

Integrated Moisture Control, Wall Alkalinization Prevention, and Microbial Preservation System for Qianling Imperial Tombs

Yifang Ge

Qianling Museum, Xianyang, Shaanxi, 713300, China

Abstract

The mural paintings in Qianling's accompanying tombs are facing multiple conservation challenges due to underground micro-environmental factors, including pigment layer oxidation, coating flaking caused by moisture, wall alkali-salt damage, and microbial erosion. This study establishes an integrated protection system: Moisture control is achieved through physical barriers, precise temperature-humidity regulation, and low-disruption ventilation; Alkali control focuses on desalination of paper pulp materials combined with wall restoration and alkali-resistant treatment; Microbial prevention combines population monitoring with physical, chemical, and biotechnological approaches. Additionally, an intelligent monitoring platform for tomb chamber environments enables multi-system coordination, establishing performance evaluation and long-term management mechanisms to achieve preventive mural preservation and provide scientific support for sustainable conservation.

Keywords

moisture control, wall alkalinization control, microbial preservation

乾陵陪葬墓室壁画防潮及墙面碱化控制与微生物防腐一体化防护体系构建

葛一方

乾陵博物馆, 中国·陕西 咸阳 713300

摘要

乾陵陪葬墓现存壁画因地下微环境影响, 面临颜料层氧化、潮湿致涂层起甲脱落、墙面碱化盐害及微生物侵蚀等多重病害。本研究构建一体化防护体系: 防潮通过物理屏障、温湿度精准调控与低扰动通风实现; 碱化控制以纸质浆料脱盐为核心, 搭配墙面修复与抗碱处理; 微生物防治结合种群监测, 采用物理、化学及生物技术。同时, 依托墓室环境智能监控平台实现多子系统协同, 并建立绩效评估与长效管理机制, 以实现壁画预防性保护, 为其永续保存提供科学支撑。

关键词

防潮调控、墙面碱化控制、微生物防腐

1 墓室壁画保存环境特征与病害机理分析

乾陵三座陪葬墓均为抢救性发掘, 原始壁画因氧化问题已整体揭取, 现存于陕西省历史博物馆地下壁画库。目前墓道两侧壁画为后期对墙面处理后, 采用 1:1 临摹复制而成, 属于国家三级保护文物。本研究针对现存复制壁画在实际环境中面临的病害问题, 构建一体化防护体系, 旨在为其长期保存提供科学依据。

1.1 墓室微环境特征

1.1.1 抗氧化

针对抗氧化方面, 墓室壁画中的矿物颜料在暴露于微量氧气时易发生化学变化, 如朱红色硫化汞的变暗或绿色颜料的分解。这种氧化过程不仅受墓室内空气流通程度影响, 还与温度波动共同作用, 加速分子结构破坏, 因此需通过监测和调节微环境氧浓度来抑制氧化速率, 延长壁画寿命, 避免壁画艺术价值的损失。

1.1.2 防潮

乾陵陪葬墓均为斜坡式墓道, 随着墓道的深入, 距离地面的垂直高度愈深, 后墓室通常极地表 15 米左右, 地下防潮难度大, 通常由地下水渗透、冷凝作用或季节性降雨引起。高湿度环境促使壁画支撑体吸收水分, 导致涂层膨胀、起甲

【作者简介】葛一方 (1987), 女, 中国陕西咸阳人, 本科, 馆员。

或脱落,同时为生物侵蚀提供条件。乾陵陪葬墓地处黄土高原,土壤水分迁移和内部冷凝是主要潮气来源,需综合评估湿度阈值并采取屏障措施,以防止水分积累对壁画结构的物理性破坏^[1]。

1.1.3 墙面碱化

墙面碱化病害主要源于墓室内部的水盐运移与物理结晶过程。当地下水或环境湿气通过墓室结构毛细作用上升至壁画墙体时,其中溶解的可溶性盐分被携带至壁画地仗层和颜料层。随着环境湿度频繁波动,水分不断蒸发,盐分反复经历溶解-结晶的盐析循环。此过程会产生巨大的结晶应力,足以撑胀壁画内部结构,最终导致颜料层起甲、粉化甚至大面积脱落,对壁画本体造成不可逆的机械性破坏。

1.1.4 微生物侵蚀

微生物侵蚀是上述环境因素发生生物化学耦合的结果,在墙面碱化的条件下提供大量湿度和一些无机养分,使得嗜碱性或耐碱性的微生物得以繁衍生长,在其菌丝体的强力作用下刺破壁画表层,危害性更大在于其代谢产生的有机酸、色素、胞外酶等物质会使壁画被直接酸化,导致画层颜料变色、暗化以及底层基材的老化分解,引起壁画表层及壁画内部发生完整性上的不可逆损害^[2]。

2 防潮调控技术体系构建

2.1 墓室防水与防潮层构建

墓室的结构性防水与防潮层是整个防护体系第一道物理屏障,应打造完整连续的防护体系,阻止外界水分进入的同时又允许室内水汽适度排出。对于乾陵陪葬墓这类地下遗址来说,防护重点应集中于多层次防潮屏障的构建。可在墙体与穹窿顶采用渗透结晶型防水材料或柔性防水卷材进行整体密封,消除原有微裂隙;其核心是在壁画载体表面设置“可呼吸”防潮层,该层以纳米级孔道无机改性材料或水性高分子复合材料为基础,具备良好阻湿性以阻挡液态水与毛细水,同时具有一定透气性,使墙体内残余水分得以缓慢挥发,从而避免地仗层背后积水。

2.2 温湿度精准调控技术

基于物理防潮层开展墓室内部微气候精准化、常态化恒定温湿度条件下的动态调控,是保障壁画长期安全的动态关键。以高灵敏度传感器网络为基础,实现在对墓室各空间内温湿度、墙壁表面温度以及墙壁表面露点温度等关键参数进行全天候的持续监控和采集数据的基础上形成“被动调节为主、主动干预为辅”的以节能最小干预为目标的调控思路:一方面,墓室内部放置大面积吸湿性或放湿性的调湿材料,利用材料自身吸放湿特性以及调湿调湿蓄热功能,用以消减季节变化及少数人员活动引起温湿度变化所带来的不利影响;另一方面,只有当所检测的数据达到预警水平时,才启动低功率、高精度的控温除湿设备对其进行定点温和的调节。

2.3 新型通风系统设计

为了让防潮体系长久有效地发挥防潮作用,并保证环境参数均匀分布,在内隔墙与墓室本体墙体连接的阴阳角转

角处设计低扰动型的新式通风系统;同时通过风量的合理分配,让风动驱湿更加准确有效;因此该通风系统采取了根据计算流体动力学模拟进行优化的低速均匀置换通风方式。其设计重点是在考虑到壁画保护中风的势场需求的基础上,通过墓道天井调整进风口、出风口位置、形态、面积等因素,充分结合墓室内空气的热压、空气密度差等使得整个墓室内的空气可以处于相对平稳且缓慢的状态,这样的自然式通风不仅可以保证墓室内无死角通风且不用担心局部过高风速产生风扬尘的问题,还可以将雾霾、积存湿气等不良气体排出,减少壁画酥碱、颜料层氧化等情况的发生,从而避免壁画受到冷凝水破坏^[4]。

3 墙面碱化与盐害控制技术

3.1 盐分来源与迁移机制

墙面碱化及盐害发生的主要原因就是墙面内可溶性盐类不停地由迁入到迁出的循环以及不断的重复结晶作用出现的盐析现象。墙面上所含有的可溶性盐主要是由墓室周缘的地下水或土壤中所溶有的硫酸根离子、氯离子及硝酸根离子等被毛细水带到墓室内,经过漫壁流到壁画的地仗层或者颜料层,再通过墙体内部的毛细渗析上升到墙体顶部或受微环境温湿度变化影响出现晶析作用形成积盐,在高温情况下产生润湿使墙面析出盐分向墙体表层迁移,在低湿情况下出现失水使从潮湿的墙面析出的盐类脱离于地仗层或颜料层形成晶体盐析出,以一定的物质密度结晶为盐存在状态。这样反复使壁画受到外力干扰和挤压,造成颜料层起甲、粉化、大面积脱落等现象的发生,是造成盐害破坏的主要机制。

3.2 高效脱盐技术

高效率脱盐是为了在保护壁画不受损害的前提下,将壁画墙体内部的可溶盐分脱除掉,目前文保界更喜欢用分级式的,可以控制的物理或者化学的方法,而不会采用单一化或者是过于激进的脱盐方法。这种纸质浆料脱盐法作为有效的脱盐方式之一,将具有强吸附性及离子交换特性的特制材料制成浆料,贴覆于待保护的壁画试块或模拟墙体表面,依靠浓度梯度将墙体内盐分“抽取”至浆料中。在此过程中要不断更换浆料并检测脱盐效果直至核心区域盐分量降至安全值之下,并且在整个脱盐过程中必须保持精准的环境控制,防止处理的过程中因为温度湿度的变化带来文物的二次损伤^[5]。

3.3 墙面修复与抗碱化处理

抗碱化是为了防止盐类重新从深部向表层移动并富集于表层所形成的一种闭合环,利用在壁画地仗层内加入憎水性物质使壁画地仗吸湿性变小;或是在墙面上施加一种含有微孔的透气性的采用硅酸乙酯基、硅丙乳液或纳米石灰等透气性保护层,这种涂层允许水蒸气透过却可以阻止液态水的进入和盐类的跟随迁徙,达到从后端阻隔盐害的作用,实现对墙面碱化久期较长的防止作用。我们在仿真环境中对壁画试块进行脱盐处理后,需对损毁墙面进行修复模拟,并做长效抗碱化处理。修复处理模拟先利用仿真壁画材料在

相同墓室环境下处置,将起甲、空鼓的仿真壁画层予以回帖和加固,恢复其结构稳定性,再进行表面精细处理与清理,尝试采用适宜的加固剂,如丙烯酸树脂类(如 Paraloid B72)、硅酸乙酯、硅丙乳液及纳米石灰等进行渗透加固,以增强表层力学性能及整体粘结力;待结构稳定后,按前述方法涂覆抗碱化保护层,形成长效防护屏障;最后在模拟环境中对处理后的试块进行持续监测与性能评估,验证其抗盐碱循环能力与修复措施的长期有效性,为实际工程应用提供可靠依据。

4 微生物综合防治体系

4.1 微生物种群分析与监测

构建有效的微生物防治体系,首先要准确地把握墓室内的微生物种群以及它们数量变化的趋势,在这个过程中要采用分子生物学方法和传统的培养手段结合起来,来检测壁画表面、壁画空气、墙体内部的特征性微生物菌群,这其中主要有对壁画材料有侵蚀作用的霉菌、放线菌和嗜盐细菌等。在此基础上建立墓室微生物的长期监测机制,在一定的时间间隔内,按照既定的时间表,用对应的培养基或者生物传感器取样一定的数量或者体积墓室内的壁画表面、壁画空气、墙体内部的特征性微生物,进而根据分析结果来确定墓室内当前存在的微生物量级,了解其活性以及种群随环境的变化情况,为今后的防治工作奠定准确的目标点与科学依据,从“盲目消杀”走向“精准防控”^[6]。

4.2 微生物防治技术

鉴于此类主要致害微生物,对于防治技术的选择和使用也应该遵循文物保护“最小干预”和“材料兼容”的原则,应该优先选择物理手段,例如,可通过精准调控墓室环境的温度与湿度,将其持续控制在不利于微生物生长繁殖的范围内,从而从根本上抑制其代谢活性;如果一定需要采取化学措施,则应当选取广谱性、强效性、低毒性以及无污染的药剂类杀菌剂、抑菌剂(例如:苯扎氯铵、异噻唑啉酮衍生物、霉敌等),使用相关技术和方法进行载体投放式的、定点、定量喷洒方式以最大限度减少对壁画本体及工作人员的影响;

4.3 微生物防控策略

该策略的核心在于切断微生物滋生所需的必要条件,即通过前述的防潮与碱化控制体系,从根本上破坏其适宜的生长环境,此乃最根本的“防”。其次,建立基于定期监测的风险预警机制,一旦发现微生物活性超过阈值或出现有害种群,立即启动相应的物理或化学“治”理流程,实现早期、快速的精准清除。最终,通过环境调控与可能的生物屏障等手段,进行持续性的“控”制,将微生物风险长期维持在可控水平,从而形成一个动态、闭环且可持续的综合防控体系。

5 一体化防护体系的集成与实施

5.1 技术集成与协同作用

一体化防护体系的精髓并非将防潮、盐害控制与微生

物防治等技术简单叠加,而是通过系统集成,实现各子系统间的深度协同与效能倍增。该体系以“稳定微环境”为共同目标,使各项技术形成有机的联动闭环:例如,高效的防潮体系通过控制湿度,从根本上抑制了可溶性盐分的迁移结晶活性,同时也消除了微生物滋生所需的关键水分条件;而成功的盐害控制减少了墙体表面的盐分结晶,破坏了部分嗜盐或耐盐微生物的养分来源。

5.2 墓室环境智能监控平台

在实现一体化体系高效运转过程中,主要的中枢是建设墓室环境智能监控平台,全面收集温度、湿度、壁面含水量、含盐量、光照强度、霉菌生物活性等环境参数以及图像、视频等多媒体数据,并经过智能分析做出联动控制。通过智能化平台不断收集和上传各种数据来感知和反馈墓室存留保护环境的状态以及致损性病害因子,系统实施全天候无死角覆盖式精准监测。而产生的实时信息又均可上传至中央处理系统,既能做到将环境状态信息进行可视化和报警提示。

5.3 绩效评估与长效管理

一体化防护体系建成不是终结,而是进入了运用持续绩效评估和动态优化的一系列长效机制阶段,需要建立一套科学完整的评估指标体系,定期进行壁画物理状态、关键环境参数控制精度及各子系统运行状况的量化评估,从评估结果找出体系中薄弱环节或者效能衰退的部分,再对相关部位实施有针对性地维护、更新与策略调整,使一体化防护体系处于不断自我完善的良性发展轨道上。通过不断积累数据,在基于数据的良性循环上升管理机制的驱动下,使一体化防护体系一直处于根据洞窟内环境存在的长期问题不断调整完善自身的阶段,最终达到遗产本体预防性保护和永续保存的目标。

6 结语

综上所述,本文在明确乾陵陪葬墓现存壁画(后期复制文物)的基础上,分析其病害机理,分别构建防潮、碱化控制、微生物防治三大子系统,随后将其集成,依托智能监控平台形成一体化防护体系,并通过绩效评估与长效管理确保适配环境变化,最终实现壁画保护的理论与技术路径探索,为乾陵壁画保存及同类文物保护提供科学范式。

参考文献

- [1] 王永进,纪娟,石美荣,等.西藏桑耶寺壁画地仗材料分析[J].文物保护与考古科学,2025,37(03):132-137.
- [2] 李立,王永进,王荔君,等.北方明清砖体建筑水盐破坏机理及治理初步研究——以山东济南华严宫古建筑壁画保护为例[J].文化遗产保护与研究,2023,(00):77-81.
- [3] 俞聪.陈望道故居壁画保护修复研究[J].文物季刊,2024,(01):163-173.
- [4] 赵晋锐.数字化应用下伽蓝壁画的守正与创新[J].文物鉴定与鉴赏,2025,(20):120-124.
- [5] 丁萌,赵凡,王钰,等.德格县俄支寺祖拉康经堂壁画颜料的光谱学分析[J].光谱学与光谱分析,2025,45(10):2837-2843.