

微生物诱导碳酸钙沉积技术加固 历史建筑砖石结构研究

王晨超

(山东港通工程管理咨询有限公司, 山东 烟台 264000)

摘要 历史建筑作为文化遗产的重要载体, 承载着地域历史与人文记忆。然而, 受风化、腐蚀、地震等外界因素影响, 其砖石结构普遍存在风化、开裂、松散等劣化问题。传统加固方法如灌浆、封闭剂及外加材料, 往往存在破坏原貌、二次损伤及材料不兼容等问题, 因此寻求一种既能提高结构强度, 又不干扰文物本体的加固技术尤为重要。而微生物诱导碳酸钙沉积技术(简称 MICP)凭借微生物诱导生成碳酸钙沉积以填充裂隙、提高孔隙率、增强整体结构的能力, 逐渐成为文化遗产保护领域的研究热点, 不仅可控制沉积位置与规模, 还具有良好的可逆性与可调节性, 为砖石结构的可持续加固提供了新思路。因此, 本文对微生物诱导碳酸钙沉积技术在历史建筑砖石结构中的应用进行了研究, 以期为相关人员提供参考。

关键词 微生物诱导碳酸钙沉积; 历史建筑; 砖石结构; 加固

中图分类号: TU74

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.22.005

0 引言

随着全球文化遗产保护意识的不断提升, 历史建筑的保存与修复逐渐成为建筑学、文物保护学以及材料工程等多学科交叉关注的重要议题。砖石结构历史建筑作为历史文明与地方文化的重要物质载体, 以其独特的结构形制、材料风貌和工艺技法在各地广泛分布。然而, 由于年久失修、自然风化、环境侵蚀以及人为干扰等因素影响, 这些建筑往往存在结构松散、砖石剥落、缝隙扩张、承载能力下降等严重的劣化问题。传统的修复方法如有机树脂灌浆、水泥注入、表面封闭等技术虽然在一定程度上可以实现加固, 但普遍存在材料不相容、密闭性过强、透气性受限以及对原构件造成二次损伤等缺陷, 难以满足当代文物保护“最小干预、可逆性、真实性”的原则要求。基于微生物诱导碳酸钙沉积技术的加固方法, 通过引入特定菌株, 利用其代谢产物诱导碳酸钙在砖石裂缝、孔隙等位置沉积, 从而实现结构的原位加固与内部密实化。

1 微生物诱导碳酸钙沉积技术原理

微生物诱导碳酸钙沉积技术(简称 MICP)是一种基于微生物代谢作用实现碳酸钙矿物沉积的生物矿化手段, 广泛应用于岩土加固、古建筑保护、裂缝修复等领域。从技术角度来看, MICP 的核心在于通过选用具有特定代谢机制的微生物(如产脲菌)在特定条件下诱

导局部环境发生物理化学变化, 从而促使碳酸钙沉淀在孔隙、裂隙等目标区域, 实现结构强化与致密化^[1]。

在技术实施过程中, MICP 主要通过向处理介质中引入可控的微生物群体, 并为其提供适宜的营养源(如尿素和钙源)以启动代谢活动。微生物在其生长过程中能够显著调节局部 pH 值并释放离子态中间产物, 这些变化共同营造出一个有利于碳酸钙沉淀生成的微环境。随着沉积过程持续进行, 碳酸钙逐渐覆盖微生物细胞表面, 并在结构孔隙、微裂纹中形成稳定、连续的矿物沉积, 进而提高材料整体密实度与抗压性能。该技术的优势在于沉积过程缓慢可控, 不会引发瞬时应力集中或热效应, 适用于脆弱或敏感材质的砖石结构。此外, 所形成的碳酸钙沉积物具有良好的结构稳定性和与原始材料的物理化学相容性, 既能强化结构, 又不影响其透气性和外观。微生物本身可作为自适应模板, 在复杂环境中自我复制与扩散, 使得沉积过程具有一定的自组织能力与适应性, 提升了施工灵活性和环境适应性。

2 微生物诱导碳酸钙沉积技术在历史建筑砖石结构中的应用价值

2.1 在保障文物真实性与完整性方面的优势

历史建筑作为不可再生的文化遗产, 其砖石结构往往具有高度的历史价值与艺术性。因此, 在实施任

何加固或修复工程时,必须优先考虑材料与结构的“真实性”与“可逆性”。传统加固方法如环氧树脂或聚合物注浆,虽然短期内能够提供一定强度提升,但其化学性质往往与原有砖石不兼容,容易引发物理应力集中、色差破坏或二次劣化。而MICP技术以微生物为核心诱导因子,通过温和、渐进的方式在砖石孔隙与裂缝中沉积碳酸钙,这种沉积物在成分与结构上高度接近原始材料,可最大限度保持建筑原貌^[2]。同时,该技术在不拆除、不大面积接触文物表层的前提下,通过注入或渗透方式完成结构加固,极大地减少了施工过程对文物本体的干扰。此外,MICP过程具有一定可逆性与可控性,微生物活性可在特定条件下终止,沉积层亦可通过物理方式清除,符合当前文物保护“最小干预”与“可逆性修复”的国际原则。

2.2 在提高砖石结构耐久性与抗劣化性能方面的贡献

历史建筑砖石结构通常面临雨水侵蚀、冻融循环、风化剥蚀、盐分迁移等多重劣化因素,尤其在南方湿润气候与北方干寒环境中更为显著。MICP技术在结构加固的同时,能够有效提升砖石材料的耐候性与结构稳定性,其机理在于碳酸钙沉积物能够填补材料内部的微裂缝与孔隙,降低材料的整体渗透性与吸水率,从而抑制水分及盐类离子的侵入,延缓风化进程。此外,碳酸钙沉积物在微观层面具有良好的结晶结构,能够作为骨架将砖石颗粒之间重新“胶结”,显著增强其抗压强度与结构完整性。相较于无机灌浆或表面涂层类技术,MICP沉积物在不同湿度与温度环境下依然具备较强稳定性,不易发生粉化或剥落,从而保证加固效果的长期有效性。特别是在风化砖石较为严重的历 史遗存中,MICP可作为“结构内部自愈”的技术路径,使加固不仅停留于表层处理,更实现从微观结构到整体力学性能的同步提升,这对于提高砖石建筑的使用寿命与延长其保护周期具有重要现实意义。

2.3 在实现绿色可持续建筑保护理念中的价值体现

当前文化遗产保护理念日益强调生态友好与可持续性,而MICP技术恰恰符合这一发展方向。其整个加固过程以可再生微生物为“材料源”,所需营养液主要由简单的有机物和无机盐组成,生产过程低能耗、无高温高压或有毒物质介入,基本不会对施工区域环境造成污染,相较传统化学加固技术具有更低的碳足迹与更高的环境兼容性^[3]。同时,MICP能够在常温常压下运行,施工过程对周边环境影响极小,特别适用

于人口密集、文化敏感区域的历史建筑修复工程。此外,MICP可根据微生物的特性进行“智能调控”,如通过调节营养液成分控制沉积速率,或通过基因工程改造提升其沉积效率与环境适应能力,为实现加固技术的高适应性与定制化创造了可能。该技术还具备良好的经济适应性,在中低成本条件下便可实施,尤其适用于资金有限的中小型遗产项目。

3 微生物诱导碳酸钙沉积技术加固历史建筑砖石结构的方法

3.1 表面喷涂法:适用于表层风化或细小裂缝结构的浅层修复

表面喷涂法作为MICP技术在历史砖石结构里较为基础且安全的应用途径之一,主要借助低压喷涂设备把含有微生物以及诱导营养液的复合液体均匀地喷洒在砖石表面,促使微生物渐渐附着并于表层微裂隙中定殖生长,诱导碳酸钙沉积,以此实现表面致密化以及结构加固,这种方法格外适用于那些表面风化、颗粒脱落或者存在毛细裂缝的古建筑结构,可有效地提升抗风化能力以及抗渗性能。之后运用喷涂设备以交叉角度多次喷涂菌液与营养液混合体系,每次喷涂都要保持湿润时间最少24小时,以便利于微生物活动,一般建议每天喷涂1~2次,持续5~7天,依据沉积效果可适当延长周期,为了提高诱导效率,可以在喷涂液中添加低浓度钙源以及缓冲剂,让碳酸钙沉积过程更加趋于稳定。喷涂法的最大优势在于不会破坏原结构,适用于无法进行深层干预的历史遗存,它的缺点是加固深度有限,碳酸钙大多沉积在表层1~3毫米的范围之内。

3.2 裂缝注入法:针对结构裂缝与接缝缺陷的定向修复技术

裂缝注入法是MICP技术于砖石结构里实现“定点加固”的关键方式,主要运用于历史建筑中出现的较宽裂缝或者砖石接缝开裂的情况,其技术思路是借助低压注浆设备把菌液和营养液交替注入裂缝内,促使微生物在裂缝内部定殖并且诱导碳酸钙沉积,逐渐填充并封闭结构缺陷,达成裂缝闭合以及强度恢复。操作流程首先要对裂缝给予清理,除掉松散颗粒和杂质,以此提升注入液渗透效率,接着运用注射针管顺着裂缝方向设置多个灌注口,分层次开展菌液注入,注入之后,要间隔6~12小时补充营养液,并且维持湿润环境利于微生物持续代谢,整个加固过程周期一般是7~14天,

依据沉积情况可进行阶段性检查，保证沉积均匀、裂缝闭合完整。和传统裂缝封闭方法相比，MICP 注入法更具柔性与适应性，其沉积物可精准分布在裂缝内部，形成致密“生物矿物胶结层”，并且与周围材料有良好物理兼容性，该方法避免使用不透气、易老化的有机材料，在长周期历史环境中更稳定可靠^[4]。

3.3 毛细渗透灌注法：用于砖石材料内部孔隙加固与整体密实化处理

毛细渗透灌注法作为一种内部加固技术，通过砖石材料自身的毛细孔隙系统，促使微生物液体自然渗透进去，在其内部形成碳酸钙沉积，这种方法主要针对砖石结构内部存在微细孔道、粒间孔隙较为松散或者受盐蚀风化影响程度较重的区域，它可以在不损坏建筑表面的情况下提高砖体或砌体的整体性。

在技术执行阶段，首先把微生物培养液注入砖石表面，通过自然渗透或者加压渗透的方式让其进入砖体内部，等微生物附着稳定之后再定期补充营养液，以此促进碳酸钙结晶的形成。这依靠材料孔径、含水率以及微生物活性之间的动态平衡，在施工之前要依靠 X 射线扫描、红外热成像等技术获取砖石孔隙结构信息，可科学设定注入量与频率。为提高沉积效率，可以使用不同黏度的营养液来调节渗透速度，并且通过控制 pH 值、 Ca^{2+} 浓度等参数精准调控结晶速率，整个渗透周期一般是 10 ~ 21 天，可以多轮循环使用来提高沉积厚度，沉积完成后，依靠低压热风干燥或者自然通风的方式去除多余水分，防止结晶物破裂。该方法的优势在于其“无痕式”加固能力，可对砖石结构的整体孔隙网络进行原位强化，有效减少渗水通道、提高抗冻性与耐盐蚀性能，其可结合微生物智能识别材料裂隙的特性，实现靶向沉积，提升加固效果的精细度和针对性。

3.4 生物膜定向诱导法：以“生物膜工程”为基础的可控沉积方法

生物膜定向诱导法是近些年在 MICP 研究中逐渐发展起来的一项先进技术，其凭借引导微生物于砖石表面或者内部形成稳定的生物膜结构，实现碳酸钙沉积的定向控制。生物膜由微生物分泌的胞外聚合物即 EPS 构成，可作为碳酸钙沉淀的模板以及诱导位点，提高沉积的粘附性和空间稳定性。该方法的技术路径主要有三步：首先是微生物筛选与驯化，挑选能在砖石表面形成致密生物膜的菌株；其次是引导定向附着，根

据微调菌液流速、温度湿度等条件，让微生物在特定位置附着并形成膜层；最后是在膜层内进行 MICP 反应，通过提供钙源和营养物质诱导碳酸钙均匀沉积于生物膜支架中^[5]。

和传统 MICP 技术不一样，生物膜当作介质强化了沉积过程的可控程度，而且可提升结晶的力学结合力，在实际应用中，技术人员可借助显微观察、激光共聚焦成像等技术，动态监测膜层结构的形成以及沉积物分布，实现精细化加固。这种方法适合用于需要对砖石表面图案、浮雕或者铭文等精细构件进行保护的场景。相较于直接喷涂或者注入，它对表面微观特征的干扰是最小的，可在极小尺度上兼顾加固与保护，生物膜还有“自修复”潜能，在遭受破坏后可再生并继续诱导沉积，拥有一定智能响应能力^[6]。

4 结语

微生物诱导碳酸钙沉积技术作为一种融合生物工程与材料科学的新兴加固技术，正在逐步改变传统历史建筑砖石结构修复的技术范式。其以低干扰、高相容性和可持续性为核心优势，在文化遗产保护这一高度敏感且多维度的应用领域中展现出独特价值。无论是通过表面喷涂、裂缝注入，还是通过毛细渗透与生物膜定向诱导，MICP 均体现出对结构微环境的精准适应与生态融合能力，为历史建筑的“非破坏性”加固提供了切实可行的技术路径。在当前文物保护理念日益向绿色化、可逆性、智能化转型的背景下，MICP 不仅是一种材料修复技术，更代表着文化遗产工程从“修旧如新”向“延寿固本”过渡的技术转向。

参考文献：

- [1] 刘忠,肖水明,刘飞飞,等.微生物诱导碳酸钙沉积固化建筑渣土抗风蚀扬尘影响因素的试验研究 [J].工业建筑,2022,52(11):71-78.
- [2] 王露.微生物诱导碳酸钙沉积对水泥基材料的表层改性机制 [D]. 武汉: 武汉大学, 2021.
- [3] 孙道胜,许婉钰,刘开伟,等.MICP 在建筑领域中的应用进展 [J]. 材料导报, 2021,35(11):11084-11091.
- [4] 葛鑫.不同灌浆方式对 MICP 固化沙漠风积沙的影响研究 [D]. 南京: 东南大学, 2021.
- [5] 张海丽,徐品品,刘教华,等.胶结方式对微生物诱导碳酸钙沉积的影响 [J]. 生物学杂志, 2020,37(05):85-89.
- [6] 赵程程.微生物诱导碳酸钙沉积修复混凝土裂缝的试验研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2015.