

玄武岩纤维布加固老旧小区结构的关键技术与应用实践

武文科, 马守恒

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2025年6月23日; 录用日期: 2025年7月13日; 发布日期: 2025年7月25日

摘要

为提升老旧小区结构安全性与耐久性, 本文系统研究了玄武岩纤维布(BFRP)加固技术的适用性及关键施工工艺。针对老旧小区普遍存在的墙体开裂、混凝土构件劣化等问题, 详细分析了BFRP在力学性能匹配、狭窄空间施工适应性及长期耐久性方面的显著优势。重点阐述了BFRP加固的关键技术环节, 包括严格的基层处理、浸渍胶配制与粘贴工艺控制、多层纤维布方向设计以及特殊节点(梁端、板角)的加固构造措施。提出了基于构件的系统加固方案(如混凝土梁抗弯-抗剪协同加固、楼板双向加固)。研究表明, BFRP加固技术具有自重增量小、施工便捷快速、耐久性优良等特点, 显著提升了结构承载力和抗震韧性, 为老旧小区安全、高效、可持续加固提供了可靠的技术路径。

关键词

老旧小区, 加固, 玄武岩纤维, 施工工艺, 耐久性

Key Technologies and Application Practices of Reinforcing the Structures of Old Residential Areas with Basalt Fiber Cloth

Wenke Wu, Shouheng Ma

College of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: Jun. 23rd, 2025; accepted: Jul. 13th, 2025; published: Jul. 25th, 2025

Abstract

To enhance the structural safety and durability of old residential areas, this paper systematically

文章引用: 武文科, 马守恒. 玄武岩纤维布加固老旧小区结构的关键技术与应用实践[J]. 土木工程, 2025, 14(7): 1760-1769. DOI: 10.12677/hjce.2025.147190

studies the applicability and key construction techniques of basalt fiber reinforced polymer (BFRP) reinforcement technology. Focusing on common problems such as wall cracking and concrete component deterioration in old residential areas, it elaborates on the significant advantages of BFRP in terms of mechanical property matching, adaptability to narrow space construction, and long-term durability. It highlights the key technical aspects of BFRP reinforcement, including strict base treatment, impregnation adhesive preparation and application process control, multi-layer fiber orientation design, and reinforcement construction measures for special nodes (such as beam ends and slab corners). It proposes a component-based systematic reinforcement scheme (such as combined flexural-shear reinforcement of concrete beams and bidirectional reinforcement of floor slabs). The research shows that BFRP reinforcement technology has the characteristics of small self-weight increment, convenient and rapid construction, and excellent durability, significantly enhancing the structural load-bearing capacity and seismic resilience, providing a reliable technical path for the safe, efficient, and sustainable reinforcement of old residential areas.

Keywords

Old Residential Areas, Reinforcement, Basalt Fiber, Construction Technology, Durability

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

在我们国家的经济和社会的发展下, 人们对住房的质量提出了更高的要求, 对住房的安全也提出了更高的要求[1]。这些小区大多建于上世纪, 由于当时的设计标准、施工的技术以及建筑材料的限制, 加之长期使用过程中的自然老化、维护不善等因素, 很多建筑结构或多或少有些损坏, 如墙体开裂、梁柱变形等问题(如图 1 所示), 给居民的生命财产安全带来了严重威胁。



Figure 1. Cracks in the wall and columns

图 1. 墙体、柱开裂图

玄武岩纤维是一种无机非金属材料，在建筑领域逐渐崭露头角。它是以天然玄武岩矿石为原料，在1450~1500℃熔融后，通过特殊的拉伸方法制作而成的纤维[2] (如图 2 所示)。



Figure 2. Basalt fiber diagram
图 2. 玄武岩纤维图

玄武岩纤维有很多的优点，如强度高、弹性模量高、耐高温、耐腐蚀、耐疲劳等。将玄武岩纤维应用于老旧小区加固，可以很好地提高混凝土构件的强度，无论是从保障居民居住安全、提升建筑使用寿命，还是从推动建筑材料创新、推动建筑业的可持续发展，都有着十分重大的实际意义。

2. 老旧小区常见问题

2.1. 结构老化

老旧小区建筑历经多年风雨侵蚀与使用磨损，结构老化问题显著。墙体作为建筑竖向承重与围护结构，常出现开裂现象，裂缝形态多样，有竖向、横向及斜向裂缝。竖向裂缝多因墙体不均匀沉降，致使砌体受拉应力超出其抗拉强度而开裂，如在软土地基上的老旧建筑，墙体底部常出现此类裂缝；横向裂缝则可能源于温度变化，墙体热胀冷缩过程中，若约束过大，便会在墙体薄弱部位产生裂缝；斜向裂缝较为复杂，通常是地震力、风力等水平荷载与墙体自身承载能力不足共同作用的结果，严重影响墙体稳定性与整体性。并且由于墙体表面容易脱落分层，一些钢结构房屋长期在阳光下和潮湿的环境下，导致局部金属出现了严重的锈蚀，对住户的日常生活产生了很大的影响[3]。

Table 1. A brief table of typical structural aging problems and their causes in old residential areas
表 1. 老旧小区典型结构老化问题及成因简表

结构部位	典型老化问题	主要成因
墙体	开裂(竖、横、斜)	不均匀沉降、温度应力、水平荷载(风/地震)作用、材料老化
	表面剥落、鼓包	冻融循环、潮湿侵蚀、抹灰层空鼓
地基基础	不均匀沉降	地基承载力不足、地下水位变化、周边施工扰动
	房屋倾斜	严重不均匀沉降
混凝土构件 (柱、梁、板)	表面疏松、剥落	碳化、冻融、风化、干湿交替
	钢筋锈蚀、锈胀开裂	混凝土保护层不足/开裂、氯离子侵蚀(沿海)
	挠度变形过大	钢筋锈蚀导致有效截面减小、长期超载、材料徐变

地基沉降是老旧小区另一突出问题。一方面，由于当初建筑设计时对地基承载能力预估不足，在长

期建筑物自重及使用荷载作用下, 地基土被压缩变形, 导致建筑物整体下沉, 不均匀沉降还会引发房屋倾斜, 室内地面出现高差, 门窗变形难以开启闭合; 另一方面, 地下水位变化、周边新建工程施工扰动等外界因素, 也会破坏地基原有的应力平衡, 加速地基沉降, 给居住安全带来极大隐患。

混凝土构件在老旧小区建筑中同样劣化严重。柱、梁、板等构件因长期暴露于自然环境, 受雨水冲刷、干湿交替、碳化作用等影响, 其外表面疏松、剥落, 裸露出来的钢筋生锈并且膨胀, 导致混凝土开裂更加严重, 使构件截面减小, 承载能力大幅下降。在一些沿海地区, 受海风中氯离子侵蚀, 混凝土构件耐久性问题更为突出, 钢筋锈蚀引发的锈胀裂缝短期内便可遍布构件表面, 危及结构安全, 急需有效的加固修复措施予以应对。

老旧小区主要结构老化问题及其成因可归纳如表 1 所示。

2.2. 抗震性能不足

老旧小区建筑在抗震性能方面存在诸多短板, 严重危及居民生命财产安全。以我国部分地震频发地区的老旧小区为例, 在地震灾害发生时, 结构破坏现象触目惊心。许多砖混结构建筑由于缺乏合理的抗震构造措施, 比如, 没有设置足够的圈梁、构造柱等, 地震发生, 墙体很容易被破坏, 出现大面积开裂、倒塌, 导致居民被困伤亡。从力学原理剖析, 圈梁能有效约束墙体平面外变形, 构造柱可以有效地增强墙体竖向与水平向连接, 二者缺失使墙体无法形成协同抗震体系, 在地震水平剪力冲击下不堪一击。

框架结构老旧建筑同样问题显著, 梁柱节点处箍筋配置不足、锚固长度不够, 致使节点核心区抗剪能力薄弱, 地震时节点率先破坏, 梁柱失去有效连接, 结构迅速垮塌。而且, 由于早期建筑规范对抗震设防要求较低, 老旧小区建筑多未考虑地震作用下的结构弹塑性变形需求, 一旦遭遇较强地震, 破坏往往是毁灭性的, 凸显出对老旧小区进行抗震加固, 提升结构抗震韧性的紧迫性与必要性。

2.3. 功能适应性欠缺

老旧小区不仅存在结构安全隐患, 功能适应性问题也颇为突出, 严重影响居民生活品质。空间布局方面, 早期建成的居民区普遍存在户型面积小、功能空间类型单一、室内采光通风不佳等问题, 室内由起居室、厨房、卫生间等多个功能空间构成, 缺乏门厅、储藏室、餐厅等功能空间, 在一定程度上影响了居民的日常生活[4]。配套设施老化同样棘手, 供排水管道锈蚀堵塞, 每逢雨季, 小区内涝积水严重; 电路系统老化, 电线私拉乱接现象频发, 用电安全堪忧; 供暖管网热效率低下, 冬季室内温度不达标; 此外, 停车位匮乏, 车辆乱停乱放, 消防通道经常被居民占用, 若发生火灾, 消防车辆难以通行, 危及居民生命财产安全。因此, 对老旧小区进行加固改造时, 不能仅着眼于结构强化, 还需统筹兼顾功能提升, 以满足居民当下及未来生活需求, 实现老旧小区的全方位复兴[5]。

2.4. 老旧小区结构典型病害机理与加固需求研究

我国城镇既有老旧居住建筑中, 砖混结构体系占比达 70%~85%, 其次为早期钢筋混凝土框架结构(10%~25%)及底框砖混组合结构(<5%)。基于现场检测数据统计, 其结构性缺陷呈现以下规律性特征:

设计基准偏离: 楼面活荷载设计值普遍采用 1.5 kN/m^2 (现行 GB50009-2012 规范要求 $\geq 2.0 \text{ kN/m}^2$), 抗震设防烈度多数未达到现行 GB 50011-2010 规定的 7 度设防标准, 圈梁 - 构造柱抗震构造措施缺失率超过 40% (JGJ116-2009 检测数据); 材料性能退化: 混凝土碳化深度均值达 22.5 mm (超出 20 mm 保护层厚度), 主筋锈蚀率检测值普遍 $> 10\%$; 砌体砂浆实测强度 $\leq \text{M2.5}$, 砖体风化等级达 III 级 (GB/T21149-2017); 使用环境劣化: 建筑平均服役年限超 32 年, 87% 的调研样本存在违规加建现象, 荷载超限导致结构损伤加速发展 (据《建筑结构学报》2023 年统计)。

老旧小区典型结构体系病害特征对比如表 2 所示。

Table 2. Comparison of disease characteristics of typical structural systems in old residential
表 2. 老旧小区典型结构体系病害特征对比

结构类型	占比范围	典型损伤模式	致损机理分析
砖混结构	80%~85%	承重墙体 45°斜裂缝、灰缝酥化脱落、地基沉降裂缝	胶结材料劣化、抗震构造措施缺失
钢筋混凝土框架	10%~15%	梁端弯剪斜裂缝、柱身纵向裂缝、楼板渗漏裂缝	钢筋锈蚀胀裂、节点配箍不足
底框砖混组合	<5%	转换层框架梁开裂、上部墙体错位裂缝	竖向刚度突变、抗侧力体系冗余度不足

3. 玄武岩纤维在老旧小区加固的适用性

玄武岩纤维加固技术之所以能在老旧小区改造中崭露头角，源于其与老旧小区建筑结构特性、施工条件及耐久性要求的高度契合，为解决老旧小区诸多问题提供了理想方案。

3.1. 力学性能

从力学性能匹配角度来看，老旧小区住宅建筑大多是砌体结构或者钢筋混凝土结构，历经岁月，结构构件承载能力衰退。砌体结构墙体受材料老化、温度应力影响，抗拉、抗剪强度降低，常现裂缝；混凝土构件因风化侵蚀、钢筋锈蚀，抗压、抗弯性能减弱。玄武岩纤维及其复合材料恰能对症下药，其抗拉强度可以达到 3000~4800 MPa，远超普通钢材，将其制成纤维布或筋材用于加固，能有效提升结构的抗拉、抗弯能力。如用玄武岩纤维布粘贴在砌体墙裂缝处或混凝土梁受拉区，可有效约束裂缝发展，承担拉力，防止构件过早破坏。且玄武岩纤维弹性模量 9100~11000 kg/mm²，与混凝土、砌体材料协同受力较好，受力时变形协调，避免因刚度差异引发附加应力，确保加固效果稳定可靠。

玄武岩纤维与常见加固材料的关键性能对比如表 3 所示，其综合优势显著。

Table 3. Comparison of key properties between basalt fiber and common reinforcing materials
表 3. 玄武岩纤维与常见加固材料关键性能对比

性能指标	玄武岩纤维	碳纤维	钢材	玻璃纤维	对加固的意义
密度(g/cm ³)	2.6~3.05	1.7~1.8	7.8	2.5~2.7	轻质，搬运施工方便
抗拉强度(MPa)	3000~4800	3000~6000	300~600	1500~3500	高强，有效提升构件抗拉/抗弯能力
弹性模量(GPa)	91~110	200~400	200	70~85	与混凝土协调性好，减少附加应力
耐腐蚀性	优异	优异	差	良好	适应老旧小区恶劣环境，寿命长
耐高温性(℃)	>650	200~400	差	300~400	火灾下性能保持较好
施工便捷性	高	高	中低	高	适应狭窄空间，干扰小
成本	中	高	低	低 - 中	性价比较高

3.2. 施工条件

施工条件适应方面，老旧小区改造面临场地狭窄、居民正常生活需保障、施工噪音与粉尘受限等难题。玄武岩纤维加固技术尽显优势，其施工工艺简便灵活，以玄武岩纤维布加固为例，只需将墙面、梁、柱表面清理平整，用浸渍胶粘贴纤维布即可，无需大型机械设备，操作空间小，可在楼道、室内等狭窄区域作业，减少对居民出行与生活干扰。施工速度快，相较传统增大截面法，极大缩短工期，降低居民不便。且材料轻质，玄武岩纤维密度 2.6~3.05 g/cm³，运输、搬运便捷，易于在无大型起重设备的老旧小

区搬运上楼, 为改造施工提供便利。

3.3. 耐久性

耐久性提升层面, 老旧小区建筑长期经受风吹雨打、温湿度变化及环境污染侵蚀, 加固材料耐久性至关重要。玄武岩纤维稳定性非常好, 耐酸、碱、盐腐蚀性强, 在老旧小区常见的潮湿、酸雨环境及因混凝土碳化形成的碱性环境中, 能长期保持性能稳定。

4. 玄武岩纤维布加固老旧小区的关键技术

玄武岩纤维布施工技术涵盖施工前准备、基层处理、纤维布粘贴及后续养护等多个关键环节。

4.1. 施工前准备

依据设计要求, 选购符合国家标准、性能指标合格的玄武岩纤维布及配套浸渍胶。纤维布应具备高强度、耐碱等特性, 浸渍胶要有良好的粘结性、耐腐蚀性。材料进场后, 按批次抽样送专业检测机构检验, 重点检测纤维布的抗拉强度、弹性模量, 浸渍胶的拉伸剪切强度、正拉粘结强度等指标, 要保证材料的质量必须达标, 不合格的产品不可使用。

4.2. 基层处理

彻底清除加固构件表面的油污、灰尘、疏松混凝土等杂质。对于油污, 可使用专用清洗剂擦拭; 灰尘用吹风机吹净; 疏松混凝土用錾子剔除, 直至露出坚实基层。对有裂缝的部位, 先采用压力灌浆或化学灌浆法修补裂缝, 封闭裂缝通道, 防止钢筋锈蚀, 确保结构整体性。

用角磨机对混凝土表面进行打磨, 去除表面浮浆, 形成粗糙面, 以增强纤维布与混凝土的粘结力。打磨时, 应控制打磨深度, 避免损伤结构内部钢筋, 打磨后用吹风机再次清理表面灰尘。转角处需要进行特殊处理, 打磨成圆弧状, 圆弧半径不应小于 20 mm [6]。

4.3. 纤维布粘贴

根据产品说明书, 严格按照规定比例称量浸渍胶主剂和固化剂, 置于清洁容器中, 用电动搅拌器充分搅拌均匀, 注意搅拌速度不宜过快, 防止产生过多气泡, 搅拌时间一般控制在 3~5 分钟。配制好的浸渍胶需要在适用期内用完, 通常适用期为 30~60 分钟, 随环境温度升高适用期缩短, 避免使用过期浸渍胶影响粘结质量[7]。

根据加固构件尺寸、形状及设计要求, 准确裁剪玄武岩纤维布。裁剪时, 应预留足够的搭接长度, 一般搭接宽度不小于 100 mm, 对于受力较大部位或重要节点, 搭接宽度可适当增加至 150~200 mm。纤维布裁剪宜在平整台面进行, 避免纤维布弯折、受损, 确保裁剪尺寸精准。

在处理好的混凝土表面均匀涂抹浸渍胶, 涂抹厚度以能充分浸润纤维布为宜, 一般厚度约为 1~2 mm。用毛刷或滚筒将浸渍胶涂抹平整, 避免出现胶堆或漏涂现象。立即将裁剪好的纤维布沿受力方向或设计指定方向铺贴于混凝土表面, 边铺贴边用滚筒从纤维布一端向另一端轻轻滚动, 挤出空气, 使纤维布与浸渍胶紧密贴合, 确保无气泡、褶皱。

若需多层纤维布粘贴, 应在前一层浸渍胶固化后(固化时间依环境温度、湿度由产品说明书确定), 重复上述粘贴步骤, 注意每层纤维布铺贴方向应按设计要求合理安排, 如梁、柱加固时, 多层纤维布常采用环向与纵向交替铺贴方式, 以充分发挥纤维布加固效能。

4.4. 后续养护

粘贴纤维布后, 应保证加固部位处于适宜的环境温度、湿度条件下养护。一般温度控制在 15~30℃,

相对湿度 40%~80%为宜, 避免高温、高湿或低温环境, 防止浸渍胶固化不良或过快。在养护期间, 若遇恶劣天气, 如暴雨、大风等, 应对加固部位采取临时防护措施, 如覆盖塑料薄膜、搭建防风棚等[8]。

根据浸渍胶产品说明书, 严格保证足够的固化时间, 让浸渍胶充分发挥粘结性能, 达到设计强度要求。一般常温下, 固化时间不少于 7 天, 温度较低时, 固化时间相应延长。固化期间, 严禁对加固部位进行扰动、加载, 如在梁、柱加固后, 避免在其附近进行重型施工设备搬运、敲打等作业, 确保纤维布与混凝土结构协同工作不受影响。

5. 老旧小区结构加固中 BFRP 加固混凝土力学机理

5.1. 协同工作机制

BFRP 加固混凝土的本质是通过高抗拉强度的纤维复合材料弥补混凝土抗拉强度低的固有缺陷, 形成“混凝土 - 粘结层 - BFRP”复合受力体系。其协同工作机制表现为:

5.1.1. 应力传递与荷载重分布

受弯构件(梁、板)中 BFRP 布粘贴于受拉区(梁底、板底), 承担混凝土开裂后释放的拉应力。荷载作用下, 混凝土受压区产生压应力, 钢筋与 BFRP 共同承担拉应力, 显著提升抗弯承载力。

受剪构件(梁、柱)中 U 型 BFRP 箍通过环向约束混凝土, 提高斜截面抗剪能力。纤维布斜向纤维可定向抵抗主拉应力, 抑制斜裂缝扩展。

受压构件(柱)中封闭包裹的 BFRP 布提供侧向约束力, 使核心混凝土处于三向受压状态, 显著提升抗压强度与延性[9]。

5.1.2. 变形协调性

BFRP 弹性模量(90~110 GPa)与混凝土(25~35 GPa)接近(表 3), 远优于碳纤维(200~400 GPa)。二者的弹性模量比($E_f/E_c \approx 3$)保证了在受力过程中: 应变发展同步($\varepsilon_c \approx \varepsilon_f$), 避免因刚度差异导致界面滑移; 减少应力集中, 抑制端部剥离。

加固体系可简化为多层材料叠加模型($\sigma_{total} = \sigma_c + \sigma_s + \sigma_f$): 其中, 混凝土(σ_c)承担压力, 钢筋(σ_s)与 BFRP (σ_f)协同承担拉力, 粘结层确保应力连续传递。

5.2. 界面粘结性能的核心作用

界面粘结层是荷载从混凝土传递至 BFRP 的唯一路径, 其性能直接决定加固效果与破坏模式。

BFRP 和混凝土之间粘结应力由剪应力主导, 界面剪应力(τ)沿粘结长度呈非线性分布, 最大值位于加载端: $\tau_{max} = \beta \sqrt{E_f t_f f_t}$ 。其中 β 为粘结系数, $E_f t_f$ 为 BFRP 模量与厚度, f_t 为混凝土抗拉强度。

有效粘结长度(L_e): 当实际粘结长度 $L_b > L_e$ 时, 承载力不再提升($L_e \approx 100\sim 150$ mm)。

影响粘结性能的关键因素如表 4 所示。

Table 4. Key factors affecting bonding performance
表 4. 影响粘结性能的关键因素表

因素	影响机制	控制措施
混凝土强度	强度越高, 界面抗剪强度 τ_{max} 越大	碳化层打磨至坚实基层
表面处理	粗糙度增加机械咬合力(τ_{mech})	角磨机打磨露骨料 + 转角圆弧形
浸渍胶性能	胶体韧性高可延缓剥离; 耐老化性保障长期粘结	胶体拉伸剪切强度 $\geq 15\text{MPa}$ (GB 50728)
BFRP 刚度与厚度	厚度 t_f 过大易导致应力集中	多层粘贴时单层厚度 ≤ 0.3 mm
端部锚固	端部剪应力集中引发剥离	梁端 U 型箍加密

6. 玄武岩纤维增强复合材料加固的系统解决方案

6.1. 设计理论基础与技术原则

6.1.1. 规范体系与计算理论

加固设计遵循标准体系：承载力计算：《混凝土结构加固设计规范》(GB50367-2013)纤维复合材料加固条款；砌体加固：《砌体结构加固设计规范》(GB50702-2011)BFRP 加固工法；材料性能：《工程结构加固材料安全性鉴定标准》(GB50728-2011) BFRP 材料指标[10]。

6.1.2. 核心设计理念

最小干预原则：采用表面粘贴加固技术，使原结构构件截面改变量 $<5\%$ (区别于增大截面法 $20\%\sim 30\%$ 的截面改变)；

协同受力准则：利用 BFRP ($E = 90\sim 110$ GPa)与混凝土($E = 25\sim 30$ GPa)的模量匹配性，通过界面粘结应力分析，控制剪应力峰值 ≤ 0.4 MPa (GB50367-2013 限值)。

6.2. 基于构件的 BFRP 加固工法

6.2.1. 混凝土梁的抗弯-抗剪协同加固

梁底粘贴 BFRP 布(抗弯)与 U 型 BFRP 箍(抗剪)的组合体系，如图 3 所示；U 型箍一般区段间距 200 mm，梁端 $1.5h$ (h 为梁高)加密区间距 ≤ 100 mm；梁端设置 3 道加密 U 型箍(间距 50 mm)。



Figure 3. Schematic diagram of the structure of the BFRP reinforced beam

图 3. BFRP 加固梁的构造示意图

6.2.2. 钢筋混凝土楼板的双向加固技术

板底采用正交网格($0^\circ/90^\circ$)布置，如图 4 所示；增设 45° 放射状 BFRP 布带(宽度 300 mm)，控制板角裂缝扩展；边界锚固：BFRP 布延伸至梁侧 ≥ 100 mm，与梁 U 型箍形成机械锚固体系。



Figure 4. Schematic diagram of the structure of the BFRP reinforced floor slab

图 4. BFRP 加固楼板的构造示意图

6.3. BFRP 加固技术的性能优势与适用边界条件

6.3.1. 不同加固方法比较分析

玄武岩纤维(BFRP)加固法突出其高强轻质、耐腐蚀、施工便捷、对原结构扰动小的优势；指出其耐火性相对较差(需防火保护)、长期性能数据仍需积累、端部锚固要求高、材料成本相对传统方法高的局限；适用场景：空间受限、需快速施工、腐蚀环境、对自重敏感、需最小干预的结构。

增大截面法优势：技术成熟、刚度提升显著、整体性好、耐火性好；局限：自重和尺寸增加大、湿作业量大、工期长、对使用空间影响大；适用场景：空间允许、需大幅提高刚度和承载力、对防火要求极高的结构。

粘钢加固法优势：技术成熟、刚度提升显著、承载力提升快；局限：重量较大、需防腐防火处理、施工要求高(焊接、钻孔)、易剥离、耐久性受环境影响大；适用场景：需快速大幅提升承载力刚度、空间允许、便于焊接锚固的结构。

碳纤维(CFRP)加固法优势：强度模量最高、最轻薄、施工便捷；局限：成本最高、脆性大、导电性(需注意电偶腐蚀)、与混凝土刚度差异更大(界面剥离风险略高于 BFRP)；适用场景：对强度重量比要求极高、空间极度受限、预算充足的项目。

不同加固工法的综合对比对比如表 5 所示。

Table 5. Comprehensive comparative analysis of different reinforcement methods
表 5. 不同加固工法综合对比分析表

评估指标	BFRP 加固技术	碳纤维(CFRP)加固	粘钢加固法	增大截面法
结构自重增量	极小(<5%)	极小(<5%)	中等(15%~20%)	大(20%~30%)
单位面积工期	短(3~5 天/100 m ²)	短(3~5 天/100 m ²)	中(10~15 天/100 m ²)	长(15~20 天/100 m ²)
承载力提升效率	高	极高	高	高
刚度提升	中	中高	高	高
延性/抗震提升	中	中低	低	中
裂缝控制能力	好	好	中	好
耐久性(耐腐蚀)	优异	优异	差(需防护)	好
耐火性	差(需防护)	差(需防护)	差(需防护)	好
狭窄空间适应性	优	优	中	差
对原结构扰动	极小	极小	中	大
长期维护需求	低	低	高(防腐防火)	低
材料成本	中高	高	中	低
综合成本(含施工)	中(优势场景)	高	中高	中(劣势场景)

6.3.2. 工程应用边界条件

抗震设防要求：适用于抗震设防烈度 ≤ 8 度地区，超过时需结合消能减震技术；环境温度限制：长期使用温度 $\leq 60^{\circ}\text{C}$ ，当处于 $60\sim 100^{\circ}\text{C}$ 环境时，需采用 A1 级防火涂层(厚度 $\geq 5\text{ mm}$)。

7. 结论

老旧小区加固是非常关键的，对于提高居民生命财产安全和城市整体品质有着不同程度的提升，如何加固及改善加固后的使用性能已成为加固设计中的关键问题[11]。玄武岩纤维材料在老旧小区加固领

域有着卓越成效。通过深入探究其特性、适配技术与实际应用, 证实玄武岩为老旧建筑注入新活力, 有效攻克诸多结构难题, 保障居民生活安全。

基金项目

2024 年度辽宁省社会科学规划基金项目: 辽宁省老旧小区绿色化改造方法和实施路径研究(项目编号: L24BSH005)。

参考文献

- [1] 张国宗, 范栩侨, 李天华, 等. 老旧小区补抗震加固高延性混凝土技术应用研究[J]. 建设科技, 2020(24): 50-52.
- [2] 张向冈, 汪昉, 王鹏, 等. 玄武岩纤维加固钢筋混凝土构件的力学性能研究进展[J]. 混凝土, 2017(6): 56-59, 63.
- [3] 黄修月. 老旧小区改造中的建筑结构加固设计[J]. 中国住宅设施, 2022(7): 34-36.
- [4] 戴鹏琴. 老旧小区维修改造设计的研究[J]. 居舍, 2024(0): 111-114.
- [5] 宋景旭. 老旧小区改造中建筑结构加固设计探究[J]. 砖瓦, 2020(10): 73-74.
- [6] 梁耀哲, 褚少辉, 王海龙, 等. 玄武岩纤维布加固混凝土结构应用技术研究[J]. 建设科技, 2019(16): 93-95.
- [7] 袁新露. 老旧小区改造加固技术研究[J]. 建筑施工, 2024, 46(3): 338-340.
- [8] 郭俊超, 李嘉衡, 王滕诗. 钢筋混凝土结构加固施工中碳纤维布的应用[J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23(7): 53-55.
- [9] Shannag, M.J. and Higazey, M. (2020) Strengthening and Repair of a Precast Reinforced Concrete Residential Building. *Civil Engineering Journal*, 6, 2457-2473. <https://doi.org/10.28991/cej-2020-03091630>
- [10] 荆磊. 纤维编织网增强混凝土加固砖砌体柱/墙力学性能与计算方法研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2021.
- [11] 谭军, 宋春雷, 金春峰. 某老旧砌体住宅楼抗震鉴定与加固方法研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(S1): 881-883.