

龙门石窟潜溪寺凝结水定量测试研究

方云¹, 黄璇¹, 王晓东¹, 张傲¹, 陈建平², 杨刚亮², 范子龙²

(1. 中国地质大学 工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 龙门石窟研究院, 河南 洛阳 471003)

摘要: 龙门石窟雕琢于碳酸盐岩体之中, 受水的侵蚀破坏十分严重, 而凝结水病害是水侵蚀中不容忽视的一个问题。潜溪寺是龙门石窟凝结水病害比较典型的一个石窟。凝结水的定量测试是评价凝结水病害和分析其形成机理的重要手段。采用专门的测试设备在龙门石窟潜溪寺现场测定凝结水的凝结速率和凝结水量, 主要包括试验仪器的率定试验和凝结水的定量采集试验, 通过率定试验得到了试验时间和试验仪器误差的曲线关系, 定量采集试验得到不同时间段的凝结速率。结合现场监测的凝结面积和生成凝结水的时间计算凝结水量。试验结果表明, 试验仪器误差水量与时间可以拟合为线性关系; 2010年潜溪寺的凝结水生成总量为200.68 kg, 其量相当可观; 潜溪寺内凝结水的生成速率上午最大, 晚上最小; 结合笔者前期研究成果分析, 潜溪寺2006—2010年期间的年生成凝结水量呈波动状态, 凝结水量的波动与年度的气候变化有关; 2008年以来, 潜溪寺的凝结水量有增多的趋势。位于南方的大足石刻凝结水的生成速率最高, 位于北方的云冈石窟的凝结水生成速率最低, 龙门石窟的凝结水生成速率介于二者之间, 这与3个石窟的自然地理位置和气候条件相关。

关键词: 凝结水; 率定试验; 定量采集试验; 龙门石窟

中图分类号: TU457

文献标志码: A

文章编号: 1000-8527(2011)06-1214-05

Quantification Research on Condensation Water on Qianxi Temple of Longmen Grottoes

FANG Yun¹, HUANG Xuan¹, WANG Xiao-dong¹, ZHANG Ao¹,
CHEN Jian-ping², YANG Gang-liang², FAN Zi-long²

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China;

2. Academy of Longmen Grottoes, Luoyang, Henan 471003, China)

Abstract: Longmen Grottoes were carved in the carbonate rocks, which are severely eroded by water, and condensation water disease is the non-ignorable problem. Qianxi Temple is a typical cave of Longmen Grottoes which have being suffered by the condensation water. The quantitative collection test of condensation water is an important tool to evaluate condensation water disease and to analysis the condensation water formation mechanism. The condensation rate and the amount of condensation water were determined by a special experimental facility at the site of Qianxi Temple in 2010. The tests mainly included the calibration test of the experimental facility and the quantification test of condensation water. From the calibration test, the curvilinear relationship between testing time and the error of the experimental facility was obtained; the condensation rate was derived by the quantification collection test at the different periods. The results reveal that the experimental error and testing time could be fitted into the linear relationship. In 2010, the amount of condensation water is 200.68 kg at Qianxi Temple, which is a considerable amount; the condensation rate is the fastest in morning and the slowest at evening. The annual amount of condensation water fluctuated from 2006 to 2010 according to the analysis of previous research achievements, for the amount of condensation water varied with the annual climate change.

收稿日期: 2011-08-25; 改回日期: 2011-10-20; 责任编辑: 潘令枝。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(40972183, 40972186)。

作者简介: 方云, 男, 教授, 1955年出生, 岩土工程专业, 主要从事岩土工程和文物保护的教学和科研工作。

Email: huangxuan425@126.com。

Since 2008, the amount of condensation water has increased. The condensation rate of the Dazu Carved Stone which is located in the south is the fastest, and the Yungang Grottoes in the north is the slowest, and the Longmen Grottoes is situated between the this difference corresponds to the grottoes' respective geographical position and the climatic conditions.

Key words: condensation water; calibration test; quantitative collection test; Longmen Grottoes

0 引言

龙门石窟自建成 1 500 a 以来, 在自然营力作用下, 产生了严重的环境地质病害, 这些病害使石窟雕刻艺术品遭到了较严重的破坏^[1]。由于近 20 年来地质环境恶化, 龙门石窟的病害有所加剧^[2], 岩土文物的地质环境病害包括风化、渗水、岩溶、危岩体等^[3-9]。龙门石窟雕琢于碳酸盐岩体之中, 受水的侵蚀破坏十分严重, 而凝结水病害是水侵蚀中不容忽视的一方面^[10]。

本文采用中国地质大学(北京)曹文炳教授研制的凝结水采集仪^[11], 对龙门石窟的凝结水进行现场定量试验研究。根据现场考察, 选取凝结水病害较严重的潜溪寺作为凝结水定量测试的试验洞窟。笔者通过现场调查和长期监测, 获得了 2010 年潜溪寺的凝结水分布面积和生成时间等基础资料; 通过凝结水定量采集试验得到了不同时间段的凝结速率, 据此对潜溪寺的凝结水进行定量评价分析, 为龙门石窟的凝结水病害治理提供依据。

1 凝结水病害的影响因素及其对石窟的危害

1.1 凝结水病害的影响因素

影响凝结水病害形成的主要因素包括: (1) 窟檐、通风的影响。潜溪寺窟檐遮蔽, 通风条件差, 蒸发过程微弱, 凝结作用增强, 造成大量凝结水附着于雕刻品上。(2) 岩性特征的影响。潜溪寺的白云岩质纯且致密, 其渗透性和吸水率极低, 岩体厚度大, 完整性好, 凝结水容易形成挂流。(3) 凝结核的影响。窟壁的粗糙表面有利于现场凝结水附存, 调查中可以观察到大量以尘埃为核心的凝结水珠悬挂在潜溪寺洞壁之上。(4) 石窟区人工水面的影响。在龙门石窟区形成的人工湖, 改变了小气候环境, 增大了石窟的湿度, 加剧了洞窟的凝结水病害。(5) 窟内渗水的影响。潜溪寺内卸荷裂隙交错发育, 雨水沿裂隙向窟内渗透, 在多雨

的夏季, 潜溪寺内地面长时间的积水和南侧壁面长时间的湿润状态, 加剧了洞窟内凝结水的形成。

1.2 凝结水对石窟的危害

(1) 在流动和蒸发过程中, 凝结水与洞壁岩体相互作用, 在洞壁上以结晶形式保留其运动的轨迹, 使洞壁留下明显的不规则片状或条带状白色沉淀痕迹, 影响雕刻艺术品的美观。

(2) 凝结水富集的地方孳生微生物病害。

(3) 水分在窟壁的反复凝聚和蒸发, 造成洞窟岩体表面的干湿变化, 降低了洞窟岩体表面的强度, 加剧了岩体的风化。

2 龙门石窟凝结水的定量测试

2.1 测试仪器

图 1 为改进后的凝结水定量采集试验仪器的结构示意图。其试验原理主要是利用密闭的空气循环系统, 将试验区岩壁上的凝结水吸入到密闭的干燥管内, 干燥剂的增重就是试验区凝结水的重量。主要对试验仪器做了如下改进: (1) 简化了管路系统, 增强了接口处的密封性; (2) 采用了日本产真空泵, 避免了油气蒸发对窟壁的污染; (3) 增大了循环的气流量, 提高了工作效率。仪器主要由 4 部分组成, 密封罩、3 个温度、湿度传感器、干燥剂管和真空泵。密封罩为一个圆形透明有机玻璃罩, 用来扣在试验区的岩壁上, 使被扣住的岩壁与外界隔离, 试验测定密封罩内岩壁的凝结水量。干燥管装上干燥剂用来吸收管路中的水分。真空泵主要用来为管路中的气流提供循环动力。3 个传感器用来测定管路中不同位置的湿度、湿度, 当传感器 1 和传感器 3 的湿度相同时, 停止试验。

2.2 标定试验

在真空泵的运行过程中, 会将空气中的水蒸气带入测试系统管路中。在定量计算窟壁的凝结水量时, 应该减去这部分误差, 所以要对试验仪器进行标定。试验时, 将密封罩扣在玻璃板上, 在玻璃板上放置盛水的器皿, 计算不同时段水分

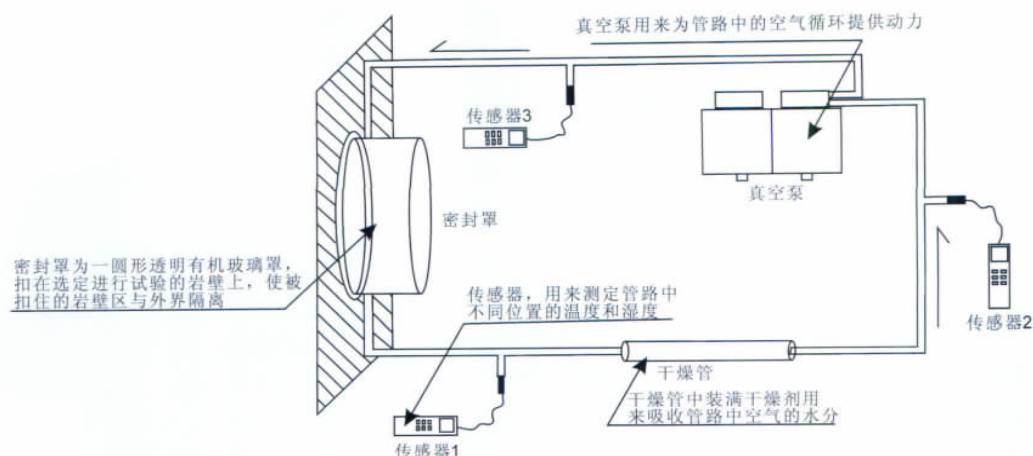


图1 凝结水定量测试仪示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the measuring appliance for condensation water

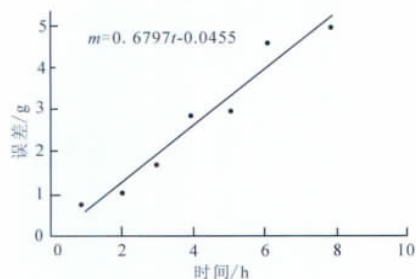


图2 率定曲线

Fig. 2 Calibration curve

的减少量和干燥剂的增重量,其差值就是误差水量。标定试验时间设定为1 h、2 h、3 h、4 h、6 h和8 h。根据试验数据绘制率定曲线(图2),并得出误差水量和试验时间的函数。

由图2可知,误差水量随时间呈线性增加,其拟合直线方程为

$$m = 0.6797t - 0.0455 \quad (1)$$

式中: t 为试验时间, h; m 为误差水量, g。根据标定试验, 得到平均误差水量为 $0.68 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

试验误差水量占凝结水采集量总量的 $1.8\% \sim 4.3\%$ 。在凝结水定量采集试验中, 如采集总量为 S , 采集时间为 t , 代入上式可以求出误差水量 m , 实际采集的凝结水量为 $S - m$ 。

2.3 凝结水定量测试

选取潜溪寺主尊南、北侧两个测试点, 于2010-07-06—08-22进行凝结水测量。由于24 h内窟内的温度、湿度和岩壁温度都会发生变化, 不同时段形成的凝结水量不同, 因此将试验时间分为上午、下午和晚上3个时段进行。

试验方法是首先将试验岩壁抽干, 在预定的时间上午9:00, 取下密封罩, 让试验岩壁暴露在空气中, 产生凝结。到13:00, 停止凝结, 重新扣上密封罩, 记录凝结时间。进行凝结水量的测量, 便可得到上午(9:00—13:00)产生的凝结水量。同理, 测定下午(13:00—19:00)或晚上(19:00—第二天9:00)的凝结水量。

试验的具体操作过程如下:

(1) 根据凝结水产生情况及试验计划, 在达到预定的凝结时间后, 将密封罩固定在已经产生了凝结水的岩壁上, 其与岩壁之间的缝隙用凡士林密封。

(2) 按图1将整套仪器连接好。对仪器进行检漏, 确认密封后进行下一步。

(3) 将称好的干燥剂装入干燥管中, 干燥管端口缠好生胶带并拧紧, 将干燥管接入测试系统。

(4) 打开3个温度计, 按下记录键, 开始记录; 然后马上开动真空泵进行试验, 试验过程中, 每小时观测一次密封罩进、出口的温度、湿度及岩石表面温度, 同时记录数据。

(5) 待岩壁上的凝结水消失, 且进、出口相对湿度达到允许的差值后, 关闭循环系统。

(6) 取下干燥管, 倒出里面的干燥剂, 用天平称重。干燥剂的增重再减去率定曲线确定的误差值就是实际采集的凝结水量。

2.4 试验结果分析

根据凝结水定量测试数据(表1), 可以得到如下的分析结果:

(1) 潜溪寺内下部岩壁的单位面积平均凝结水

表 1 2010 年潜溪寺南北试验点凝结水定量测试成果

Table 1 Comparison of condensation waters between north and south wall of Qianxi Temple

试验位置	时段	试验编号	凝结时间/h	生成水量/g	单位面积生成水量/(g/m ²)	凝结速率/(g/(m ² ·h))	平均凝结速率/(g/(m ² ·h))
主尊南侧	上午	1-1	6.67	5.91	253.07	37.96	37.26
		1-2	5.83	4.80	205.39	35.21	
		1-3	5.75	5.19	222.07	38.62	
	下午	2-1	6.67	6.70	286.52	42.98	37.18
		2-2	5.67	5.51	235.66	41.59	
		2-3	9.17	5.78	247.32	26.98	
	晚上	3-1	15.25	4.86	207.95	13.64	15.89
		3-2	13.0	5.51	235.77	18.14	
主尊北侧	上午	4-1	5.0	4.30	183.99	36.80	36.80
		5-1	6.33	5.32	227.64	35.94	
		5-2	6.0	5.80	248.18	41.36	38.99
	下午	5-3	6.17	4.40	188.41	30.55	
		5-4	5.83	6.56	280.70	48.12	
	晚上	6-1	14.0	4.48	191.69	13.69	15.56
		6-2	16.0	5.83	249.28	15.58	
		6-3	12.83	5.68	243.04	18.94	
		6-4	14.0	4.59	196.54	14.04	

注: 试验罩面积为 233.71 cm² = 0.023 371 m²。

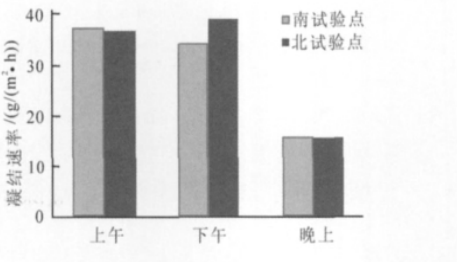


图 3 南北试验点凝结速率对比图

Fig. 3 Comparison of condensation rates between north and south site

量为 229.60 g/m², 根据现场观测统计确定的潜溪寺凝结水分布面积和生成时间, 计算出 2010 年潜溪寺的凝结水生成总量为 200.678 kg, 其量相当可观。

(2) 对比一天中上午、下午和晚上 3 个时段的凝结水生成速率, 由图 3 可知, 南、北两个试验点上午和下午的生成速率都基本相当, 而晚上的生成速率则远小于白天。

(3) 对比南、北两个试验点, 可以发现潜溪寺主尊南侧试验点的凝结水平均生成速率为 31.88 g/(m²·h), 略高于北试验点(28.33 g/(m²·h))。而从单位面积的凝结水生成总量来看, 南试验点略高于北试验点, 这可能与南试验点岩壁更为潮湿且表面有较多灰尘颗粒有关。

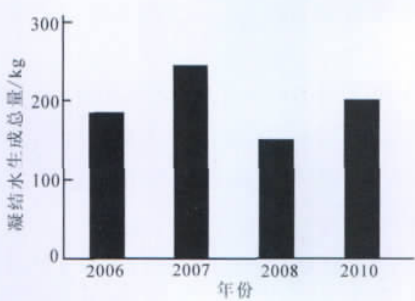


图 4 2006—2010 年潜溪寺凝结水年度生成总量

Fig. 4 Annual total amount of condensation water from 2006 to 2010 in Qianxi Temple

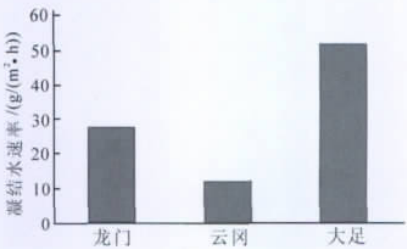


图 5 龙门石窟、云冈石窟和大足石刻凝结水生成速率对比图 (云冈石窟数据据文献 [8], 大足石刻数据据文献 [3])

Fig. 5 Comparison of condensation rates in Longmen Grottoes, Yungang Grottoes and Dazu Carved Stone

(4) 结合笔者的前期研究成果分析, 2010 年凝结水生成的总量为 200.68 kg, 大于 2006 年

(187.83 kg) 和 2008 年(149.33 kg), 小于 2007 年(246.14 kg)^[12]。凝结水量的波动与年度的气候变化有关。由图 4 可知, 2008 年以来, 潜溪寺的凝结水量有增多的趋势。

(5) 图 5 给出了龙门石窟、云冈石窟和大足石刻凝结水生成速率的对比图。由图 5 可知, 位于南方的大足石刻凝结水的生成速率最高, 为 $49.94 \sim 53.22 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。位于北方的云冈石窟的凝结水生成速率最低, 为 $9.92 \sim 15.03 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ^[11]。龙门石窟的凝结水生成速率为 $15.56 \sim 38.99 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 介于二者之间, 这与 3 个石窟的自然地理位置和气候条件相对。

3 结 论

(1) 通过定量测试可知, 潜溪寺主尊南侧的凝结水平均生成速率略高于北侧, 其原因是南侧岩壁更为潮湿且表面有较多灰尘颗粒。

(2) 潜溪寺内岩壁单位面积平均凝结水量为 $229.60 \text{ g}/\text{m}^2$, 2010 年潜溪寺的凝结水生成总量为 200.678 kg, 其量相当可观。

(3) 潜溪寺内凝结水的生成速率上午最大, 晚上最小。

(4) 潜溪寺 2006—2010 年期间的年生成凝结水量呈波动状态, 凝结水量的波动与年度的气候变化有关。2008 年以来, 潜溪寺的凝结水量有增多的趋势。

(5) 位于南方的大足石刻凝结水的生成速率最高, 位于北方的云冈石窟的凝结水生成速率最低, 龙门石窟的凝结水生成速率介于二者之间, 这与 3

个石窟的自然地理位置和气候条件相对应。

参考文献:

- [1] 刘景龙. 龙门石窟保护 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993: 23-27.
- [2] 潘别桐, 黄克忠. 文物保护与环境地质 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992: 1-20.
- [3] 王金华, 方云, 黎方银. 大足石刻保护 [M]. 北京: 文物出版社, 2009: 1-50.
- [4] 严绍军, 方云, 孙兵, 等. 渗水对龙门石窟的影响及治理分析 [J]. 现代地质, 2005, 19(3): 475-478.
- [5] 方云, 邓长青, 李宏松, 等. 石质文物风化病害防治的环境地质问题 [J]. 现代地质, 2001, 15(4): 458-461.
- [6] 方云, 魏海云, 王金华, 等. 隧洞排水法治理大足石刻渗水病害 [J]. 现代地质, 2001, 15(3): 351-354.
- [7] 方云, 邓长青, 顾成权, 等. 国家重点文物安丙家族墓地遗址区环境地质病害研究 [J]. 现代地质, 2002, 16(2): 220-223.
- [8] 方云, 陈星, 刘俊红, 等. 云冈石窟危岩发育的成因分析 [J]. 现代地质, 2011, 25(1): 137-141.
- [9] 方云, 顾成权, 严绍军, 等. 河南洛阳龙门石窟溶蚀病害机理的研究 [J]. 现代地质, 2003, 17(4): 479-482.
- [10] Fang Yun, Wan Li, Li Suisen, et al. Study on mechanics of condensation water diseases and test in site [M] // Proceedings of International Symposium Conservation of Ancient Sites 2008 and ISRM-Sponsored Regional Symposium. Beijing: Science Press, 2010: 205-212.
- [11] 曹文炳, 万力, 曾亦键, 等. 云冈石窟洞窟内凝结水形成机制与防治研究 [M] // 云冈石窟研究院. 2005 年云冈国际学术研讨会文集(保护卷). 北京: 文物出版社, 2006: 184-191.
- [12] 中国地质大学(武汉) 华文遗产和岩土文物保护工程中心. 龙门石窟保护修复工程凝结水病害研究报告 [R]. 武汉: 中国地质大学, 2008.