

# 铝合金型材嵌缝加固砖砌体压剪性能试验研究

赵亚军<sup>1,2</sup>, 滕利群<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:** 砌体结构在地震灾害下常因抗剪承载力不足而发生层间破坏, 在灰缝中嵌入筋材可提高砖砌体结构的抗剪性能, 但各层筋材之间缺少层间联系。为提高加固砌体结构整体性, 提出采用角铝的一侧翼缘嵌缝, 铝合金带连接两层角铝的另一侧翼缘, 形成具有层间联系的嵌缝加固系统, 通过压剪试验研究加固系统对砌体结构的抗剪加固机理。结果表明: 铝合金型材嵌缝的加固形式能显著提高砌体结构的抗剪强度, 不同加固形式试件的抗剪强度比未加固试件提高了 28.72%~88.29%; 角铝的抗弯截面系数较高, 使嵌入的一侧翼缘能够保持直线, 利于角铝嵌缝翼缘两侧砌体粘结; 铝合金带受压稳定性较差, 连接嵌缝角铝的铝合金带受拉时, 加固效果优于铝合金带受压, 且铝合金带与角铝之间的拉结作用能有效防止砌体墙的层间破坏, 抑制裂缝扩展, 提升砌体结构的整体性。

**关键词:** 铝合金型材; 砌体结构; 嵌缝加固; 对角剪切; 压剪性能

中图分类号: TU362

文献标志码: A

## Experimental study on diagonal shear performance of brick masonry strengthened with embedded aluminum alloy profiles

ZHAO Yajun<sup>1,2</sup>, TENG Liqun<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. Demonstration Center for Experimental Teaching of Mechanics, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

**Abstract:** Under earthquake disasters, masonry structures often cause damage between layers due to insufficient shear bearing capacity. Embedding bars in mortar seam can improve the shear resistance of brick masonry structures, but the connection between layers of reinforcements is lacking. In order to improve the integrity of reinforced masonry structures, this paper proposes to use one flange of angle aluminum for caulking, and the aluminum alloy strip for connecting the other flange of the two layers of angle aluminum, to form a seam reinforcement system with interlayer connection. Through the compression shear test of the strengthened specimens, the shear strengthening mechanism of the strengthening system to the masonry structure is studied. The results show that the reinforcement form of the reinforcement using aluminum alloy profiles for caulking can significantly improve the shear strength of the masonry structure, and the shear strength of different strengthened specimens is 28.72% to 88.29% higher than that of the unstrengthened specimens. The bending section coefficient of angle aluminum is high so that the embedded flange can keep a straight line, which is beneficial to the masonry bonding on both sides of the angle aluminum caulking flange. The aluminum alloy strip has poor compressive stability. When the aluminum alloy strip connecting the caulked angle aluminum is under tension, the reinforcement effect is better than when it is under compression. And the tie action between the aluminum alloy strip and angle

收稿日期: 2024-03-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178137)

作者简介: 赵亚军(1979—), 男, 河南汤阴人, 副教授, 博士, 主要从事工程结构加固方面的研究。

E-mail: zhaoyajun@hebeu.edu.cn

滕利群(2000—), 男, 安徽芜湖人, 硕士研究生, 主要从事工程结构加固方面的研究, 本文通信作者。

E-mail: tengliqun2000@163.com

aluminum can effectively prevent the interlaminar failure of masonry wall, inhibit the expansion of cracks, and improve the integrity of masonry structure.

**Key words:** aluminum alloy profiles; masonry structure; caulking reinforcement; diagonal shear; shear performance

砌体结构是我国大多数老旧住宅的主体结构,组成砌体结构的砖、石、砂浆属于脆性材料,其抗压强度较高,抗拉、抗剪性能较差。由于材料性能劣化,老旧砌体结构抗压和抗剪承载力大幅降低<sup>[1]</sup>,在实施城市更新过程中亟待解决老旧住宅抗剪性能不足的问题,可以采用砌体灰缝嵌入增强材料进行加固补强<sup>[2]</sup>。

嵌入式加固法能够有效增强工程结构的强度和刚度,提高结构安全性和可靠性,保护加固材料免受外部环境侵蚀,延缓发生黏结剥落破坏、抗冲击性强等优点<sup>[3]</sup>。国内外学者对嵌缝加固砌体结构进行了大量研究,结果发现:采用工程水泥基复合材料嵌缝加固砖砌体可以有效减缓砖砌体内部裂缝的开展,工程水泥基复合材料具有较高的界面黏结能力、抗拉强度和抗剪强度,嵌缝加固后显著提高试件的抗剪承载能力和破坏时的整体性<sup>[4]</sup>。针对砂浆性能退化,通过置换砂浆来提高砌体结构抗剪承载能力和剪切变形能力,延缓试件开裂,且不同置换深度对提高砌体抗剪性能均有显著作用,抗剪性能存在一定的差异<sup>[5-7]</sup>。采用灰缝嵌入钢筋加固砖砌体墙可以提高水平抗剪极限承载力,耗能能力有较大幅度提高<sup>[8-9]</sup>,灰缝嵌入钢丝绳能够增加砌体结构抵抗平面外的作用,有效避免墙体的面外摇摆现象<sup>[10]</sup>。采用增强聚合物(fiber reinforced polymer, FRP)带或板嵌入式加固砌体墙可以改变墙体的破坏模式,提高墙体的水平抗剪承载能力和变形能力,耗能能力更强<sup>[11-13]</sup>。

但在嵌缝加固砌体结构的方法中,工程水泥基复合材料嵌缝和置换砂浆虽在一定程度上提高整体性和承载能力,但无法改变砌体结构脆性破坏的特征,无法保证砌体结构的整体性。嵌入钢材或FRP材料虽改善脆性破坏效果显著,但钢材耐腐蚀性差,腐蚀后力学性能退化,FRP材料成本较高,耐火性能差,破坏时呈明显的脆性,且不易大角度加工与连接,容易造成层间破坏。相较于以上材料,铝合金作为一种轻质高强、耐腐蚀、变形性能优越以及加工后保持优良力学性能的材料<sup>[14-15]</sup>,在低温环境中强度和延性不会降低,特别适用于侵蚀、潮湿、低温和高寒等极端环境,在工程加固领域得到广泛应用<sup>[16-17]</sup>。但目前缺乏关于铝合金型材加固砖砌体压剪性能的影响研究,故提出角铝翼缘嵌缝与铝合金带连接的内外组合加固方法,该方法将角铝一侧翼缘嵌缝,再通过铝合金带拉结两层角铝的另一侧翼缘,将无筋砖砌体墙转变为具有层间约束的砌体墙,加固后基本不增加原结构自重,可用于老旧小区及农村住宅建筑砌体结构加固修缮。

## 1 试验概况

### 1.1 材料性能

试验选用的砌体砖为普通烧结砖,按照GB/T 2542—2012《砌墙砖试验方法》要求,测得砖抗压强度为13.2 MPa。砌筑及勾缝砂浆按照JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》要求,测得砂浆轴心抗压强度为3.9 MPa。采用6063-T5型铝合金,厚度为2 mm,宽度为40 mm,根据GB/T 228.1—2021《金属材料拉伸试验》要求进行拉伸试验,铝合金实测极限抗拉强度为234 MPa,弹性模量为60.7 GPa,极限应变接近0.20。

### 1.2 试件设计与制作

试验共设计6片墙体作为试件,分为3种加固类型,其中编号为UW的试件为未加固墙体,砖砌体试件尺寸长×高×厚均为500 mm×500 mm×240 mm,试件加固方案如图1所示。

墙体灰缝砂浆厚10 mm,嵌缝深度为40 mm,试件砌筑时用10 mm厚的板材在设定的灰缝位置预留40 mm深的槽缝。试件砌筑完成后养护14 d拆除板材,清理槽内的灰尘,进行湿润处理,将砂浆嵌入到槽的一半深度,然后在槽缝中嵌入角铝翼缘,用砂浆填满槽缝完成勾缝工作,通过螺栓连接铝合金带完成加固,再自然养护28 d后进行试验,试件砌筑、留缝等制作过程如图2所示。

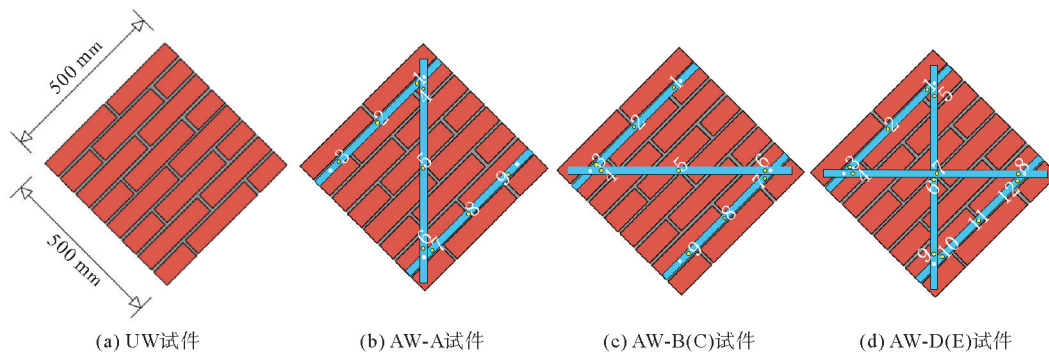


图 1 试件示意图及铝合金应变测点布置

Fig. 1 Schematic diagram of specimens and layout of aluminum alloy



图 2 试件砌筑和嵌缝过程

Fig. 2 Specimen masonry and caulking process

### 1.3 加载方案

根据砌体对角剪切试验规范(ATSM E519/E519M—22)规定的方法对砌体墙进行压剪性能测试,为保证试件角部均匀受力,使用两个加载钢座。试验使用电液伺服压力试验机进行加载,在未加固面制作散斑,利用数字图像相关(digital image correlation, DIC)技术采集全场位移和应变,沿铝合金材料长度方向均匀布置应变片,每根 3 个应变片,间距 150 mm,试件的应变片布置如图 1 所示。试验采用位移控制加载,速率 0.03 mm/s,加载过程中加载力达到峰值荷载的 50%或试件发生明显破坏时停止加载,试验装置如图 3 所示。

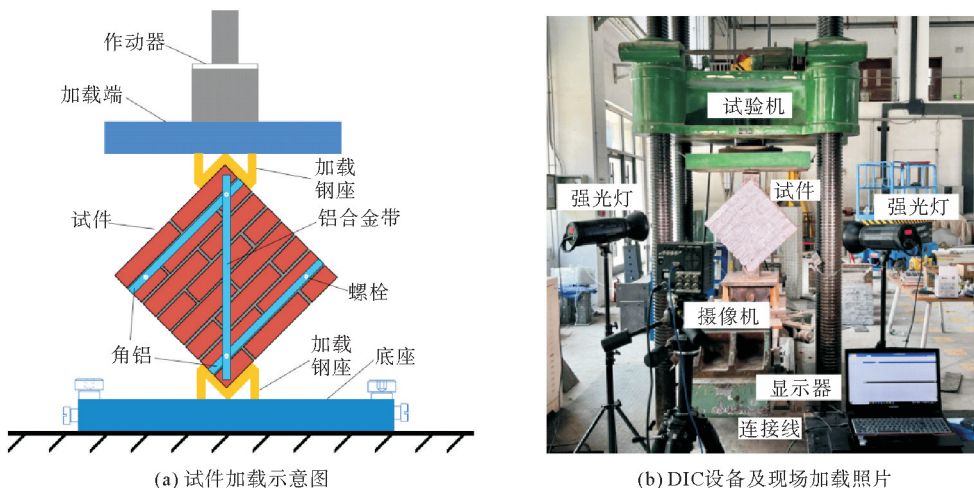


图 3 对角剪切加载试验图

Fig. 3 Diagonal shear loading test plot

## 2 试验现象及破坏形态

### 2.1 未加固墙体

在加载初期,未加固试件 UW 处于弹性阶段,没有出现明显裂缝。达到峰值荷载后,墙体出现阶梯状裂缝并沿砂浆缝开展。当主裂缝沿着左侧中部灰缝方向发展到下钢座位置时,试件发生剪切滑移破坏,破坏形态见图 4(a)。



图 4 试件破坏形态

Fig. 4 Failure pattern of the specimen

### 2.2 “Z”字型加固墙体

“Z”字型加固试件 AW-A,在加载过程中,裂缝从右侧偏下部出现并向下角部发展,但裂缝并未穿过嵌缝层,说明角铝翼缘嵌缝阻止裂缝向下延伸。铝合金带受压稳定性较差,导致铝合金带受压屈曲明显。在荷载下降阶段,破坏位置裂缝沿灰缝层延伸明显,形成一条贯通主裂缝后发生剪切滑移破坏,破坏形态如图 4(b)所示。

### 2.3 反“Z”字型加固墙体

反“Z”字型加固试件 AW-B 和 AW-C 破坏过程相似,以试件 AW-C 破坏形态为例。在加载的初始阶段,铝合金框架与砌体墙协同工作。当达到开裂荷载后,墙体沿对角线方向出现裂缝,铝合金带通过受拉提供层间约束。在达到峰值荷载后,墙体退出工作,荷载主要由铝合金框架承担。当主裂缝沿对角方向发展至角铝翼缘嵌缝层时,试件发生剪压破坏,此时裂缝并未穿过角铝嵌缝层,说明角铝嵌缝阻止裂缝延伸,破坏形态如图 4(c)。

### 2.4 “8”字型加固墙体

“8”字型加固试件 AW-D 和 AW-E 破坏过程相似,以试件 AW-D 破坏形态为例。在加载初期,铝合金框架与墙体协同工作。随着荷载增大,试件的上钢座附近产生裂缝并沿对角向下发展至角铝嵌缝层停止延伸。在墙体破坏后,荷载主要由铝合金框架承担,竖向铝合金带受压,水平铝合金带受拉,二者交界处出现明显凹陷,在铝合金框架屈服后试件发生剪压破坏,破坏形态如图 4(d)。

综上所述,砖砌体试件在对角压剪作用下的破坏形态主要有剪切滑移破坏(UW、AW-A)和剪压破坏(AW-B、AW-C、AW-D、AW-E)两种典型形式。裂缝分为沿中部开裂向下延伸呈阶梯状破坏和沿试件对角线贯通破坏。连接两层角铝翼缘的铝合金带受拉时,改变砌体墙的破坏模式,角铝翼缘嵌缝与铝合金带连接的内外组合加固能够有效防止砌体结构的层间破坏,提升试件的整体性。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 荷载-位移曲线分析

试件加载前进行 5 kN 预加载,各试件的荷载-位移曲线如图 5 所示。可以看出,在达到荷载峰值后,曲线迅速下降,呈现明显的脆性破坏特征。当荷载达到 60 kN 后,试件 AW-A 的荷载-位移曲线斜率大于未加

固试件荷载-位移曲线斜率,试件刚度增大,试件 AW-A 的峰值荷载比试件 UW 提高 28.87%。说明“Z”字型加固可以提升试件的承载能力,因铝合金带受压稳定性较差,仅角铝翼缘嵌缝加固的效果提升幅度较小。

试件 AW-B、AW-C 在加载初期荷载-位移曲线较平缓,出现拐点后斜率增大,峰值荷载比试件 UW 分别提高 50.63%和 72.89%。说明反“Z”字型加固在加载过程中角铝翼缘嵌缝与铝合金带之间的拉结作用有效提高了试件的刚度,在一定程度上减缓试件裂缝的扩展,对于改善砌体结构的脆性破坏起到明显效果。

试件 AW-D、AW-E 在加载过程中荷载-位移曲线斜率不断增大,过峰值荷载后曲线急剧下降,峰值荷载比试件 UW 分别提高 88.25%和 82.08%。“8”字型加固试件在加载过程中铝合金带既有受拉也有受压,在墙体出现裂缝后,该形式角铝翼缘嵌缝与铝合金带之间的拉结作用更强,延缓裂缝的扩展,刚度提升显著,对砌体墙起到较强的层间约束作用。

角铝翼缘嵌缝与铝合金带连接的加固试件可提高试件的承载能力,强度显著提升。不同加固形式的荷载-位移曲线变化趋势有相似之处,但不同加固方式提高试件承载能力的幅度存在差异。

### 3.2 强度及延性分析

根据砌体对角剪切试验规范(ATSM E519/E519M—22)开展对角剪切试验,试验结果见表 1。其中延性系数的计算是通过 DIC 采集的墙体表面全场应变,采用荷载下降至峰值荷载的 50%时对应的横、纵向应变,与峰值荷载下对应剪切应变之比作为横、纵向延性系数。可以看出,角铝翼缘嵌缝与铝合金带连接的加固形式能够有效提升试件的抗剪强度,当加固类型为“8”字型时,试件 AW-D 和 AW-E 比试件 UW 剪切强度分别提高 88.29%和 82.13%、刚度分别提高 215.71%和 189.15%,试件的强度和刚度提升效果最为显著。

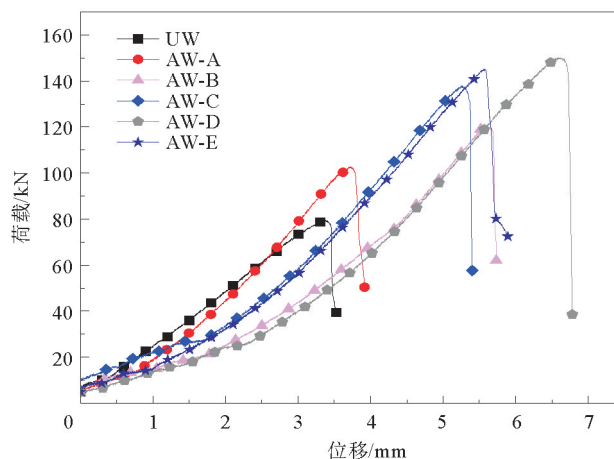


图 5 不同加固类型试件荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of different reinforcement types

表 1 对角剪切试件试验结果

Table 1 Test results of diagonal shear specimens

编号	峰值荷载/kN	峰值荷载对应位移/mm	剪切强度/MPa	强度提高百分率/%	刚度/MPa	横向延性系数	纵向延性系数
UW	79.75	3.37	0.470	—	123.5	2.72	0.32
AW-A	102.77	3.72	0.605	28.72	131.6	2.75	0.33
AW-B	120.13	5.56	0.708	50.63	150.1	3.06	0.82
AW-C	137.88	4.25	0.812	72.76	167.5	3.14	0.57
AW-D	150.13	6.58	0.885	88.29	389.9	3.51	1.09
AW-E	145.21	5.57	0.856	82.13	357.1	3.80	1.13

“8”字型嵌缝加固试件的横向延性系数大于反“Z”字型嵌缝加固试件,原因是“8”字型嵌缝加固对砌体层间约束作用更加显著,延缓裂缝的扩展,过峰值荷载后裂缝宽度无明显变化。在铝合金框架屈服退出工作后,裂缝快速发展致使试件破坏。“Z”字型嵌缝加固试件因铝合金带竖向受压,对砌体结构横向层间约束作用较小,因此横向延性系数未发生明显变化。

在墙体退出工作后,铝合金框架承担主要荷载,此时角铝翼缘嵌缝与铝合金带发挥层间约束作用,提高试件的整体强度和刚度,进而提升试件的纵向变形能力,整个结构的延性有一定的提升,导致加固试件的纵向延性系数均大于未加固试件。

### 3.3 应变场分析

通过 DIC 采集系统获取试件未加固面在加载过程中的全场应变。荷载达到 50 kN 时的,墙体表面剪切应变云图如图 6 所示。由于试件均是单面加固,加固面有铝框架的约束,具有层间联系,受压过程中约束了层间作用,而未加固面在受压过程中未得到相应约束,导致墙体两面层间作用不对称,因此加固试件的墙体表面最大剪切应变值略大于未加固试件。不同加固类型试件(“Z”字型、反“Z”字型、“8”字型)的最大剪切应变值,比未加固试件分别增加 15.49%、15.96%和 19.25%。

未加固试件的剪切应变主要集中在上、下加载端附近及试件边缘区域,中间区域应变分布较均匀。“Z”字型加固试件的应变,沿竖向对角线附近和角铝嵌缝层区域的剪切应变比其他区域应变小,原因是角铝翼缘嵌缝和竖向铝合金带受压起到减小剪切应变的作用。反“Z”字型加固试件的剪切应变在角铝翼缘嵌缝层明显小于未嵌缝层,由图 6(c)可以看出,嵌缝处有明显分层,说明角铝翼缘嵌缝能够降低嵌缝层剪切应变。“8”字型加固试件的剪切应变,沿横向对角线对称分布在整個墙面,角铝嵌缝层剪切应变小于其他区域,说明该形式加固能够有效提高墙体剪切强度。

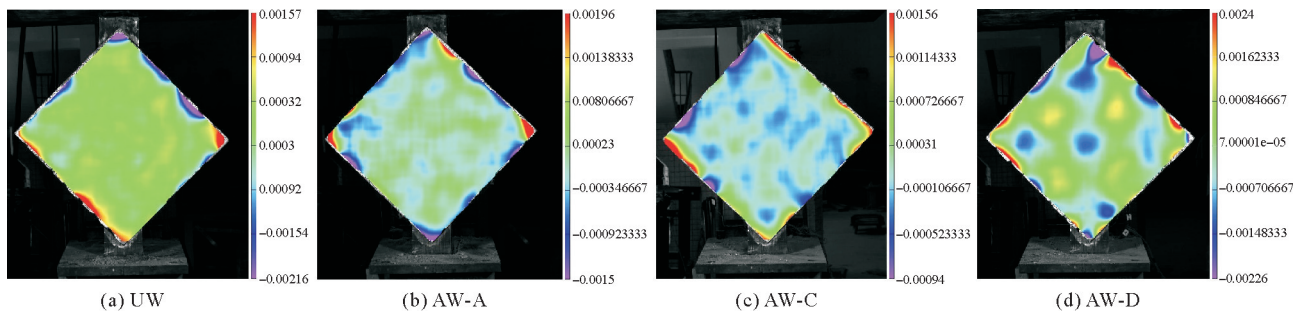


图 6 相同荷载下应变云图

Fig. 6 Strain cloud map under the same load

在峰值荷载下墙体表面剪切应变云图如图 7 所示,反“Z”字型加固和“8”字型加固的墙体表面最大剪切应变值均小于未加固试件,其最大应变值比未加固试件降低 15.71%和 60.35%。反“Z”字型、“8”字型加固试件在墙体退出工作后,角铝翼缘嵌缝与铝合金带受拉共同承担主要荷载,降低墙体表面的最大剪切应变值。“Z”字型加固的墙体表面最大应变值略大于未加固试件,说明“Z”字型加固试件在墙体退出工作后,角铝翼缘嵌缝与铝合金带受压共同承担主要荷载,而铝合金带受压稳定性较差,未降低墙体表面最大剪切应变值。由此说明,当墙体在峰值荷载下,应变主要集中在裂缝处,墙体发生破坏后,在铝合金带受拉作用下,裂缝的扩展有所减缓,进一步验证了铝合金框架可以有效防止砌体结构层间破坏。

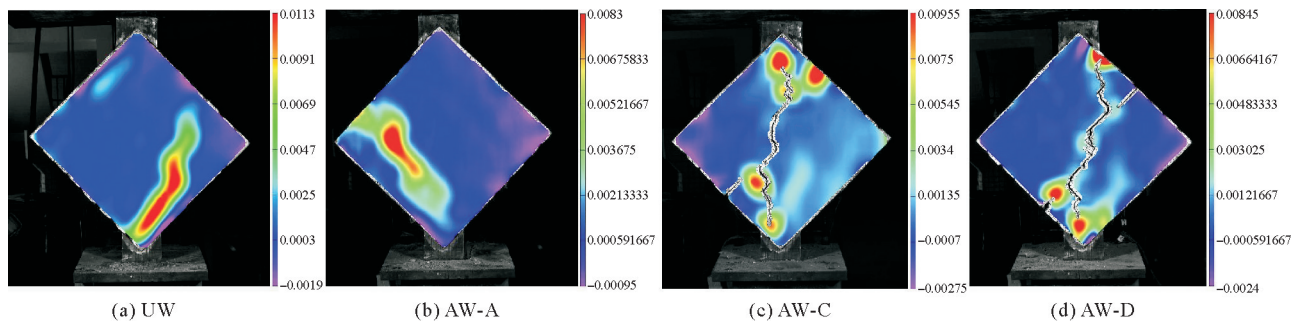


图 7 峰值荷载下应变云图

Fig. 7 Strain cloud map under peak load

### 3.4 铝合金型材应变分析

铝合金型材应变曲线如图 8 所示,由图 8(a)可以看出,试件 AW-A 角铝上 1 号和 8 号测点应变在初始

阶段由于角铝和墙体协同工作整体受压,曲线表现出平缓下降趋势。达到峰值荷载,墙体破坏后,荷载主要由铝合金框架承担,角铝整体受压但测点处受铝合金带的拉力作用,导致曲线出现拐点上升。5号测点位于铝合金带中部,在达到峰值荷载后,应变曲线出现拐点,屈曲位置受压变形较大导致应变急剧增大,铝合金带受力形式如图9(a)所示。由图8(b)可以看出,试件AW-C角铝上2号和9号测点应变曲线初始阶段下降平缓。9号测点靠近裂缝处,在墙体破坏后,由于裂缝扩展,铝合金带与角铝受拉导致应变出现拐点急剧上升。2号测点远离铝合金带与角铝连接处,一直受压导致曲线总体呈平缓下降趋势。铝合金带上4号、5号和6号测点应变变化主要是铝合金带受拉变形所致,由初期应变发展较平缓到出现拐点应变骤增,铝合金带受力形式如图9(b)所示。

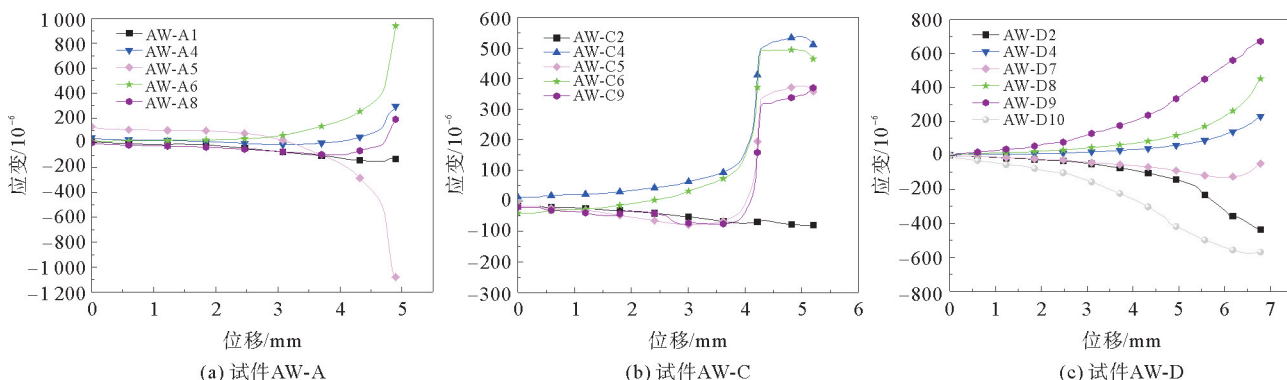


图8 铝合金型材应变曲线

Fig. 8 Strain curve of aluminum alloy profile

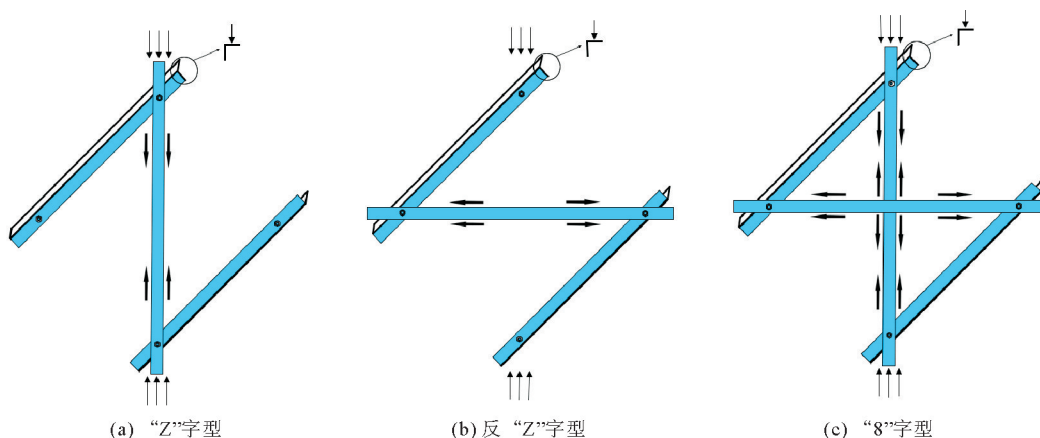


图9 铝合金带受力示意图

Fig. 9 Schematic diagram of aluminum alloy belt stress bearing

由图8(c)可以看出,试件AW-D角铝上2号和10号测点应变曲线,初始阶段平缓下降。在墙体破坏后,由铝合金框架承担主要荷载,角铝受压导致应变出现拐点,但应变增长速度比试件AW-A和AW-B的角铝应变增长速度大幅降低。横向铝合金带上4号和8号测点应变变化,主要是铝合金带受拉变形导致应变增大。竖向铝合金带上9号测点靠近下加载端,在铝合金带受压屈曲后,整体受压但测点处局部受拉,出现应变增大现象。7号测点位于铝合金带交汇处,初始阶段应变曲线平缓下降。在墙体破坏交汇处出现明显凹陷,导致应变曲线出现拐点上升,铝合金带变形形态如图9(c)所示。

通过对铝合金型材应变进行分析,角铝上的应变曲线大多趋于平缓,达到峰值荷载后,应变也并无太大变化。原因是角铝抗弯截面系数较高,角铝一侧翼缘嵌缝,角铝的直角构造使嵌入翼缘部分在受力时能够保持直线,变形较小,有利于两层砌体之间的粘结。而灰缝嵌筋承受荷载后钢筋会发生较大变形,使砌块被拱

起,破坏了两层砌体之间黏结力,嵌筋与角铝翼缘嵌缝受力变形如图 10 所示。

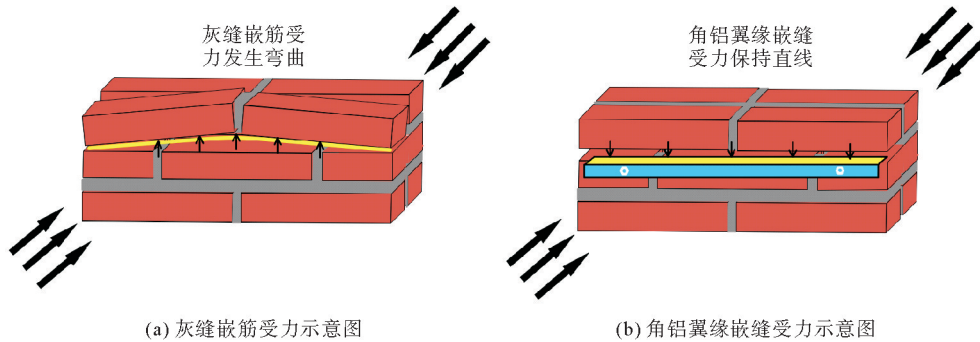


图 10 嵌缝受力变形示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the insert force deformation

铝合金带上的应变数值比角铝的大,铝合金带的变形程度大于角铝。当连接铝合金带受拉时,应变明显小于铝合金带受压。说明铝合金带受拉的加固形式优于铝合金带受压,同时也说明铝合金带受拉时对砌体墙的增强效果更显著。从图 8 中的应变曲线可以看出,铝合金带与角铝受力不均匀,因此加固时应考虑减少两层角铝嵌缝间隔,再连接铝合金带进行层间约束,充分发挥铝合金材料的高强优势,以显著提高加固效果。

#### 4 结 论

1) 铝合金型材嵌缝加固后,墙体的抗剪强度均有一定程度的提高,不同加固形式试件比未加固试件提高了 28.72%~88.29%。“8”字型加固的墙体增强效果显著,墙体的承载力、刚度和横、纵向延性系数提高幅度分别为 88.25%、215.71%、39.71%和 253.1%。

2) 角铝翼缘嵌缝后,由于角铝的抗弯截面系数较高,使嵌入的一侧翼缘在受力时能够保持直线,变形较小,有利于两层砌体之间的黏结。

3) 相同角铝翼缘嵌缝条件下,铝合金带的受力形式对砌体抗剪性能的影响显著。连接嵌缝角铝的铝合金带受拉时,砌体试件在压剪作用下发生剪压破坏。连接嵌缝角铝的铝合金带受压时,砌体试件在压剪作用下发生剪切滑移破坏,破坏模式改变。铝合金框架约束层间变形,抑制裂缝扩展,提升试件整体性。

#### 参考文献:

- [1] 王志永,梁斌,张海,等. 乡镇农居抗震性能综合评价[J]. 建筑结构,2022,52(17):39-44.  
WANG Zhiyong,LIANG Bin,ZHANG Hai,et al. Comprehensive evaluation of seismic performance of farmhouse[J]. Building Structure,2022,52(17):39-44.
- [2] 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.  
JING Jiejing,ZHOU Changdong. Research progress on masonry structures strengthened with near-surface mounted fiber reinforced polymer[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering,2023,45(1):209-224.
- [3] 邢国华,黄娇,罗小宝,等. 预应力铝合金筋嵌入式补强钢筋混凝土梁裂缝分析与计算[J]. 工程力学,2022,39(3):171-181.  
XING Guohua,HUANG Jiao,LUO Xiaobao,et al. Crack calculation and analysis of concrete beams strengthened with near-surface mounted prestressed aluminum alloy bars[J]. Engineering Mechanics,2022,39(3):171-181.
- [4] 周长东,张晨,景杰婧. ECC 嵌缝加固砖砌体的剪切性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2023,50(11):128-135.  
ZHOU Changdong,ZHANG Chen,JING Jiejing. Experimental study on shear performance of brick masonry strengthened with caulking ECC[J]. Journal of Hunan University (Natural Science),2023,50(11):128-135.
- [5] 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.



- SHI Jianguang, ZHENG Xuefeng, LIN Shuzhi, et al. Experimental study on effect of replacement mortar strength and depth on shear performance of masonry strengthened with replacement mortar[J]. *Building Structure*, 2021, 51(13): 126-131.
- [6] 郑煌典, 石建光, 谢益人. 竖向压应力及高宽比对置换砂浆加固砖墙体的抗震性能研究[J]. *工程抗震与加固改造*, 2020, 42(3): 69-75.
- ZHENG Huangdian, SHI Jianguang, XIE Yiren. Study on seismic behavior of vertical compression stress and aspect ratio for replacing mortar reinforced brick wall[J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2020, 42(3): 69-75.
- [7] 王伟明, 刘廷滨, 张家玮, 等. 嵌缝加固砖砌体沿通缝抗剪性能研究[J]. *建筑结构*, 2020, 50(6): 114-117.
- WANG Weiming, LIU Tingbin, ZHANG Jiawei, et al. Research on shear performance of reinforced brick masonry by embedded mortar along horizontal bed joint[J]. *Building Structure*, 2020, 50(6): 114-117.
- [8] 潘磊, 刘廷滨, 裴先科, 等. 水平嵌筋加固砖砌体墙抗震性能试验研究[J]. *世界地震工程*, 2019, 35(2): 157-164.
- PAN Lei, LIU Tingbin, PEI Xianke, et al. Experimental study on seismic performance of brick walls strengthened with embedded horizontal steel bars[J]. *World Earthquake Engineering*, 2019, 35(2): 157-164.
- [9] 刘链波, 何忠茂, 杨国江, 等. 嵌筋加固墙体抗震性能试验研究[J]. *工程抗震与加固改造*, 2023, 45(4): 118-122.
- LIU Lianbo, HE Zhongmao, YANG Guojiang, et al. Experimental study on seismic behavior of wall reinforcement with embedded bars[J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2023, 45(4): 118-122.
- [10] CORRADI M, SPERANZINI E, BISCOTTI G. Out-of-plane reinforcement of masonry walls using joint-embedded steel cables[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2020, 18(10): 4755-4782.
- [11] JAFARI A, OSKOEI A V, BAZLI M, et al. Effect of the FRP sheet's arrays and NSM FRP bars on in-plane behavior of URM walls[J]. *Journal of Building Engineering*, 2018, 20: 679-695.
- [12] KONTHESSINGHA K M C, MASIA M J, PETERSEN R B, et al. Static cyclic in-plane shear response of damaged masonry walls retrofitted with NSM FRP strips: An experimental evaluation[J]. *Engineering Structures*, 2013, 50: 126-136.
- [13] 周长东, 张腾, 景杰婧. 碳纤维板嵌缝加固砖墙抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(增1): 323-330.
- ZHOU Changdong, ZHANG Teng, JING Jiejing. Experimental study on seismic performance of brick wall strengthened with seam embedded CFRP plates[J]. *Journal of Building Structure*, 2020, 41(S1): 323-330.
- [14] 吴昊, 徐福泉, 谢剑. 不同铝合金板加固方式对 RC 梁抗弯性能的影响[J]. *工程抗震与加固改造*, 2023, 45(1): 115-122.
- WU Hao, XU Fuquan, XIE Jian. Influence of different strengthening methods of aluminum alloy plates on the flexural performance of RC beams[J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2023, 45(1): 115-122.
- [15] 鲁宽亮, 张春芝, 王宁, 等. MIG 焊 6063/7075 铝合金接头的金相组织、耐腐蚀性和力学性能研究[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2023, 42(4): 60-69.
- LU Kuanliang, ZHANG Chunzhi, WANG Ning, et al. Microstructure, corrosion resistance and mechanical properties of MIG welded 6060/7075 aluminum alloy joints[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2023, 42(4): 60-69.
- [16] 杨立军, 邓志恒, 杨海峰. 铝合金板加固钢筋混凝土梁的剥离破坏机理试验研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2020, 42(6): 95-102.
- YANG Lijun, DENG Zhiheng, YANG Haifeng. Experimental analysis of debonding failure mechanism of reinforced concrete beams strengthened with aluminum alloy plate[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, 42(6): 95-102.
- [17] 邢国华, 谢鹏宇, 宋启奎, 等. 铝合金筋体外预应力加固混凝土梁受力性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2016, 35(3): 831-836.
- XING Guohua, XIE Pengyu, SONG Qixi, et al. Behavior of reinforced concrete beams strengthened by external prestressed aluminum alloy bars[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2016, 35(3): 831-836.

(责任编辑:吕海亮)