

纤维增强高性能混凝土在近代工业遗产砌体结构加固中的应用

吕克

上海川勤建筑工程有限公司, 上海 202151

DOI:10.61369/ETQM.2026060011

摘 要 : 针对砌体结构自重大、延性差及抗震不足等缺陷, 本文以上海某近代工业遗产加固项目为背景, 研究纤维增强高性能混凝土 (FRHPC) 薄层抹面加固技术。引入聚丙烯 (PP)、聚乙烯醇 (PVA) 及微细钢纤维 (MSF) 三类细观纤维, 通过单轴受压试验构建基于多项式与有理分式的分段本构模型, 并结合塑性损伤 (CDP) 模型进行有限元验证与应用分析。对比研究表明: MSF-FRHPC 强度提升效果最好, PVA 与 PP-FRHPC 延性增强显著; 所建模型能精准模拟材料非线性及加固墙体受力特征。相比普通喷射砂浆及无纤维 HPC, FRHPC 薄层加固使砌体墙体峰值荷载提升 28.2%~40.1%, 延性系数超过 2.0, 且施工便捷、不破坏历史风貌。该成果为同类遗产砌体结构的材料选型与工程应用提供了理论依据与技术支持。

关 键 词 : 纤维增强高性能混凝土; 近代工业遗产; 砌体结构加固; 历史风貌保护; 本构模型

Research on the Application of Fiber Reinforced High Performance Concrete in the Reinforcement of Modern Industrial Heritage Masonry Structure

Lv Ke

Shanghai Chuanqin Construction Engineering Co., Ltd., Shanghai 202151

Abstract : In view of the defects of masonry structure, such as self-weight, poor ductility and insufficient earthquake resistance, this paper studies the thin layer plastering reinforcement technology of fiber reinforced high performance concrete (FRHPC) based on the background of a modern industrial heritage reinforcement project in Shanghai. Three kinds of meso-fibers, polypropylene (PP), polyvinyl alcohol (PVA) and micro-steel fiber (MSF), were introduced. The piecewise constitutive model based on polynomial and rational fraction was constructed by uniaxial compression test, and the finite element verification and application analysis were carried out by combining the plastic damage (CDP) model. The comparative study shows that the strength of MSF-FRHPC is the best, and the ductility of PVA and PP-FRHPC is significantly enhanced. The model can accurately simulate the material nonlinearity and the stress characteristics of the reinforced wall. Compared with ordinary shotcrete mortar and fiber-free HPC, FRHPC thin-layer reinforcement increases the peak load of masonry walls by 28.2% ~ 40.1%, the ductility coefficient exceeds 2.0, and the construction is convenient and does not destroy the historical features. The results provide theoretical basis and technical support for material selection and engineering application of similar heritage masonry structures.

Keywords : Fiber-Reinforced High-Performance Concrete (FRHPC); modern industrial heritage; masonry structure reinforcement; historical aesthetic preservation; constitutive model

引言

砌体结构由于其施工便利性、较低的造价和广泛的适用性, 长期以来被广泛应用于城乡建设中, 尤其在住宅、学校及工业厂房等低层和多层建筑中占有重要地位^[1-4]。然而, 传统砌体结构普遍存在自重大、延性差、抗震性能不足等问题, 特别是在地震等极端荷载作用下易发生脆性破坏, 严重影响结构的安全性和耐久性。因此, 研究并发展适用于砌体结构的高效、经济、易施工的加固技术具有重要的理论价值与工程意义^[5-8]。

近年来, 纤维增强高性能混凝土 (Fiber-Reinforced High-Performance Concrete, FRHPC) 因其优异的力学性能、耐久性和良

好的界面结合能力，成为结构加固领域的一种重要材料手段。相比于传统钢筋或钢板加固方法，FRHPC具有更好的适形性和施工适应性^[9-12]，尤其适用于砌体结构的表面抹面加固。但常规钢纤维由于纤维尺寸较大、施工适应性差，不利于均匀分布在薄层加固材料中，难以在砌体墙体抹面中广泛应用^[13-15]。因此，本文引入了更适用于上墙施工的细观纤维材料，包括聚乙烯醇纤维（PVA）、聚丙烯纤维（PP）以及微细钢纤维（MSF），探讨其在高性能混凝土基体中的增强效应及其加固性能。

上海某近代工业遗产加固改造项目为典型砖石砌体结构建筑，清水红砖外立面为其核心历史风貌特征，项目加固既需解决墙体开裂、承载力不足、抗震性能差等突出结构问题，又需满足外立面无破坏性施工的严格历史保护要求，其工程需求与技术约束在近代工业遗产砌体建筑加固中具有典型代表性。

本文以该项目为工程背景，系统开展细观 FRHPC 在近代工业遗产砌体结构加固中的应用研究：通过单轴受压试验探究三类细观纤维对 FRHPC 力学性能的增强效应，构建表征材料非线性力学特性的本构模型；结合塑性损伤（CDP）模型完成数值模拟验证，并将模型应用于项目典型砌体墙体加固模拟，分析不同细观 FRHPC 的加固效果；同时结合项目施工条件与风貌保护要求，提出 FRHPC 工程实施要点。本文旨在通过材料基础研究与工程实践相结合，探讨细观 FRHPC 在该类建筑加固中的适用性与应用效果，为近代工业遗产及同类砌体结构的加固材料选型、数值分析与工程应用提供理论依据和技术支撑。

一、工程背景与加固核心约束

（一）项目概况

上海某近代工业遗产始建于19世纪末，为上海近代工业发展的重要见证，建筑被列为当地优秀历史建筑，兼具工业遗产价值与红色文化价值。建筑主体以砖石砌体结构为主，辅以少量钢筋混凝土梁柱，建筑外立面为清水红砖构造，是近代工业建筑的典型风貌特征；本次改造后建筑功能定位为现代企业办公，需在严格保留历史风貌的前提下，满足现行建筑规范对结构承载力、抗震性能及现代使用功能的要求。

（二）结构现状与加固需求

项目前期通过回弹、钻芯及超声检测对砌体结构进行评估。结果表明，墙体普遍存在竖向、斜向及水平裂缝，局部宽度达0.5 ~ 2.0 mm，削弱整体性与抗震性能；红砖风化、碳化明显，强度下降约30% ~ 40%，砂浆粉化，界面粘结强度不足；原结构承载力偏低，局部存在应力集中与失稳风险；同时缺乏有效抗震构造，延性不足。总体上，结构需提升承载力、延性与整体性，并加强裂缝控制与抗震能力。

在加固过程中，需兼顾历史风貌保护与结构性能提升。清水红砖外立面不得破坏，加固应采用薄层措施并保证材料相容性；加固材料需具备高强、高延性及良好抗裂性能，与原砌体可靠粘结，实现协同受力；施工应采用低扰动工艺，适应现场条件并保

证加固质量。

现采用普通喷射砂浆抹面虽可实现裂缝封闭及初步加固，但对承载力与延性的提升有限，抗裂与耐久性能不足，且难以适应差异化病害需求，在变形协调性方面亦存在不足。相比之下，FRHPC具备更高强度与延性及优良抗裂性能，与砌体相容性更好，可在不改变施工方式的前提下显著提升加固效果，更符合本项目需求。

二、FRHPC材料试验与本构模型构建

（一）试验设计与实施

结合本项目砌体结构的加固需求与核心约束，FRHPC试验设计遵循无粗骨料配比、细观纤维选型、固定体积掺量（0.6%）及界面适配性四大原则。试验选用P-O 42.5级普通硅酸盐水泥、I级粉煤灰、S95级矿粉为胶凝材料，河砂为细骨料，聚羧酸系高效减水剂为外加剂，纤维类型包括PP、PVA、BF、MSF四类，其基本性能参数见表1。以无纤维高性能砂浆（HPC）为基准组，试验配合比见表2，按《混凝土物理力学性能试验方法标准》（GB/T 50081-2019）^[16]制作100mm×100mm×300mm棱柱体试件，标准养护28d后进行单轴受压试验，加载速率0.5mm/min，同步采集荷载-位移数据并记录破坏形态。

表1 不同纤维的基本性能参数
Table 1 Basic Performance Parameters of Different Fibers

类型	长度（mm）	直径（μm）	抗拉强度（MPa）	弹性模量（GPa）	断裂延伸率（%）	特点
PP	6	31	400-600	4	30	成本低、抗裂效果好
PVA	12	40	1400-1600	36	18	韧性优异、分散性好
MFS	12	15	1500-2000	0.04	3.1	高模量、耐高温、耐碱

注：编号中PP为聚丙烯纤维，PVA为聚乙烯醇纤维，MFS为微细钢纤维。表中数据来源生产厂家。

表2 试验配合比 (kg/m³)
Table 2 Test mix ratio

编号	砂	水泥	粉煤灰	矿粉	水	减水剂	纤维
HPC	1011	432	98	98	168	5.8	0
PP-FRHPC	1011	432	98	98	168	5.8	5.4
PVA-FRHPC	1011	432	98	98	168	5.8	7.8
MSF-FRHPC	1011	432	98	98	168	5.8	15.6

注：编号中前缀表示纤维种类，“HPC”表示高性能混凝土，“FRHPC”表示纤维增强高性能混凝土。

(二) 试验结果分析

1. 破坏形态与力学性能

图1为轴心受压试验试件破坏形态。试验表明，不同纤维类型均有效改善了基准高性能砂浆的脆性破坏行为。无纤维组在达到峰值荷载后呈典型的爆裂状断裂，沿斜裂缝瞬间破坏，表现出明显脆性；而掺纤维试件在出现贯通裂缝后仍能维持整体性，裂缝发展缓慢，部分试件表现出明显的桥联效应，显示出良好的韧性与残余承载能力。不同纤维对峰值应力与应变的提升效果存在差异：微细钢纤维在提高峰值应力方面效果更为显著，而聚丙烯纤维和聚乙烯醇纤维则在提高极限应变、延缓下降段破坏方面表现优越。

力学性能测试结果见表3，与HPC相比，MSF-FRHPC峰值应力提升18.22%，极限应变提升48.27%，强度与延性综合最优；PVA-FRHPC 极限应变提升39.41%，延性改善最为显著；PP-FRHPC成本低廉，强度与延性均有一定提升，适配成本敏感部位。

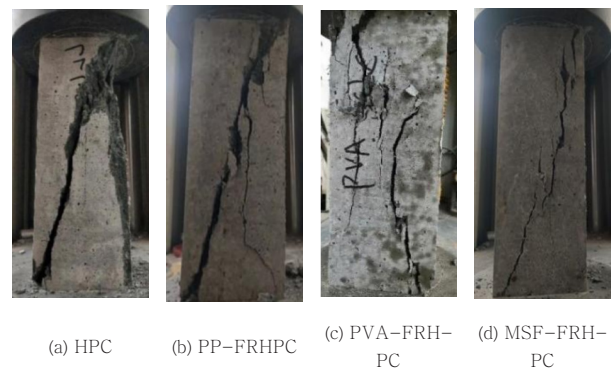


图1 试件破坏形态
Fig 1 Specimen failure form

表3 FRHPC单轴受压试验结果

Table 3 FRHPC uniaxial compression test results

编号	HPC	PP-FRHPC	PVA-FRHPC	MSF-FRHPC
f_{co}/MPa	29.30	31.28	30.36	34.64
$\epsilon_{co}/10^{-3}$	1.52	1.98	2.09	2.27
$\epsilon_{cl}/10^{-3}$	2.03	2.64	2.83	3.01

2. 本构模型构建与验证

对应力-应变曲线进行无量纲化处理^[17] ($x = \frac{\epsilon}{\epsilon_{co}}$, $yy = \frac{\sigma}{f_{co}}$)。为全面表征FRHPC在单轴受压下的非线性应力-应变关系，本

文参考王振宇^[18]等提出的典型混凝土应力-应变全曲线，采用分段式函数构建本构模型：上升段 ($0 < x \leq 1$) 采用五次多项式 $y = A_1x + A_2x^2 + A_3x^3$ ，下降段 ($x > 1$) 采用有理分式 $y = \frac{x}{Bx^2 + Cx + D}$ ，整合可得FRHPC材料应力-应变分段式本构方程：

$$\begin{cases} y = (2+3A)x - (1+4A)x^2 + Ax^3 \\ y = \frac{x}{B(x-1)^2 + x} \end{cases} \quad (1)$$

通过最小二乘法拟合得到A、B参数(表3)，不同纤维种类FRHPC应力-应变曲线见图2。拟合结果显示，所有试件的相关系数R²均大于0.98，理论曲线与试验曲线高度吻合，峰值误差控制在5%以内，模型能准确表征FRHPC的非线性力学行为，可直接用于有限元模拟。

表3 A、B值
Table 3 A、B value

编号	HPC	PP-FRHPC	PVA-FRHPC	MSF-FRHPC
A值	-0.21	0.02	0.05	-0.12
B值	10.28	1.56	2.43	5.36

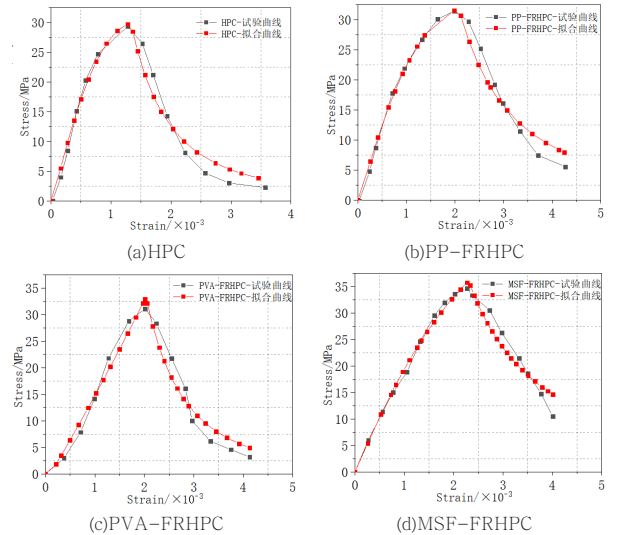


图3 FRHPC应力-应变试验曲线与理论曲线对比
Fig.3 Comparison of FRHPC Stress-Strain Test Curve and Theoretical Curve

三、加固效果有限元模拟

(一) 模型建立

为进一步评估FRHPC在砌体结构加固中的效果，本文基于文献[19]砌体墙拟静力试验研究成果，建立典型单跨单层砌体墙体模型，并在此基础上，分别用喷射砂浆和三种FRHPC对砌体墙进行加固，分析加固前后墙体的损伤演化机制及破坏模式转变规律。墙体尺寸为1500mm×1000mm×230mm，采用实心砖砌筑方式；顶梁尺寸为1800mm×250mm×250mm；底梁尺寸为2000mm×250mm×250mm。墙体两端固定约束，顶部施加轴压比为0.2的竖向恒载，并加载水平位移模拟地震作用下的侧向推覆工况。模型分为未加固组与加固组。加固组在墙体两侧设置FRHPC抹面层，厚度15mm，模拟实际施工中砂浆过渡层或界面剂粘结效果。

FRHPC加固层分别采用三种不同纤维类型（PP、PVA、MSF），纤维体积掺量统一为0.6%，所用材料本构关系与前述实验拟合模型一致。墙体材料采用砌体损伤模型，加固层材料采用前文基于塑性损伤理论构建的FRHPC CDP本构模型。未加固组与加固组砌体墙有限元模型及其网格划分见图4。

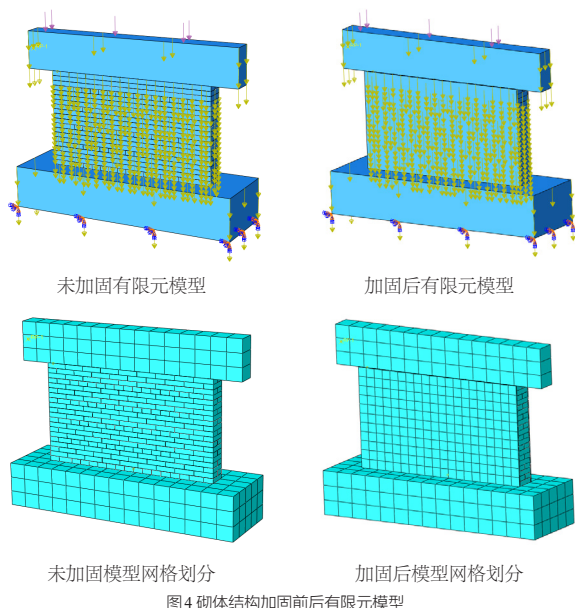


图4 砌体结构加固前后有限元模型

Fig.4 Finite Element Model of Masonry Structure before and after Strengthening

（二）承载力与延性提升

加固前后有限元数值模型破坏形态对比如图5所示。图6展示了加固前后墙体水平荷载-位移曲线。结果表明，FRHPC加固层显著提升了砌体墙体的承载力与初始刚度。其中，MSF-FRHPC组提升幅度最大，峰值荷载提升约42%；PVA纤维次之，PP-FRHPC组因强度贡献有限，刚度提升效果相对较弱但变形能力明显增强。

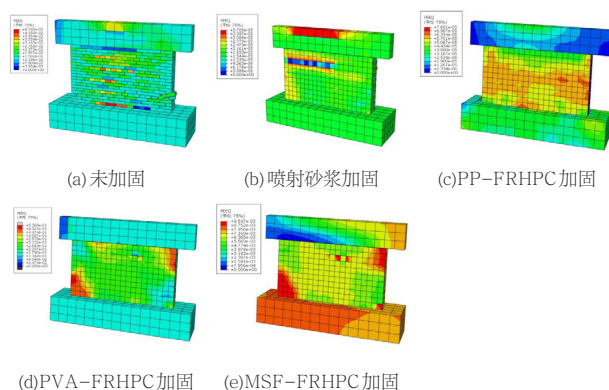


图5 砌体结构加固前后有限元结果分布云图

Fig.5 Finite element results distribution diagram before and after masonry structure reinforcement

与项目现有工艺相比，FRHPC加固在承载力提升、延性改善、裂缝控制、界面耐久性、风貌保护适配性方面均具有显著优势，且后期维护成本更低。MSF-FRHPC的承载力提升幅度高于现有工艺，PVA-FRHPC的延性与裂缝控制效果更优，二者均采用薄层喷射施工，无破坏性操作，完全契合本项目的历史风貌保护要求。

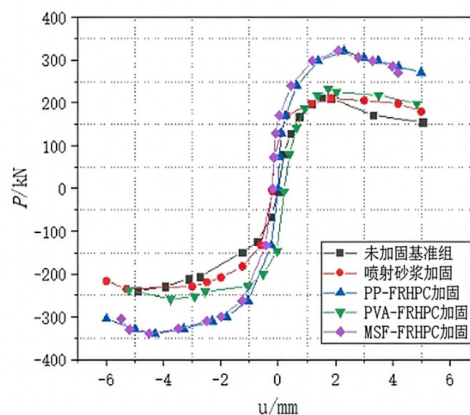


图6 砌体结构加固前后荷载-位移曲线

Fig.6 Load-displacement curves before and after reinforcement of masonry structures

四、结论

本文针对多种细观FRHPC在砌体结构抹面加固中的应用开展了系统研究。通过材料试验、本构模型拟合和有限元模拟，得到以下主要结论：

（1）0.6%体积掺量的PP、PVA、MSF三类FRHPC均能显著改善基准高性能砂浆的力学性能，MSF-FRHPC强度与延性综合最优，PVA-FRHPC延性提升显著，PP-FRHPC成本低廉，可满足不同部位加固需求。

（2）构建的多项式-有理分式分段式本构模型拟合精度高（ $R^2 > 0.98$ ），能准确表征FRHPC的非线性力学行为，结合CDP模型可有效模拟FRHPC加固砌体的受力响应。

（3）FRHPC薄层加固可使砌体墙体峰值荷载提升28.2%~42.1%，延性系数提高至2.0以上，裂缝控制效果显著，加固效果优于现有工艺，且施工适配性好，可在不破坏历史风貌的前提下实现结构性能提升。

（4）提出的施工实施要点与差异化选型方案，为FRHPC在近代工业遗产砌体结构加固中的工程应用提供了实操指导。

参考文献

- [1] 刘桂秋. 砌体结构基本受力性能的研究 [D]. 湖南大学, 2005.
- [2] Arisoy, B., Ercan, E., & Demir, A. (2015). Strengthening of brick masonry with PVA fiber reinforced cement stucco. Construction and Building Materials, 79, 255 - 262.
- [3] 苏三庆, 丰定国, 王清敏. 用钢筋网水泥砂浆抹面加固砖墙的抗震性能试验研究 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 1998, (03): 26-30.

- [4] 邓明科, 樊鑫森, 高晓军, 等. ECC 面层加固受损砖砌体墙抗震性能试验研究 [J]. 工程力学, 2015, 32(04): 120-129.
- [5] 林磊, 叶列平. FRP 加固砖砌体墙的试验研究与分析 [J]. 建筑结构, 2005, (03): 21-27. DOI: 10.19701/j.jzjg.2005.03.006.
- [6] El-Khair, K. H., & Sam, A. R. (2025). Numerical simulation to investigate the performance of existing masonry walls strengthened by ultra high-performance concrete layer. Journal of Umm Al-Qura University for Engineering and Architecture.
- [7] Koutas, L. N., Tetta, Z., Bournas, D. A., & Triantafillou, T. C. (2019). Strengthening of Concrete Structures with Textile Reinforced Mortars: State-of-the-Art Review. Journal of Composites for Construction.
- [8] Melinda, A. P. & Juliafad, E. (2022). Experimental Study of Masonry Wall Strengthened by Polypropylene Fiber Mortar. Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol., 12(3), 1066 - 1072.
- [9] Melinda, A. P. & Juliafad, E. (2022). Experimental Study of Masonry Wall Strengthened by Polypropylene Fiber Mortar. Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol., 12(3), 1066 - 1072.
- [10] Labaran, Y. H., Atmaca, N., Tan, M. et al. (2024). High-strength fiber-reinforced concrete: assessing the impact of polyvinyl alcohol, glass, and polypropylene fibers on structural integrity and cost efficiency. Discover Civil Engineering, 1, 37.
- [11] 徐世烺, 李贺东. 超高韧性水泥基复合材料研究进展及其工程应用 [J]. 土木工程学报, 2008, (06): 45-60.
- [12] 岳清瑞. 我国碳纤维 (CFRP) 加固修复技术研究应用现状与展望 [J]. 工业建筑, 2000, (10): 23-26.
- [13] 张晓虎, 孟宇, 张炜. 碳纤维增强复合材料技术发展现状及趋势 [J]. 纤维复合材料, 2004, (01): 50-53+58.
- [14] Koutas, L. N., Tetta, Z., Bournas, D. A., & Triantafillou, T. C. (2019). Strengthening of Concrete Structures with Textile Reinforced Mortars: State-of-the-Art Review. Journal of Composites for Construction.
- [15] Li, L., Xing, F., Xu, Z. et al. (2023). Numerical Analysis of Modified PVA Fiber Rubber Concrete in Frame Beams. Buildings, 13(3), 791.
- [16] GB/T 50081-2019 《混凝土物理力学性能试验方法标准》[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [17] 陆新征, 叶列平, 滕锦光, 等. FRP-混凝土界面粘结滑移本构模型 [J]. 建筑结构学报, 2005, (04): 10-18.
- [18] 过镇海, 张秀琴, 张达成, 等. 混凝土应力-应变全曲线的试验研究 [J]. 建筑结构学报, 1982(1).
- [19] 刘绍卿. UHPC 加固既有砌体结构受剪性能试验研究 [D]. 华北理工大学, 2021.