 颗粒与颗粒之间胶结牢

固;溶蚀后结构变得较为松散,原有完整的胶结面消失,孔隙明显增多。对比可知化学反应的进行进一步加大了结构中的孔隙率,而孔隙率的增加又增大

了反应接触面积,进而又加快了化学反应的速率,溶蚀速率也逐渐增大。

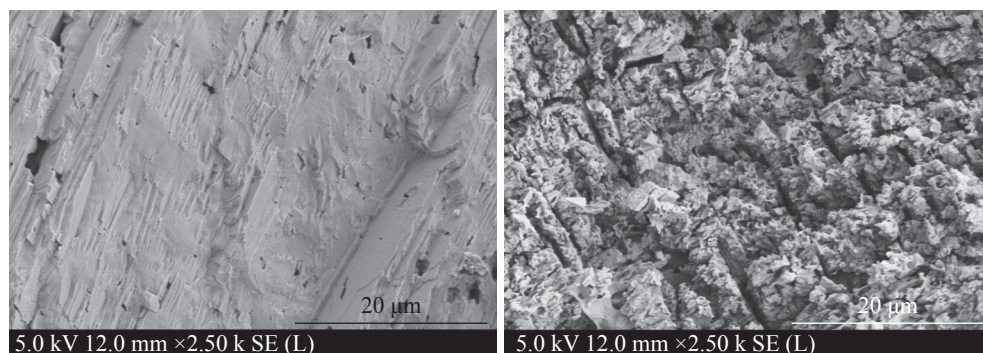


图5 白云岩溶蚀前后扫描电镜照片对比

Fig. 5 Comparison of scanning electron microscope images before and after dolomite dissolution

在岩石结构方面,白云岩为细晶结构,石灰岩为粉晶结构(图6和图7)。细晶结构的排列形式较粉晶结构更加稳定,且细晶结构的孔隙率小于粉晶结构,在与外界酸性溶液发生反应时,粉晶结构与溶液有较大的接触面积和反应速率,石灰岩的溶蚀速率要大于白云岩。

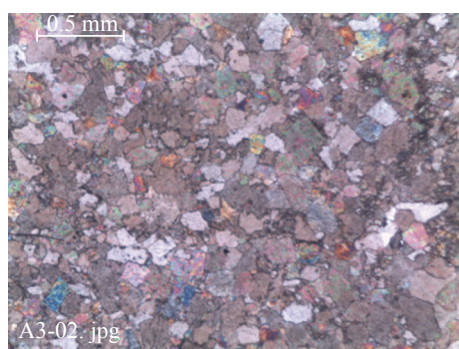


图6 白云岩细晶结构鉴定照片

Fig. 6 Identification image of dolomite fine grain structure

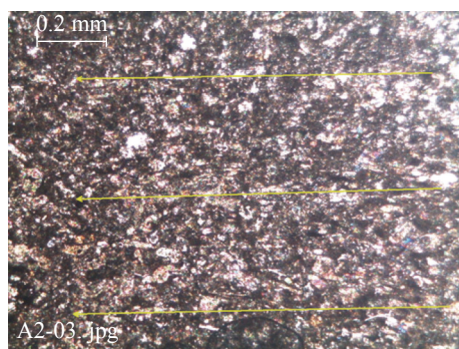


图7 石灰岩粉晶结构鉴定照片

Fig. 7 Identification image of limestone powder structure

(2)岩石是由固态的矿物颗粒以及颗粒间的微小空隙组成,固体矿物颗粒以及由矿物颗粒间空隙形成的通道网络,通道中往往充斥着流体介质。当岩石这种多孔介质所处环境发生变化时,赋存于岩石内部孔隙及裂隙中的水会发生相变,导致岩石的物理力学性质发生变化。这些变化不仅与其本身物理结构有关,还受其内部赋存的水、温度、受力状态的影响。岩溶石山地区具有独特的地表、地下二元地质构造,不合理土地利用方式导致植被破坏严重,大量岩石裸露于地表,太阳辐射强烈,岩石表面温度伴随太阳辐射同步增温,岩石表面增温快、降温较慢,具有显著的加热效应。

温度对碳酸盐岩溶蚀特性的影响存在单向性,在 H^+ 离子充足的酸性溶液中,随着温度升高,白云岩和石灰岩的溶蚀作用逐渐增强,在表层或浅层埋藏条件下(地温小于 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$),没有出现拐点^[22]。同时随着温度的升高,白云岩与石灰岩的溶解度也逐渐接近,且温度越高,温度变化对白云岩溶蚀作用的影响越大。这主要是因为高温为两种岩石矿物的晶格破坏提供的能量较大。而石灰岩由于前期反应速率较快,后期提升的空间较小。

(3)从图3中可以看出,当振动10次时,浸泡白云岩与石灰岩溶液中 Ca^{2+} 的浓度分别为 $92.16\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $192.47\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$,振动40次时,浸泡白云岩与石灰岩溶液中 Ca^{2+} 的浓度分别为 $227.24\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $352.71\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。可见振动条件较强的情况会促进两种碳酸盐岩的溶蚀作用,且石灰岩的溶蚀速率始终大于白

云岩。因此,在有振动条件的区域,石灰岩的溶蚀速率要强于白云岩。

对比振动条件和温度条件对石灰岩和白云岩溶蚀作用的影响,从图3与图4中的数据对比可以得出,两种条件对溶蚀作用造成的影响不同,振动条件对岩石溶蚀速率的影响要大于温度条件。造成这种现象的主要原因在于振动条件下溶蚀作用同时存在机械破坏过程与化学反应,岩石表面的一些微小颗粒会在流水条件下被冲刷下来,从而样品可以更充分地与溶液接触并反应,在没有振动条件时,溶蚀作用只存在化学反应,相比前者溶蚀速率要小。

4 结 论

(1)在静止条件下,随着酸性溶液的加入,石灰岩和白云岩中均有钙离子析出,白云岩中析出钙离子的速率始终小于石灰岩,且随着反应的持续进行,二者的差距越来越大;

(2)在试验选定的温度范围内,两种岩石的溶蚀率都随着温度上升而增大,15℃时石灰岩溶蚀量是白云岩的2.496倍,45℃时石灰岩溶蚀量是白云岩的1.15倍。随着温度的升高,两者溶蚀量差异逐渐减小,温度变化对白云岩溶蚀性的影响更大;

(3)振动条件较强的情况会促进两种碳酸盐岩的溶蚀作用,且石灰岩的溶蚀速率受振动荷载的影响更为明显。振动荷载对岩石溶蚀速率的影响要大于温度条件。

参考文献

- [1] 袁道先,蔡桂鸿.岩溶环境学[M].重庆:重庆出版社,1988.
- [2] 卢耀如.地质-生态环境与可持续发展—中国西南及邻近岩溶地区发展途径[M].南京:河海大学出版社,2003.
- [3] Nomeli M A, Riaz A. Effect of CO₂ solubility on dissolution rate of calcite in saline aquifers for temperature range of 50-100 °C and pressures up to 600 bar: Alterations of fractures geometry in carbonate rocks by CO₂-acidified brines[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(9): 352.
- [4] Eliwa A A. Kinetics and thermodynamics of carbonate dissolution process of uranium from Abu-Zeniema wet crude uranium concentrates[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2017, 312(1): 1-11.
- [5] Mutlutuk M, Altindag R, Turk G. A decay function model for the integrity loss of rock when subjected to recurrent cycles of freezing-thawing and heating-cooling[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(2): 237-244.
- [6] 余敏,蒋义敏,胡安平,吕玉珍,陈薇,王永生,王莹.碳酸盐岩溶蚀模拟实验技术进展及应用[J]. *海相油气地质*, 2020, 25(1): 12-21.
SHE Min, JIANG Yimin, HU Anping, LYU Yuzhen, CHEN Wei, WANG Yongsheng, WANG Ying. The progress and application of dissolution simulation of carbonate rock[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2020, 25(1): 12-21.
- [7] 丁梧秀,徐桃,王鸿毅,陈建平.水化学溶液及冻融耦合作用下灰岩力学特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(5): 979-985.
DING Wuxiu, XU Tao, WANG Hongyi, CHEN Jianping. Experimental study of mechanical property of limestone under coupled chemical solution and freezing-thawing process[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(5): 979-985.
- [8] 杨云坤,刘波,秦善,罗平,张单明,周明辉,石开波,田永净.基于模拟实验的原位观察对碳酸盐岩深部溶蚀的再认识[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2014, 50(2): 316-322.
YANG Yunkun, LIU Bo, QIN Shan, LUO Ping, ZHANG Shan-ming, ZHOU Minghui, SHI Kaibo, TIAN Yongjing. Re-recognition of deep carbonate dissolution based on the observation of in-situ simulation experiment[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2014, 50(2): 316-322.
- [9] XIE Wei, GAO Guangyun, SONG Jian, WANG Yu. Ground vibration analysis under combined seismic and high-speed train loads[J]. *Underground Space*, 2022, 7(3): 363-379.
- [10] 盛金昌,李凤滨,姚德生,黄青富,宋会彬,詹美礼.渗流-应力-化学耦合作用下岩石裂隙渗透特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(5): 1016-1025.
SHENG Jinchang, LI Fengbin, YAO Desheng, HUANG Qingfu, SONG Huibin, ZHAN Meili. Experimental study of seepage properties in rocks fracture under coupled hydro-mechano-chemical process[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(5): 1016-1025.
- [11] 陈功奇.基于现场测试的列车引起地基振动分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(3): 601-611.
CHEN Gongqi. Ground vibration analysis induced by high-speed train based on in-situ data[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(3): 601-611.
- [12] 高建文.酸性溶液对碳酸盐岩溶蚀实验[J]. *辽宁化工*, 2016, 45(3): 254-256.
GAO Jianwen. Experimental simulation of dissolution of carbonate rocks in acid solution[J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2016, 45(3): 254-256.
- [13] ANDRIAMIHAJA Spariharijaona, PADMANABHAN Eswaran, BEN-AWUAH Joel, SOKKALINGAM Rajalingam. 静态条件下碳酸盐岩三维孔隙网络的溶蚀改造及其对孔隙结构的影响[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(2): 361-369.
ANDRIAMIHAJA Spariharijaona, PADMANABHAN Eswaran, BEN-AWUAH Joel, SOKKALINGAM Rajalingam. Static dissolution-induced 3D pore network modification and its impact on

- critical pore attributes of carbonate rocks[J]. *Petroleum Exploration And Development*, 2019, 46(2): 361-369.
- [14] 刘再华, W Dreybrodt. 不同CO₂分压条件下的白云岩溶解动力学机理[J]. *中国科学(B辑 化学)*, 2001(4): 377-384.
- [15] 刘再华, 何师意, 袁道先, 赵景波. 土壤中的CO₂及其对岩溶作用的驱动[J]. *水文地质工程地质*, 1998(4): 44-47.
- [16] 宋焕荣, 黄尚瑜. 碳酸盐岩化学溶蚀效应[J]. *现代地质*, 1993(3): 363-371.
- SONG Huanrong, HUANG Shangyu. Chemical corrosion effect of carbonate rocks[J]. *Geoscience*, 1993(3): 363-371.
- [17] 陈卫昌, 李黎, 邵明申, 梁行洲, AFOLAGBOY Lekan Olatayo. 酸雨作用下碳酸盐岩类文物的溶蚀过程与机理[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(11): 2058-2067.
- CHEN Weichang, LI Li, SHAO Mingshen, LIANG Xingzhou, AFOLAGBOY Lekan Olatayo. Experimental study on carbonate dissolution and erosion effect under attack of simulated sulphuric acid rain[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(11): 2058-2067.
- [18] 寿建峰, 余敏, 沈安江. 深层条件下碳酸盐岩溶蚀改造效应的模拟实验研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2016, 35(5): 860-867, 806.
- SHOU Jianfeng, SHE Min, SHEN Anjiang. Experimental simulation of dissolution effect of carbonate rock under deep burial condition[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2016, 35(5): 860-867, 806.
- [19] 陈超, 周广胜. 1961-2010年桂林气温和地温的变化特征[J]. *生态学报*, 2013, 33(7): 2043-2053.
- CHEN Chao, ZHOU Guangsheng. Analysis on variation characteristics of air temperature and ground temperature in Guilin from 1961 to 2010[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(7): 2043-2053.
- [20] 杨俊杰, 张文正, 黄思静, 黄月明, 刘桂霞, 肖林萍. 埋藏成岩作用的温压条件下, 白云岩溶解过程的实验模拟研究[J]. *沉积学报*, 1995, 13(3): 83-88.
- YANG Junjie, ZHANG Wenzheng, HUANG Sijing, HUANG Yueming, LIU Guixia, XIAO Linping. Experimental simulation of dolomite dissolution under the conditions of burial temperature and pressure[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1995, 13(3): 83-88.
- [21] 杨俊杰, 黄思静, 张文正, 黄月明, 刘桂霞, 肖林萍. 表生和埋藏成岩作用的温压条件下不同组成碳酸盐岩溶蚀成岩过程的实验模拟[J]. *沉积学报*, 1995, 13(4): 49-54.
- YANG Junjie, HUANG Sijing, ZHANG Wenzheng, HUANG Yueming, LIU Guixia, XIAO Linping. Experimental simulation of dissolution for carbonate with different compositions under the conditions from epigenesis to buried diagenesis environment[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1995, 13(4): 49-54.
- [22] 蒋小琼, 王恕一, 范明, 张建勇, 管宏林, 鲍云杰. 埋藏成岩环境碳酸盐岩溶蚀作用模拟实验研究[J]. *石油实验地质*, 2008, 30(6): 643-646.
- JIANG Xiaoqiong, WANG Shuyi, FAN Ming, ZHANG Jianyong, GUAN Honglin, BAO Yunjie. Study of simulation experiment for carbonate rocks dissolution in burial diagenetic environment[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2008, 30(6): 643-646.
- [23] 苏悦, 胡晓农, 曹建华, 黄芬, 吴夏, 王修华. 桂林市毛村流域碳酸盐岩溶蚀实验研究[J]. *煤炭技术*, 2019, 38(1): 63-65.
- SU Yue, HU Xiaonong, CAO Jianhua, HUANG Fen, WU Xia, WANG Xiuhua. Experimental research on carbonate rock erosion by Maocun river basin in Guilin[J]. *Coal Technology*, 2019, 38(1): 63-65.
- [24] 翁金桃. 方解石和白云石的差异溶蚀作用[J]. *中国岩溶*, 1984, 3(1): 29-38.
- WENG Jintao. The differential corrosion of calcites and dolomites[J]. *Carsologica Sinica*, 1984, 3(1): 29-38.

Experimental study on the influence of vibration loads and temperatures on the dissolution of dolomite and limestone

GU Zhanfei^{1,2}, HUANG Bingyan¹, LIU Zhikui^{1,2}, QUAN Xin¹, XIE Yongxiong¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Technical Innovation Center of Mine Geological Environmental Restoration Engineering in Southern Area, Nanning, Guangxi 530029, China)

Abstract The dissolution of surface carbonate is a complex physicochemical process constrained by multiple influencing factors. In karst regions, due to the variations in mineralogy and chemical composition of the rock mass, differences in internal structure and pore characteristics, and the influence of external conditions such as the presence of groundwater, temperatures and vibration loads, limestone and dolomite exhibit differential dissolution patterns. Such differential dissolution often damages the completeness of the rock mass, affects its mechanical property and stability, and hence poses huge risk to the safety of buildings and structures on it. With the increasing strength of China's economy and the sustained promotion of development strategies in China's western region, many tunnels and underground engineering projects are being constructed, and the speed and frequency of train operation (high-speed

trains and urban rail transit) are significantly increasing. However, the repeated vibrations during train operation can alter the degree and direction of water-rock interaction, leading to the continuous expansion of joints, fractures, and cavities within the rock mass. In addition, the impact of various external factors (temperature, climate, etc.) can accelerate this process, reduce the strength of limestone and dolomite, and thus pose hidden hazards to the safety of train operation.

By the self-designed experimental equipment, this study investigates the dissolution behavior of dolomite and limestone in karst mountain areas of northern Guangxi under the influence of vibration loads and different temperature conditions. The experimental setup includes vibration equipment, a constant temperature chamber, a temperature controller, a flow meter, a pH meter, equipment for measuring Ca^{2+} and Mg^{2+} ions, and related drugs and reagents. Trains traveling between urban rail transit stations undergo three phases from acceleration to uniform and then deceleration, during which the vibration amplitude changes with the speed. Assuming a train departs every 8 minutes, horizontal and vertical vibrations will be generated during the operation, with vertical vibrations being the primary cause. In the laboratory, vibration conditions were controlled using a shaker sieve machine with an amplitude of 10 mm, a frequency of 2.5 times per second, and approximately 150 impacts per minute. A crossbar was fixed to the upper part of the sieve machine, and a fine cotton thread was used to tie the rock sample to one end of the crossbar to drive the sample vibration. The vibration was conducted every half an hour for 2 to 3 minutes.

The results show: (1) Under normal temperature and pressure conditions, the dissolution rate of dolomite is lower than that of limestone in static acidic solutions. (2) With sufficient H^+ under different temperature conditions (0°C to 45°C), the dissolution rates of dolomite and limestone both increases with increasing temperatures, and the effect is more significant on dolomite. At 15°C , the dissolution rate of limestone is 2.496 times that of dolomite, while at 45°C , the dissolution rate of limestone is 1.150 times that of dolomite. (3) The dissolution of dolomite and limestone is strongly affected by vibration conditions and their dissolution rates increase with the increase of vibration frequency. Under the same vibration conditions, the dissolution rate of limestone is always greater than that of dolomite. Vibration loads have a greater impact on the dissolution rates of limestone and dolomite than other factors such as temperatures. This study provides a theoretical basis for engineering design and construction in karst mountain areas of northern Guangxi.

Key words limestone and dolomite, vibration load, temperature, dissolution characteristics

(编辑 张玲)

我国土地资源概况

2022 年度全国国土变更调查初步汇总结果显示, 全国共有耕地 12 760.1 万公顷、园地 2 012.8 万公顷、林地 28 352.7 万公顷、草地 26 427.2 万公顷, 湿地 2 357.3 万公顷、城镇村及工矿用地 3 596.7 万公顷、

交通运输用地 1 018.4 万公顷、水域及水利设施用地 3 628.7 万公顷。

——据《2022 年中国自然资源统计公报》