

建筑工程保护中的材料老化机理防护技术

裴亚东，卫经龙

(陕西省文物保护工程有限公司，陕西 西安 710000)

摘要 建筑文物是具有历史文化价值的物质载体，材料老化是决定保护工程效果好坏的关键因素。本文从无机质、有机质文物材料固有的特性以及环境胁迫两个方面分析材料老化的内在机理和加速机理，构建表面防护、结构加固、环境调控的三维防护技术体系，阐明各种技术针对不同的老化机理所起的作用。通过分析防护技术同老化机理的适配逻辑以及多技术协同整合模式，为建筑工程保护工程提供兼具科学性与实践性的技术参照，从而实现对老化进程的精确抑制，并保证文物本体的长久保存。

关键词 建筑文物保护；材料老化机理；防护技术；表面防护；结构加固

中图分类号：TU7；K87

文献标志码：A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.028

0 引言

建筑文物的耐久性直接取决于构成材料的稳定性，材料老化是自然和人为因素共同作用下不可逆的过程，一直是文物保护工程的主要问题。砖石结构风化剥蚀，木结构腐朽糟朽，彩绘层褪色起翘，夯土墙体酥碱崩解，材料老化用多种方式危及文物的结构安全和价值存续。防护技术的研发与应用要以对老化机理的深刻认识为基础，采用针对性干预的方式来延缓老化过程。

1 建筑工程保护中的材料老化机理解析

1.1 无机质文物材料老化的内在机理

无机质文物材料（如石材、砖瓦、夯土、金属等）的老化源于其内部晶体结构的固有特性与外部环境长期作用的结果，其机理主要是物理结构破坏和化学组分变异的共同发展。石材类材料的老化源于其内部孔隙和微裂隙的存在，环境中的水分依靠毛细作用渗透进去，在温度变化引起的冻融循环中，水分结冰膨胀产生的机械应力不断扩大裂隙，同时溶解在水中的盐分结晶与潮解过程造成体积的反复变化，造成材料表面颗粒脱落、结构疏松^[1]。以敦煌莫高窟砂岩壁画载体为例，西北干旱区昼夜温差可达20℃以上，每年冻融循环次数超过30次，加快岩体裂隙的扩展；从化学角度来说，空气中的酸性气体同石材里的碳酸钙等成分发生反应，产生易溶于水的盐类物质，促使材料的溶蚀和风化。工业城市中pH值小于5.6的酸雨会使大理石文物表面形成蜂窝状溶蚀坑，实测结果显示pH4.0的模拟酸雨喷淋30天，碳酸钙流失量可达原始质量的

12%。夯土、砖瓦材料的老化与黏土矿物的亲水性有关，水分的持续作用使黏土颗粒间的结合力变弱，出现酥化、崩解现象，长期的干湿交替会造成材料的收缩与膨胀不均，产生龟裂、剥落。例如：西安城墙明代夯土墙体的检测结果显示，含水率在20%以上时，夯土抗压强度下降58%，孔隙率增大35%；金属类文物材料的老化主要是电化学腐蚀，表面氧化膜损坏产生腐蚀电池，水、电解质参与下发生氧化还原反应，锈蚀产物生成并使基体材料损耗，从而破坏文物结构的完整性。例如：故宫太和殿鎏金铜缸检测表明，在含氯离子的环境中，铜基体点蚀速率是干燥环境的8~10倍，腐蚀坑深度每年增加0.3~0.5mm。

1.2 有机质文物材料的降解机制

有机质文物材料（如木材、漆器、纺织品、纸张等）的老化是以分子链降解和生物侵蚀为主，稳定性受材料自身的化学结构和外界生物环境的双重影响。木材属于天然高分子材料，纤维素、半纤维素和木质素的共同作用维持结构稳定，环境中的水分和氧气会引起纤维素的水解反应和氧化反应，造成分子链断裂、聚合度降低，表现为木材强度下降、糟朽粉化。苏州园林古建筑金丝楠木构件检测发现，相对湿度80%时存放五年纤维素聚合度由1200降至450，抗弯强度损失42%；另外，木质素的氧化降解会使木材颜色稳定性遭到破坏，造成褪色、变脆。漆器、纺织品中的天然树脂、纤维等成分也容易受到环境的影响，紫外线照射会使分子链上的化学键被破坏，造成材料老化变脆。经过500小时的紫外线照射，丝纤维断裂强力下降67%、断

作者简介：裴亚东（1984-），男，本科，助理工程师，研究方向：文物保护。

裂伸长率下降 81%; 微生物(如真菌、细菌)以有机质为营养源, 造成腐朽、霉变等生物病害, 破坏材料物理结构及化学组成^[2]。在南方湿热地区, 纺织品霉菌滋生的临界相对湿度为 75%, 黄曲霉代谢产生的有机酸可以使局部 pH 值降到 3.5, 加快纤维水解。纸张类文物的老化具有多重机理叠加的特征, 纤维素的酸性水解、氧化降解与微生物侵蚀互相促进, 使纸张变黄、发脆、撕裂强度下降, 最终影响文物保存年限。例如: 法国国家图书馆的中世纪羊皮纸研究显示, 当纸张的 pH 值小于 5.0 的时候, 纤维素水解速率呈指数级增长。

1.3 环境胁迫下的老化加速机理

建筑文物材料的老化过程不是孤立发生的, 而是在温湿度波动、紫外线辐射、污染物侵蚀等环境因素的共同作用下加速发展, 形成了复杂的老化胁迫体系。温度和湿度的剧烈变化是材料老化的主要因素, 温度突然变化会使得材料内部产生热应力, 破坏颗粒间的结合力, 而湿度频繁变化会造成材料反复的湿胀干缩, 使裂隙的产生和扩展更加严重。通过热成像技术检测可知, 北京天坛祈年殿琉璃瓦在夏季昼夜温差大的时候, 表面温度梯度可以达到 15~20 ℃, 产生约 1.2 MPa 的热应力; 多孔材料受湿度的变化影响较大, 容易引起盐分迁移结晶, 从而加速老化。敦煌壁画地仗层中可溶盐(如硫酸钠、氯化钠)在湿度变化时的反复结晶, 造成颜料层起甲剥离率年均增加 8.3%。紫外线属于高能辐射, 可以破坏材料分子结构中的化学键, 引发光氧化反应, 加快有机质材料的降解, 同时也会促进无机材料的光致变色和表面风化^[3]。光谱分析显示, 300 nm 至 400 nm 波段的紫外线对纤维素的破坏作用是可见光的 12 倍, 空气中的污染物(如二氧化硫、氮氧化物、颗粒物)沉降在文物表面, 一方面会和材料发生化学反应破坏材料组分, 另一方面会堵塞材料的孔隙而影响透气性, 造成内部湿气积聚, 间接加快老化速度。工业城市的 PM2.5 颗粒会使石材表面的孔隙堵塞率提高 40%, 湿度传导效率减少 65%。另外, 生物因素(如植物根系生长、昆虫蛀蚀)用机械破坏和生物代谢的双重作用来加剧材料的结构损伤, 形成环境、生物、材料三者之间的恶性循环。平遥古城城墙裂缝中生长的构树根系, 三年内可以使裂缝宽度从 2 mm 扩大到 15 mm, 根系分泌物的酸性环境会加快夯土的化学分解。

2 建筑文物工程保护中的材料老化工程防护技术体系构建

2.1 基于老化抑制的表面防护技术

针对材料表面风化、侵蚀等老化现象, 表面防护技术依靠形成功能性的防护层, 隔绝老化因子同文物

本体的接触途径, 实现对老化进程的源头把控。硅烷、硅氧烷类防护材料由于表面张力低、渗透性好, 可以渗透到材料的孔隙中形成疏水薄膜, 有效地阻止水分和盐分的侵入, 又不会影响材料的透气性, 适合于石材、砖瓦等无机质文物的防风化处理, 其作用机理是通过化学结合和物理吸附双重作用, 在材料表面形成稳定的防护屏障, 抑制冻融循环和盐结晶引起的物理老化。对有机质文物使用含氟聚合物、纳米复合涂层等材料进行表面处理, 可以在不破坏文物本体的情况下提高材料的抗紫外线能力、耐水性, 延缓分子链降解和生物侵蚀, 木质文物表面涂改性桐油和纳米二氧化硅复合涂层, 保留传统工艺的兼容性, 用纳米粒子填充提高涂层的致密性, 提高对老化因子的阻隔效果^[4]。另外, 表面清洁技术属于防护预处理环节, 采用干冰清洗、激光清洗等非接触式方法去除文物表面污染物及老化产物, 防止传统清洗方法对材料造成的二次损伤, 为之后防护层的附着做好准备。

2.2 针对结构劣化的加固防护技术

当建筑文物材料因为老化而出现结构疏松、强度降低等问题的时候, 加固防护技术利用补强材料和文物本体的协同作用, 恢复并提高结构稳定性, 防止老化造成的连锁破坏。对砖石结构文物的裂隙和酥化问题, 用低压注浆法将无机或有机无机复合浆料注入孔隙和裂隙中, 浆料固化后与基体材料形成整体受力体系, 填补结构缺陷, 提高材料的整体性及抗压强度, 关键在于根据砖石材料的老化程度选择合适的浆料组分, 保证加固材料与本体的相容性, 防止因弹性模量不同造成二次应力损伤。木结构文物的加固技术重视保持材料的原有特性, 用碳纤维布包裹、竹丝嵌入等方法加固腐朽部分, 利用碳纤维的高强度和竹丝的柔韧性, 提高木材的抗弯、抗剪能力, 同时使用气调法等物理方法抑制木材内部微生物的活性, 从结构加固和生物病害防治两个方面延缓老化过程。夯土墙体的加固结合传统工艺与现代技术, 掺加草木灰、糯米浆的改性土进行表层抹面和内部夯补, 利用传统材料的兼容性和现代改性剂的增强作用, 提高墙体的抗风化和抗水蚀能力, 延缓酥碱和崩解老化。

2.3 环境调控型防护技术

环境调控型防护技术通过改善文物的存放环境, 减少环境胁迫对材料老化速度的影响, 间接控制老化进程, 是建筑文物长效保护的重要支撑。温湿度调控技术依靠智能监测和反馈系统, 使文物所处环境的温湿度保持在合适的范围内, 减小温湿度波动引起的物理老化, 恒温恒湿设备控制室内文物库房的环境参数,

通风系统调节露天文物遗址的微气候,降低水分和温度对材料的侵蚀风险。紫外线阻隔技术就是通过设置过滤材料、遮阳设施等来减少紫外线对有机质材料的辐射损伤。在古建筑彩绘保护中使用低反射、高紫外线阻隔率的玻璃罩来保护彩绘颜料,既保证了展示效果,又有效延缓了彩绘颜料的褪色与粉化。污染物控制技术通过改善文物周边空气质量,减少酸性气体和颗粒物的沉降,在文物保护区周边设置绿化隔离带、安装空气净化设备,降低污染物对材料的化学侵蚀,定期进行环境监测来评估污染风险,为防护措施的调整提供依据。该类技术的主要原理就是通过控制环境因子,消除老化加快的外部诱因,给文物材料提供稳定的保存环境。

3 建筑文物保护中的材料防护技术与老化机理的适配应用逻辑

3.1 基于老化机理的防护技术选型原则

防护技术的有效应用要依靠对老化机理的准确认识,选型过程要建立机理和技术特性之间的对应关系,实现针对性防护^[5]。对于由于水分和盐分引起的无机质材料酥化、裂隙老化,应选择渗透性好、疏水性强的表面防护材料和注浆加固技术,从源头上阻断水分迁移的路径,填补结构缺陷,抑制物理老化的发展;对有机质材料分子链降解、紫外线老化,采用抗紫外涂层与环境紫外线阻隔技术相结合的方式,既保护材料表面,又减少外部辐射胁迫。当文物材料受到多种老化机理的共同作用时,就要采用复合防护技术方案。砖石文物同时存在风化剥蚀和结构疏松的问题,首先要对老化产物表面进行清洗,再用注浆加固的方法恢复结构强度,最后施加疏水防护层隔断环境侵蚀。

3.2 多技术协同的防护体系整合路径

建筑文物材料老化过程具有复杂性、关联性,单一防护技术很难实现全面防护,需要建立多技术协同的整合体系,形成机理覆盖、功能互补的防护网络。在技术整合时,要依照“预处理—核心防护—后期维护”的逻辑流程,预处理阶段借助清洁、脱盐等手段去除老化诱因和产物,为后续防护技术的应用做好铺垫;核心防护阶段按照老化机理组合表面防护、结构加固和环境调控技术,形成立体防护格局;后期维护阶段依靠长期监测和定期养护,及时察觉老化新趋向,调整防护措施^[6]。古建筑整体保护工程中使用表面疏水防护、木结构碳纤维加固、智能环境调控三者协同的体系,表面防护技术阻断外部环境侵蚀,加固技术

解决结构老化问题,环境调控技术削弱老化加速诱因,三者形成有机整体,实现对多重老化机理的全面抑制。

3.3 基于监测反馈的防护技术动态调控机制

建筑文物材料的老化是不断演化的,单靠静态防护很难长期有效地进行,所以需要在技术体系中加入监测反馈,以实现防护和老化状态的同步进行。动态调控核心在于采用多源监测数据,抓住材料湿度、含盐量、裂隙扩展和表面化学组分改变等关键指标进行连续采集和趋势分析,适时确定老化加速点。在监测表明湿度增加引起盐分迁移风险增大的情况下,可以加强疏水层的养护或者对局部通风进行调节;在微裂隙扩展速率增大的情况下,可以进行局部低压注浆加固,以免裂缝向结构性损伤演变;紫外线强度季节性上升时增加遮光覆盖的比重,使得防护措施始终和老化驱动力相匹配。另外,对监测数据进行模型化分析,可对老化发展短期趋势进行预测,并对防护策略进行事前调整,从而实现整体体系由“静态设定”向“自适应调控等”的转变。该基于监测的动态机制,有效地延长了防护材料和加固结构使用周期并减少了反复干预,对文物材料起到更加稳定和持续的保护效能。

4 结语

建筑工程保护的主要任务是利用科学的防护技术手段,减缓材料老化速度,保持文物的历史价值和结构安全。材料老化机理是防护技术研发与应用的逻辑起点,决定了防护措施是否有效,各种防护技术的本质就是通过物理阻隔、结构补强、环境改善等途径,延缓老化机理的作用过程。

参考文献:

- [1] 王静芳.基于古建筑修缮的文物建筑保护与利用 [J].炎黄地理,2025(06):133-135.
- [2] 姜晓丹.以小修防大修,助文物“延年益寿” [N].人民日报,2025-06-19(013).
- [3] 何冬寒,陈金格.石质文物建筑保护修缮:以重庆璧山区朝元寺牌坊为例 [J].收藏,2025(06):7-9.
- [4] 李哲艺.庐山牯岭历史建筑群保护之规划与实施评估研究 [D].北京:北方工业大学,2025.
- [5] 白冰,段萍.优化生物酶杀菌技术应用于文物建筑保护的方法研究 [J].文物鉴定与鉴赏,2025(09):45-48.
- [6] 张雯涵.文物建筑屋顶保护修缮技术研究:以郑州文庙大成殿为例 [J].东方收藏,2025(03):132-134.