

# 钢丝绳嵌缝加固砖砌体结构抗弯性能研究\*

Study on Bending Performance of Steel Wire Rope Caulking Reinforced Brick Masonry Structure

赵亚军<sup>1,2</sup>, 刘洋<sup>1</sup>, 吴昊<sup>1</sup>, 方宾彬<sup>1</sup>

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038;  
2. 河北工程大学 力学实验教学示范中心, 河北 邯郸 056038)

**摘要:** 为提高砖砌体建筑的抗弯与抗倾覆性能, 同时保留原有风貌, 提出钢丝绳嵌缝缠绕加固砖砌体的技术。通过使用压力试验机对砌体结构进行沿通缝截面抗弯试验, 采用数字图像相关方法 (DIC) 获取砌体结构表面应变场, 分析试件的破坏模式和荷载-位移曲线, 研究钢丝绳嵌缝加固砖砌体结构受荷时的受力特征与协同工作机理, 并在试验的基础上建立了抗弯试件的数值模型。结果表明: 钢丝绳嵌缝加固可建立有效的砌体层间联系, 在水平和竖向约束砖砌体, 保持砌体的整体性; 加固后砌体结构抗弯性能显著提高, 嵌入 2、3 mm 钢丝绳使承载力分别提高 26% 和 46%, 峰值荷载对应的挠度分别提高了 51% 和 77%, 脆性破坏特性得到改善。该方法可用于城市更新中需要保留外观的砌体加固改造工程。

**关键词:** 受弯砌体; 钢丝绳嵌缝加固; 应变场; 数值模拟

**中图分类号:** TU362 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 06-0096-05

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.06.018

ZHAO Yajun<sup>1,2</sup>, LIU Yang<sup>1</sup>, WU Hao<sup>1</sup>, FANG Binbin<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Experimental Teaching Demonstration Center of Mechanics, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

**Abstract:** In order to improve the bending resistance and overturning resistance of historical brick masonry buildings while retaining the original style, the technology of wire rope caulking and reinforcement of brick masonry is proposed. By using a pressure testing machine to conduct bending tests along the joint section of masonry structures, the surface strain field of the masonry structure was obtained using digital image correlation method (DIC), and the failure mode and load displacement curve of the specimens were analyzed. The stress characteristics and collaborative working mechanism of steel wire rope joint reinforcement brick masonry structures under load were studied, and a numerical model of the bending specimens was established based on the experiments. The results show that the steel wire rope joint reinforcement can establish effective interlayer connections in masonry, constrain brick masonry horizontally and vertically, and maintain the integrity of the masonry. After reinforcement, the bending resistance of the masonry structure was significantly improved, and the bearing capacity was increased by 26% and 46% by embedding 2 mm and 3 mm wire rope, and the deflection corresponding to the peak

\* 基金项目: 国家自然科学基金 (52278171)。

作者简介: 赵亚军 (1979—), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 建筑结构加固。

通信作者: 刘洋 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 结构工程。

收稿日期: 2023-07-24

load was increased by 51% and 77%, respectively, and the brittle failure characteristics were improved. This method can be used for masonry reinforcement and renovation projects that require preservation of appearance in urban renewal.

**Keywords:** bent masonry; wire rope caulking reinforcement; strain field; numerical modeling

## 0 引言

砌体结构特点是抗拉、抗弯强度显著不足，且由于使用年限较长、受到环境侵蚀及外力作用等原因<sup>[1]</sup>，未加固砌体墙体存在弯曲性能低、抗震能力不足等问题<sup>[2]</sup>，在地震等自然灾害中，容易造成墙体在平面内方向严重损坏，在平面外方向发生倾覆和倒塌<sup>[3]</sup>，威胁着人们的生命财产安全。因此，进行砌体结构的补强加固，改善其力学性能，是非常必要的。

吴碧野等<sup>[4]</sup>研究钢筋网水泥砂浆加固砖墙，发现钢筋网在结构开裂后通过限制砌体单元可提高平面内非弹性变形能力；尹世平等<sup>[5]</sup>利用纤维编织网增强混凝土（TRC）加固砖砌体墙，开裂荷载得到提高。研究发现面层加固法可提高砌体墙的抗弯性能，但破坏了建筑原有格局肌理，且加固层易剥离<sup>[6]</sup>。石建光等<sup>[7]</sup>采用置换砂浆法来提高砌体结构性能，对原有建筑损伤较小，且显著提高了墙体的抗剪强度和抗震承载力。张德宇等<sup>[8]</sup>进行置换砂浆砌体抗剪性能模拟分析，结果表明应力分布情况与试验砂浆受剪破坏相同。王伟明等<sup>[9]</sup>研究了水平嵌筋的加固方法，将无筋砖砌体改造成水平配筋砖砌体；朱成成<sup>[10]</sup>分析了配筋率和配筋方式对墙体加固效果的影响；戴如之<sup>[11]</sup>、张豪杰<sup>[12]</sup>探讨了嵌筋加固后对墙体开裂机理的影响，结果表明嵌筋可以提高墙体的抗剪、抗压承载力，增强其变形能力；Fonti<sup>[13]</sup>等为提高砌体结构平面外抗弯性能，提出在砂浆接缝中插入一个连续的高强度钢筋网，以研究加固后结构弯曲性能，结果表明纤维绳嵌缝加固可为毛石砌体提供交叉连锁，保持砌体整体性；Borri 等<sup>[14]</sup>使用 CLT 板和钢丝绳组合加固毛石墙，结果表明抗弯强度和初始刚度改善明显；Frerretti<sup>[15]</sup>对由不锈钢带制成的加固带和碳纤维增强聚合物（CFRP）带相结合的加固技术进行了改进，用钢丝绳取代了不锈钢带，钢丝绳在砖和 CFRP 带周围形成闭环，利用了理想的工字钢机构，增强材料之间的机械耦合，提高砌体墙极限荷载；Haryanto

等<sup>[16]</sup>通过使用钢丝绳来增强梁的抗弯性能，并进一步研究了钢丝绳数量的变化对加固效果的影响，研究结果显示，加固后梁的承载能力显著提高，并且与钢丝绳配筋率呈正比关系；Miao 等<sup>[17]</sup>研究了石板表层嵌埋预应力钢丝绳的受弯性能。以上加固方法均在一定程度上提升了砖砌体结构的性能，但是存在提升抗弯与抗倾覆能力不显著问题。

钢丝绳具有一定的拉伸和变形能力，利用钢丝绳柔软、可编织缠绕的特点，把钢丝绳沿横、竖缝嵌入到灰缝内，使砖墙体层间建立联系，有利于提高墙体整体性，且由于钢丝绳的轻质性，现有建筑额外负荷增加较小，且能够保持建筑原有的美观性。为研究钢丝绳嵌缝加固砌体结构的抗弯性能，利用压力试验机对砌体结构进行沿通缝截面抗弯试验，采用数字图像相关（DIC）方法获取砌体结构表面应变场，分析试件的破坏模式和荷载位移曲线，研究钢丝绳嵌缝加固砖砌体结构受荷时的受力特征与协同工作机理，为砌体结构建筑加固提供理论依据与技术支持。

## 1 试验方案

### 1.1 试件设计

根据 GB/T 50129—2011《砌体基本力学性能试验方法标准》的要求，砌体试件使用 MU10 红砖、M5 砂浆砌筑，试件尺寸为 240 mm × 240 mm × 930 mm，砂浆层厚度为 (10 ± 1.5) mm。砌体试件在标准环境下养护 28 d 后，在表层凿除砖墙灰缝形成 20 mm 深凹槽，将钢丝绳沿砖块对称嵌进凹槽中，最后在灰槽内压入砂浆并完成勾缝。根据试验设计，共设置 3 组试件，每组包含 2 个试件，其中 FW 为未加固砌体试件，FX-A、FX-B 分别为嵌入直径 2、3 mm 钢丝绳加固试件，钢丝绳性能见表 1。为确保试验结果的准确性和可比性，所有试件都在标准环境条件下养护 28 d。

表 1 钢丝绳性能  
Table 1 Wire rope performance

类型	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa	拉应变
6 × 7	1 560	130	0.008

## 建筑结构

### 1.2 加载方案

选用简支梁三分点集中加载的方式进行试验,采用位移控制方式,匀速连续加载,试件在加载 3 ~ 5 min 之内破坏。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 破坏特征

未加固试件 FW 在跨中区域出现裂缝后,迅速开裂断为两部分,具有显著的脆性弯曲破坏特征,其他部位未见明显裂缝,破坏形态如图 1 (a) 所示。钢丝绳嵌缝加固试件 FX-B 在跨中区域出现裂缝后,裂缝宽度和向上延伸速度缓慢增加,当底部砂浆与钢丝绳脱粘掉落时,试件中部出现一条张开型主裂缝,裂纹面的扩展路径近似呈贯穿型直线上升。钢丝绳未被拉断,作为“桥梁”连接被劈成两半的砌体试件,试件未出现过度破坏或失稳的情况,可以保持较好的整体性,具有延性破坏特征。破坏形态如图 1 (b) 所示。



(a) FW 试件



(b) FX-B 试件

图 1 破坏形态对比

Fig. 1 Comparison of failure modes

相对于试件 FW,试件 FX-B 出现贯穿主裂缝时间晚,裂缝扩展速度慢,砌体整体变形能力获得提升。表明钢丝绳嵌缝加固可建立有效的砌体层间联系,和砂浆协同受力,且由于钢丝绳有一定的变形能力,在水平和竖向上约束砖砌体的同时,可以随

着砌体结构一起发生变形,延长了试件从出现可见主裂缝到最终破坏的时间。

### 2.2 荷载-挠度曲线分析

图 2 为砌体试件沿通缝抗弯试验的荷载-挠度曲线。上升段中,各试件曲线走向相似。达到峰值时,相对于未加固试件,嵌入钢丝绳加固的 FX-A、FX-B 试件峰值荷载分别提高了 26% 和 46%,峰值荷载对应的挠度分别提高了 51% 和 77%。下降段时,未加固试件迅速失去承载能力,而钢丝绳嵌缝加固试件还有一定承载能力。结果显示,钢丝绳嵌缝加固可以改善砌体结构的抗弯性能,提高配筋率可提高峰值荷载及对应挠度。

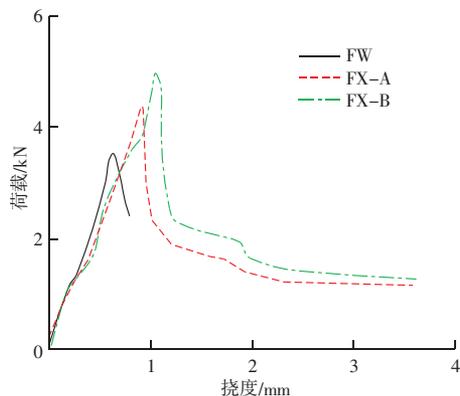


图 2 荷载-挠度曲线

Fig. 2 Load-deflection curve

钢丝绳嵌缝加固试件 FX 的荷载-挠度曲线大致分为 3 个阶段。未裂阶段 I: 加载初期,抗弯应力由砖砌体灰缝处砂浆粘结力承担,曲线斜率较大,大致呈直线上升,荷载增长较快。裂缝出现及发展阶段 II: 随着荷载的增加,砖块与砂浆之间拉应力超过粘结力,底部砂浆与砖块之间逐渐脱粘,竖向出现 1 条可见主裂缝。当裂缝向上延伸至钢丝绳处时,钢丝绳与砂浆协同受力,限制裂缝的发展,砖砌体整体变形能力和承受荷载能力有所提升。破坏阶段 III: 由于钢丝绳的拉力主要靠表面的摩擦力和表面的挤压力向砂浆传递,随着表面压应力的增大,主裂缝处钢丝绳与砂浆黏结界面出现挤压破碎,当荷载提高到峰值荷载时,钢丝绳下端砂浆几乎完全撕裂脱落,如图 3 所示。钢丝绳不再被砂浆包裹限制,砖砌体构件跨中处裂缝快速延伸至顶端,跨中荷载迅速减小,稳定在较低的水平,跨中变形则不断增加,表现出良好的延性及变形能力,荷载-挠度曲线几乎是一条水平直线。



图3 破坏截面

Fig. 3 Destruction of the cross-section

### 2.3 应变场分析

以试件 FX-B 为例，应用 DIC 技术获得不同加

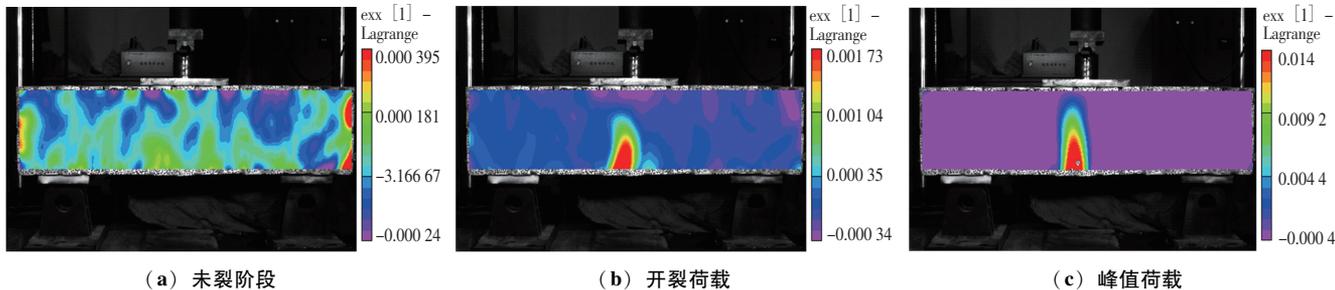


图4 FX-B 试件应变场演化

Fig. 4 Evolution of strain field in FX-B specimen

## 3 数值模拟研究

### 3.1 有限元建模

采用与试验相同的 15 层砌筑方式，选择分离式建模方法。钢丝绳采用理想的弹塑性单折线模型，选用混凝土塑性损伤模型来模拟砖块和砂浆在抗弯试验作用下的拉伸和压缩破损形态。通过在 ABAQUS 的相互作用模块定义粘性接触行为模拟砂浆层与砖块之间粘结性能，包含法向行为、切向行为、黏性行为 and 损伤。采用牵引力 - 分离本构模型定义法向应力和切向应力与对应界面位移的关系，如图 5 所示。随着加载的进行，当应力或位移满足损伤判定条件时，界面进入损伤演化阶段，刚度开始退化，损伤判定条件采用二次应力准则。

钢丝绳采用桁架单元，砂浆和砖块均使用八节点线性六面体单元 (C3D8R) 来表示。钢丝绳采用内置嵌入约束，边界条件为模型底部左右两块刚体完全约束，设置通用分析步用于施加竖向位移。

### 3.2 有限元模拟结果验证

图 6 为试件模拟与试验荷载 - 挠度曲线的对比，

载阶段应变云图，研究钢丝绳嵌缝加固后砌体受荷时变形情况与裂缝发展过程。

图 4 为试件 FX-B 横向拉伸应变云图。试件上部承受压应力，下部承受拉应力，距离中和轴越远的区域应变越大。在裂缝发展阶段，随着加载的进行，当载荷接近未加固试件峰值附近时，试件底部跨中区域出现明显应变集中区域，应变为 0.0017，此时试件开裂。随后应变集中区域不断向上扩展延伸，应变持续快速增大至 0.014，裂纹不断向试件上部发展，直至贯穿，试件中部出现 1 条张开型主裂缝，裂纹面的扩展路径近似呈贯穿型直线上升。

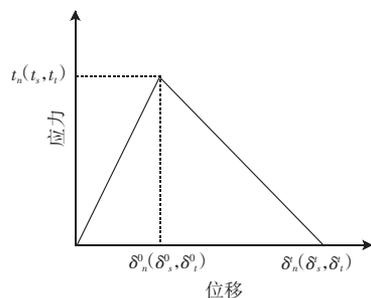
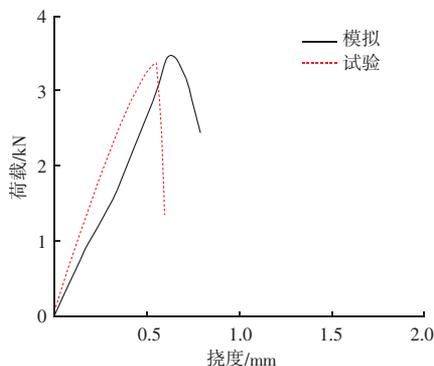


图5 牵引分离模型

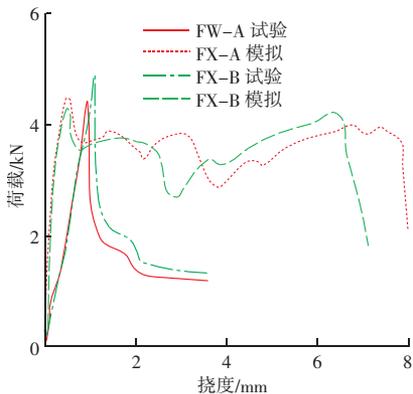
Fig. 5 Traction separation model

可以看到，模拟结果与试验结果的走向基本一致，未加固试件开裂后，迅速失去承载能力；而钢丝绳嵌缝加固试件在主裂缝处砂浆开裂后，钢丝绳未被



(a) 未加固模型与试验对比

## 建筑结构



(b) 钢丝绳嵌缝加固模型与试验对比

图6 荷载-挠度曲线对比

Fig. 6 Comparison of load deflection curves

拉断,作为“桥梁”连接被劈成两段的砌体试件,试件仍具有一定的承载能力,能保持较好的整体性,峰值荷载及对应挠度显著提高。由于试验时的钢丝绳与砖块表面之间的约束效果不太理想,故未测到后半段的荷载上升,但所建模型的承载力变化趋势总体上与试验试件相符。

## 4 结论

(1) 钢丝绳嵌缝加固砌体结构可以建立有效的层间联系,在水平和竖向约束砖砌体,有效推迟贯通大裂缝的出现,砌体试件整体变形能力获得提升。

(2) 钢丝绳嵌缝加固后,砌体结构抗弯性能改善明显。相对于未加固试件 FW,试件 FX-A、FX-B 试件峰值荷载分别提高了 26% 和 46%,峰值荷载对应的挠度分别提高了 51% 和 77%,提高配筋率有助于提高峰值荷载及对应挠度。

(3) 未加固试件开裂后,迅速失去承载能力;而钢丝绳嵌缝加固试件在主裂缝处砂浆开裂后,钢丝绳未被拉断,作为“桥梁”连接被劈成两段的砌体试件,试件仍具有一定的承载能力,能保持较好的整体性。

## 参 考 文 献

[1] 景杰婧,周长东.内嵌纤维增强复合材料加固砌体结构研究进展[J].土木与环境工程学报(中英文),2023,45(1):209-224.

[2] 潘毅,陈建,包韵雷,等.长宁6.0级地震村镇建筑震害调查

与分析[J].建筑结构学报,2020,41(增刊1):297-360.

- [3] 王毅红,韩岗,卜永红,等.村镇既有砌体结构民居建筑抗震性能现状分析[J].建筑结构,2010,40(12):101-104,121.
- [4] 吴碧野,戴君武,柏文.钢筋网砂浆面层加固震损砖墙抗震性能模拟[J].地震工程与工程振动,2021,41(5):79-89.
- [5] 尹世平,成帅安,王飞.基于数字图像技术的TRC加固砌体裂缝发展研究[J].建筑材料学报,2022,25(9):953-959.
- [6] 位三栋,马跃强,彭斌,等.超高性能混凝土加固历史保护建筑砖砌体承重墙性能试验研究[J].建筑结构学报,2018,39(增刊2):284-289.
- [7] 石建光,郑雪峰,林树枝,等.置换砂浆强度及深度对置换砂浆加固砌体抗剪性能影响的试验研究[J].建筑结构,2021,51(13):126-131.
- [8] 张德宇,王新宇,施宵勇,等.基于ABAQUS的砌体结构抗剪性能有限元分析[J].厦门大学学报(自然科学版),2021,60(6):1077-1082.
- [9] 王伟明,刘廷滨,张家玮,等.嵌缝加固砖砌体沿缝抗剪性能研究[J].建筑结构,2020,50(6):114-117.
- [10] 朱成成.砌体结构水平嵌筋加固有限元分析[D].邯郸:河北工程大学,2018.
- [11] 戴如之.水平嵌筋加固砌体墙开裂性能的有限元分析[D].青岛:中国海洋大学,2014.
- [12] 张豪杰.基于离散单元法墙体平面外受力性能分析[D].武汉:武汉理工大学,2015.
- [13] FONTI R, BORRI A, BARTHEL R, et al. Rubble masonry response under cyclic actions: experimental tests and theoretical models [J]. International Journal of Masonry Research & Innovation, 2017, 2 (1): 30-60.
- [14] BORRI A, SISTI R, CORRADI M. Seismic retrofit of stone walls with timber panels and steel wire ropes [J]. Structures & Buildings, 2020, 174 (5): 1-30.
- [15] FRERRETTI E. Wire ropes and CFRP strips to provide masonry walls with out-of-plane strengthening [J]. Materials, 2019, 12 (17): 2712.
- [16] HARYANTO Y, SATYARNO I, SULISTYO D. Strength and ductility of reinforced concrete T-beams strengthened in the negative moment region with wire rope and mortar composite [C]. Journal of the Civil Engineering Forum. 2012, 21 (1): 1163-1170.
- [17] MIAO W, GUO Z X, YE Y. Performance of composite stone beams with prestressed NSM longitudinal CFRP reinforcement subjected to bending [J]. Engineering Structures, 2023, 277: 115423.