

四川摩崖造像岩石的工程物理特性

韦 荃, 贺晓东, 谢振斌, 宋 艳

(四川省文物考古研究院, 四川成都 610041)

摘要: 在自然力的影响下摩崖造像所产生的风化、剥蚀、开裂等种种病害, 是与其岩石本体的理化性质有着密切关系。因此, 进行摩崖造像保护工程的前期, 做好对岩石的工程物理特性调研是非常必要的。为此, 根据摩崖造像的分布, 经代表性选点、取样并测试。结果表明, 四川地区摩崖造像的岩石本体均为砂岩, 存在明显软化现象, 试验数据有明显的规律性, 且各项指标间的相关性较好。其成果为今后保护工程的顺利开展奠定了初步基础。

关键词: 摩崖造像; 工程物理特性; 砂岩

中图分类号: K877 K879.29 **文献标识码:** A

0 引言

四川地区摩崖造像以分布广、数量多、历史久远而闻名全国。乐山大佛、安岳石刻、巴中石刻、广元石刻等均属我国石窟艺术宝库中璀璨的明珠, 对探索四川地区的政治、经济、文化、艺术、宗教等诸多方面提供了重要的实物依据, 具有永恒的历史研究价值和艺术欣赏价值。

就摩崖造像的开凿而言, 四川地区具有明显的自然优势。东部为四川盆地, 盆地之西部为川西平原, 以成都为中心, 四周高山环绕。平原、丘陵与低山相比较, 以丘陵居多。众多悬岩、石壁为开凿造像创造了优越的选址条件, 无论是雕刻大型巨像或凿造摩崖群雕, 都能选用自如, 取之不尽, 用之不竭。且四川各地的岩石又多为砂岩, 无论精、粗加工, 或圆雕、浮雕、镂空, 都无所不宜。但遗憾的是这些造像都因年代久远, 而存在诸多病害, 为科学的保护这些珍贵的文化遗产, 四川省文物考古研究院于 2004 年至 2005 年对全省重要摩崖造像进行了全面调查、勘察和岩石本体取样工作, 并开展了岩石的工程物理特性分析测试。本文即是对该项成果的扼要介绍。

1 四川摩崖造像的分布及取样

四川摩崖造像的分布受到区域地形、地貌、地层岩性和地质构造的控制。四川盆地面积约 20 万平方公里, 盆地四周环绕着山地和高原: 北面是米仓山、大巴山, 西面是龙门山、邛崃山、大凉山, 东面是

巫山, 南面是大娄山。西部和北部的山地较高, 东面和南面的山地较低。盆地内部的地势由西北向东南微倾斜。河流多由边缘向盆地底汇聚, 岷江、沱江、嘉陵江由北向南, 乌江由南而北分别注入长江, 从而构成以长江为骨干的不对称向心状水系。自新生代以来, 强烈的断构造运动, 河谷切割侵蚀形成低山、台坎、丘陵、方山、桌状山等地貌形态, 使四川摩崖造像多沿谷间山地丘陵、江河流经之处和沟谷发育之地分布, 因而盆地内长江以北摩崖造像密集, 尤以盆地中、西、北部更为集中, 西部以台状浅丘为主, 大部分造像沿岷江、青衣江水系分布; 中部为丘陵区, 造像沿沱江、涪江、嘉陵江、渠江等水系分布; 北部为低山区, 仅在嘉陵江、南江等河谷地带有零星平地, 向南低山高度降低, 岩层变缓, 形成各种水平构造地貌, 顶部多有数米砂岩硬盖^[1], 为石刻的开凿提供场所(见图 1)。根据四川摩崖造像的分布, 结合文物的历史、科学价值, 全面了解四川摩崖造像岩石的工程物理特性, 选择了具代表性的乐山大佛、安岳石窟、巴中南龛、北龛、水宁寺摩崖造像、通江千佛岩摩崖造像、广元黄泽寺摩崖造像、千佛崖摩崖造像、剑阁鹤鸣山道教造像、宜宾流杯池及石刻题记、长宁龙吟寺石刻造像、荣县大佛、资阳半月山摩崖造像、阆中大佛、泸县玉蟾山石窟等进行调查、取样。由于四川自然环境雨量充足、条件湿热, 岩石的物理、化学和生物风化作用, 长期在浸蚀造像, 危害造像的保存, 其表面风化程度和形态也因造像的开凿年代、生存大小环境和污染状况差异较大, 为此, 岩石本体取

收稿日期: 2008-07-21; 修回日期: 2008-10-21

作者简介: 韦 荃 (1963—), 男, 1990 年毕业于上海复旦大学研究生班, 文物保护专业, 副研究员, 四川省成都市人民南路四段五号, 610041, E-mail: weiquan191@sina.com

样时尽量除去岩石表面强风化层,使各处造像的岩石测试数据有一定的可比性和关联性。取样点的选择须远离造像区域,一般在重点保护范围以外,选择与造像同一岩层,人工开凿提取 $20\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 的样品,减震包装运回。

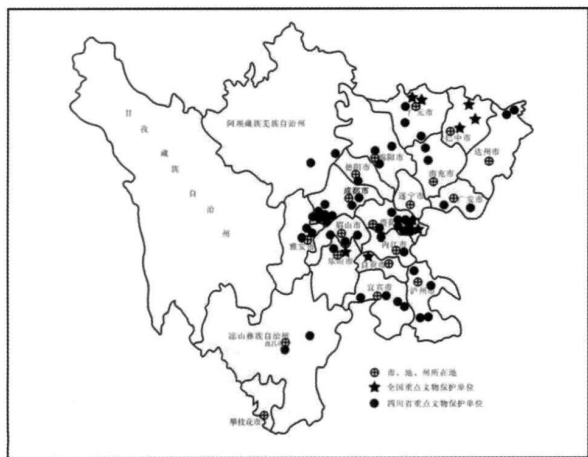


图 1 四川重要摩崖造像分布示意图

Fig 1 Distribution sketch map of cliff figures in Sichuan Province

in Sichuan Province

2 四川摩崖造像的工程特性

四川摩崖造像分布区域地层出露单一,以侏罗、白垩系的红色砂岩为主,夹砂质泥岩和泥岩组成,岩性均一,层性稳定,厚度由数米到数十米,最宜开凿造像。造像在气候、地形、水、生物等多种因素综合作用下发生了复杂的岩体破坏,即通常所说的物理破坏和化学破坏。物理破坏有日晒、雨淋、霜冻、融化、风蚀等,而化学破坏有氧化、水化、酸化、溶解等。当然所有引起破坏的因素都是要通过石质文物本身即岩石来起作用的,当岩石的力学强度较低岩石结构较疏松,组成的矿物和胶结物易风化,那么显而易见,此类岩石容易破坏受损。反之则不易,即摩崖造像的保存状况与岩石的物理性质和力学性质有密切关系。因此在研究摩崖造像的保护问题时,首先必须研究其岩石组成、结构、胶结物成分、及其物理指标和力学强度。只有了解其地质特征和力学强度特征,才能够进一步研究石质文物病害原因,进而提出符合岩石特点的加固、防护处理措施。

2.1 四川摩崖造像物理力学性质

岩石的物理性质指标,主要是指岩石的容重 (g/cm^3)、比重、含水量 (%)、吸水率 (%)、孔隙率 (%) 等。

岩石的力学性质指标,主要是指岩石的单轴抗压

强度 (kg/cm^2 或 10^4 Pa)、和单轴抗拉强度 (kg/cm^2 或 10^4 Pa)、软化系数、极限抗弯强度、变形性质 (包括泊松比 γ 和变形模量 E (kg/cm^2 或 10^4 Pa))、抗剪强度包括摩擦角 φ (度) 和内聚力 C (kg/cm^2 或 10^4 Pa)。

根据石质文物保护的技术要求,结合四川摩崖造像的特点,对采集的岩石标本进行物理力学性试验项目共 11 项:包括烘干密度、比重、普通吸水率、饱和吸水率、干抗压强度、湿抗压强度、干抗拉强度、湿抗拉强度、弹性模量、泊松比和软化系数等。岩石采集点为摩崖造像同一岩层,在不影响造像结构和环境的部位,去掉岩石表面风化层,人工开凿样品,尺寸大小为 15 cm^3 。

本批岩石试验的时间为 2004 年 7 月到 2006 年 3 月。岩石试验依据《水利水电工程岩石试验规程 (DL/T 504-81)》进行。试样加工:岩样加工之前,首先根据岩块试验岩样进行仔细清理、核对和分类;岩石抗压强度试验试件和弹性模量试验试件加工尺寸的高径比为 2:1;岩石抗拉强度试验试件加工尺寸的高径比为 1:1;试件上、下两端面的平行度和垂直度都按照规程要求控制。

试验方法:密度试验采用体积法、水中称重法;比重试验采用水中称重法和比重瓶法;吸水率试验采用试件自由浸水 48 h 方法;饱和吸水率试验采用煮沸法。

干抗压强度试验、干抗拉强度试验采用烘干试件;湿抗压强度试验,湿抗拉强度试验采用饱和试件。试验在 2000、800、10 kN 压力机上进行。

弹性模量试验采用烘干试件,试验在液压伺服控制刚性试验机上进行。位移传感器自动测量试件轴向变形,并由 X-Y 函数记录仪自动绘制应力-应变曲线。

各项物理力学性试验成果见表 1。

2.2 岩石的成分分析

四川省重要摩崖造像岩石化学成分分析按原“地矿部矿物原料分析法”标准进行,具体分析方法如下: SiO_2 : 重量法; Fe_2O_3 : 重铬酸钾容量法; Al_2O_3 : EDTA-NaF 容量法; CaO : EDTA 容量法; MgO : EDTA 容量法,分析结果见表 2。

2.3 岩石的矿物分析

岩矿分析在高倍显微镜下对岩石薄片进行鉴定定名分析,分析结果见表 3。该分析方法在岩石的矿物分析上属宏观的初步分析,如要对造像风化病害做进一步研究,还需更多的综合性研究,如岩石氧化物的化学分析、风化产物的差热分析、X 射线衍射分析、光谱分析和扫描电镜鉴定等。

表 1 四川摩崖造像岩石物理力学性试验成果表

Table 1 The result of the Physical and mechanical tests of rock for cliff figures in Sichuan Province

造像名称	岩性	烘干 密度 /g cm ⁻³	比重	普通 吸水率 /%	饱和 吸水率 /%	弹性 模量 /GPa	泊松比	烘干抗 压强度 /MPa	湿抗压 强度 /MPa	干抗拉 强度 /MPa	湿抗拉 强度 /MPa	软化 系数
巴中南龛石窟	细砂岩	2.40	2.58	2.64	2.87	18.5	0.23	62.1	36.7	5.44	3.60	0.60
通江千佛岩摩崖造像	石英砂岩	2.06	2.63	6.29	10.5	3.70	0.30	12.1	6.80	1.20	0.88	0.55
广元千佛岩摩崖造像	石英砂岩	2.22	2.62	4.62	7.00	6.20	0.28	26.0	14.6	24.8	1.40	0.57
剑阁鹤鸣山道教造像	砂岩	2.64	2.69	0.46	0.60	22.4	0.22	76.4	64.0	7.70	7.00	0.82
长宁龙吟寺石刻造像	细砂岩	2.38	2.61	3.08	3.69	11.5	0.25	43.1	25.0	4.10	2.45	0.59
荣县大佛	石英砂岩	2.07	2.65	6.82	10.6	3.50	0.30	11.9	6.49	1.10	0.84	0.55
资阳半月山摩崖造像	石英砂岩	2.16	2.62	6.76	8.20	5.40	0.29	21.4	11.5	2.00	1.00	0.56
蒲江飞仙阁摩崖造像	石英细砂岩	2.30	2.64	3.67	5.57	10.0	0.26	39.8	24.6	3.99	2.55	0.61
乐山大佛 ^①	石英细砂岩	2.22	2.68	6.29				42.2	18.79			
阆中大象山摩崖造像	砂岩	2.24	2.67	4.84	7.22	11.0	0.25	33.6	23.3	2.98	2.20	0.68
泸县玉蟾山摩崖造像	砂岩	2.25	2.64	1.32	1.34	37.0	0.22	89.5	63.3	8.65	6.15	0.70
安岳卧佛院石窟 ^②	砂岩	2.38	2.42			3.4	0.25	14.58	9.22		0.98	

注: 试验数据为每组测试数据的平均值, ①数据来源《乐山大佛的前期研究》②数据来源《四川省安岳县卧佛院危岩工程地质勘察报告》

表 2 岩石化学分析结果

Table 2 The result of chemical analysis of rock for cliff figures in Sichuan Province

(%)

名称	SO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	烧失量	SiO ₂
巴中南龛石窟	58.75	2.68	10.56	13.17	1.35	10.06	0.06
通江千佛岩摩崖造像	68.91	3.61	14.38	3.73	1.07	3.62	0.08
皇泽寺摩崖造像	67.48	4.32	14.20	3.80	1.49	2.30	0.05
广元千佛岩摩崖造像	73.42	4.52	11.44	3.4	0.81	1.79	0.07
剑阁鹤鸣山道教造像	52.34	4.38	5.18	20.01	1.11	15.16	0.04
长宁龙吟寺石刻造像	63.29	2.71	8.14	11.87	0.85	9.20	0.04
荣县大佛	63.93	5.92	16.20	2.78	1.99	3.23	0.07
资阳半月山摩崖造像	55.25	9.12	16.02	4.25	3.87	5.69	0.08
蒲江飞仙阁摩崖造像	51.94	2.62	8.46	18.03	1.38	14.35	0.05
乐山大佛	71.84	3.37	7.59	6.29	0.98	3.12	0.05
阆中大象山摩崖造像	48.72	2.17	7.58	20.94	2.63	16.21	0.05
泸县玉蟾山摩崖造像	73.59	1.36	16.35	1.84	0.21	5.37	0.04

表 3 岩石的矿物分析结果

Table 3 The result of Mineral analysis of rock for Cliff Figures in Sichuan Province

(%)

名称	岩石名称	石英	长石	云母	岩屑	颗粒物	胶结物
巴中南龛石窟	钙质含长石石英细砂岩	>80	<5	1~2	3%±	少许	钙质 7± 含少许泥质
通江千佛岩摩崖造像	钙泥质中细粒长石岩屑石英砂岩	>75	5~10		10		褐铁矿化泥质为主, 少量钙质
广元皇泽寺摩崖造像	泥质中细粒岩屑长石石英砂岩	>65	>15	<2	>10	少许	钙质 5±
广元千佛岩摩崖造像	泥质中细粒含长石岩屑石英砂岩	>75	>5	少量	<10	少许	钙质 5±
剑阁鹤鸣山道教造像	钙质中粒岩屑砂岩	30±	<5	少量	55	少许	钙质 >10
长宁龙吟寺石刻造像	钙质石英细砂岩	>85 (含硅质)	少量	少量	少量	少许	钙质 (方解石为主) 10
荣县大佛	泥质细粒含岩屑长石石英砂岩	>70 (含硅质)	>10	2±	<10	少许	泥质 <5
资阳半月山摩崖造像	泥质中细粒长石岩屑石英砂岩	>55 (含硅质)	5~10	<3	>25	少许	隐晶质泥质 <5
蒲江飞仙阁摩崖造像	砖红色钙质石英细砂岩	>80 (含硅质)	1	<3	2±	少许	钙质 (方解石为主) <5
乐山大佛	中细粒长石石英砂岩	>65	15~20		10~15	少许	钙质 + 泥质
阆中大象山摩崖造像	钙质中粒含长石石英砂岩	>90 (含硅质)	<5		少量	少许	钙质 (方解石为主) <5
泸县玉蟾山摩崖造像	硅泥质中粒岩石石英砂岩	>70	2±		20±	少许	硅质 + 泥质 >5

2.4 岩石测试结果分析

南龛石窟细砂岩、鹤鸣山道教造像砂岩、泸县玉蟾山摩崖造像, 岩性致密完整, 抗压强度值较高, 湿抗压强度值大于 30MPa , 烘干密度大于 $2.40\text{g}/\text{cm}^3$, 软化系数高, 属于硬岩, 抵抗自然力的力量相对较强, 从现场勘察情况看, 造像整体保存较好。

通江千佛岩摩崖造像石英砂岩, 黄色, 颗粒松散, 抗压强度值低, 干抗压强度范围值在 $14.4 \sim 10.8\text{MPa}$, 湿抗压强度范围值在 $7.75 \sim 5.97\text{MPa}$, 易风化, 特别是在水的作用下更为严重。

广元千佛岩摩崖造像石英砂岩, 黄色夹黑色矿物斑点, 颗粒粗大, 结合紧密。抗压强度值较大, 干抗压强度范围值在 $26.4 \sim 25.4\text{MPa}$ 之间, 但湿抗压强度范围值在 $15.4 \sim 14.4\text{MPa}$, 软化系数仅为 0.57 , 抵抗自然力的能力相对较差。

长宁龙吟寺石刻造像细砂岩, 紫红色, 泥质成分含量较多, 但岩石致密、颗粒细小, 岩石强度较高, 所以保存情况还好。

荣县大佛、资阳半月山摩崖造像均为黄色石英砂岩, 荣县大佛岩石颗粒粗大、松散, 资阳半月山摩崖造像岩石颗粒细小且致密, 资阳半月山摩崖造像岩石强度明显大于荣县大佛岩石强度, 从两处造像的保存现状也能证实。

蒲江飞仙阁摩崖造像岩石为浅紫红色石英细砂岩, 岩性致密, 钙质成分含量较高, 这组岩石抗压强度值较高, 干抗压强度范围值在 $43.0 \sim 37.3\text{MPa}$, 湿抗压强度范围值在 $26.2 \sim 22.4\text{MPa}$, 这和造像的保存情况一致。

阆中大象山摩崖造像砂岩, 岩石的湿抗压强度大幅度的降低, 软化系数为 0.68 岩石存在软化现象。

各组岩石除剑阁鹤鸣山道教造像岩石外, 其它各组岩石湿抗压强度降低明显, 软化系数范围值在 $0.68 \sim 0.55$ 之间, 岩石存在明显软化现象。

岩矿分析结果各组岩石均为砂岩, 所含石英、长石、云母、岩屑存在一定差异, 除鹤鸣山道教造像外,

其差异不大, 胶结物多以钙质为主, 泥质和硅质次之。

从四川各处摩崖造像采集的岩石样品分析测试结果来看, 呈明显的规律性, 且各项指标间的相关性良好; 岩石湿抗压强度降低明显, 存在明显软化现象; 岩石的矿物成分含量直接影响岩石物理力学性质指标; 岩石的致密程度、风化程度与岩石力学强度有密切关系。在探索造像风化程度方面, 采用点荷载仪在调查现场无雕刻处的风化面进行了测试, 测试数据关联性差, 有待进一步研究、规范和完善。另外可用声波、微测探法等对造像风化程度和深度进行测试研究。

3 结束语

四川地区摩崖造像岩石工程物理特性的测定是文物保护前期的基础性的研究工作, 研究显示四川摩崖造像依托岩石均为砂岩, 结构疏松。从岩石的矿物成分、化学成分以及岩石的胶结物分析来看, 岩石在水的作用下, 钙质和泥质胶结物易水化, 岩石体积膨胀, 造成岩石表面风化, 岩石的软化数据也说明水是造成病害的主要原因。当然, 要全面探索四川地区摩崖造像所存病害的原因是个系统工程, 尚有诸如摩崖造像岩石表面风化层研究; 本体岩石耐酸碱能力和抗风蚀能力研究; 造像所处地理环境、自然环境的研究, 以及除物理、化学风化外还有生物风化作用等等许多工作要做。因此, 本文提供的成果, 仅仅是想为科技工作者在从事摩崖造像的保护研究时参考, 也为今后保护工程的顺利开展奠定初步基础。

参考文献:

- [1] 马家郁. 四川摩崖造像的分布概况 [J] // 两岸文物保存修复会议论文集. 台北: 国立历史博物馆, 2000
MA Jiayu. Distribution overview of cliff figures in sichuan province [J] // "Cultural Relic Protection and Restoration Conference Proceedings between Two Sides of Strait" Taipei National History Museum, October 2000

The Physical characteristics of rock cliff figures in Sichuan Province

WEI Quan, HE Xiaodong, XIE Zhenbin, SONG Yan

(Sichuan Province Cultural Heritage and Archaeology Institute, Chengdu 610041, China)

Abstract: Damage to the rock cliff figures such as weathering, denudation and cracking caused by natural force are very much related to the rock's physical and chemical composition. Therefore, it is important to study and ana-

the physical characteristics of rocks before starting a preservation project for the rock cliff figures. Random samples taken from various rock cliff figures in the area have been tested. Results show that the rock is sandstone with a natural tendency for crumbling (softening). These findings establish a basic foundation to begin protection project on the rock cliff figures.

Key words: Rock cliff figures; Sandstone; Engineering Physics characteristics

(责任编辑 潘小伦)

· 科技信息 ·

对来自洪都拉斯科潘的颜料和瓷器样品的光谱学研究

拉曼光谱可用来考察原料的矿物学特性, 了解原料的来源、颜料混合物的成分以及制作技术等等。有人采用微区拉曼光谱分析为主要手段, 另外再结合微区红外光谱以及扫描电镜 能量色散谱仪对洪都拉斯科潘的古典玛雅陶瓷装饰颜料的特性进行研究。

样品来源于科潘古典时期的两个不同的阶段: Acb(公元 400-650年)和 Coner(公元 650-950年), 每一类样品包含多种类型和风格。9个样品为浅黄色釉层上带有红色颜料, 6个样品为多彩釉, 即浅黄色釉层上带有红色和棕黑色颜料, 还有 1个样品没有上颜料, 但是胎为棕黑色。样品没有经过预处理, 先用光学显微镜观察其物理属性, 然后利用微区拉曼光谱仪和衰减全反射红外光谱仪进行分析。利用金刚锯从其中 5个样品上切割一小部分, 将外部的颜料表面镀上一层碳膜, 并利用扫描电镜和微区 X射线进行分析。

所有样品上均能找到红色颜料, 只是其颜色深浅不一, 从橙红色到棕色或者紫色。拉曼光谱分析表明红色颜料为赤铁矿, 但是不同类型的陶瓷所用颜料的配方是有所区别的。

所有的 Acb陶瓷显示出深红色, 它是由赤铁矿、磁铁矿粒子和粘土组成的混合物; 而所有的 Cone陶瓷呈亮红色, 它是由高浓度的铁和少量粘土组成的混合物, 其中还含有小的镜铁矿粒子。Coner颜料很可能含有赤铁矿粉, 在氧化条件下烧成亮红色。而 Acb陶瓷颜料是含有磁铁矿的复杂混合物, 这样对于确定其最初的原料是一件非常复杂的事情。但是本研究发现从 Acb时代到 Coner时代, 红色颜料混合物的使用发生了变化, Cone时代的颜料中具有高铁含量, 这种配方不利于其与陶瓷表面的结合, 但是新的烧造技术使这一配方的应用得以实现。

矿物学特征证实了在进口陶瓷 Calder和当地多彩陶瓷 Gualpapa Copado之间有明显的差异。同样, 本地陶器之间颜料的差异表明了 Surlo Gualpapa和 Copado三个不同的生产系统, 很有可能存在 3个生产中心。Cocoricó Favela Gualpapa和 Melanc陶瓷在颜料和生产技术方面的相似性表明其生产者之间可能存在一定的关系。本研究发现碳 铁基粘土被用于生产黑胎陶瓷— Surlo Brown。

因此, 扩展该项研究, 收集更多更丰富的古典时期的样品, 并将这些样品与基里瓜、莫塔瓜中部、危地马拉高原、萨尔瓦多西部以及洪都拉斯中部这些在文化上与科潘相关联的地方的样品进行比较, 这将是非常有意义的研究。

龚玉武 参考文献《Archaeometry》, 2009, 51(1): 95-109