

双层玻璃纤维网格增强环氧砂浆单面加固 砌体墙抗震性能试验研究

万世有¹, 潘二明¹, 闫文举¹, 邓宗才², 陈铭华²

(1. 中铁建设集团有限公司, 北京 100040; 2. 北京工业大学, 北京 100124)

摘要: 为研究双层玻璃纤维网格增强环氧砂浆单面加固砌体墙的抗震性能, 对两个高度为 1 200 mm、宽度为 1 600 mm、厚度为 240 mm 的砌体墙进行低周往复试验。试验结果表明: 1) 双层玻璃纤维网格增强环氧砂浆抗震加固技术切实可行, 加固后的墙体破坏形态由脆性转为延性; 2) 加固后能够降低裂缝扩展速率, 减小裂缝宽度; 3) 显著提高了墙体承载力与变形能力, 峰值荷载约提高了 91.5%, 开裂荷载约提高了 20.4%, 墙体开裂位移提升了 20.0%; 4) 加固墙体的滞回曲线更加饱满优良, 可恢复性变形增加, 残余变形更小。本文成果可为砌体墙的加固工程提供一定的借鉴与参考。

关键词: 砌体墙加固; 玻璃纤维网格; 环氧砂浆; 低周往复试验; 抗震性能

中图分类号: TU591

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)09-0008-06

doi: 10.13402/j.gejs.2024.09.113

Experimental study on seismic performance of epoxy mortar one-sided reinforced masonry wall strengthened with double-layer fiberglass mesh

WAN Shiyu¹, PAN Erming¹, YAN Wenju¹, DENG Zongcai², CHEN Minghua²

(1. China Railway Construction Group Company, Beijing, 100040, China;

2. Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to study the seismic performance of strengthened with reinforced epoxy mortar one-sided reinforced masonry walls strengthened with, a low circumferential reciprocation tests is conducted on two masonry walls with a height of 1,200 mm, a width of 1,600 mm, and a thickness of 240 mm. The test results show that: 1) the strengthening method is practicable, and the damage pattern of the strengthened reinforced wall is changed from brittle to ductile; 2) the strengthening can reduce the crack expansion rate and crack width; 3) it can significantly improve the wall bearing capacity and deformation capacity, the peak load is increased by about 91.5%, the cracking load is increased by about 20.4%, and the cracking displacement of the wall is improved by 20.0%; 4) the strengthened walls have more full and excellent hysteretic curves. The hysteresis curve of the strengthened wall is more full and excellent, the recoverable deformation is increased, and the residual deformation is smaller. The results of this paper can provide certain reference for the masonry wall reinforcement project.

Key words: reinforced masonry wall; glass fiber mesh; epoxy mortar; low frequency reciprocation test; earthquake resistant behavior

收稿日期: 2023-11-01

基金项目: 北京市教委科技重点攻关项目(KZ201810005008)

作者简介: 万世有(1982—), 男, 助理工程师, 从事土木工程与材料方面的研究。

通信作者: 邓宗才(1961—), 男, 教授/博士生导师, 从事纤维混凝土和纤维增强聚合物材料方面的研究。

从 20 世纪至今, 我国砌体结构方面的研究与实践获得了迅速发展, 砌体结构在办公楼和住宅等民用建筑以及多层轻工业厂房中被大范围应用^[1]。据统计, 截至 2015 年, 我国既有建筑面积中有 60% 以上是砌体结构^[2]。我国是一个震灾严重的国家, 地处欧亚地震带和环太平洋地震带交界处, 除个别省份外, 绝大部分地区都发生过较强的破坏性地震^[3]。随着时代的发展与规范的完善, 越来越多的砌体建筑处于待加固状态。

玻璃纤维是一种性能优异的无机非金属材料, 由白云石、石英砂和石灰石等原材料经高温熔制、拉丝、络纱、织布制造而成。由于其绝缘性好、耐腐蚀性好并且强度较高, 目前在建筑和电子领域应用较多^[4], 主要是作为复合材料中的增强材料或者电绝缘材料, 如玻璃钢(玻璃纤维增强塑料)、玻璃纤维电路板等。将玻璃纤维网格(glass fiber nets, GFN)与水泥、石灰或其他聚合物基材结合成复合材料, 以织物增强砂浆(textile reinforced mortars, TRM)的形式应用于砌体和混凝土结构的加固, 是近年来新兴的结构加固形式。在此加固方法中, 砂浆颗粒能够渗透入纤维纱线, 与纤维网格紧密黏结, 确保了内力的充分传递。基材将纤维网格完全包裹, 对内部的纤维网格起到保护作用, 与其他加固方式相比具有拉伸强度高、耐腐蚀性好等优点^[5-7]。

作为一种新型材料, 纤维网格轻质高强、耐久性好、可操作程度高, 在加固工程中具有特殊的技术优势。关于纤维网格加固的研究与应用发展十分迅速。然而, 目前纤维网格的相关研究主要集中在新建和待加固的混凝土结构, 涉及砌体结构加固的研究较少, 尤其是纤维网格加固砌体结构的抗震性能。为研究双层玻璃纤维网格增强环氧砂浆单面加固方式对砌体墙抗震性能的影响, 对 1 个无筋且无窗洞的砌体墙试件进行双层玻璃纤维网格增强环氧砂浆单面加固, 并与 1 个未加固砌体墙试件进行对比, 通过低周反复拟静力试

验对砌体墙进行抗震试验, 以期为砌体墙的加固工程提供一点借鉴。

1 材料与试验方案

玻璃纤维网格是由两个经纬度方向的玻璃纤维束编织而成(图 1), 其中纬向的纤维束为 1 股条状的玻璃纤维细丝, 为主要受力方向, 力学性能较好; 经向为两股互相缠绕的玻璃纤维细丝, 主要起连接固定作用, 力学性能较差。纬向玻璃纤维束穿过经向的两股玻璃纤维束中间, 形成受力整体。GFN 的网孔大小为 6 mm × 6.75 mm, 其主要性能参数如表 1 所示。

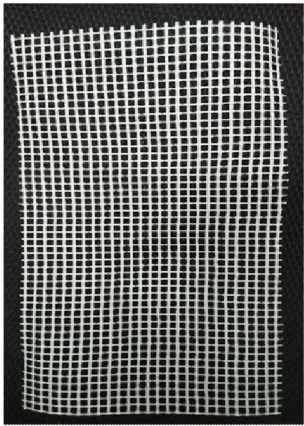


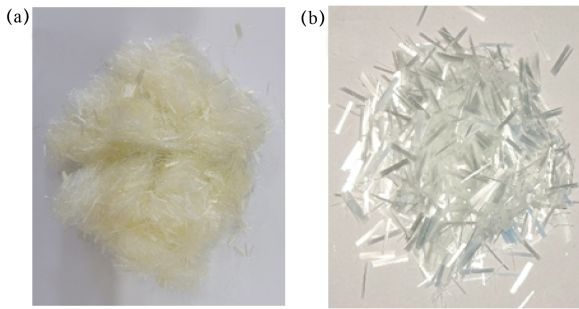
图 1 玻璃纤维网格外观

环氧砂浆的力学性能好、黏结强度高, 与砌体墙和玻璃纤维网格牢固黏结、共同受力, 因此选用水性环氧砂浆进行试验。为增强环氧砂浆的抗裂性^[8], 在砂浆制备时以 3 kg/m³ 的掺量加入聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)纤维和高锆耐碱玻璃纤维。PVA 纤维和玻璃纤维均为短切纤维, 长度约为 7 mm, 如图 2 所示。

环氧砂浆的配合比如表 2 所示, 其中水泥为 42.5 级高贝利特硫铝酸盐水泥。制备砂浆时, 先将环氧树脂、环氧固化剂和消泡剂称好倒入塑胶桶中, 用搅拌枪搅拌 1 ~ 2 min。搅拌充分后, 再加入三分之一所需体积的水, 搅拌 1 ~ 2 min 后倒入剩余的水, 并充分搅拌。完成后, 再倒入提前

表 1 GFN 性能参数

经纱/tex	纬纱/tex	体密度/(g·cm ⁻³)	密度/(根·m ⁻¹)	弹性模量/GPa		断裂强力/(kN·m ⁻¹)	
				径向	纬向	径向	纬向
350 × 2	900	2.68	166	148	78.3	58.1	70



(a) PVA 纤维; (b) 玻璃纤维

图 2 掺入的短纤维

配好的胶凝材料、砂和其余母料,使用手持式电动搅拌机搅拌均匀,并尽快使用。该环氧砂浆强度高、抗裂性能好,可以较好地保护内部的玻璃纤维网格。

表 2 环氧砂浆配合比 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

高贝利 特水泥	母料	砂/mm		消泡剂	环氧 树脂	环氧 固化剂	水
		0.18 ~ 0.63	0.63 ~ 0.85				
674	200	320	805	0.58	77.6	93.2	208

采用两个几何尺寸与配筋完全相同的砖砌体墙试件,其中一个试件(未加固)作为对比试件,另一个试件使用双层玻璃纤维网格增强环氧砂浆单面进行加固,具体的加固方案如表 3 所示。砖砌体墙的几何尺寸采用国内民用建筑砌体墙的常见尺寸进行设计。两片砖砌体墙的几何尺寸均为高度为 1 200 mm,宽度为 1 600 mm,厚度为 240 mm。墙顶部均设有圈梁,底部设有基础梁。基础梁、构造柱和圈梁均由强度等级为 C30 的混凝土浇筑。

表 3 试件编号及加固方案

编号	加固方案
W-0	未加固对比试件
G-W-2	GFN 单面两层加固

注:“G”为 GFN 加固,“W”为加固墙体,“数字”为加固层数。

GFN 加固系统主要由玻璃纤维网格和环氧加固砂浆组成,覆盖整个砖墙面。以 G-W-2 试件为例,加固层的施工过程:1)依据砖墙尺寸裁剪网格;2)清理砖墙表面;3)涂抹第一层砂浆;4)将 GFN 在砂浆层表面铺平;5)涂抹第二层砂浆;6)铺设第二层 GFN,方法同第四步;7)找平压光;8)室外洒水养护 28 d,步骤如图 3 所示。



图 3 施工步骤

2 加载与测量方式

试验采用低周反复荷载,加载方式参考《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)中建筑结构构件拟静力试验的相关规定。加载时,先对墙体施加竖向荷载,直至试验结束。水平荷载采用荷载和位移双控制加载方式。试件开裂前的水平荷载由荷载控制,逐级增加,每级增加 25 kN,推拉循环 1 次。定义开裂时墙体的位移为开裂位移 ΔCr ,试件开裂后的水平荷载由位移控制,逐级增加,每级增加 ΔCr ,推拉循环两次。当墙体承受的水平荷载经过峰值开始下降后,每级增加 $2\Delta Cr$,推拉循环两次。当水平荷载下降至不足峰值状态的 85% 时,即可判定墙体丧失承载能力而破坏,试验结束。

为测量墙体在加载过程中的位移和钢筋、砂浆层的应变,试验共布置 14 个应变片。对于 GFN 加固试件,在墙体的加固面上沿两条对角线各黏贴 3 个混凝土应变片,应变片分布在墙面对角线的四等分点位置,记作 Y1 ~ Y6。通过应变曲线分析砂浆层在加载时的应变变化趋势。在构造柱浇筑前,每根纵筋底部都黏贴 1 个钢筋应变片来检测钢筋的应变变化,共 8 个,记为 Y7 ~ Y14。位移值和应变值均通过动态电阻应变仪采集,应变片布置如图 4 所示。



图 4 应变片测点布置

3 试验结果分析

为方便叙述, 将砌体墙试件黏贴 GFN 的一面称为加固面, 未黏贴的墙面称为未加固面。将远离水平作动器的构造柱记为 GZ1, 靠近水平作动器的构造柱记为 GZ2, 同时规定墙体受推为正, 受拉为负。

(1) 未加固墙体试件 W-0。当水平荷载为 +75 kN 时, 在 GZ2 底部距基础梁顶面约为 50 mm 处出现细小的水平裂缝。当水平荷载为 -100 kN 时, 在 GZ1 底部也出现了类似的细微裂缝, 试件仍处于弹性阶段, 基本无残余变形。当水平荷载达到 +125 kN (第五级荷载控制加载) 之前, 只在两侧构造柱出现细微裂缝, 砖墙面未出现明显的裂缝。当水平荷载增加到 +130 kN 时, 在靠近 GZ2 水平裂缝处的砖墙面出现水平裂缝。裂缝长度约为 50 mm, 位于第一层砖上部, 沿砌体灰缝开展。此时的墙体位移为 1.0 mm, 记为开裂位移 Δ_{Cr} , 推拉循环完成后, 下一级加载改为基于 Δ_{Cr} 的位移控制加载。图 5 为 W-0 墙体破坏过程。

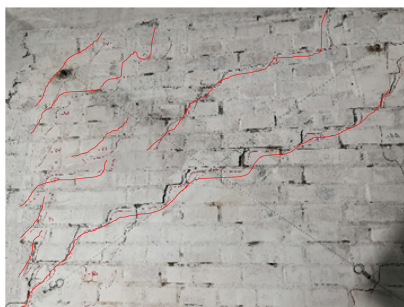


图 5 W-0 墙体破坏过程

(2) 双层玻璃纤维网格增强环氧砂浆单面加固砌体墙试件 G-W-2。试件 G-W-2 在水平荷载达到 +100 kN 前, 未观察到裂缝, 荷载-位移曲线大致呈直线。当水平荷载达到 +125 kN 时, GZ2 侧面距离基础梁顶 400 mm 处出现约为 150 mm 长的水平微裂缝; 当水平荷载达到 +150 kN 时, GZ2 距离基础梁顶 450 mm 处出现约为 180 mm 长的类似裂缝, 此时的顶部水平位移为 1.2 mm, 记为开裂荷载。自下一级循环开始, 加载方式改为由位移控制。图 6 为 G-W-2 墙体破坏过程。

未加固砌体墙在低周反复荷载下的破坏模式为脆性剪切破坏。墙体在达到弹性极限荷载前, 裂



图 6 G-W-2 墙体破坏过程

缝主要集中于两构造柱底部, 以水平裂缝为主。当墙体达到弹性极限荷载后, 构造柱上的裂缝逐渐延伸到墙体加固面与未加固面上, 之后斜向下延伸, 随后墙体进入塑性阶段。随着墙顶水平位移的不断增大, 加固面的砂浆层上沿对角线出现主斜裂缝并快速发展, 而未加固面上出现阶梯状斜裂缝。当墙体达到峰值荷载后, 墙面的主斜裂缝急剧变宽并与底部裂缝贯通, 承载力突然下降, 从而使砌体墙试件遭受破坏。

加固后的砌体墙虽然同样为剪切破坏形式, 但属于延性较强的剪切破坏形式。在产生裂缝的各个阶段都极大减缓了裂缝产生速度, 并减小了裂缝的宽度, 而且最大承载力的下降速度也有一定的缓解。这种破坏模式是抗震设计中理想的破坏模式, 有利于砌体墙的抗震, 说明了玻璃纤维网格增强环氧砂浆加固砌体墙具有很好的抗裂增韧效果。

4 承载力与位移分析

将加载过程中出现明显裂缝时的水平荷载定义为墙体的开裂荷载, 此时对应的墙顶位移为墙体的开裂位移。将加载过程中墙体承受的最大水平荷载定义为墙体的峰值荷载, 此时对应的墙顶位移为墙体的峰值位移。将加载过程中墙体的承载力在首次下降至峰值的 85% 以下 (即刚认定墙体破坏) 时的水平荷载定义为墙体的极限荷载, 此时对应的墙顶位移为墙体的极限位移。砌体墙试件的试验结果如表 4 所示。

(1) 承载力。与未加固墙体 W-0 相比, G-W-2 的开裂荷载与峰值荷载均有不同程度的提高。试验结果表明, GFN 加固系统可以有效保护

表 4 砌体墙试验结果统计

试件	开裂荷载/kN	开裂位移/mm	峰值荷载/kN	峰值位移/mm	极限位移/mm
W-0	126.2	1.0	216.4	9.5	11.8
G-W-2	152.0	1.2	414.5	8.4	10.8

注：其中各项数值均为推拉两个方向数值的平均值。

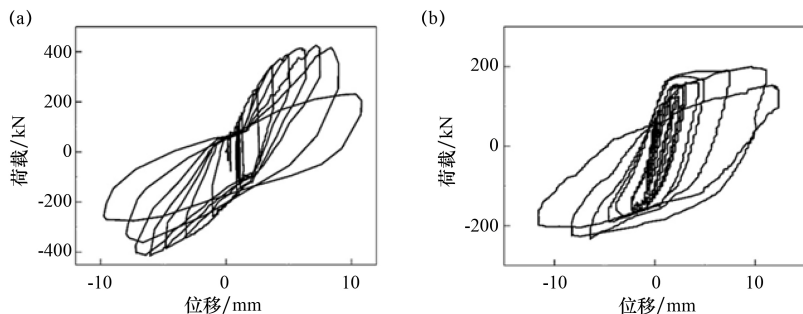
内部砌体，抑制墙体在前期的裂缝开展，提高墙体的开裂荷载。在加载后期，GFN 对墙体的峰值荷载也有提升效果，并且随着 GFN 层数的增加，峰值荷载提升的越多。

(2) 位移。G-W-2 的变形能力与未加固墙体 W-0 相比也有不同幅度的提高。对于墙体的开裂位移，G-W-2 提高了 20.0%，说明单面的 GFN 加固可以提高砌体墙的开裂位移，有效增强砌体墙在弹性阶段的变形能力。与未加固墙体相比，G-W-2 峰值和极限位移无明显提升，有些位移数值甚至稍有降低，这是由于单面 GFN 加固增加了截面面积，从而增大了砌体墙的刚度，使墙体在后期的变形能力变差。

5 滞回曲线分析

记录加载过程中墙顶水平位移为横坐标、水平作动器施加的荷载为纵坐标，得到的荷载-位移曲线即为试件的滞回曲线。滞回曲线，又称恢复力特性曲线，一般通过低周反复荷载试验得到，是分析构件、结构抗震性能的重要工具。滞回曲线可以直观地反映出构件或结构的变形特征和耗能能力。一次循环往复加载形成的近似封闭的曲线称为滞回环，常见的滞回环形状有梭形、弓形和 Z 形等^[9-10]。

两种墙体滞回曲线如图 7 所示。由图 7 可知：



(a) W-0; (b) G-W-2

图 7 墙体滞回曲线

G-W-2 比未加固墙体有更优秀的滞回曲线。在加载前期，墙体的滞回曲线近似为直线，卸载后几乎无残余变形。进入塑性变形阶段后，滞回曲线逐渐由梭形向弓形变化，墙体的塑性变形不断增大。对于墙体达到峰值荷载的滞回环，其卸载后的残余变形量突然增大，残余变形量为上一圈滞回环的两倍。达到峰值荷载后，两个墙体的承载力均出现明显下降，之后的滞回环同样在中部出现“捏拢”，滞回环呈明显弓形。

6 结 论

(1) 通过拟静力试验，验证了双层玻璃纤维网格增强环氧砂浆单面加固砌体墙的可行性，证明改加固方法能够改善墙体的破坏形态。虽然加固后仍为剪切破坏形式，但属于延性剪切破坏形式，极大地减缓了裂缝产生速度，减小了裂缝的宽度，减缓了最大承载力的下降速率，这种破坏形态有利于砌体墙的抗震，具有一定的意义与作用。

(2) 通过试验结果与数据分析发现，双层玻璃纤维网格增强环氧砂浆单面加固砌体墙极大地提高了墙体的承载力，峰值荷载提高了 91.5%，开裂荷载提高了 20.4%。说明玻璃纤维网格增强环氧砂浆加固系统可以有效保护内部砌体结构，抑制墙体裂缝开展，提高开裂荷载与峰值荷载；同时也提高了墙体的变形能力，提高了 20.0% 的墙体开裂位移，有效增强砌体墙在弹性阶段的变形能力。

(3) 双层玻璃纤维网格增强环氧砂浆单面加固砌体墙的滞回曲线明显优于未加固墙体，无论是从残余变形、滞回环等方面都可以看出玻璃纤

维网格增强环氧砂浆加固砌体墙可以显著提高砌体墙的抗震性能。

参考文献:

- [1] 李佳,薛海朋,李向宇. 预制钢筋混凝土墙板加固砌体试验研究[J]. 工程建设,2023,55(5):22-28.
- [2] 齐风波,任红伟,辛海亮,等. 框架结构侧向刚度比与砌体墙高厚比分析[J]. 工程建设,2022,54(2):40-44.
- [3] 陈飞跃,任宜春,尹志祥. 一种基于谱加速度均值的新型地震动强度指标的提出及应用[J]. 工程建设,2022,54(11):1-7.
- [4] 顾亮,左鑫. 基于有限元软件计算的水泥混凝土路面改造[J]. 工程建设,2017,49(6):58-60.
- [5] YANLB,KASAL B,HUANG L. A review of recent research on the use of cellulosic fibres,their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering. Engineering,2016(92):94-132.
- [6] MahpourA R. Mechanical properties and durability of biobased fabric-reinforced lime composites intended for strengthening historical masonry structures. Construction and Building Materials,2024(414):134916.
- [7] DONNINI J, SPAGNUOLO S, CORINALDESI V. A Comparison Between the Use of FRP,FRCM and HPM for Concrete Confinement [J]. Engineering,2019,160:586-594.
- [8] 王永波,罗晖. PVA 纤维在水泥基材料中作用的研究[J]. 重庆建筑,2005(7):62-64.
- [9] 陈俊,朱晗轩,廖桢颖. 内置螺旋箍筋装配式剪力墙抗震性能试验[J]. 工程建设,2023,55(8):1-8.
- [10] 靳涛,刘大召,李雪飞,等. 近断层地震动作用下黏滞阻尼器的减震研究[J]. 工程建设,2023,55(1):12-18.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、万方数据电子出版社、重庆维普资讯有限公司、超星学术期刊“域出版”等第三方平台在其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵,不再另行支付),对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明,如有异议请来稿说明,本刊将作适当处理。