

科技与匠心助力秦兵马俑从残破到重生

——秦俑一号坑新出土彩绘兵马俑保护修复

兰德省 李晓溪 周萍

2010年至2024年,为配合考古发掘出土文物的保护修复和研究展示工作,秦始皇帝陵博物院联合相关科研机构,对一号坑新出土的彩绘陶质文物开展了系统性保护修复工作,采取“边发掘、边保护、边开放、边修复、边展示”的“五位一体”新模式,为大型遗址类博物馆文物保护修复从秘不示人走向公众教育提供了可复制的实践样本。

出土现状

秦兵马俑一号坑第三次考古发掘相继出土兵马俑220余件。通过对新出土秦俑保存现状调查发现,坑内淤泥与填土堆积,残片之间交错叠压。残片数量多,陶胎可见裂纹、裂隙等不同程度损害。经先后多次提取,残片混乱,失散的部分残片不能确定归属。彩绘病害较为复杂,表现为彩绘严重脱落、局部漆皮起翘、卷曲,彩绘表面粘连厚重且有大量积泥土附着物,陶俑提取后,大面积彩绘自陶俑本体脱离,粘连在周围或下方覆土上,提取和保护修复难度较大。

保护修复

现场保护

第三次考古发掘,构建“抢救性保护与预防性保护并重”的工作体系,将保护前移至考古发掘现场,通过建立现场快速检测与应急保护机制,在文物揭露之初便对彩绘层的保存状态、病害类型进行精准评估,同步实施保湿、加固等预处理,最大限度避免彩绘因环境突变而损毁。

病害调查

经过对出土兵马俑的病害情况进行统计,参照中华人民共和国文物保护行业标准《陶质彩绘文物病害分类及图示》,根据出土陶质彩绘兵马俑保存现状,识别出常见病害13种。经统计,常见陶胎病害中,残断、泥土附着物较为严重,动物损害、刻划等病害相对较少,结晶盐病害在陶马中较常见。在修复的140多件兵马俑中,彩绘脱落、起翘、空鼓、变色、龟裂等病害普遍存在。

检测分析

通过微损/无损检测技术,了解了兵马俑的制作工艺、病害机理、保存状况、理化性能和物质组成。秦俑彩绘具有“生漆底层+矿物颜料”的独特双层结构,受埋藏环境、出土条件及材料老化等因素影响,发掘时彩绘脱落病害普遍,脱落面积平均约占总面积85%以上。借助显微镜观察、X射线衍射(XRD)、X射线探伤技术、超声波检测仪、超景深显微观察、傅里叶变换红外光谱分析(FT-IR)等仪器系统分析,揭示彩绘层起翘、脱落与生漆层降解及环境温湿度变化密切相关。

确定方案

修复兵马俑时,依据文物保护修复理念与原则,通过对每一件出土兵马俑的陶胎成分、彩绘结构、病害机理及制作痕迹等进行系统观察、全面检测与深入分析,针对不同类型病害,筛选适配的保护材料与工艺技术,设计制定修复方案。

保护实施

在保护修复实施过程中,根据出土陶俑残片的实际情况,结合前期的检测分析,严格依据技术路线开展保护修复工作。具体操作如下:

通过文字、照片、影像、绘图和一些无损检测技术,多维度记录文物的保存现状、病害类型、保存环境,便于病害评估与修复方案的制定以及材料选择、操作实施。形成初步的“问诊”档案。

清除表面污染物,恢复文物结构完整性与原貌,提取工艺信息。清理前先在残片局部小面积做实验块,方便把握清理的程度。对于脆弱的彩绘层需先加固、后清理,在显微镜下精细化清理。

加固则以加固空鼓、起翘、脱落的漆皮和彩绘层为主,针对秦俑彩绘特殊的“生漆底层+矿物颜料”双层结构,加固时先软化漆皮,再加固彩绘。加固剂选择不能影响彩绘原貌,浓度应从低到高,少次多量恢复胎体强度。

拼对以传统人工拼对为主,数字化虚拟修复为辅,将残片以俑/马的外形摆放,对于无明显特征的残片,拼对花费时间也相对较长。

确定粘接残片的顺序后,陶俑从下往上粘,粘接具有一定固化时间,粘接时用捆扎带、支架或夹板固定。

兵马俑修复过程中,部分残片多次提取后仍不能确定归属,在不影响文物整体稳定性前提下不做补全。有展示需求时,通过对补配部位三维扫描获取残片数据,经数据处理,三维建模,用树脂材料3D打印工艺获取残片模型,拼接在缺失部位。修复完成后绘制残破图和病害图,设置保存环境管控建议,建立长期监测体系,定期检查、监测形成保护效果评估报告,及时调整保存环境与



T23G8分段 出土现状局部



陶俑修复前后



陶马修复前后

防护措施。最后建立一俑一档保护修复档案,同时保存纸质版与电子版,作为后续研究、修复、管理的依据。

科技创新

秦俑一号坑第三次考古发掘保护进一步探索了面积较大、形状复杂、存在弧度的彩绘遗迹的回贴保护修复技术。在彩绘遗迹回贴模拟实验的基础上,根据实验结果筛选丝网+粘接剂的背底衬托结构用于彩绘遗迹保护,通过对“彩绘遗迹—附土复合体”预加固、丝网托底力学支撑、揭取彩绘遗迹、确定原位回贴、分割减薄覆土、清洗泥土病害等多个步骤,将新出土的彩绘遗迹揭取并回贴于原位,弥补了仅能将粘附于填土上的彩绘遗迹用作标本的缺憾,最大程度地还原了秦俑彩绘的真实面貌。

利用三维激光扫描仪及高分辨率相机获取的兵马俑碎片三维点云和纹理影像数据,对兵马俑碎片进行数字化修复,解决传统修复过程中人工分类复杂、频繁比对拼接易造成文物碎片二次损伤问题,减少拼接时间、拼接误差,提升修复效率。利用有限元分析软件对整体陶俑进行静力和振动工况下的力学模拟,根据模拟结果对秦俑展示过程中的结构安全稳定性进行评估,通过分析结果制定修复后秦俑的保护措施和建议。

通过调研陶质彩绘文物的病害、保存环境、保护修复信息,查阅梳理近十年来国内外有关陶质文物粘接剂文献资料,收集粘接剂信息,了解粘接剂成分和理化性能,分析其老化机理和老化产物,了解各类粘接剂在不同环境下的理化性能。以“陶胎的抗拉强度大于或等于粘接剂的抗拉强度”为主线,通过粘接实验和修复现场应用,从中筛选出九种比较适合于大、中、小型陶质文物粘接的粘接剂库,并应用于实践,解决了陶质文物修复中粘接剂选择的实际问题,优化了陶质文物粘接工艺,为陶质文物保护修复提供了技术支撑。初步建立了一套陶质文物粘结材料的筛选方法及陶质文物粘接剂库。

彩绘保护是秦兵马俑保护修复的重要组成部分,基于彩绘褪色、变色和修复效果评价,在不损伤文物的前提下,对秦兵马俑彩绘表面颜色进行连续、实时、非接触式的科学监测与数据采集,通过追踪彩绘颜色变化,精准记录。根据监测数据变化情况分析秦兵马俑彩绘修复保护效果的稳定性,同时侦测和验证秦兵马俑彩绘保护修复方法和保存环境的可靠性,为优化修复方案和改善秦兵马俑的保存环境提供科学依据。

在第三次考古发掘过程中,针对脆弱的彩绘、漆器的碎片,糟朽的木质遗

迹等,采用预先加固后提取的方法,将文物转移至实验室进行后续处理或者保存。通过文献调研与实验室研究,筛选出薄荷醇作为临时性加固材料,试验结果表明薄荷醇在考古现场使用时具有良好的效果,成果推广应用于68处不同脆弱文物的提取与保护实践中。

通过显微拉曼和偏光显微分析手段,实证秦俑表面附着的各种颜料,红色为朱砂、铅丹、铁红,绿色为石绿,蓝色为石青、中国蓝,紫色为中国紫,白色主要为骨白、铅白,其中对秦俑中国紫与中国蓝的研究,证明了两千多年前的秦代已掌握世界级的高温合成化工技术。

项目实施过程中注重陶文、指纹、制作工艺痕迹采集。在已经修复的40多件陶俑身上,利用高精度显微技术提取了100多枚指纹。运用痕迹学方法,对秦兵马俑遗留指纹进行分析,结合指纹学对当时陶工的年龄构成、性别比例以及手工业管理模式进行了分析研究。目前研究成果表明,这些指纹以成年男性居多,有少数未成年人指纹存在。

实践启示

经过对新出土彩绘兵马俑十余年保护修复工作的梳理,项目构建了“科技引领、现场优先、数字赋能、精细化修复”的技术体系,形成了完整、科学、规范、可借鉴、高水准的保护修复范例。

针对秦兵马俑彩绘漆皮出土快速失水皱缩、脱落、劣变难题,基于现场的环境监测与控制,前期对彩绘病害的诊断与识别,建立对微环境温湿度可控的现场应急保护措施,做到了“边发掘,边保护,边监测”。通过彩绘预加固,有效抑制了彩绘层起翘、脱落难题,实现从抢救性保护向预防性、精细化保护转变。

项目创新性地筛选出“丝网+粘接剂回贴”工艺,首次提取了遗留在覆土周围的脆弱彩绘遗迹。借助显微镜对彩绘层进行精细剥离,并通过出土照片比对与彩绘碎片拼图,实现了大面积脱落彩绘层的精准原位回贴。

在保护修复过程中,项目还借助三维激光扫描兵马俑碎片,快速获取残片形状、尺寸、纹饰,经过计算、建模,进行碎片拼接虚拟修复,提升修复精度和效率。此外在目前秦兵马俑修复补全中,对于兵马俑残缺的部位,借助三维建模、3D打印技术还原缺失部位原型,提前评估修复方案的可行性和效果,避免修复过程中对文物二次损伤,降低修复风险。关于资料存储与管理,建立数字化档案,将文物基本信息、影像资料、检测数据、修复资料等相关信息通过数字化存储建成电子档案,在永久保存的同时方便文物的后续研究、价值阐释及长期预防性保护和后期溯源追踪。

(作者单位:秦始皇帝陵博物院)

云冈石窟建筑空间的文化意象

文莉莉

云冈石窟开凿于460年至524年,历时64年。石窟东西绵延约1公里,洞窟254个,造像59000余尊。根据武州山山势的起伏及洞窟组合,石窟分为东、中、西三个区域。石窟开凿工程经历三个时期,一期洞窟分布于16—20窟,二期洞窟分布于1—3窟、5—13窟,三期洞窟分布于21—45窟以及一、二期洞窟的余留壁面。这一时期,平城(今山西大同)作为北魏的政治、经济、文化中心,在石窟开凿过程中,来自希腊、中亚、印度以及少数民族的文化不断交汇融合。同时,随着北魏汉化政策的持续深入,云冈石窟很快成为北魏境内各地开凿窟龕的典范,形成“云冈模式”。

云冈一期洞窟建筑特征

昙曜五窟位于云冈石窟群西部编号第16—20窟,五窟相互毗邻,洞窟形制设计相同,造像内容基本一致,由北魏高僧昙曜主持设计开凿。云冈一期洞窟均为大像窟形制,平面为马蹄形,窟顶呈穹窿状,每窟上开明窗,下辟窟门,窟外壁面曾经满雕千佛,各窟高度相当,窟前宽阔平坦。

五所洞窟中的造像主要是三世佛,主佛居中而设,身躯均在13米以上,或坐或立,姿态各异,神情有别。窟内空间狭小紧迫,佛像体量高大挺拔,顶天立地,占据窟内绝大部分空间,窟底余留的空间狭小。这种窟形的主要宗教功能是供佛教徒参禅礼拜,主佛高大威严,窟内四壁满雕千佛,逐渐向上延伸收分,与窟顶交接处转折自然,顶部呈穹窿状。从建筑力学上讲,穹窿顶的设计均匀分散了来自窟顶的压力,对整个洞窟起到很好的支撑作用。其次,由窟顶经壁面到底部,形成了以穹窿顶向外扩展的张力,营造了一个高耸的空间,增强神圣感的同时,改善了窟内空间不足的压抑感。大佛身体雕刻与倾斜的山体壁面连成一体,并与穹顶相接,一定程度上也减轻了穹顶承受的壓力,客观上对山体卸荷力起到支撑作用。另外,早期洞窟中明窗明显大于窟门,而中期洞窟反之,原因之一是洞窟提供更好的通风采光,解决了洞窟狭窄、光线不足的问题,其二,明窗的位置恰好与主尊上半身相对,在窟外宽口的前庭空间也能够观像礼拜,突出帝佛合一的王者风范。

云冈二期洞窟建筑特征

云冈中期洞窟位于石窟群的中、东部区域,开凿于470年至494年,包含7,8窟,9,10窟,5,6窟,1,2窟,3窟,以及11,12,13窟。二期洞窟平面多为方形,有具前后室的佛殿窟,有类似一期的大像窟形制,有的在窟内中部立塔柱,还有的在后壁开凿礼拜道,双窟是中期洞窟建筑布局中的主要特点。中期洞窟的壁面雕刻布局均上下分层、左右分段,多表现汉魏以来传统建筑形式及其装饰,如木构建筑屋檐、斗拱、平基等,佛像也穿上了褒衣博带的汉式服装。

双窟的建筑布局

双窟是中期洞窟结构中的典型特征,通常双窟指同一形制、同样规模、内容相连并紧靠在一起的两个洞窟,最为明显的特征是两个洞窟共用一个前庭,并在前庭紧靠两座窟壁的左右两侧各竖立突出塔柱。在云冈,第1,2窟,第3窟,第5,6窟,第7,8窟,第9,10窟等均属于双窟,其结构严谨、规模宏大,代表了云冈双窟开凿的高超水平。云冈中期的双窟既可独立成窟,又相互联系,从造像主题、雕刻内容、洞窟形制、壁面布局等多方面都体现了它们的双胞胎关系,这与北魏二圣二的政治背景相关,由此,双窟结构成为云冈石窟强烈政治性的另一个典型特征。

二期洞窟形制

云冈二期洞窟形制布局是按照中国佛教活动的内容来设计的,深受传统建筑的影响,石窟平面多呈方形或长方形、顶部雕有平基藻井,有的洞窟中雕有中心塔柱,后壁还有用以巡回参拜的诵经道,也有延续早期大像窟形制,但窟内空间及壁面造像布局明显不同。云冈二期洞窟中明窗和窟门的比例不同于一期,明窗尺寸小于窟门,这是二期洞窟布局和僧人礼拜方式发生了变化,其建筑结构也相应作了调整。按照洞窟形制及特点划分,云冈二期洞窟可分为3类,即大像窟、佛殿窟和塔庙窟。

第1类大像窟。云冈二期继承了一期昙曜五窟的洞窟形

制,第5窟和第13窟为大像窟,但在窟室空间和壁面布局有了明显创新。云冈二期中的第5窟是穹窿状窟顶、马蹄形平面,窟内有高17.4米的佛像直达窟顶,占据窟内主要空间,是典型的大像窟。但第5窟佛像雕刻明显后移,主佛前营造了宽阔的礼拜空间,同时在大佛身后,北壁下部东西两侧凿有隧道式的礼拜道,结合了塔庙窟的功能性特点,形成了右绕礼佛的环形路线,礼拜道的壁面及顶部雕刻有右旋方向的供养人和飞天。大像窟的洞窟形制,从云冈一期过渡到二期,随着汉文化的逐渐渗透,礼佛方式的变化导致洞窟空间结构的总体设计明显不同。另外,二期大像窟中的壁面布局采用上下分层、左右分段的重层布局方式,这和昙曜五窟的千佛图像完全不同,应是模仿北魏当时地面木构佛殿建筑的结果,这种壁面布局形式也是云冈二期洞窟的典型特点。

第2类佛殿窟。佛殿窟是从我国汉式殿堂式木构建筑演变而来,窟内空间明显加大,可容纳更多的信徒开展佛事活动,这是集礼拜和讲经于一体的洞窟形式。云冈二期的佛殿窟有第7,8窟,第9,10窟和第12窟,均有前室和后室,前后室之间的隔墙延长了洞窟南北进深的空间跨度,隔墙的出现又增加了雕刻内容,这种将洞窟分为前后两个礼拜殿堂空间的设计,使洞窟的空间结构变得更加丰富而有层次。其次,佛殿窟平面为方形或长方形,顶部和四壁交接处界限分明,窟顶装饰平基,窟顶与壁面相连之处饰以三角垂帐,仿佛整个洞窟被华盖笼罩。壁面雕刻内容布局强调整体性,上下分层,左右分段,四壁间分层分段运用同种装饰带或分隔带,使不同壁面因装饰带而相互联系,整个洞窟有严谨统一的规划设计。再者,云冈石窟佛殿窟顶部雕刻仿木构庑殿顶,下方雕刻具有外来建筑风格的八棱柱,可知总的建筑架构为汉魏以来的殿堂式建筑风格,而其间的建筑构件、壁面布局形式及装饰风格又具异国情调。

第3类塔庙窟。塔庙窟的宗教功能主要是绕塔、观佛、礼拜,窟内四壁下层均雕刻右旋绕塔的鲜卑族供养人像。云冈二期塔庙窟与中国早期佛教仪轨的发展、礼佛方式的形成有密切关系,礼佛仪式中的“行道”即适合在塔庙窟中进行绕塔礼佛修行。其次,塔庙窟中的中心塔柱对窟顶以及山体卸荷力起到很好的支撑作用,同时塔的四面也可以进行雕刻,极大地丰富了整个洞窟的造像内容。

云冈二期塔庙窟有编号第11窟,6窟,1,2窟,均为单室窟,平面方形,平顶,洞窟的主像仍以后壁为中心。塔柱位于洞窟正中,这种布局不同于印度、敦煌和新疆石窟。云冈方形的中心塔柱为典型的汉式重层仿木结构楼阁高塔造型,每层四面开龕造像,塔柱四周留有礼拜道,体现了北朝盛行以佛塔为中心的佛寺布局形式。这在云冈山顶考古发掘遗迹中再次得到印证。这些中心塔柱通常由塔基、塔身、塔顶三部分组成,底大顶小,塔身有2—5层,自下而上逐渐收分。虽然塔柱占据窟内主要空间,但依然感觉塔柱高耸直立,蔚为壮观。

云冈三期洞窟建筑特征

公元494年,北魏孝文帝迁都洛阳,大批留居和夏季返回平城的亲贵、中下层官吏以及邑人信众充分利用平城旧有的艺术人才在云冈开凿了大量的中小型洞窟,有第4窟、14窟和15窟,20窟以西规模较小的石窟群,5—20窟外崖面以及窟内补刻的小型窟龕。据统计,晚期民间开窟者,多数是没有官职的佛教信徒,表明都城迁洛后,佛教在平城地区的中下阶层流行起来。

云冈三期洞窟数量较多,都属于中小型窟室,洞窟形制为缩小型的大像窟、佛殿窟和塔庙窟。洞窟平面约为方形、平顶,顶部多装饰平基藻井,壁面布局主要有三壁三龕式或四壁重龕式,造像缩小,礼拜空间变大,造像内容中出现杂技等世俗内容。云冈三期洞窟的壁面布局较一、二期更为丰富而有创意,参与开凿的僧侣工匠设计思路也更为开放写实。这个时期释迦多宝二佛并坐像作为主像出现于洞窟正壁,大量弥勒造像的雕刻说明《法华经》《法华三昧观》和弥勒信仰在云冈三期依然是雕刻的流行主题。此外还有塔庙窟和千佛洞等典型洞窟,塔庙窟有第39窟、未完成的第4窟、第5—28窟和第13—13窟,还有第14窟千佛洞。第39窟是完全的中国楼阁式五层塔楼结构,标志着佛教建筑雕刻已完成改梵为夏的进程。

云冈石窟是大自然与建筑本体、文化艺术与佛教造像有机融合的杰作。建造者把石窟和造像统一看作是建筑整体的组成部分,从洞窟的建筑结构、壁面设计,再到造像的形式构图,完整构建出理性、神圣的佛教建筑空间。云冈石窟的建筑结构总体是中国式的,而大架构中的建筑构件如希腊柱头、印度的八棱柱、兽面斗拱,以及其他来自西方的装饰纹样,体现了中西方建筑文化的交流与碰撞、融合与创新。云冈石窟历经六十余年营造,在三个不同开凿时期呈现出风格迥异的建筑形式和艺术特征,为研究世界建筑史、美术史、宗教史等提供了丰富的实物资料。

(作者单位:云冈石窟研究院)



第6窟(二期)



第5窟(二期)



第16窟(一期)



第9窟(二期)



第21—31窟(三期)