

砂岩类石窟寺保护新进展

——以云冈石窟保护研究新成果为例

黄继忠¹ 王金华² 高峰³ 王逢睿⁴ 齐扬⁵ 刘绍军⁶

(1.上海大学 上海 200444;2.复旦大学 上海 200433;3.中国文化遗产研究院
北京 100029;4.中铁西北科学研究院有限公司 甘肃兰州 730000;
5.陕西省文物保护研究院 陕西西安 710075;6.中南大学 湖南长沙 410083)

内容提要:石窟寺作为石质文物的典型代表,具有极高的历史、艺术和科学价值,但普遍面临着洞窟及岩体失稳、各种水患、雕刻表面污染以及石雕风化等问题。国家科技部和国家文物局立项的“石质文物保护关键技术研究”项目,以世界文化遗产山西大同云冈石窟为例,针对我国砂岩类石窟寺普遍存在的共性关键技术问题,进一步深入研究了砂岩类石窟病害的机理,研发了监测、检测技术手段和装备以及文物加固、保护材料和工艺,提升了云冈石窟乃至我国砂岩类石窟文物保护的整体水平,研究成果已推广运用于同类石窟寺的保护工作。

关键词:文物保护 石质文物 砂岩类石窟文物 云冈石窟 “石质文物保护关键技术研究”项目
中图分类号:K854.3;K879.2 **文献标识码:**A

以石窟寺为典型代表的石质文物在我国文化遗产中占有非常重要的位置,如山西大同云冈石窟、河南洛阳龙门石窟、重庆大足石刻等大型石窟寺历来受到各级政府的重视,一些重要的石窟寺都经历过多次维修保护。但是,由于这类文物的保护不仅与文物本身有关,而且与其赋存岩体、周边环境等均有着密切的关系,所以成为文物保护中问题最为复杂的一种类型。近年来,在科技部支持下,国家文物局组织实施了科技支撑计划项目——“石质文物保护关键技术研究”(以下简称“石质文物保护研究”)。该项目以云冈石窟为主要研究对象,针对我国砂岩类石窟普遍存在的共性关键技术问题,从既相互关联又相对独立的六个方面展开,包括无损或微损检测技术在石窟保护中的应用研究、石窟水分来源综合探

查技术研究、石窟岩体稳定性分析研究、石窟危岩体治理关键技术研究、石窟文物表面有害污染物清除技术研究以及石质文物防风化保护和施工工艺研究^[1]。该项目是1949年以来我国石质文物保护领域最为系统的一次跨学科研究,取得了系列新成果,在我国的世界文化遗产和全国重点文物保护单位的工作中得到了推广应用。本文将对该项目及其成果作出系统、扼要的介绍,有助于学界和业界了解我国石窟类石质文物保护的新进展。

一、项目立项前石窟类文物保护面临的问题

在项目立项前,我国以云冈石窟为代表的石窟类文物长期面临着水患、石窟岩体稳定性及石雕表面风化等病害与问题的威胁,一直缺乏有效的解决手段和方法。

收稿日期 2017-12-19

作者简介 黄继忠(1965—),男,上海大学文化遗产保护基础科学研究院特聘教授、博士生导师,主要研究方向:岩土文物保护。
王金华(1964—),男,复旦大学文物与博物馆学系教授、博士生导师,主要研究方向:石质文物与古遗址保护。
高峰(1971—),男,中国文化遗产研究院研究馆员,主要研究方向:岩土文物保护、文物无损检测分析。
王逢睿(1977—),男,中铁西北科学研究院教授级高级工程师,主要研究方向:岩土文物保护。
齐扬(1964—),男,陕西省文物保护研究院研究员,主要研究方向:石质文物与壁画保护。
刘绍军(1970—),男,中南大学粉末冶金研究院研究员、博士生导师,主要研究方向:纳米材料合成及在文物保护中的应用等。

1.水患

与普通的岩体不同,石窟岩体不仅与山体地质构造相关,而且与文物相关,这就决定了它与普通地质岩体的探查技术不同,更多地需要用无(微)损的技术解决。针对我国石窟寺存在的水的问题,水分来源通道探测技术长期没有取得突破;影响石窟文物的凝结水的研究严重滞后,也一直没有探索出治理方法。

2.岩体稳定性

石窟岩体的稳定性分析和评价与一般岩体也不同,之前尚未建立起相应的评价方法和手段。在石窟危岩体加固方面,虽然实际保护中较多运用非预应力锚杆,但这类锚杆属于被动支护,只有当危岩体发生变形后,才发挥明显的作用;而裂隙灌浆的办法则需要解决灌浆后浆体与危岩体之间粘结力的长期效应问题。

3.风化石雕加固

之前我国石窟寺风化石雕保护加固问题缺乏系统的研究,主要原因在于:一是加固保护之前去除石质表面有害污染物的手段和方法滞后;二是石雕防风化加固材料依然难以满足文物的实际需要,石窟文物在自然界各种营力的作用之下依然在快速地风化。

二、石质文物保护研究项目的主要研究内容

1.无(微)损检测技术在石窟保护中的应用研究

该研究主要有三个方面:一是研究降低对文物的损害性的检测方法,即在石质文物保护的分析检测过程中,尽可能采用无损检测方法替换目前的有损检测方法;二是研究提高检测精确度的方法,即对目前较为重要的石质文物表征指标开展检测方法研究,提高其精确度和检出限;三是石窟石质文物保护关键表征指标的前沿技术应用,即针对石质文物保护领域亟需的、目前检测技术较难获取的表征指标,开展有针对性的应用研究,扩展石质文物无损、微损检测范畴。

2.石窟水分来源综合探查技术研究

主要包括:采用计算机空间建模技术,开发裂隙岩体三维导水通道模拟识别系统,形成三维导水通道模型;利用六氟化硫(SF₆)混合气体钻孔压入技术,开展石窟渗水通道与规律研究;研发石窟凝结水测量技术、凝结水形成环境综合监测技术及治理技术;了解石窟顶部降水入渗和水盐聚散规律,研究石窟岩土体内降水和空气中的水汽在气候因子驱动下的循环转化规律,最终形成石窟水分来源综合探查技术^[1]。

3.石窟岩体稳定性分析评价系统研究

主要包括:开展云冈石窟不稳定病害类型及破坏模式的调查分析研究、岩体结构网络勘察及网络模型模拟研究工作。通过开展石窟岩体温度场、应力场监测分析研究,石窟岩体盐类运移及积聚特征分析研究,水、温度、盐类作用、岩石劣化等因素对石窟岩体稳定影响综合作用研究等多项研究,对云冈石窟岩体稳定性做出评估,研发建立云冈石窟重点区域岩体稳定性监测系统和石窟岩体稳定性分析评估系统^[3]。

4.石窟危岩体治理关键技术研究

针对现有石窟危岩体保护治理技术,从勘察、设计、施工、检测等环节进行系统的比较研究;通过试验测试,改进石窟危岩体的锚固设计方法,进行现场锚固施工振动影响监控及施工工艺研究;研发锚固施工粉尘收集装置及新型石窟危岩体裂隙灌浆加固材料,进行危岩体锚固及灌浆质量的无损检测研究。

5.石窟文物表面有害污物清除技术研究

系统研究石雕表面各种不同类型污染物物质成分及组成,确定不同污染物对石雕文物的危害性,建立石质文物表层污染物评估的技术和方法;研发石质文物激光清洗装备;系统评估现有石质文物清洗方法和工艺的安全性、可靠性和有效性,建立起适合砂岩类石窟文物表层污染物的清洗技术和工艺方法的体系。

6.石质文物防风化保护和施工工艺研究

进一步深入研究云冈石窟砂岩风化机理,系统评估已有的砂岩类石窟防风化材料的各种性能以及施工工艺,在此基础上研发满足云冈石窟砂岩石雕防风化加固的材料、工艺以及质量控制体系,建立石质文物防风化保护技术控制和评价系统,以解决风化砂岩类石雕保护的问题。

三、石质文物保护研究项目取得的新成果

1.无(微)损检测技术在石窟保护中的应用研究

为准确掌握石质文物的表层风化程度、裂隙病害发育情况、风化石雕和岩体裂隙灌浆效果等,对现有可能用于石质文物保护的多种无(微)损检测技术的适用性进行了评估研究,形成了系列技术以及相关操作规程,同时研制了用于石质文物风化表层的微损钻芯取样装置。

(1)建立了风化病害及加固效果的无(微)损检测技术体系

采用微损钻芯取样、高光谱及红外成像、便携式和实验室荧光等技术,构建起砂岩文物风化

病害的现场无(微)损检测技术体系,可定性或半定量完成石质文物孔隙率、风化病害特征元素、结晶水含量、风化层厚度、风化程度分布、表面硬度等指标的测定和防风化加固效果的现场评估。而便携核磁共振波谱分析可对石质文物加固前后孔径分布特征进行无损检测,实现石质文物风化病害以及加固保护效果的评估。

(2)建立了裂隙检测及灌浆效果的综合探查技术体系

主要包括裂隙图像分析系统结合超声波探测等技术的石窟文物近表面裂隙综合无(微)损探测技术系统,和红外热成像与超声波结合的裂隙灌浆效果评估无(微)损检测技术方法,实现了对石质文物裂隙发育情况和灌浆效果的无(微)损检测与评价。

2.石窟水分来源综合探查技术研究

采用地球物理、地球化学、水文地质等多种监测、检测手段,查明了石窟围岩裂隙渗水通道,揭示了石窟内部凝结水形成机理和转化的规律;对石窟周边整体环境中的水分来源进行了前瞻性研究,揭示了大气和岩体中的水汽迁移转化对石窟文物的影响。

(1)解决了石窟含泥岩夹层的砂岩裂隙连通导水的复杂问题

对前人已有的研究成果开展了深入的分析,同时针对石窟典型区域,现场开展了详细的裂隙测量,在此基础上采用Joint-OKY2裂隙分析系统和蒙特·卡罗方法(Monte Carlo method)进行了石窟岩体三维裂隙网络模拟^[4]。结果表明切割云冈洞窟顶部和两侧壁的主要是北东向和北西向的交叉节理,而洞窟顶部贯通节理的发育对于石窟渗水才具有直接的意义。

(2)解决了凝结水的监测问题,研发了凝结水控制技术

通过对窟内水平方向不同深度、垂直方向不同高度的空气温湿度、岩石表面和内部温度等各项参数的实时监测,全面了解了洞窟内岩壁凝结水形成的环境。系统改造了先前研发的凝结水测量装置,达到了快速、大面积定量测量凝结水的目的。与洞窟内部环境监测的联动实现了文物保存环境无线远程控制除湿,达到了控制凝结水的目的。

(3)开展了窟顶水盐聚散规律和窟内岩壁盐分分布规律的研究

通过氢氧同位素的比较研究,明确了石窟区

地下水来源主要为大气降水。从覆盖层土壤入手,探讨了云冈石窟盐分的形成过程,发现石窟顶部积水或者汇水区电导率较大,盐分易于聚集;采用硫同位素分析对云冈石窟区硫的来源进行了研究,揭示出石窟表面盐类中硫的来源主要是大气干湿沉降而不是砂岩中的硫铁矿^[5]。

(4)开展了石窟山体水汽循环转化规律的研究

建立了由窟区气象站、石窟顶部覆盖层监测系统、石窟围岩监测系统(水平孔和垂直深孔)和洞窟内部环境监测系统组成的石窟山体水汽循环监测体系,应用该体系进行的整体监测结果表明,石窟岩体内部0.6m以内的空气相对湿度超过90%,意味着石窟山体包气带相当于一个含有饱和水汽的空气储藏室,在气压和温差作用下,整个包气带的水汽产生运移^[6]。

3.石窟岩体稳定性分析评价系统研究

开展了石窟区危岩类型的分析与研究,建立了云冈石窟重点区域岩体稳定性监测和分析评估方法。

(1)从云冈石窟稳定性问题的类型、特点、识别方法入手,初步建立了以稳定性问题与识别、评价内容、评价方法、评价结论及预测为框架的相对完整的评价系统。

(2)对不同石窟岩体稳定性问题的内涵、概念进行了界定,结合云冈石窟岩体的特点,对地层岩性、结构、形制特点与石窟岩体稳定性的关系进行了分析评估,提出了云冈石窟岩体破坏模式。

(3)采用多种监测技术手段,结合石窟岩体特点,提出了系统监测方法、技术和指标,建立了适用于石窟保护研究的稳定性监测系统。通过对岩体表层及内部温湿度的监测、盐类分布和含量的调查、水气运移作用的模拟分析、岩石风化过程及长效性能的研究,探讨了温度、应力、盐等多因素体系下,岩体微观性质改变及宏观力学强度的衰减过程,揭示了多场耦合作用下石窟稳定性的变化规律。

(4)针对石窟岩体特征,开展了现场地质调查及室内岩石力学试验,对石窟关键部位的稳定性进行THM耦合、动力及流变计算分析,对石窟各部位的受力、变形与破坏的长期时效进行了评价。

4.石窟危岩体治理关键技术研究

围绕石窟危岩体治理关键技术,解决了勘察、设计、施工、检测等环节的技术问题,提高了

石窟危岩体治理水平。

(1)勘察环节。对以云冈石窟为代表的典型砂岩石窟危岩体病害发育的地质结构成因进行了分析,结合治理需求进行了危岩体破坏的力学模式分类,完善了石窟危岩体勘察技术要点。

(2)设计环节。通过现场实验研究了不同形式单孔复合锚索对岩体附加应力场的影响,提出了预应力锚索治理危岩体的适用性条件及参数选取原则。对不同杆体结构形式及材料的轻型锚杆在石窟危岩体治理中的适用性进行了试验研究。运用FLAC 3D、ADINA、PLAXIS等数值模拟分析软件对锚杆锚固过程进行了计算分析,为锚固设计及方法改进提供了依据。

(3)施工环节。提出不同地层条件和文物保存状况下的施工机械选择、钻机支架与导向装置的改进、特殊条件下的钻进工艺选择与改进、确保钻孔方位的动态测量手段等控制措施。自主研发了粉尘疏导装置,解决了施工过程中造成二次粉尘污染的问题。研发的矿物聚合材料具有耐候性强、可灌性好、环境友好、工艺简单及适应性等特点^[7]。

(4)检测环节。运用自主研发的锚索质量无损检测仪对危岩体锚固体体系进行了工后质量检测,并通过研发震荡回波压制法对原波形分析方法进行了改进。

5.石窟文物表面有害污染物清除技术研究

针对石雕表面不同污物类型建立了污染物评估技术方法,研制完成了石质文物表面污染物的清洗装备,建立了石质文物表面污染物清除工艺的评估方法和相关技术体系。

(1)系统分析了石窟表面的各种污染物及其与基底砂岩表层的结合状况。其中粉尘沉积的黑灰色颗粒与岩石表面贴合密切,烟熏黑垢则以黑褐色细小粒子不均匀堆积为特征,铁锈污染物可出现在岩石表面或内部。

(2)开展了石雕表层污染物对文物影响机理的研究,结果表明:不同类型的污染物对于石雕的风化破坏作用不同,烟熏黑垢一定程度上可以减缓其风化,表面墨汁污染对文物本身有一定的“保护”作用,而粉尘黑垢则会促进对砂岩的破坏。

(3)研制了石质文物激光清洗机,其中实时在线监测和激光光斑位置指示系统的相关技术为项目研发单位特有。该设备的激光能量、输出光束质量等主要指标均达到国际同类产品水平。

(4)开展了多种石质文物清洗技术和方法的

研究,其中喷射清洗对于松散型污染物灰尘、泥土等污染具有良好的去除能力,适合表面未酥粉风化的各类石材;对于硬质结壳类污染物如水泥、钙质结壳等,宜选择微粒子喷射清洗并采用硬度较大的玻璃微珠、石榴石类材料;蒸汽清洗对墨迹、白灰、颜料污染物等的去除效果明显。

6.石质文物防风化保护和施工工艺研究

以保护材料与环境、文物本体的兼容性为材料设计的指导思想,研发了三种适合云冈石窟石质文物保护的专用防风化材料,同时对其施工工艺进行了研究。

(1)以四甲氧基硅烷($C_4H_{12}O_4Si$)和甲基三甲氧基硅烷($CH_3Si(CH_3O)_3$)为基体,以甲基三乙氧基硅烷($C_7H_{18}O_5Si$)和正硅酸乙酯($C_8H_{20}O_4Si$)为补充并添加少量的含氟有机物和纳米二氧化硅(SiO_2)/岩石粉末颗粒,该材料具备色差小、渗透深及综合防风化效果好的特点。

在制备二氧化钛(TiO_2)包覆二氧化硅(SiO_2)复合纳米颗粒的基础上,通过高能机械球磨结合超声分散的方法,制备了无机(二氧化钛包覆二氧化硅的复合微纳米颗粒)—有机(含氟有机物)超疏水性表面封护材料,所制备的超疏水性表面封护材料,渗透深度好、透气性好、耐老化能力强,耐酸性能和耐盐腐蚀性能的提高尤其显著。

以具有良好综合防风化性能的甲基三甲氧基硅烷为有机物,通过与二氧化硅溶胶的机械混合而制备出有机—无机防风化杂化材料,该材料具有粘度低(接近于水的粘度)、凝胶时间短且稳定性好等特点^[8],同时有效地降低了单一有机物加固涂层的开裂几率。

(2)防风化加固施工工艺研究表明,针对不同区域、不同风化程度的石质文物,即轻度、中度、严重风化三种类型,采用加固材料的浓度和施工工艺应有所区别。如风化较为严重的区域采用加固材料从低浓度向高浓度逐步增加的多次梯度加固,采用较为柔和的加固施工工艺,如滴注法;而风化较为轻微的区域应尽量采用无色差的低浓度加固材料,施工时宜采用涂刷法、喷涂法或湿敷法进行。

四、余论

该项目所取得的研究成果,已成功应用于我国多处石窟寺和其他石质文物的保护中。如无损探伤检测技术成功应用于我国“十二五”石质文物保护一号工程——大足石刻千手观音造像保存状况探测及评估中,为千手观音的抢救性修复

保护提供了有力的技术支撑;石窟水分来源综合探查技术应用于云冈石窟防水保护工程设计,云冈石窟、龙门石窟、大足石刻凝结水研究以及吉林集安高句丽壁画墓凝结水研究之中,为这些重要世界文化遗产的防水治水保护提供了科学依据和技术支撑;石窟岩体稳定性评价关键技术应用于云冈石窟五华洞、第三窟等六个洞窟的保护工程中,有效解决了云冈石窟岩体稳定性评价难题和危岩体加固问题,为云冈石窟的长久保护创造了条件;石窟危岩体治理关键技术应用于新疆吐鲁番吐峪沟石窟、柏孜克里克石窟、胜金口石窟,以及甘肃酒泉榆林窟、四川乐山大佛等十多项重要石窟的保护工程中,使得危及石窟保存的危岩体得到有效治理,取得了良好的保护效果;石窟表面污染物清除关键技术应用于陕西咸阳乾陵石刻、顺陵石刻以及江苏镇江英国领事馆旧址、广西崇左花山岩画等文物的保护工程中,清除了对石质文物具有破坏作用的多种污染物,为这些砖石质文物的长久保存创造了条件。

然而,由于我国地域广阔,石窟寺分布范围广,石窟雕刻的岩性、时代不同,再加上石窟寺赋存环境的复杂性,石窟寺保护依然面临着许多难题需要进一步加强研究予以解决。如我国石窟寺

文物风化的主控因素还不是很清晰,环境污染依然对我国珍贵的石质文物构成严重的威胁;水是引起石窟寺风化的最重要的因素之一,目前石窟寺防水、治水的技术、方法以及材料等还需进一步探索和试验;石窟寺历经数百年甚至上千年,已经遭受严重风化部位的保护加固问题依然没有彻底解决;等等。

- [1]王金华、黄继忠:《围绕核心问题 突破创新 规范提升 行业科技水平》,《中国文物报》2012年9月7日第8版。
 [2]同[1]。
 [3]同[1]。
 [4]黄继忠:《石窟水分来源探查的新技术》,《中国文物报》2012年10月19日第5版。
 [5]同[4]。
 [6]同[4]。
 [7]王捷、王逢睿、申喜旺等:《无机矿物聚合物应用于龙山石窟岩体裂隙加固的试验研究》,《新型建筑材料》2017年第5期。
 [8]刘绍军、孙敏、高峰等:《二氧化硅胶体基石质文物防风化有机-无机杂化材料制备及效果评估》,《中南大学学报(自然科学版)》2013年第1期。

Recent Progresses in Sandstone Cave Temples Conservation: A Case Study of Yungang Grottoes

HUANG Ji-zhong¹ WANG Jin-hua² GAO Feng³ WANG Feng-rui⁴ QI Yang⁵ LIU Shao-jun⁶

(1. Shanghai University, Shanghai, 200444; 2. Fudan University, Shanghai, 200433; 3. China Academy of Cultural Heritage, Beijing, 100029; 4. Northwest Research Institute Co., Ltd of C.R.E.C, Xi'an, Shanghai, 730000; 5. Shanxi Provincial Institute of Cultural Relics Protection, Xi'an, Shanxi, 710075; 6. Central South University, Changsha, Hunan, 410012)

Abstract: Cave temples are representative of stone relics enjoying high historical, artistic and scientific values. However, most of them are facing challenges from instable caves and rock mass, widespread flooding, pollution, and surface weathering. The research project of "Key technologies of stone cultural relics protection" initiated by the Ministry of Science and Technology and the State Administration of Cultural Heritage, taking the World Cultural Heritage Yungang Grottoes as an example, aiming at the common problems and key technical problems of sandstone cave temples in our country, studied the damage mechanism of sandstone cave temples, invented key techniques in monitoring and damage assessing, and developed materials and techniques in reinforcing and preserving these cave temples. The project greatly improved the overall work of sandstone caves protection in Yungang Grottoes and even in China. The research results have been widely applied in other cave temples protection projects of similar cases.

Key words: cultural relics protection; stone relics; sandstone caves; Yungang Grottoes; "Key Technologies of Stone Cultural Relics Protection"