

钟志彬, 冯杰, 吕蕾, 等. 红层石膏夹层静动水溶蚀特性试验研究[J]. 中国岩溶, 2025, 44(1): 15-23.

DOI: 10.11932/karst2024y046

红层石膏夹层静动水溶蚀特性试验研究

钟志彬^{1,2}, 冯杰², 吕蕾³, 周其健⁴, 李思嘉⁵, 薛昌沛⁶

(1. 成都建工第三建筑工程有限公司, 四川 成都 610056; 2. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室
成都理工大学, 四川 成都 610059; 3. 成都建工路桥建设有限公司, 四川 成都 610073; 4. 中国建筑
西南勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610093; 5. 中国电建成都勘测设计研究院有限公司,
四川 成都 610014; 6. 中铁上海工程局集团有限公司, 上海 200436)

摘要: 四川盆地红层砂泥岩中广泛分布石膏夹层, 石膏溶蚀形成大量孔洞, 加之红层特殊的物理力学性能, 极易造成地基承载力降低、工程结构不均匀沉降变形甚至破坏。为了探究不同流速环境下石膏夹层的溶蚀特性, 采用自主设计的溶蚀试验装置开展红层石膏夹层静、动水溶蚀试验, 通过溶液离子浓度变化刻画试验中石膏的溶蚀进程。结果表明, 静水环境下石膏夹层溶蚀速率随时间呈先减小后增大的趋势, 但幅值较小; 动水环境中, 石膏夹层平均化学溶蚀速率和瞬时化学溶蚀速率均表现出随时间减小的特征。同时, 根据溶蚀量变化曲线发现流速增大后化学溶蚀和机械潜蚀作用均会得到加强。

关键词: 岩溶; 红层石膏夹层; 机械潜蚀; 化学溶蚀; 溶蚀速率

创新点: 采用自主研发的溶蚀试验装置, 对含石膏夹层试样开展静动水溶蚀试验, 揭示了不同流速作用下石膏夹层的溶蚀规律, 试验结果表明流速对石膏溶蚀进程影响显著。

中图分类号: P642.25; TV223

文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2025)01-0015-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

红层是中、新生代炎热干旱古气候环境条件下形成的外观以红色为主色调的碎屑沉积岩层。长江中上游红层主要由侏罗—白垩系紫红—棕红色砂岩、泥岩、砾岩等碎屑岩组成, 由于碎屑岩含有可溶盐成分^[1], 在地表降水^[2]、地下水的长期侵蚀作用下普遍发育岩溶, 这一类岩溶现象通称为“红层岩溶”^[3]。

伴随社会发展, 我国在红层地区修建了大量水利水电工程, 包括最早在黄河上游修建的盐锅峡水电站、下游的八盘峡水电站以及长江干流葛洲坝水电枢纽等众多大型的水电工程^[4]。在这些工程建设

过程中, 除了要面对红层中泥化夹层强度低、水理性和抗风化能力差的物理性质外, 红层中所发育的石膏层也是影响大坝稳定性的重要因素之一。虽然石膏自身强度较高, 但在遇水后会发​​生溶蚀反应, 造成坝基岩体架空, 使得坝基岩体抗滑稳定性降低, 导致基底岩体出现变形、不均匀沉降等病害, 甚至造成大坝沉降拉裂等工程灾害发生。早在1928年, 美国加州的弗朗西斯重力坝就因为红层中石膏胶结物溶蚀造成溃坝, 导致400多人死亡; 瑞士Engadin和Emosson水利工程项目, 以及法国、澳大利亚、伊拉克等国家也均发生过石膏溶蚀诱发的工程灾害。其中最为著名的是伊拉克摩苏尔大坝, 自1986年运行开始就出

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42293353, 51808458); 四川省自然科学基金资助项目(2022NSFSC0403)

第一作者简介: 钟志彬(1988—), 男, 博士, 副教授, 主要从事工程岩体灾变机理及控制技术方面的研究。E-mail: zzb2007@163.com。

收稿日期: 2023-12-07

现石膏床溶解渗漏问题,虽然陆续采取了包括持续灌浆在内的众多防控措施,却依然无法阻止坝基溶蚀造成的大坝持续变形,最终只能选择在下游建造另一座大坝以抵挡溃坝下泄洪水^[5]。同样,在我国已建成的大型水利水电工程中也存在相应的问题,如嘉陵江青居水电站^[6]、黄河黄丰水电站^[7-8]等蓄水多年后依然出现石膏岩溶蚀,诱发坝基渗漏、坝体变形等工程病害现象。除此之外,仍有众多水利水电工程存在这一潜在风险,如王甫洲水利枢纽^[9-10]、穆家沟水电站^[11]、合川水利枢纽^[6]、八盘峡电站^[12]等,坝址区基岩中存在大量石膏夹层,由于工程开挖及后期蓄水影响,使得基岩封闭性降低将加快石膏吸水溶蚀的进程,进而影响坝址基岩体的稳定性使之存在渗漏溃坝的风险。因此,关于红层中石膏夹层的溶蚀特性有必要开展更为深入的研究。

目前国内外学者针对石膏的溶蚀特性展开了较多研究。刘琦等^[13]针对不同应力条件下白云岩的溶蚀特性开展研究;魏玉峰等^[8]将石膏浸泡于不同流速环境中观察其溶蚀规律,结果表明石膏溶蚀特性与水的流速关系不大,水流只是保证石膏岩始终处于被冲刷的状态,其本身不影响溶蚀的速率;Gyesel^[14]以瑞士 Punt dal Gall-OvaSpin 和危地马拉 Chixoy 水利引水隧道为例,分析了石膏溶蚀特征,以及溶蚀空腔;高明明等^[15-16]通过开展静水溶蚀试验,探究不同溶蚀液对石膏岩的溶蚀特性及力学指标的影响规律;张玲玲等^[17-19]通过一系列静水溶蚀试验,深入探究了温度-时间效应对石膏岩溶蚀特性的影响;Kemper 等^[20]采用一阶动力学方程描述石膏的溶解过程;徐文斌^[21]、JESCHKE A^[22]、韩浩东等^[23]研究了石膏岩在动水环境中的溶蚀规律,认为有效传输系数 k 与流速呈线性增加;Rahimi 等^[24]通过开展不同压力、水流速度和 pH 范围下的石膏岩室内溶蚀,发现溶蚀速率常数与流速呈正相关。

虽然关于石膏溶蚀特性的研究成果众多,但大都仅开展了静水溶蚀或者小流速下的动水溶蚀试验,对于较大流速作用下的溶蚀特性研究并不多。因此,本文将依托重庆某航电枢纽工程,以坝基含石膏夹层原岩为研究对象,采用自主设计的动水溶蚀装置开展溶蚀试验,探究红层中石膏夹层不同流速下的溶蚀特性。研究成果对于今后大量类似工程建设具有指导意义。

1 试验设计

1.1 试样制备

试验样品取自涪江下游重庆某航电枢纽工程坝址区基岩,该岩石属于侏罗系中统上沙溪庙组上段(J_2s^2)砂岩含可溶岩夹层。经 XRD—矿物衍射分析,夹层矿物成分以石膏为主,因此在后续分析中认为试验过程中仅有石膏发生溶蚀反应。图 1 为砂岩和夹层的矿物成分能谱图。

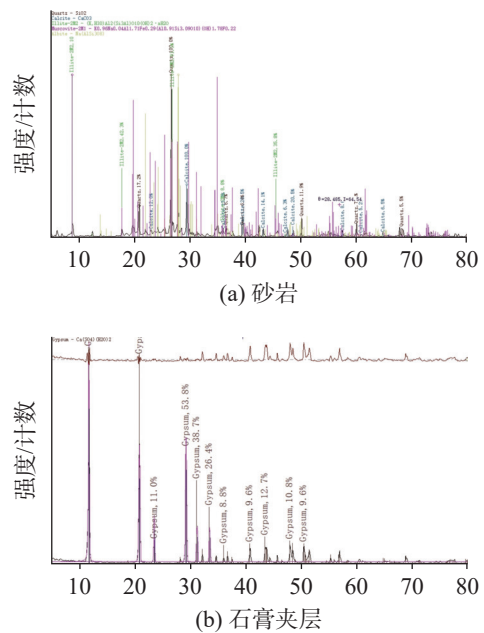


图 1 XRD 能谱图

Fig. 1 XRD energy spectrum

试样为同一位置钻孔岩芯切割而成的 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 圆柱体试样,且保证所获得试样中部均夹有 5~6 mm 石膏夹层(图 2)。为保证试验时试样含水率等参数一致,严格参照国际岩石力学试验规程将厚度相近、石膏层分布集中的岩样进行 48 h 烘干处理,岩样编号及相关物理参数见表 1。



图 2 试样制备

Fig. 2 Sample preparation

表 1 试验设计
Table 1 Experimental design

试验类型	试验编号	岩样编号	流量/L·min ⁻¹	取样时间/d	石膏层厚度/mm	天然密度/g·mm ⁻²	天然含水率/%
静水溶蚀	A1	1-3	0	1、3、5、7、9、11、13、15、17	6	2.44	2.43
	B1	1-6		3	5	2.45	2.70
	B2	1-2		5	5	2.44	2.44
	B3	1-11		7	5	2.34	2.23
	B4	1-14		9	5	2.43	3.01
动水溶蚀	D-1	1-4	1.27	1、3、5、7、9	5	2.43	1.80
	D-2	1-12	0.79		5	2.40	2.20
	D-3	1-13	0.31		5	2.43	3.04

1.2 溶蚀试验方法

将试样置于不同流速环境下开展溶蚀试验, 通过定期监测溶蚀液中钙离子和硫酸根离子浓度变化, 即可分析试验中石膏的溶蚀进程, 从而获得石膏夹层的溶蚀规律。

1.2.1 溶蚀实验

实际环境中低压力流体在岩体中渗流速度极其缓慢对石膏溶蚀周期较长, 为加快试验进程且满足试验设备量程要求, 因此设计试验流量为 0 L·min⁻¹、0.31 L·min⁻¹、0.79 L·min⁻¹、1.27 L·min⁻¹ 以探究不同流速对石膏溶蚀进程的影响(表 1)。试验期间按照 1 d、3 d、5 d、7 d、9 d、13 d、15 d、17 d 时间间隔采集溶蚀液, 试验结束后通过 ICP-700 电感耦合等离子体发射光谱仪和滴定法测定溶蚀液中的Ca²⁺和SO₄²⁻浓度, 并计算溶蚀液中离子含量。静、动水溶蚀试验周期分别为 17 d、9 d, 试验结束后将岩样取出烘干称重。

1.2.2 溶蚀设备

本次溶蚀试验分为静水溶蚀和动水溶蚀试验。对于静水溶蚀试验, 将制备好的干燥试样静置于装有 4 L 自来水的溶蚀桶内开展溶蚀试验, 通过在试样底部加垫透水石使其能与溶蚀液充分接触。同时, 为防止岩样长时间吸水崩解, 造成试验测量误差, 故采用铁纱网对试样进行包裹(图 3)。

动水溶蚀试验则是采用自主设计的动水溶蚀装置进行溶蚀试验。图 4 为动水溶蚀装置, 由 50 L 供水桶、水位控制器、流速调节阀、流量计、溶蚀管、循环水泵和溶蚀液收集桶七部分组成。

试验开始时, 将试样置于溶蚀管中, 于供水桶内



图 3 静水溶蚀试验

Fig. 3 Dissolution experiment under still water conditions

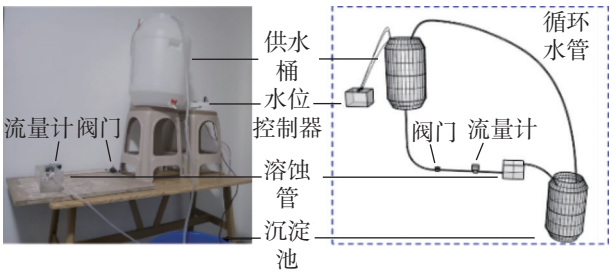


图 4 动水溶蚀装置

Fig. 4 Dissolution apparatus for the experiment under flowing water conditions

注入足量的水, 打开流速调节阀, 利用供水桶与溶蚀管间的水头差使桶内水经重力作用通过橡胶管流入溶蚀管冲刷溶蚀试样, 过程中产生的溶蚀液流入收集桶。当供水桶水位下降至预设高度后, 水位控制器控制水泵启动, 将收集桶中的溶蚀液重新抽回供水桶中, 实现溶蚀液的动态循环。试验过程中, 通过电子流量计读数调节阀门, 确保溶蚀管内水流达到预设流量。由于水中杂质影响, 循环过程中杂质不断淤积在流量滤网, 导致溶蚀管流速降低, 因此在试验过程中仍需不断调节阀门将溶蚀管内流速维持在预设值。由于动水试验中溶蚀液处于封闭的动态循环状态, 因此试验前后溶蚀液成分变化仅受石膏化

学溶蚀进程的影响。

在上述动水溶蚀装置中,溶蚀管作为装置核心部件其大致构造如图 5。图中,溶蚀液经入水口进入溶蚀管对置于托架上的岩石试样进行动水溶蚀。由于机械潜蚀作用会使部分细小岩石颗粒脱离母岩,为防止脱落的岩屑堵塞管道及流量计,故将出水口位置设置于溶蚀管上方。

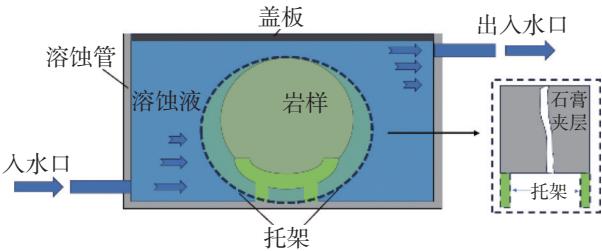


图 5 溶蚀管构造图

Fig. 5 Structure diagram of dissolution pipe

2 试验结果分析

试验结束后,各试样石膏夹层均出现不同程度的溶蚀凹槽,其中静水溶蚀 ($0\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$) 试样表面凹槽深度最小,仅 $2\sim 3\text{ mm}$;而动水溶蚀试验中第三组试样 ($0.79\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$) 溶蚀凹槽最深处达到了 12 mm ,其余两组 ($0.31\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $1.27\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$) 表面凹槽分别为 6 mm 和 8 mm (图 6)。第三组动水溶蚀试验产生沟槽最深的原因推测为该岩样贴近水底一侧石膏层较窄,导致沟槽流现象明显进而溶蚀产生的沟槽深度更大。

2.1 试验结果分析

由于试验过程中所采用试样石膏夹层分布状态接近且全部试样均在室温下进行,因此可以认为试验过程中流速为唯一变量。加之试样砂岩不与水产生反应,因此静水溶蚀过程中石膏夹层以化学溶蚀为主,而动水溶蚀试验中由于存在水流冲刷,因此同时存在化学溶蚀和机械潜蚀作用。静水溶蚀实际上就是流量为 $0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 的动水溶蚀试验,为了增加静、动水溶蚀两者的对比性并凸显出流速从“无”到“有”对石膏溶蚀进程的影响,因此在后续动水溶蚀分析中将以 $0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 为起点对试验数据进行分析。

本次试验采用自来水作为溶蚀液开展溶蚀试验,为排除自来水中离子浓度对试验结果的影响,需要对各组试验离子浓度测值进行折减。自来水离子浓

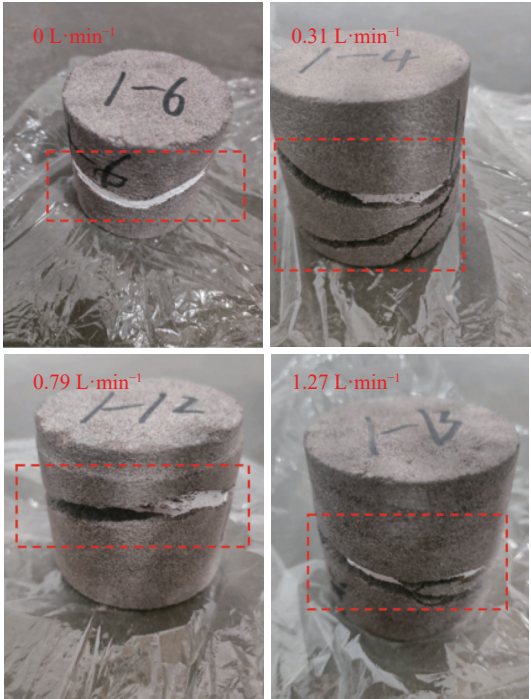


图 6 各组试样动水溶蚀后形态特征

Fig. 6 Morphological characteristics of samples in each group after the dissolution under flowing water conditions

表 2 自来水离子浓度

Table 2 Ionic concentrations in tap water

元素	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
Ca^{2+}	5.826
SO_4^{2+}	188.280

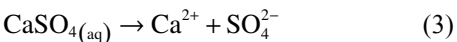
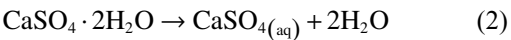
度见表 2。

2.1.1 参数计算

试验完成后,将岩样取出烘干称重,得到试验前后岩样的质量 m_1 和 m_2 ,依据下式(1)即可算得试验后石膏夹层的溶蚀率 K_m 。

$$K_m = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \tag{1}$$

试样石膏夹层的主要成分为 $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$,溶解化学式如下:



由上述化学式可知,石膏溶解以产生 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 为主,因此可以通过定期监测溶蚀液中两种离子的含量变化即可反映石膏夹层的化学溶蚀特性。同时,依据化学反应的质量守恒定律,根据试验前后

溶蚀液中 Ca^{2+} 含量变化可以确定石膏的化学溶蚀量 Δm_1 。由于在溶蚀过程中认为仅有石膏发生溶解,附着在试样表面的砂岩颗粒以及其它不可溶性矿物在水流作用下从母岩上脱落,可通过下式(4)计算其机械潜蚀量 Δm_2 。采用 Excel、Origin 等常规软件对所得的数据进行分析处理,即可得出研究区红层中石膏夹层在动水环境中的溶蚀特性。

$$\Delta m_2 = \Delta m - \Delta m_1 \quad (4)$$

2.1.2 离子含量变化

2.1.2.1 静水溶蚀试验

在静水溶蚀试验中仅使用了 4 L 水作为溶蚀液,后期在不断采集水样过程中势必会导致桶内离子浓度增大,因此对于静水溶蚀试验将采用 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 含量随时间的变化特征来表示溶蚀反应进程(图 7)。石膏 20 °C 时的溶解度为 0.212 g/100 g H_2O ,但静水溶蚀试验结束时 3 L 溶蚀液中 Ca^{2+} 含量仅为 1.5 g,换算后发现溶蚀液中石膏浓度并未达到饱和,因此在后续分析中将不再考虑饱和度对溶蚀进程的影响。

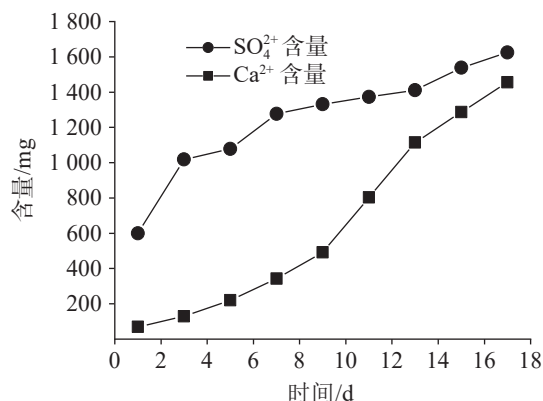


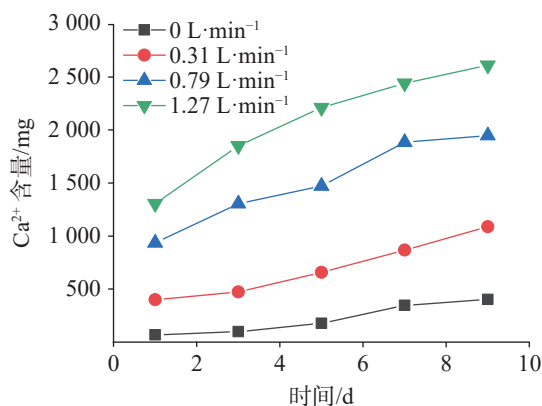
图 7 静水溶蚀离子浓度变化

Fig. 7 Change in concentrations of solution ions in still water

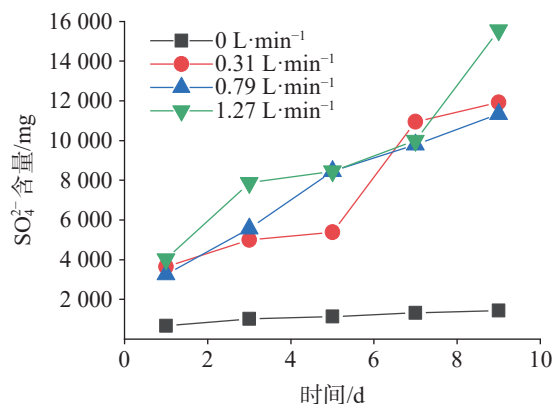
2.1.2.2 动水溶蚀试验

图 8 为动水溶蚀试验过程中不同流速状态下石膏溶蚀产生的 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 含量随时间的变化曲线。

由图 8a 可知, Ca^{2+} 含量随时间增加呈近似线性增长;并且可以明显看出随着流速增大,各试验组 Ca^{2+} 含量变化曲线斜率在逐步增大,说明了较大流速对石膏化学溶蚀具有一定促进作用。采用滴定法测量 SO_4^{2-} 浓度,由于测量过程中存在诸多误差, SO_4^{2-} 含量变化规律不明显,但仍可以看出随试验进行, SO_4^{2-} 含量呈线性增加的趋势。该结果与 Kemper 等^[20]



(a) Ca^{2+} 浓度随时间变化曲线



(b) SO_4^{2-} 浓度随时间变化曲线

图 8 离子浓度随时间变化曲线图

Fig. 8 Curve of ion concentrations with the change of time

所获得试验结果一致,即溶解系数随溶液流速增大而增大。

2.1.3 溶蚀总量变化

图 9 为试验结束后各试样溶蚀量随流量的变化曲线。图中各试样化学溶蚀量随流量呈线性增加,而溶蚀总量呈对数函数发展趋势,两曲线对应点间的差值即为机械潜蚀质量。可以看出随流速增大,

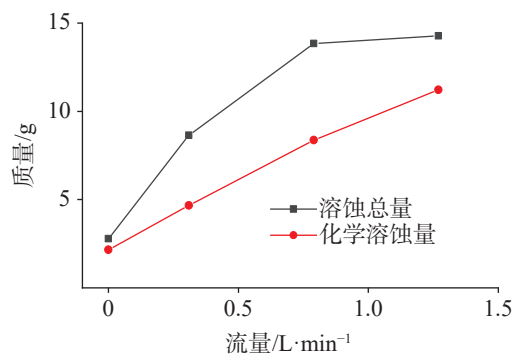


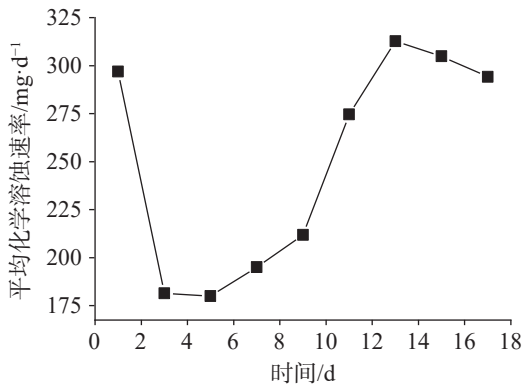
图 9 溶蚀量曲线

Fig. 9 Curves of dissolution amount

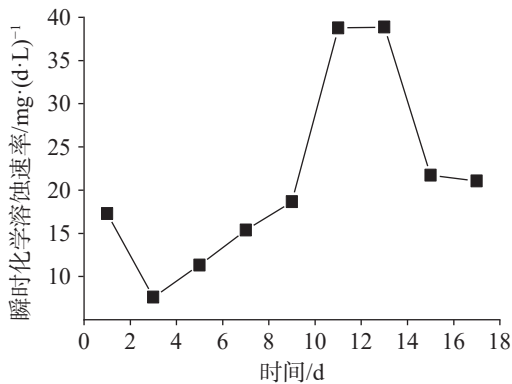
机械潜蚀质量逐步增大,但当流量大于 $0.79 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 后,机械潜蚀作用减弱。由图 9 可知,化学溶蚀速率随流速呈线性增加,与 Jeschke 等^[22] 研究结果相同。试验前期机械潜蚀作用随流速增大而增强,一是因为流速增大加强了对试样的冲击作用,加快碎屑颗粒掉落;二是由于流速增加使得石膏夹层溶蚀速度加快,加速了岩样的崩解。但当流速增加值 $1.27 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时机械潜蚀作用却减弱,这是不符合常理的,推测为试样个体差异(如溶蚀接触面积等)所导致的结果。这也是本文的不足之处,作者也将在后续工作中继续加以研究。

2.1.4 化学溶蚀速率

化学溶蚀率 v 是表征岩石可溶性强弱的一项定量指标^[25],化学溶蚀速率可以分为平均化学溶蚀速率 v_p 和瞬时化学溶蚀速率 v_s 。平均化学溶蚀率表示当试验进行至第 i 天时,这 i 天时间内石膏平均的溶蚀速率(图 10a, 图 11a);瞬时化学溶蚀率是指当试验进行至第 i 天时,第 $i-1$ 至第 i 天这一时间内的溶蚀



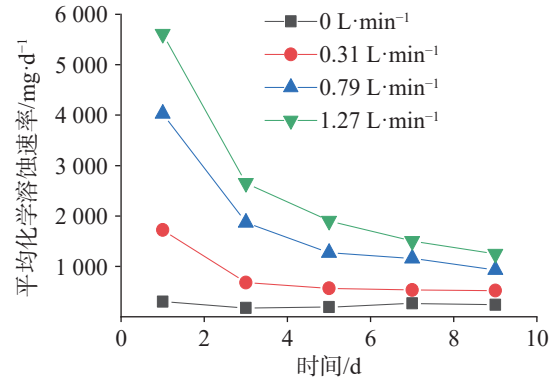
(a) 平均化学溶蚀速率变化曲线



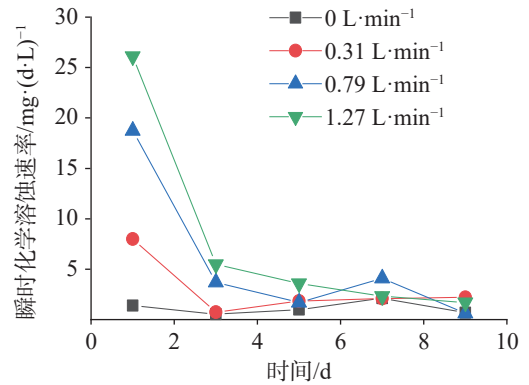
(b) 瞬时化学溶蚀速率变化曲线

图 10 静水试验化学溶蚀速率变化曲线

Fig. 10 Curves of changes in chemical dissolution rates in the experiment under still water conditions



(a) 平均化学溶蚀速率变化图



(b) 瞬时化学溶蚀速率变化图

图 11 动水试验化学溶蚀速率变化曲线

Fig. 11 Curves of changes in chemical dissolution rates in the experiment under flowing water conditions

速率(图 10b, 图 11b)。相应计算式如下:

$$v_p = \frac{m_i}{t} \quad (5)$$

$$v_s = \frac{c_i - c_{i-1}}{\Delta t} \quad (6)$$

式中: v_p 、 v_s 分别为平均化学溶蚀速率和瞬时化学溶蚀速率($\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{L}^{-1}$); c_i 、 m_i 分别代表在试验进行至第 i 天时,溶蚀液中所含有的 Ca^{2+} 的浓度和含量($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 mg); Δt 为收集溶蚀液的时间间隔(d)。

2.1.4.1 静水溶蚀试验

结合图 10a、图 10b 两曲线可知,静水溶蚀试验开始时干燥试样吸水能力强,因此第 1 d 的化学溶蚀速率较大;当试验进行至第 3 d 时,试样化学溶蚀速率逐步增大,于第 11 d 达到峰值,在此期间速率变化曲线呈指数函数形式发展。由此可知,试样在静水环境中,前 11 d 天溶蚀速率表现为逐步增大的趋势。这是由于随着溶蚀反应进行,试样石膏夹层内形成了新的岩溶通道,使得石膏与水体的溶蚀接触面积增加,从而加快了溶蚀反应的进程。而后化学溶蚀

速率逐步减小,在第13 d出现较大转折,推测为试样表面裸露石膏已经溶蚀完成,石膏夹层与溶蚀液接触面积减小导致溶蚀速率降低。

2.1.4.2 动水溶蚀试验

从图11a可知,不同流速环境下平均溶蚀速率均表现为短时间内迅速下降,而后逐步趋于稳定。溶蚀试验初始时刻,不同流速环境下试样的平均化学溶蚀速率表现出流速越快溶蚀速率越大的特点;随着试验进行,溶蚀速率迅速减小且不同流速环境中所表现出的减小趋势存在一定区别,流速越大溶蚀速率下降幅度越大,即下降率越大。与动水溶蚀试验相比,静水环境下试样的平均化学溶蚀速率变幅较小。同时,通过比较图11a中各曲线可发现,石膏平均溶蚀速率会伴随流速加快而增加,由此证明较大的流速对石膏夹层溶蚀起到了促进作用。

图11b中各动水溶蚀试验组对应的瞬时化学溶蚀速率曲线变化趋势与平均化学溶蚀速率曲线趋势基本保持一致,表现为随时间降低的规律,且试验进行至第3天时各曲线均出现骤降,而后逐渐降低趋于平稳。在试验进行至第9天时,各试验组的瞬时速率均小于 $4 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{L}^{-1}$,推测为试样中的石膏夹层溶蚀殆尽的原因。

与静水溶蚀试验结论不同,动水环境下石膏的化学溶蚀速率会随时间逐步降低。魏玉峰^[26]的研究指出,由于动水环境下石膏表面可溶岩逐渐减少的同时与水流的接触时间缩短,溶蚀过程中石膏夹层内部没有形成新的岩溶通道,故导致化学溶蚀速率降低。

3 结 论

(1) 相较于静水环境,动水条件下石膏夹层的溶蚀速率明显更快,并且表现出流速越快,溶蚀速率越快的特点。

(2) 静水环境中,石膏夹层的溶蚀速率因溶蚀面积增大而加快;而动水环境下,由于石膏夹层与水流接触时间缩短,溶蚀过程中不能产生新的溶蚀通道,导致溶蚀速率降低。

(3) 石膏夹层溶蚀过程中,化学溶蚀和机械潜蚀作用均会随着流速的增大而得到加强。

参考文献

[1] 黄胜东,赵龙,黄贵任,陈积普,王宇.滇中红层膏盐溶蚀特征

及其对水质的影响:以楚雄谢家河河谷为例[J].中国岩溶,2022,41(4):610-622.

HUANG Shengdong, ZHAO Long, HUANG Guiren, CHEN Jipu, WANG Yu. Dissolution characteristics of gypsum salt in the red beds of central Yunnan Province and their effects on groundwater quality: A case study of Xiejiahe valley in Chuxiong City[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(4): 610-622.

[2] 于爽,严毅萍,张春来,王翱宇,刘齐,李幼玲.酸雨对碳酸盐岩溶蚀速率影响的试验研究[J].桂林理工大学学报,2011,31(4):539-544.

YU Shi, YAN Yiping, ZHANG Chunlai, WANG Aoyu, LIU Qi, LI Youling. Experimental study on the effect of acid rain on carbonate karst erosion rate[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2011, 31(4): 539-544.

[3] 吴应科,梁永平.长江中上游红层岩溶刍议[J].中国岩溶,1987,06(2):111-119.

WU Yingke, LIANG Yongping. A discussion on red bed karst in the middle and upper reaches Yangtze River[J]. *Carsologica Sinica*, 1987, 06(2): 111-119.

[4] 邢观猷.对我国红层地区大坝工程安全措施的探讨[J].大坝与安全,1996(2):1-7.

XING Guanyou. Discussion on safety measures of dam engineering in red layer area of China[J]. *Dam & Safety*, 1996(2): 1-7.

[5] Nasrat Adamo, Nadhir Al-Ansari, Sven Knutsson, Jan Laue, Varoujan Sissakian. 伊拉克摩苏尔大坝溃坝危机与解决方案[J].大坝与安全,2017(4):67-72.

Nasrat Adamo, Nadhir Al-Ansari, Sven Knutsson, Jan Laue, Varoujan Sissakian. Crisis and Solution of Mosul Dam Failure[J]. *Dam & Safety*, 2017(4): 67-72.

[6] 杨先毅.嘉陵江合川水利枢纽建坝岩体主要地质问题研究[J].水文地质工程地质,1998(4):38-39,47.

YANG Xianyi. Study on the main geological problems of rock mass for dam construction in Hechuan water Conservancy project of Jialing River[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1998(4): 38-39,47.

[7] 洪文之,张林,冯正华.西宁石膏岩对水工建筑物危害的探讨[J].水文地质工程地质,1998(6):50-51.

HONG Wenzhi, ZHANG Lin, FENG Zhenghua. Discussion on the hazards of gypsum rock to hydraulic buildings in Xining[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1998(6): 50-51.

[8] 魏玉峰,聂德新.第三系红层中石膏溶蚀特性及其对工程的影响[J].水文地质工程地质,2005,32(2):62-64.

WEI Yufeng, NIE Dexin. The speciality of gypsum dissolution of the Neogene red clay and its influence to engineering[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2005, 32(2): 62-64.

[9] 林仕祥,王启国.王甫洲水利枢纽坝基石膏溶蚀研究及处理对策[J].人民长江,2007,38(9):40-42.

LIN Shixiang, WANG Qiguo. Research and treatment of gypsum dissolution on dam foundation of Wangfuzhou Water Conservancy Project[J]. *Yangtze River*, 2007, 38(9): 40-42.

- [10] 王启国, 严应征, 林仕祥, 潘坤. 王甫洲水利枢纽坝基主要工程地质问题及对策[J]. 人民长江, 2009, 40(5): 80-83.
WANG Qiguo, YAN Yingzheng, LIN Shixiang, PAN Kun. Main engineering geological problems and countermeasures of dam foundation of Wangfuzhou Hydro Project on the Hanjiang River[J]. Yangtze River, 2009, 40(5): 80-83.
- [11] 郑莉. 穆家沟水库石膏夹层对坝基渗透和渗漏稳定性分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2019(s1): 182-184.
ZHENG Li. Analysis of the permeability and leakage stability of gypsum interlayer in Mujiagou Reservoir on dam foundation[J]. Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences), 2019(s1): 182-184.
- [12] 郁敏. 八盘峡水电站坝址高矿化地下水水质成因及防治对策研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
YU Min. Study on the genesis and prevention countermeasures of high mineralization groundwater quality at the dam site of Bapanxia Hydropower Station[D]. Nanjing: Hohai University, 2007.
- [13] 刘琦, 白友恩, 顾展飞, 卢耀如, 盛祝平. 石漠化地区石灰岩和白云岩的溶蚀-蠕变特性试验研究: 以贵州贞丰-关岭花江岩溶区为例[J]. 桂林理工大学学报, 2017, 37(3): 399-404.
LIU Qi, BAI YouEn, GU Zhanfei, LU Yaoru, SHENG Zhuping. Experimental study on dissolution creep characteristics of limestone and dolomite in rocky desertification area: A case study of Huajiang Karst area in Zhenfeng-Guanling, Guizhou Province[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2017, 37(3): 399-404.
- [14] Gysel M. Anhydrite dissolution phenomena; three case histories of anhydrite karst caused by water tunnel operation[J]. *Rock mechanics and rock engineering*, 2002, 35(1): 1-21.
- [15] 高明明, 燕新, 焦云成. 不同溶液下石膏岩溶蚀试验研究[J]. 山东交通科技, 2021(5): 39-41.
GAO Mingming, YAN Xin, JIAO Yuncheng. Experimental study on gypsum karst erosion in different solutions[J]. Shandong Jiaotong Keji, 2021(5): 39-41.
- [16] 高明明, 祝艳波, 苗帅升, 田王慧, 龚政豪, 巨之通. 石膏岩溶蚀与强度特性试验研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(8): 2975-2980.
GAO Mingming, ZHU Yanbo, MIAO Shuaisheng, TIAN Wanghui, GONG Zhenghao, JU Zhitong. Experimental Study on Dissolution and Strength Characteristics of Gypsum Rock[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(8): 2975-2980.
- [17] 盘惠林. 成都地区膏岩地层溶蚀及对地下建筑物混凝土基础的影响研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2022.
PAN Huilin. Study on the dissolution of gypsum rock strata and its influence on the concrete foundation of underground buildings in Chengdu area[D]. Jilin: Jilin University, 2022.
- [18] 祝艳波, 吴银亮, 余宏明. 隧道石膏质围岩溶蚀及溶出特性试验研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(1): 28-37, 61.
ZHU Yanbo, WU Yinliang, YU Hongming. Experimental Research on Corrosion and Leaching Characteristics of Gypsum Rock Surrounding Tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(1): 28-37, 61.
- [19] 张玲玲. 石膏原岩静水溶蚀时间-温度效应试验初步研究[J]. 中国岩溶, 2019, 38(2): 265-268.
ZHANG Lingling. Preliminary study on the time-temperature effect test of hydrostatic dissolution of gypsum original rock[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(2): 265-268.
- [20] Kemper W D, Olsen J, Demooy C J, Anonymous. Dissolution rate of gypsum in flowing water[J]. *Proceedings - Soil Science Society of America*, 1975, 39(3): 458-463.
- [21] 徐文斌. 成都天府新区灌口组芒硝/石膏溶蚀规律研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
XU Wenbin. Study on the dissolution law of miscanthus nitrate/gypsum in the Guankou Formation of Tianfu New Area, Chengdu[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.
- [22] Jeschke A A, Vosbeck K, Dreybrodt W. Surface controlled dissolution rates of gypsum in aqueous solutions exhibit nonlinear dissolution kinetics[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(1): 27-34.
- [23] 韩浩东, 王春山, 王东辉, 李鹏岳, 李华, 杨涛. 成都市白垩系灌口组富膏盐红层溶蚀特征与机理[J]. 中国岩溶, 2021, 40(5): 768-782.
HAN Haodong, WANG Chunshan, WANG Donghui, LI Pengyue, LI Hua, YANG Tao. Dissolution characteristics and mechanism of gypsum-salt-rich-red beds in Cretaceous Guankou formation in Chengdu[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(5): 768-782.
- [24] Rahimi M R, Mohammadi S D, Taleb Beydokhti A. Laboratory simulation of gypsum rock dissolution at different pressures, water-flow velocities and pH ranges[J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 2023, 56(1): 1-17.
- [25] 陈如冰, 罗明明, 罗朝晖, 陈植华, 周宏. 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, CHEN Zhihua, ZHOU Hong. Response relationship between chemical composition and dissolution rate of carbonate rocks in the Three Gorges Area[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(2): 258-264.
- [26] 魏玉峰. 新第三系红层石膏岩工程特性及工程应用研究: 以黄河丰水电站为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2005.
WEI Yufeng. Research on engineering characteristics and application of Neogene red layer gypsum rock: A case study of Huangfeng Hydropower Station, Huanghe River[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2005.

Experimental study on dissolution characteristics of gypsum intercalations in red layers under still and flowing water conditions

ZHONG Zhibin^{1,2}, FENG Jie², LYU Lei³, ZHOU Qijian⁴, LI Sijia⁵, XUE Changrui⁶

(1. Chengdu Third Construction Engineering Co., LTD., Chengdu, Sichuan 610056, China; 2. State Key Laboratory of Geological Hazard Prevention and Geological Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 3. Chengdu Jiangong Road and Bridge Construction Co., LTD., Chengdu, Sichuan 610073, China; 4. Southwest China Institute of Architectural Survey and Design Co., LTD., Chengdu, Sichuan 610093, China; 5. Powerchina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu, Sichuan 610014, China; 6. China Railway Shanghai Engineering Bureau Group Co., LTD, Shanghai 200436, China)

Abstract Gypsum intercalations with uneven thicknesses are widely distributed within sand and mudstone in red layers of the Sichuan Basin. In the process of groundwater infiltration or erosion, these gypsum intercalations inevitably undergo dissolution reactions, resulting in the formation of numerous pores. Additionally, the unique physical and mechanical properties of red layers can significantly reduce the bearing capacity of foundations, leading to uneven settlement deformation and even damage to engineering structures. Therefore, it is necessary to carry out more in-depth research on the dissolution characteristics of gypsum intercalations in red layers. Based on an avionics hub project in Chongqing, this study took the original rock containing gypsum intercalations in the dam foundation as a research object. A self-designed apparatus for flowing water dissolution was used to perform the dissolution test. By regularly monitoring the changes in ion concentrations of Ca^{2+} and SO_4^{2-} ions within the solution, the dissolution process of gypsum in the test can be characterized, thereby allowing for an investigation into the erosion characteristics of gypsum intercalations in red layers under different flow velocities.

At the end of the test, the gypsum intercalations in different flow velocities exhibited erosion grooves to varying degrees. Notably, the depth of surface grooves in the sample exposed to dissolution under still water conditions was the smallest, measuring only 2–3 mm, while the deepest groove formed by dissolution under flowing water conditions reached 12 mm. This observation indicates that the dissolution rate of gypsum significantly increased under flowing water conditions. Following the test, the concentrations of Ca^{2+} and SO_4^{2-} in the solution were measured, revealing that the contents of both ions showed an increasing trend over time. Comparing the dissolution test under flowing water conditions to that under still water conditions, the average chemical dissolution rate of the samples in still water was lower, both in terms of numerical values and the magnitude of changes. Furthermore, the slope of Ca^{2+} content change curve for the experimental groups increased gradually with the rise in flow velocity, indicating that higher flow velocity has a promoting effect on the chemical dissolution of gypsum. Through the processing and conversion of the test data, it can be found that the average dissolution rate under different flow velocity conditions exhibited a rapid decline in a short time, followed by a gradual stabilization. At the initial time of the dissolution test, the average chemical dissolution rate of the samples indicated that the higher flow velocity corresponded to increased dissolution rates. With the experiment, the dissolution rate decreased rapidly and the decreasing trend under different flow velocity conditions was different to some extent. The greater the flow velocity was, the greater the dissolution rate became. The trend of curve for instantaneous chemical dissolution rate of each dissolution test group under flowing water conditions was generally consistent with the trend of curve for the average chemical dissolution rate. This trend exhibited a pattern of decline over time, with all curves demonstrating a sudden drop on the third day of the test, followed by a gradual decrease that eventually stabilized. According to the curve depicting the dissolution amount of each sample as a function of flow velocity, it is evident that both chemical dissolution and mechanical subsurface erosion in gypsum intercalations were enhanced with increasing flow velocity.

Key words karst, gypsum rock in red layer, mechanical subduction erosion, chemical dissolution, dissolution rate

(编辑 杨杨)