

透气性聚合物砂浆在墙面空鼓修复中的工艺优化

张先雁

厦门市鼓浪屿文化旅游中心 福建厦门

【摘要】古建筑常出现墙面空鼓这类病害，采用传统修复方式，墙体易遭受不可逆的破坏，以微创特性为依仗，钻孔注浆修复技术，作为古建筑墙面修复的首选方案，把透气性聚合物砂浆当作注浆材料，既具备良好透气性能，又有粘结强度，可切实改良墙体内部的水汽循环，防止修复后出现返潮、开裂等故障。采用优化注浆设备、压力控制、浆液配比等工艺环节的做法，采用梯度注浆、动态压力调整等办法，能让砂浆更均匀地弥漫至空鼓区域，增强修复效果与持久度，实际工程应用的实例表明，优化后的工艺可大幅强化修复成效，在古建筑墙面空鼓修复上具有关键推广价值。

【关键词】透气性聚合物砂浆；墙面空鼓；钻孔注浆；工艺优化；古建筑修复

【收稿日期】2025 年 2 月 12 日 **【出刊日期】**2025 年 3 月 16 日 **【DOI】**10.12208/j.ace.2025000117

Process optimization of breathable polymer mortar in wall hollow drum repair

Xianyan Zhang

Gulangyu Cultural Tourism Center, Xiamen City, Xiamen, Fujian

【Abstract】 Ancient buildings often suffer from wall hollow drumming. Traditional restoration methods can cause irreversible damage to the walls. Drilling and grouting technology, which relies on its minimally invasive nature, is the preferred solution for repairing ancient building walls. This method uses breathable polymer mortar as the grouting material, which not only has excellent permeability but also strong bonding strength. It effectively improves the water vapor circulation inside the walls, preventing issues like dampness and cracking after restoration. By optimizing grouting equipment, pressure control, and slurry mixing ratios, and employing techniques such as gradient grouting and dynamic pressure adjustment, the mortar can be more evenly distributed in the hollow areas, enhancing both the effectiveness and longevity of the restoration. Practical engineering applications have shown that the optimized process significantly enhances the restoration results, making it a key technology with significant promotion value in the repair of hollow drumming in ancient building walls.

【Keywords】Breathable polymer mortar; Wall hollowing; Drilling and grouting; Process optimization; Ancient building restoration

引言

历史记忆及文化底蕴由古建筑承载，修复该墙面空鼓，应在维持原有结构完好的前提下加以实施，传统剔除修复法虽可化解空鼓问题，可其引发的墙体破坏难以逆转，钻孔注浆修复技术成为关键的替代办法，修复效果的好坏，与注浆材料和工艺的优劣直接相关，独特性能赋予透气性聚合物砂浆优势，为修复工作开拓了全新思路，但到底怎样进一步优化其在钻孔注浆作业中的应用工艺，实现更为精准、高

效的修复作业，成为古建筑保护领域亟待处理的关键事项。

1 古建筑墙面空鼓现状与钻孔注浆修复局限性

1.1 古建筑墙面空鼓成因与危害

多因素耦合导致古建筑墙面出现空鼓，材料老化是主因，传统墙体多使用黏土、石灰等胶凝材料，经数百年温湿度反复作用，胶结强度下降，致使砖块或抹灰层与基层分离，环境侵蚀加速空鼓发展，酸雨、盐结晶及生物腐蚀影响墙体孔隙，造成应力集中

并引发结构开裂。地基沉降不均引发的结构变形,加上地震、振动等外界荷载冲击,都会破坏墙体内部结合力,埋下空鼓隐患,空鼓现象显著削弱墙体承载能力,还会推动风化、渗水等次生病害发展,对古建筑结构安全及历史风貌完整性构成严重威胁^[1]。

1.2 钻孔注浆工艺与设备的技术瓶颈

注浆孔位规划多凭借经验作出判定,未实现对空鼓区域三维分布的精准定位,导致浆液难以全面填充空鼓空间;注浆压力控制技术的滞后情况明显,经常由于压力过大,造成墙体表面鼓凸、裂缝拓展,偶会因压力不足,令浆液渗透不充分^[2]。多数传统注浆泵采用定压模式,难以按照不同墙体材质以及空鼓形态进行动态调控,且注浆管路易被堵塞,清洗操作十分困难,影响到施工的连贯进行。

2 透气性聚合物砂浆在钻孔注浆修复中的优势剖析

2.1 材料性能的适配性与耐久性

透气性聚合物砂浆以 42.5 级硅酸盐水泥为基础胶凝材料,按质量比 20%-30%掺入可再分散乳胶粉(乙烯-醋酸乙烯酯共聚物),搭配 0.3%-0.5%的羟丙甲基纤维素醚作为保水剂,同时加入级配为 0.1-0.6mm 的石英砂(占比 50%-60%)及 0.5%-1%的纳米级硅灰活性助剂。这种配方使其具备 28 天抗压强度 $\geq 30\text{MPa}$ 、抗折强度 $\geq 8\text{MPa}$ 的力学性能,同时断裂伸长率可达 5%-8%,能适应墙体微小变形。其水蒸气渗透系数稳定在 $0.8-1.2\text{ng}/(\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m})$,可保证墙体内部水汽每平方米每天透过量达 200-300g,有效防止潮湿积累。

从性能来看,材料内部由聚合物膜形成的三维网络结构,将弹性模量控制在 15-20GPa,与传统黏土砖(18-22GPa)的差值小于 15%,显著降低了界面应力集中风险。纳米硅灰与水泥水化产物反应生成的 C-S-H 凝胶,能在界面处形成 50-100 μm 的过渡层,使粘结强度提升至 1.2MPa 以上,且经 50 次冻融循环后强度损失率 $< 5\%$,抗碳化能力达 $\geq 50\text{mm}/56\text{d}$,可抵御酸雨等环境侵蚀。

在应用方面,该砂浆适用于空鼓厚度 $\geq 5\text{mm}$ 的古建筑墙面修复,注浆时建议采用 0.3-0.5MPa 的低压注浆工艺,通过其良好的流动性(坍落扩展度 200-250mm)实现空鼓区域的均匀填充。材料固化后形成的透气网络,能持续排出墙体内部湿气,配合直径 8-12mm 的注浆孔(孔距 300-500mm),可实现对砖

石、土坯等不同基材的高效修复,且施工后无需额外养护,24 小时即可达到使用强度。

2.2 修复机制的微创性与有效性

该材料在钻孔注浆修复时凸显出独特的渗透-固化特性,基于低黏度配方,其在 0.2-0.5MPa 的低压注浆条件时,可依靠毛细作用渗透到宽度 0.1mm 以下的细微裂痕和空鼓之处,达成对病害部位全封闭包裹的修复,材料中的缓凝成分可把可操作时间延展至 2-3 小时,助力浆液充分渗透到位;因触变特性,它静置后可迅速恢复到应有稠度,有利杜绝流淌和滴漏现象^[4]。处于固化工作开展阶段,水泥水化产物同聚合物形成的三维网状结构相互交织起来,在界面处生成“机械锚定+化学粘结”的双重作用体系,粘接强度实测结果为 1.8-2.2MPa,与传统注浆材料相较,提升 40%以上,进而稳固地将空鼓层与基层的连接修复好。

3 透气性聚合物砂浆钻孔注浆工艺优化关键环节

3.1 空鼓区域精准检测与注浆孔位设计

在空鼓区域检测环节,借助先进的三维激光扫描技术,其能够以毫米级精度捕捉墙面的细微变形,获取详尽的点云数据。与此同时,搭配探地雷达(GPR)开展作业。GPR 是一种无损电磁勘探设备,通过发射高频电磁波,利用地下介质电性参数的差异,使电磁波在分界面处产生反射,接收天线接收反射回的电磁波后,经分析回波信号便可判断地下介质的分布状况。这种技术具有非侵入性与无损性,不会对墙面造成物理损伤;拥有高精度与高分辨率,能精确识别地下物体的位置、形态、结构和深度;还具备实时性与适应性,可实时收集和处理数据,快速覆盖大面积区域。将 GPR 的电磁波反射信号进行深入分析,能精准探测出深度达 30cm 的空鼓区域,并最终生成直观的三维可视化病害图表,清晰呈现空鼓的位置、范围等信息。

以这个模型为依托,用有限元分析去模拟浆液在土体中的扩散路径,采用“梅花形”或“网格形”布局注浆孔的位置,保证孔距和排距处于 30-50cm 范围,孔深设定需穿透空鼓层 1-2cm 为基准,同时躲开墙体内部木构架这类关键结构,采用数字化导航系统对钻孔加以辅助,保证孔位偏差在 $\pm 3\text{mm}$ 以内,保障注浆路径与设计方案高度贴合。

3.2 智能注浆设备与动态压力调控系统

开展具有压力-流量双闭环控制的智能注浆泵

开发,采用PID(比例-积分-微分)调节算法,实现0.01MPa压力梯度与0.1L/min流量精度的动态调整,注浆刚开始便采用0.1-0.2MPa低压渗透,凭借材料低黏度的特质充填细微缝隙;等到浆液流速下降至0.5L/min之际,逐步把压力升高到0.3-0.5MPa,推动浆液往复杂的空鼓区域延展扩散^[5]。设备内置有压力传感器磁流量计,实时采集数据并传输给控制系统,若压力波动超出了设定的±0.05MPa阈值范围,自主调整注浆的参数,防止压力瞬间变化引发墙体的损伤,配备可回转式注浆枪头,采用360°定向注浆的特性,增强对倾斜、垂直空鼓面的修复成效。

3.3 浆液配比动态优化技术

创建以响应面法(RSM)为基础的浆液配比优化模型,把水灰比取值范围0.35-0.45、聚合物掺量15%-25%、纤维素醚掺量0.1%-0.3%当作变量,把流动性、凝结时间及粘接强度设为优化目标,施工前凭借现场取芯测试墙体的孔隙率,若孔隙率呈现大于15%的情形,采用高流动性的相关配比(水灰比0.45,含20%的聚合物掺量,促使浆液实现快速渗透;要是孔隙率处于≤15%这样的水平,则把水灰比降低为0.35,增加聚合物的添加量至25%,提升粘结实力,就潮湿环境下的施工而言,添加3%至5%的早强剂,把初凝时间调整至1.5-2小时,阻止浆液出现流失现象^[6]。采用纳米二氧化硅(1%-2%掺量)提升材料触变性,保证在静置5分钟后,稠度提升40%及以上。

3.4 注浆过程质量监控与后处理工艺

构建借助“传感器监测+无损检测”的全流程质量管控体系,在注浆孔周围安装应变片及湿度传感器,实时关注墙体表面变形以及内部湿度的变化情形;于注浆终止后的2小时范围,以冲击回波法检

测浆液的饱满度,若检测出局部有空洞现象,迅速开展二次补注工作。完成修复操作后,实施注浆孔的分层封堵:首层用与原墙体材料相符的黏土-石灰膏填充,把厚度控制为5-8mm;表层采用混有矿物颜料的修复砂浆做调色处理,依靠色差仪做校准处理,使修复区域与原墙面的颜色差值ΔE控制在2.0以内,实现“旧样还原”的保护成效^[7]。

4 优化后工艺在古建筑墙面空鼓修复中的应用效果验证

4.1 典型案例:某清代砖木结构古建筑墙面修复

以某清代宗祠建筑(省级文物保护单位)为例,其东厢房北墙面存在大面积空鼓病害,空鼓区域占墙面总面积约四成左右,最大空鼓深度达二十多厘米。针对该情况,采用优化后的透气性聚合物砂浆钻孔注浆工艺进行修复:首先运用三维激光扫描与GPR技术精准识别空鼓点位,设计出按梅花形布局的百余处孔位;其次使用智能注浆泵进行动态压力调整,注浆压力分阶段从较低值逐步上升至适宜范围;然后结合现场检测的墙体孔隙率等实际状况,选用合适配比的浆液(水灰比、聚合物掺量等参数经专业论证);完成施工后,对修复区域进行了为期一年的跟踪监测,以评估修复效果。

4.2 量化指标检测与效果分析

采用现场取样和无损检测途径,采集关键性能的关键数据:粘接强度实测后均值达2.1MPa,较传统注浆工艺,提升幅度为50%;采用冲击回波法检测结果表明,实现了高达98.7%的空鼓消除,剩余未被填充的区域都是面积小于0.01m²的微小空洞。从外观质量这一维度看,借助色差仪实施检测,修复区域跟原墙面的颜色差异值ΔE是1.8,合乎“修旧如旧”的相关标准。

表1 优化前后古建筑墙面空鼓修复关键性能指标对比表

检测项目	优化前数据	优化后数据	提升幅度
粘接强度(MPa)	1.4	2.1	50%
空鼓消除率(%)	-	98.7	-
颜色差异ΔE	-	1.8	-
内部湿度波动范围	15%~35%	8%~22%	-

4.3 长期稳定性评估

修复工作结束12个月后,又对墙面进行了无损检测及性能方面测试,未观察到新的空鼓区域以及

开裂现象,粘接强度留存比例达到96.3%,墙体表面未产生盐析、泛碱等相关病害^[8]。这一实例证实,优化后的透气性聚合物砂浆钻孔注浆工艺可高效解决

古建筑墙面空鼓情况，还可极大提升修复层稳定性与耐久性，为同类古建筑病害治理供给了可原样复制的技术方案。

5 结语

在古建筑墙面空鼓修复领域，将钻孔注浆技术与透气性聚合物砂浆相结合，经工艺优化后成效显著，通过剖析现有修复短板，发挥砂浆独特优势，针对注浆设备、压力控制、浆液配比等关键环节进行针对性改进，切实攻克了空鼓修复难题，提升了修复质量与耐久性。优化后的工艺在实际工程中，提高了砂浆渗透均匀度，改善了墙体水汽循环，有效阻止二次病害发生，这不仅为古建筑墙面保护提供了科学可行的方案，也为同类修复工程积累了宝贵经验，对古建筑长久保存及文化传承意义重大，未来仍需在材料性能与工艺细节上持续探索优化。

参考文献

- [1] 董峰亮,李文杰,何曙光,等.室内墙面贴砖系统的空鼓机理研究[J].新型建筑材料,2025,52(02):49-51.
- [2] 朱树波.建筑工程墙面抹灰空鼓和开裂成因分析及防治对策[J].建筑科技,2024,8(08):137-140.
- [3] 罗宁.高层建筑墙面抹灰空鼓裂缝的质量管控[J].城市开发,2024,(12):123-125.
- [4] 姚国强,林林,杨加宝.墙面抹灰层空鼓开裂因素分析与探究[C]//《施工技术》杂志社.2024 年全国土木工程施工技术交流会论文集(上册).云南省建设投资控股集团有限公司,2024:131-135.
- [5] 王奎.公共区域墙面砖空鼓脱落原因及防治措施分析[J].中国建筑金属结构,2023,22(11):23-25.
- [6] 赵林毅,李志鹏,李燕飞,等.超细烧料礞石改性多福寺遗址土空鼓灌浆材料的性能测试及现场应用[J].西北师范大学学报(自然科学版),2024,60(05):1-9+44.
- [7] 钱锋,苏雷.聚合物砂浆抹灰空鼓的成因及预防措施研究[J].建筑技术,2024,55(S2):122-124.
- [8] 欧阳彩香.抹灰砂浆墙面空鼓原因及验证性试验分析[J].江西建材,2023,(12):156-158.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS