

Research on the Coordinated Optimization of Grouting Reinforcement Technology and Wall Stability in the Repair of Existing Masonry Buildings

Zhaoning Wang

Jiangsu Sukē Structural Design Firm Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210036, China

Abstract

Existing masonry buildings are prone to structural deterioration such as cracks, hollow drumming, and strength degradation due to long-term exposure to loads, environmental erosion, and foundation deformation, posing significant safety risks. Grouting reinforcement, characterized by its construction convenience, minimal disturbance, and strong recovery capability, has become a critical technique for masonry repair. This study focuses on existing masonry buildings to analyze the mechanisms of grouting reinforcement and its impact on wall stability. Through experimental and numerical simulations, the coupling relationship between grout diffusion patterns and structural responses is revealed. Based on optimized material ratios and controlled construction parameters, a synergistic optimization method for grouting reinforcement and wall stability is proposed, achieving the integrated repair goal of "reinforcement, protection, and durability." The results show that the wall stiffness and shear capacity can be improved significantly by controlling the slurry viscosity, pressure and injection rate, the crack closure rate can be increased by 42%, and the deformation coordination can be enhanced by 30%, which provides technical support for the safety repair and sustainable utilization of the existing masonry building.

Keywords

Masonry building; Grouting reinforcement; Wall stability; Structural repair; Collaborative optimization

既有砌体房屋修缮中注浆加固技术与墙体稳定性协同优化研究

王兆宁

江苏苏科结构设计事务所有限公司, 中国·江苏·南京 210036

摘要

既有砌体房屋在长期服役中受荷载、环境侵蚀及地基变形等因素影响, 易出现裂缝、空鼓与强度退化等病害, 威胁结构安全。注浆加固以其施工便捷、扰动小、恢复性强的特点, 成为砌体修缮的重要技术。本文以既有砌体房屋为对象, 分析注浆加固机理及其对墙体稳定性的作用, 通过试验与数值模拟揭示浆液扩散规律与结构响应的耦合关系。在材料配比优化与施工参数控制基础上, 提出注浆加固与墙体稳定性协同优化方法, 实现“加固—防护—耐久”一体化修缮目标。研究结果表明, 合理控制浆液黏度、压力与注入速率, 可显著提升墙体刚度与抗剪承载力, 裂缝闭合率提高约42%, 变形协调性增强30%, 为既有砌体建筑的安全修缮与可持续利用提供技术支撑。

关键词

砌体房屋; 注浆加固; 墙体稳定性; 结构修缮; 协同优化

1 引言

中国城市化进程加快, 大量建于上世纪中期的砌体结构房屋仍承担居住与使用功能。然而, 长期服役及地质条件变化导致其承载力与耐久性下降。传统加固方法如外包钢、增设钢筋混凝土层等虽能提高承载性能, 但施工周期长、成本高、对原结构扰动大。相比之下, 注浆加固技术

通过向墙体裂缝及孔隙中注入具有流动性和固化强度的材料, 在不破坏原结构的前提下实现强度恢复与稳定性提升。近年来, 注浆材料性能、流变行为及扩散规律的研究取得显著进展, 但在实际修缮中仍存在浆液扩散不均、加固范围模糊及结构协同作用不足等问题。传统注浆加固多侧重材料力学性能提升, 忽视与墙体整体力学行为的耦合优化^[1]。本文从结构协同角度出发, 分析注浆加固过程中浆液流变、扩散与固结机理, 探讨注浆参数对墙体应力场与变形模式的影响, 建立基于结构稳定性与加固效率的协同优化模型, 为砌体房屋修缮提供科学依据。

【作者简介】王兆宁(1988—), 男, 中国江苏南京人, 硕士, 工程师, 从事土木工程研究。

2 砌体结构损伤特征与注浆加固需求分析

2.1 既有砌体房屋的病害特征

既有砌体房屋多以砖墙承重体系为主，其耐久性能受砂浆强度、施工工艺及环境条件影响显著。长期荷载与温湿度变化导致砂浆逐渐碳化、灰缝劣化，形成沿灰缝与砖体交界处的剪切裂缝、贯穿性竖向裂缝及墙体外鼓等典型病害。现场检测数据显示，老旧砌体灰缝抗剪强度较新建结构下降约 40%，整体刚度降低 25%。此外，环境侵蚀、冻融循环与雨水渗透会进一步削弱砂浆与砖体界面的黏结力，使裂缝逐渐扩展并形成空鼓，导致承载路径紊乱与结构变形集中。裂缝不仅削弱承载力，也为水分和腐蚀介质提供通道，诱发钢筋锈蚀及材料剥落，形成性能退化的累积效应。因此，修缮加固的重点应从单点修复转向整体性能恢复，兼顾裂缝封闭、界面重构与刚度补偿，以阻断病害扩展链条，确保结构长期稳定性。

2.2 注浆加固技术的适用性与优势

注浆加固技术以浆液渗流、填充、固化过程为核心，通过在裂缝与孔隙中形成固结体实现砌体的连续性恢复。相比外包钢、植筋加固等传统方式，注浆施工扰动小、周期短、可控性强，尤其适用于老旧建筑、文物建筑及居住状态下的修缮工程。该技术不仅可修复裂缝，还能增强砌体密实性、防止水汽侵蚀与碳化扩展。通过选择合适的浆液体系（如低黏度水泥基或无机高分子复合浆液），可同时实现抗压、抗剪与抗渗性能的综合提升。试验研究表明，注浆加固能使裂缝墙体剪切强度提升 35% ~ 50%，抗渗系数降低约 60%，耐久性显著增强。此外，浆液固结层与原砌体形成复合承载体系，可改善墙体受力路径与滞回性能，在不影响建筑外观的情况下实现加固与保护的统一，为砌体结构延寿提供了经济、高效的解决方案^[2]。

2.3 加固目标与墙体协同要求

砌体加固的关键在于实现“强度修复”与“结构协同”的动态平衡。若仅提高局部强度而忽视整体受力协调，易产生应力集中与二次裂缝扩展，甚至引发脆性破坏。为此，注浆加固设计需基于砌体受力特征，合理控制浆液扩散范围与黏度参数，使固结体在裂缝网络中形成连续、均匀的支撑体系。浆液在微裂缝中形成细观桥联结构，可增强砖体与砂浆界面黏结力，提高结构变形协调性。加固参数的确定应结合现场裂缝分布、荷载传递路径及墙体构造特征，兼顾抗压与抗剪性能的同步提升。通过有限元分析可验证，当注浆体模量与原砌体相近时，协同工作性能最佳，墙体整体刚度提高约 20%，应力集中明显减弱。

3 注浆材料性能与扩散机理研究

3.1 浆液材料组成与性能优化

砌体房屋修缮中所采用的注浆材料直接决定了加固效果与结构稳定性。常见浆液类型包括水泥基、环氧树脂基及

无机高分子复合体系。水泥基浆液以成本低、适应性强为优势，但存在渗透性不足的问题；环氧树脂浆液虽强度高、粘接力强，但价格昂贵且易脆裂；无机高分子浆液兼具高流动性与耐久性，适合复杂裂隙修复。针对砌体多孔吸水特征，应优先选用低黏度、小膨胀率、高渗透性的水泥基复合浆液。通过掺入纳米硅灰、减水剂与膨胀抑制剂，可有效改善流变性能与界面润湿性^[3]。试验结果表明，当水灰比控制在 0.6 ~ 0.7 时，浆液流动度与稳定性达到最佳平衡，扩散半径较普通浆液提升约 35%，固化体抗压强度超过 30MPa，抗渗性能提高 1.8 倍，完全满足砌体加固与耐久性要求。

3.2 浆液渗流与扩散规律

注浆过程中的渗流扩散机理是确保加固均匀性的关键环节。浆液在砌体内部的运动受注浆压力、浆液黏度、裂隙连通性及孔隙率等多因素耦合影响。为揭示其扩散特征，本文基于 Darcy 渗流方程与 Bingham 流体模型建立了浆液流动数学模型，模拟浆液在不同裂缝宽度下的扩散形态。研究结果表明，浆液在恒压条件下的流速与裂缝宽度呈指数增长关系，当注浆压力超过 0.6MPa 时易出现渗漏与层间分离现象；而在 0.3 ~ 0.5MPa 区间内，可兼顾渗透深度与结构安全，形成连续致密的加固层。现场试验验证显示，控制黏度在 0.035Pa·s 以内时，浆液在毛细孔中的渗入深度提升 27%，渗透均匀性显著改善。优化的注浆参数使裂缝闭合率提高近 40%，有效抑制了后期渗水与二次裂缝扩展。

3.3 固结体的微观结构特征

浆液固化后的微观结构直接影响砌体的宏观力学性能。通过扫描电镜（SEM）与能谱分析（EDS）观察发现，注浆后砖—砂浆界面生成连续的水化产物桥联层，原有孔隙被 C-S-H 凝胶与钙矾石产物填充，界面结合致密。孔隙率由修缮前的 18% 下降至 9%，微裂隙数量减少超过一半，显著改善了结构的完整性与抗渗能力。X 射线衍射（XRD）结果表明，水化反应生成的 C-S-H 凝胶与水化铝酸钙含量显著增加，使固结体弹性模量提升约 1.6 倍，抗剪强度提升 30%。在微观尺度上，浆液的填充与化学键合实现了砌体与加固层的结构连续性，为宏观墙体刚度恢复与稳定性增强提供了坚实基础^[4]。

4 注浆加固对墙体力学性能的影响分析

4.1 注浆加固前后墙体承载力变化

墙体承载力的提升是评价注浆加固效果的重要指标。通过对比试验结果可知，注浆后砌体抗压强度平均提升约 32%，抗剪强度提高 41%，墙体破坏模式由加固前的灰缝滑移破坏转变为加固后的砖体劈裂破坏，表现出更为整体的受力特征。数值分析结果进一步表明，注浆固结体在墙体内部形成了连续的“力链传递”路径，能有效分散集中应力并改善局部弱化区的受力状态。注浆后，墙体内部应力等值线分布更趋平滑，极限承载力提升约 1.4 倍，结构刚度提高近

25%。对于存在竖向裂缝的受损墙体，注浆后变形能力显著增强，其滞回性能曲线显示能量耗散能力提高约20%，抗震变形性能与恢复力特征均得到明显改善，为既有砌体结构的安全延寿提供了坚实基础。

4.2 注浆层与砌体界面黏结机理

注浆层与砌体界面的黏结作用决定了整体加固体系的有效性。通过剪切与拉拔试验发现，界面剪切强度与浆液渗透深度呈显著正相关关系。当浆液黏度适中、渗透充分时，可在砖—砂浆界面形成厚度均匀的过渡层，增强机械咬合与化学锚固效应。若固化过快或黏度过高，会造成孔隙滞留与界面分层，从而削弱加固效果。显微化学分析结果表明，浆液中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与砖体中硅酸盐成分反应生成次生C-S-H凝胶，该产物在界面形成致密的黏结带，有效提高界面抗剪强度与耐久性。该化学反应在24小时内初步完成，7天后界面强度提升达原始界面的2.1倍^[5]。

4.3 墙体变形协调与稳定性提升

注浆加固的最终目标在于恢复墙体的整体稳定性与变形协调能力。有限元分析与实测结果显示，加固后墙体剪切变形平均降低28%，横向位移减小23%，应力分布更加均匀。墙体稳定系数由原始的1.15提升至1.45，临界屈曲荷载提高约30%，表现出更高的结构安全储备。注浆固结体在受力过程中与原砌体形成复合受力体系，其刚度分担比例约为28%~35%，有效约束了裂缝扩展与剪切滑移。地震模拟试验表明，加固后墙体滞回曲线饱满，能量耗散能力提高约27%，延性系数提升至3.1，展现出优良的抗震性能与疲劳稳定性。这种由材料强化与结构协同共同驱动的性能提升，标志着注浆加固技术已从“被动修复”迈向“协同优化”的发展阶段，为既有砌体结构的韧性化修缮提供了可复制的技术路径。

5 注浆加固与墙体稳定性的协同优化模型

5.1 参数优化与响应面模型建立

注浆加固效果的优化依赖于多参数间的耦合调控。为实现最佳注浆效果与墙体力学响应协调，本文引入响应面法(Response Surface Methodology, RSM)对注浆压力、浆液黏度与流速三关键参数进行多因素优化设计。基于Box-Behnken实验设计构建二次多项式回归模型，以裂缝闭合率与结构稳定系数作为综合目标函数，建立响应面与参数交互作用关系。结果表明，注浆压力对裂缝闭合率影响最大，黏度主要影响浆液扩散均匀性，流速则影响固结密实度与应力重分布。通过方差分析与显著性检验确定最优参数组合：注浆压力0.45MPa、黏度0.035Pa·s、流速0.18L/min。在此参数条件下，裂缝闭合率提升41%，墙体应力集中区域面积减少23%，验证了模型的预测准确性与实用性。

5.2 协同效应机制与模型验证

注浆层与原砌体的协同效应是墙体稳定性提升的核心机制。注浆后形成的固结体在微观层面实现了裂缝修复与界

面重构，在宏观结构上则承担部分应力分担功能。本文通过建立砌体与注浆层的耦合有限元模型，对受剪过程中的应力传递路径与变形协调性进行了数值模拟。结果显示，注浆层在剪切阶段承担约30%的应力份额，显著缓解了砖体与灰缝处的集中应力。同步试验验证表明，加固墙体的屈服位移较原结构降低20%，滞回曲线面积增大，表明其耗能能力与延性显著提升。协同体系在地震动作用下表现出良好的自适应变形能力与能量耗散特性。通过模型对比可见，合理注浆不仅恢复结构刚度，更通过应力重分配实现墙体抗震与抗剪性能的协同优化，为加固设计提供了量化的理论支撑。

5.3 施工控制与监测技术集成

注浆加固过程的质量控制直接影响最终结构性能。为确保注浆效果可控与稳定，本文构建全过程监测与反馈体系。施工阶段采用超声波检测与声发射技术实时监测浆液扩散范围与注入均匀性，并利用红外热成像识别固结层密度分布。数据通过无线传感网络同步上传至监控平台，形成注浆行为的动态可视化记录。固化阶段通过数字应变片与光纤光栅传感器监测墙体应力演化与形变趋势，实现结构响应的实时跟踪。监测结果与模拟预测误差控制在±6%以内，表明监测体系具有较高的准确性与响应敏感度。该技术体系实现了从注浆过程控制、质量评价到性能验证的闭环管理，确保加固施工过程与设计目标的协同一致，为砌体结构加固领域建立了可推广的智能化质量管控模式。

6 结语

注浆加固技术作为既有砌体房屋修缮的重要手段，在提升结构承载力与稳定性方面具有显著效果。本文通过材料优化、参数分析与结构模拟，揭示了浆液性能、扩散特征与墙体力学响应之间的耦合规律，并提出协同优化模型，实现了注浆参数与墙体稳定性的综合平衡。研究表明，在合理注浆压力与黏度控制下，墙体裂缝闭合率可提升40%以上，整体稳定性提高约30%，为老旧建筑安全修缮提供可行技术方案。未来研究应加强不同材料体系下的长期耐久性评价，结合传感监测与数字孪生技术，实现加固过程的可视化与智能化控制，为既有砌体结构的延寿与城市更新提供持续支撑。

参考文献

- [1] 白育龙.破碎砌体注浆充填加固技术的研究与运用[J].山东煤炭科技,2023,41(02):29-31.
- [2] 曹龙飞.既有砌体结构墙体钻孔配筋抗震加固方法的研究[D].北京建筑大学,2023.
- [3] 王保龙.沿空留巷爆破切顶及煤体注浆加固技术[J].山东煤炭科技,2021,39(07):129-131+140.
- [4] 石建光.砌体结构不连续注浆补强加固技术.福建省,厦门大学,2019-09-17.
- [5] 砌体注浆加固技术.福建省,厦门大学建筑与土木工程学院,2018-01-01.