

# In-Plane Mechanical Behavior of Ancient Masonry Walls Strengthened by BFRP Composite Material

Zhen Lei, Li Zhang, Zixia Duan, Liu Bai

School of Architecture and Planning, Yunnan University, Kunming Yunnan  
Email: leizhen0916@163.com

Received: Aug. 8<sup>th</sup>, 2017; accepted: Sep. 3<sup>rd</sup>, 2017; published: Sep. 13<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

This paper evaluates the mechanical behavior of ancient masonry walls strengthened by Basalt Fiber Reinforced Polymer (BFRP) composite material. Three kinds of masonry walls (unreinforced walls without opening, confined walls with or without opening) were considered. Based on the seismic performance tests of three masonry walls without any strengthening scheme and three walls strengthened with BFRPP directly under in-plane increasing cyclic lateral loading and constant vertical compression loading, failure characteristics of each specimen was described. The hysteretic curves and skeleton curve, ultimate shear strength and displacement, bearing capacity and stiffness degradation characteristics, deformation recovery capacity, energy dissipation behavior and FRP strain were compared and analyzed. The results show that the strengthening technique of bonding BFRP sheets can effectively enhance the ultimate shear strength and deformation capacity, and the improvement level of the latter is much larger than that of the former. FRP strengthened ancient masonry walls show a distinct slowdown in bear capacity and stiffness degradation, which also have better energy dissipation capacity as well as deformation recovery capacity. This technics can eventually extend the service life of the original masonry structure and guarantee the aseismic ability.

## Keywords

BFRP Composite, Strengthening, Masonry Wall, In-Plane, Seismic Performance

---

# BFRP复合材料加固老旧砌体砖墙的平面内受力性能

雷 真, 张 力, 段自侠, 白柳

云南大学, 建筑与规划学院, 云南 昆明  
Email: leizhen0916@163.com

收稿日期: 2017年8月8日; 录用日期: 2017年9月3日; 发布日期: 2017年9月13日

## 摘要

本文研究了玄武岩纤维复合材料(Basalt Fiber Reinforced Polymer, BFRP)加固老旧砌体砖墙平面内受力性能, 考虑了无筋不开洞、带构造柱开洞、带构造柱不开洞三种砖墙形式。通过3片未加固砖墙和3片纤维直接加固砖墙在低周往复水平加载作用下的抗震性能试验, 得到各试件的破坏特征, 研究BFRP加固前后砖墙的滞回曲线和骨架曲线、极限抗剪和变形性能、承载力及刚度退化特性、变形恢复能力、耗能性能及纤维复合材料应变。研究结果表明: 粘贴BFRP复合材料可以有效地提高不同形式老旧砌体砖墙的极限抗剪强度和变形能力, 且后者提高幅度远大于前者; 纤维加固试件的承载力及刚度退化明显减缓, 耗能能力增强, 变形恢复能力改善, 进而延长原结构的使用寿命, 保证结构抗震能力。

## 关键词

BFRP复合材料, 加固, 砌体砖墙, 平面内, 抗震性能

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

在云南省地震区范围内, 现有砌体结构房屋存量巨大且建设年代较为久远, 加之设计建造时较大部分房屋未充分考虑抗震要求。因此, 越来越多的砌体结构房屋亟待修复加固, 以满足目前不断完善的结构设计和抗震标准。相对于混凝土结构, 砌体结构多采用传统加固方法, 如增设扶壁柱法、钢筋网水泥砂浆面层加固法、外包角钢或钢筋混凝土加固法等。上述传统加固方法在一定程度上可以提高原结构构件的抗震能力, 使其达到安全、实用及耐久要求, 但是同时也存在着加固费用高、增加结构自重、施工周期长、湿作业等缺点, 极大限制了其进一步地广泛应用。面对大量需要修复加固的砌体结构, 纤维加固作为一种新兴加固技术, 以其轻质高强、施工便捷、适用面广等优点为砌体修复加固领域开辟了新的途径并逐渐被重视, 弥补了传统加固方法的不足[1] [2] [3] [4] [5]。

目前, 应用纤维增强复合材料加固砌体结构的试验研究及理论分析主要集中在无筋砌体墙体的加固, 考虑试件不同砌筑材料、高宽比、加载方式的影响, 加固方式常为对角[6]、水平[6]、斜向网格[7]、正向网格加固[8]、满布[9]等。

相比常用加固纤维(CFRP [1] [2] [3] [7]、GFRP [4] [5]), 玄武岩纤维复合材料(BFRP)因其具有较好的力学性能和稳定性, 且价格更低[10], 近年来在混凝土结构和砌体结构加固领域已逐渐被关注[11] [12] [13] [14]。本文以无筋不开洞、带构造柱开洞、带构造柱不开洞三种形式的砌体砖墙为研究对象, 进行了砖墙加固前后的平面内低周反复加载试验, 系统地分析 BFRP 复合材料对砌体结构的加固效果, 为砌体结构的纤维加固设计工作提供一定的试验依据。

## 2. 试验设计

### 2.1. 试件设计及加固设计

试验共砌筑无筋不开洞、带构造柱开洞、带构造柱不开洞砖墙各 2 片, 编号分别为 W1-W2, ZW1-ZW2, DW1-DW2。所有砖墙尺寸为  $2100 \times 1500 \times 240$  mm (高宽比为 5/7), 砖墙砌筑于钢筋混凝土底梁上, 砌筑方式为一顺一丁, 待砖墙养护后在墙体顶部安置加载梁, 具体截面尺寸如图 1 所示。为了确保混合砂浆试验过程中加载梁(底梁)、墙体两者之间实现刚接, 不产生相对滑移, 在底梁、加载梁上预留凹槽, 凹槽尺寸为  $2100 \times 270 \times 20$  mm, 梁、墙之间接触面进行凿毛处理并采用高强水泥砂浆连接[14]。所有试件均采用 MU10 实心粘土砖( $240 \times 115 \times 53$  mm)砌筑。为模拟老旧砌体建筑, 采用强度相对较低的 M5.0 和 M2.5 混合砂浆, 其中对无筋砖墙采用 M5.0 砂浆, 带构造柱砖墙采用 M2.5 砂浆。圈梁、构造柱的混凝土强度等级为 C20。纵筋、箍筋选用 I 级钢, 直径分别为 10 mm, 6 mm。试件材性试验结果如表 1 所示。

从三种不同形式的砌体砖墙中各选取 1 片(W2, ZW2, DW2)进行玄武岩纤维直接加固, 加固方式为双面混合加固。加固用玄武岩纤维布抗拉强度为 2303 MPa, 弹性模量为 105 GPa, 伸长率为 2.18%, 单位面积质量为  $341 \text{ g/m}^2$ , 纤维粘贴用胶选用 TGJ 型纤维粘贴专用胶[14]。加固试件明细见表 2。

纤维布的粘贴顺序: 为对斜向纤维布起一定的锚固作用, 先粘贴斜向纤维布, 再粘贴水平纤维布, 其中等高处水平纤维端部相互重叠并粘贴于墙体侧面, 即水平纤维端部封闭, 试件加固后如图 2。在纤维表面布置应变片以测试纤维在加载过程中应变变化情况(图 2), 同时在砖墙一侧沿高度 0, H/2, H 位置布置位移传感器。

### 2.2. 试验装置与加载制度

试验加载装置如图 3 所示。试验采用墙顶加载方式, 通过加载梁在砖墙顶面施加水平荷载和竖向荷

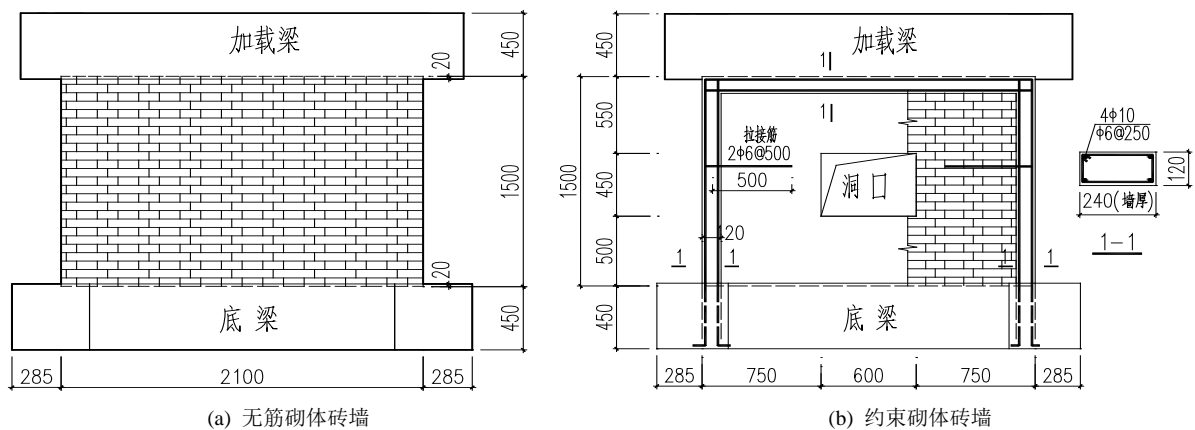


Figure 1. Specimen size (Unit: mm)

图 1. 试件尺寸(单位: mm)

Table 1. Main parameters of material

表 1. 材料主要参数(单位: MPa)

平均抗压强度		屈服抗拉强度			
M5.0 砂浆	M2.5 砂浆	砖	混凝土	Φ10	Φ6
4.8	1.9	12.8	27.0	402.5	377.3

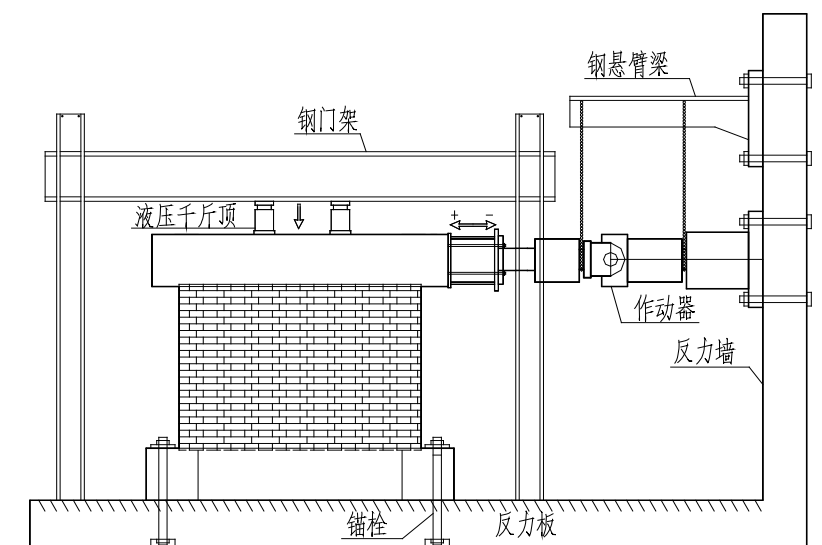
**Table 2.** Main parameters of test specimen  
**表 2.** 试件主要参数

类型	编号	加固方式(双面混合加固)	斜向纤维		水平纤维	
			层数	宽度/mm	层数(由上至下)	宽度/mm
无筋不开洞	W1	-	-	-	-	-
	SW2	W2 直接加固	2	150	1/1/1/2	150
带构造柱不开洞	ZW1	-	-	-	-	-
	SZW2	ZW2 直接加固	2	300	1/1/1/2	150
带构造柱开洞	DW1	-	-	-	-	-
	SDW2	DW2 直接加固	2	300	1/2	150



**Figure 2.** Fiber reinforced brick wall

**图 2.** 纤维加固砖墙示意图



**Figure 3.** Loading setup

**图 3.** 加载装置图



载。竖向荷载通过 2 台液压千斤顶在加载梁顶部一次性施加,千斤顶与钢门架之间设水平滑动滚轴,以实现梁端水平往复位移而限值其竖向位移。试验过程中竖向压应力保持恒定为 0.6 MPa,不含加载梁自重。由电液伺服往复作动器对试验架顶部施加低周反复水平荷载,以模拟砌体承重墙片往复受力。

水平荷载的施加采用荷载 - 位移双重控制方法。试件开裂前采用荷载控制方法分级加载,按每级 30 kN 递增,接近开裂荷载前减小级差,采用 10 kN 进行加载,每级循环 1 次;试件开裂后采用位移控制,以加载梁水平侧移  $a + 2k$  控制加载( $a$  为开裂时试件顶部加载梁位移,  $k = 1, 2, 3, \dots$ ),每级循环 1 次。当试件加载荷载下降到峰值荷载的 85% 时,加载结束[15]。

### 3. 试验破坏特征

#### 3.1. 未加固砌体砖墙

未加固试件(W1, ZW1, DW1)表现出以剪切破坏为主的失效模式,即在剪压加载状态下,当对角拉伸应力超过砖墙(混凝土)劈裂拉伸强度,砖墙(混凝土构件)发生明显斜向剪切裂缝,伴随局部墙脚处砖块或混凝土可能轻微压碎(图 4),试件达到峰值荷载后承载能力急剧下降,墙体形成主拉应力的剪切型破坏。

试件 W1 的变形和损伤集中在主裂缝处,双向主裂缝将墙体分为四个块体,裂缝快速发展致使被分隔的各块体间不断滑移,逐渐偏离初始平衡位置,反向加载也难使裂缝闭合,整个试件的破坏呈脆性性质。相比试件 W1,试件 ZW1, DW1 由于混凝土构件(圈梁、构造柱)的约束作用,墙体与构造柱紧密结合共同抵抗剪力作用;当墙体中形成主裂缝后,主裂缝的张开及墙体沿主裂缝的滑移均较小,同时墙体的其他部分不断产生新的裂缝,墙体主裂缝也延伸到两侧构造柱,最终整个砌体的裂缝发展较 W1 充分,主裂缝宽度较小,具有较好的延性性能。

#### 3.2. 纤维加固砌体砖墙

直接加固不开洞砌体砖墙(SW2, SZW2)试验破坏现象基本相似,均表现为以弯曲破坏为主的失效模式[14],具体表现为砖块严重压碎;同时砖墙未发现明显斜向剪切主裂缝,在水平、斜向纤维附近砖墙分布大量细微裂缝,个别砖墙有水平弯曲裂缝发展;砖墙表面纤维剥离、屈曲甚至断裂,破坏现象详见文献[14]。此外,试件 SZW2 中的混凝土构造柱底部也被严重压碎,纵向钢筋出现不同程度的屈服破坏(图 5(a))。

直接加固开洞砌体砖墙(SDW2)表现为剪 - 弯破坏的失效模式,试件的斜向纤维附近有明显剪切斜裂缝发展(图 5(b)),并延伸至构造柱(图 5(c)),将洞口边砖墙分隔成小块,但在水平和斜向纤维的约束作用,构造柱底部的混凝土剪切变形受到约束;随着加载的继续,洞口边砖墙也出现不同程度的开裂压碎(图 5(d))。与加固不开洞砌体砖墙试验现象类似,试件 SDW2 出现纤维空鼓、断裂现象(图 5(e)~图 5(f))。



Figure 4. Failure mode of unreinforced masonry wall  
图 4. 未加固砌体砖墙破坏形态



**Figure 5.** Failure mode of FRP-reinforced masonry wall  
**图 5.** 加固砌体砖墙破坏形态

## 4. 试验结果及分析

### 4.1. 滞回曲线和骨架曲线

根据试验过程中各试件的墙顶水平荷载和试件顶端相对于底端的位移，绘制各试件的滞回曲线，如图 6 所示。加载初期，滞回环面积较小，无明显残余变形，所有试件处于线弹性状态，因此滞回曲线近似呈直线状态，耗能能力较小；开裂后，滞回环变为反 S 形，并逐渐向水平轴倾斜，滞回曲线呈现出一定的捏拢现象，其中加固试件的滞回曲线由于后期纤维加固作用向位移轴靠拢速度较未加固试件略慢。加固试件滞回曲线的正反两个方向上，分别存在一个较明显的捏拢点，正反向加载过程中，滞回曲线通过该捏拢点。所有加固试件滞回曲线均较未加固对比试件更为丰满，表明砖墙采用玄武岩纤维加固后，其耗能能力有明显的提高；试件 SDW2 由于开洞影响，抗侧刚度受到削弱，耗能能力较未开洞试件的提高幅度较低。

将荷载 - 位移曲线中各加载级第一往复循环的峰值点所连成的包络线即得各试件骨架曲线，如图 7 所示。所有试件骨架曲线均表现为反 S 型，表明在低周反复加载作用下经历了线弹性、弹塑性和极限破坏 3 个受力阶段。直接加固试件在达到峰值荷载后其抗侧承载力退化速率较未加固试件更为缓慢，这主要是由于在强度下降阶段，纤维与砖墙共同受力，加固作用明显。

### 4.2. 极限抗剪和变形性能

试验过程中记录试件首条裂缝发展对应的墙顶水平荷载 ( $V_{cr}$ ) 和位移 ( $\Delta_{cr}$ )；加载峰值时 ( $V_u$ ) 对应峰值位移 ( $\Delta_u$ )；破坏时的荷载 ( $V_d$ ) 取 0.85 倍峰值荷载 ( $V_u$ )，对应位移为极限位移 ( $\Delta_d$ )。表 3 列出了试件在各个阶段下墙顶荷载、位移特征值及破坏转角，其中“+”、“-”分别表示推、拉加载方向。

由表可知：1) 纤维加固试件 (SW2, SZW2, SDW2) 的峰值荷载与开裂荷载之比介于 1.31~1.99，高出同类型未加固试件 (W1, ZW1, DW1) 比值，表明试件采用 BFRP 加固后具有更高的安全储备。2) 纤维加

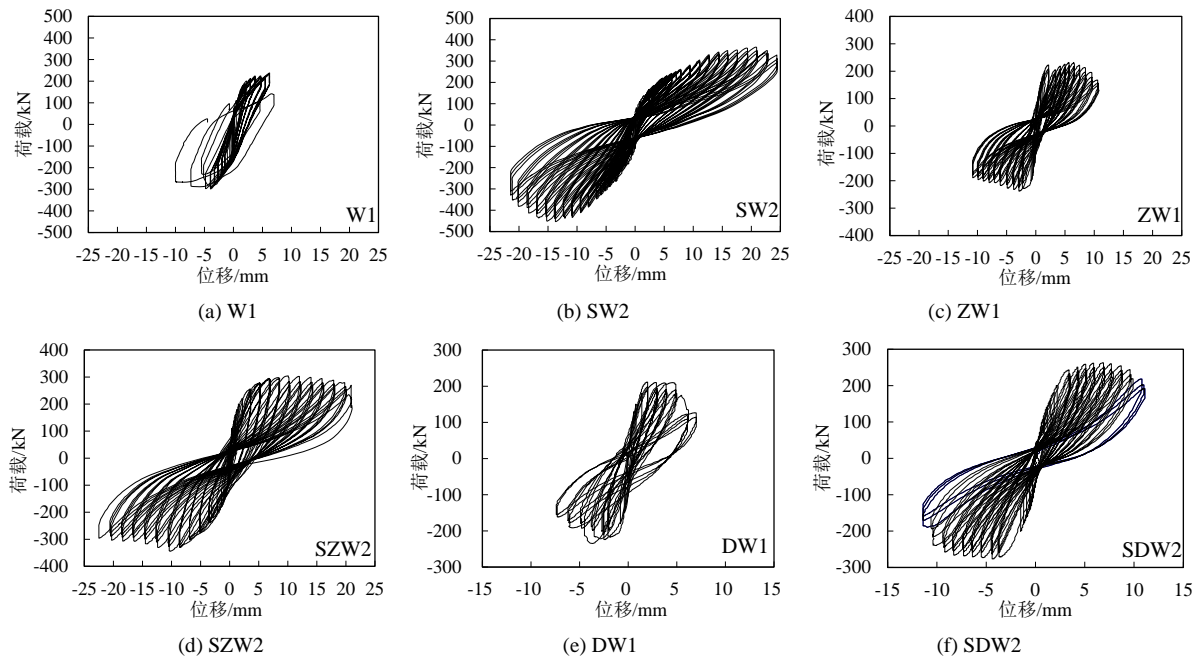


Figure 6. Load-displacement hysteretic curves

图 6. 荷载 - 位移滞回曲线

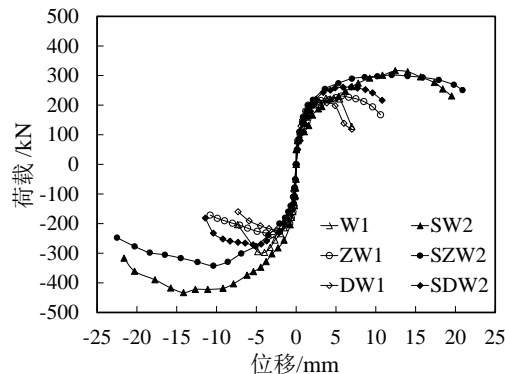


Figure 7. Load-displacement skeleton curves

图 7. 荷载 - 位移骨架曲线

固的峰值荷载较同类型未加固试件分别提高 56.1%, 37.5%, 23.0%, 同时极限位移分别提高 264.5%, 130.1%, 84.2%, 表明 BFRP 加固对试件峰值荷载和极限位移有显著提高, 且后者提高幅度明显高于前者。3) 无筋不开洞试件 SW2 提高幅度较带构造柱不开洞试件(SW2)高出 49.6%, 而试件 SW2 提高幅度较带构造柱开洞试件(SDW2)高出 63.0%, 可见加固试件抗剪承载力的提高与墙体材料强度、纤维用量、墙体类型均有关系, 同理对极限变形也如此。4) 纤维加固试件的开裂荷载较未加固试件均有提高, 提高幅度分别为 13.0%, 13.9%, 11.1%, 而对应的开裂位移提高幅度则更大, 分别为 163.6%, 69.2%, 72.7%。

### 4.3. 承载力和刚度退化

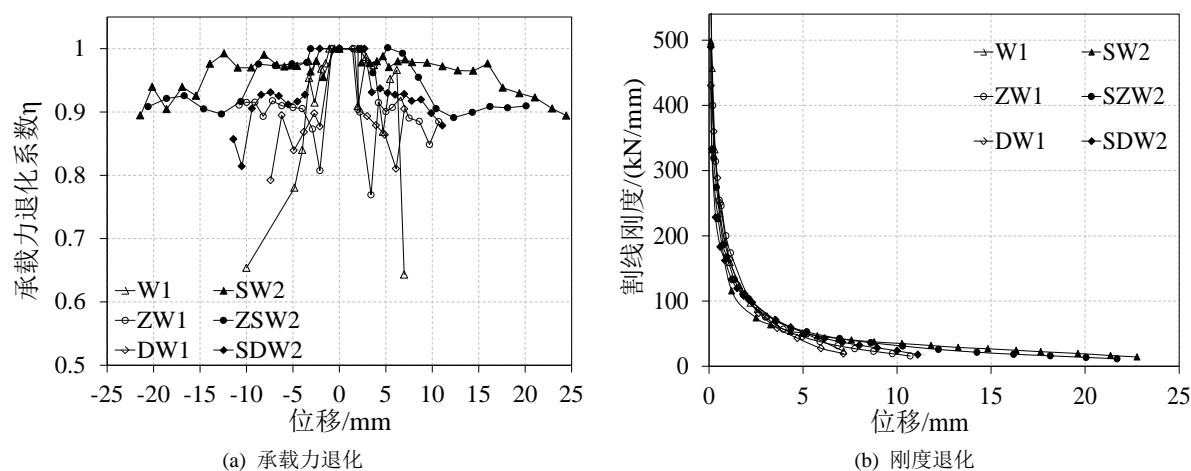
结构的承载力退化特性可用承载力退化系数  $\eta$  表示。该系数  $\eta$  是指同一位移幅值下末次循环的峰值点荷载值与首次循环的峰值点荷载值之比。所有砖墙承载力退化曲线如图 8(a)所示。

由图可知: 1) 所有试件承载力退化曲线, 承载力退化系数在整体上表现出随位移角增加而减小的趋



**Table 3.** Load-displace characteristic values  
**表 3.** 墙顶水平荷载 - 位移特征值

试件编号	开裂状态		峰值状态		破坏状态		$V_u/V_{cr}$	破坏转角 $\Delta_d^{ave}/H$
	$V_{cr}/kN$	$\Delta_{cr}/mm$	$V_u/kN$	$\Delta_u/mm$	$V_d/kN$	$\Delta_d/mm$		
W1	-180.3	1.1	+297.4	+4.0	+252.8	+6.1	1.44	1/248
			-223.3	-3.7	-189.8	-6.0		
SW2	+203.7	+2.9	+452.5	+13.7	+384.6	+19.7	1.99	1/69
			-360.1	-20.9	-306.1	-24.4		
ZW1	-191.7	-1.3	+237.3	+2.9	+201.7	+7.7	1.22	1/176
			-231.0	-5.7	-196.4	-9.6		
SZW2	+218.3	+2.2	+342.2	+10.4	+290.9	+19.2	1.48	1/75
			-301.9	-12.0	-256.6	-20.6		
DW1	-183.5	-1.1	+223.9	+2.4	+190.3	+6.0	1.18	1/263
			-209.2	-2.9	-177.8	-5.4		
SDW2	-203.9	+1.9	+271.6	+5.4	+230.9	+10.5	1.31	1/143
			-261.0	-6.9	-221.9	-10.5		



**Figure 8.** Degradation curves  
**图 8.** 退化曲线

势, 表明试件承载力退化随着往复加载而不断加剧。2) 与未加固试件相比, 加固试件承载力退化速率明显缓慢, 其中未加固试件(W1, ZW1, DW1)承载力退化系数(正负向均值)介于 0.86~0.89 之间, 加固试件承载力退化系数(正负向均值)介于 0.88~0.94 之间, 这表明砌体砖墙采用玄武岩纤维加固后受力性能更加稳定。3) 对比带构造柱不开洞加固试件与带构造柱开洞加固试件的承载力退化曲线, 前者承载力退化系数明显高出后者, 其中试件 ZW1 较 DW1 高出 2.3%, 试件 SZW2 较 SDW2 高出 2.8%。可见开洞削弱了砌体砖墙受力的稳定性。

计算砖墙在各加载级第一循环的刚度退化情况, 各试件割线刚度[15]与墙顶位移关系曲线如图 8(b)。由图可知: 1) 试件加固前后刚度退化规律基本一致, 在加载前期刚度退化速率较大, 而加载后期退化较为缓慢, 表明 BFRP 纤维加固对砌体砖墙刚度退化的延缓作用。2) 在整个加载过程中, 试件抗侧刚度退



化主要发生在砖墙初始开裂至屈服阶段；3) 纤维加固试件的抗侧刚度较未加固试件无明显提高，提高幅度分别为 0.6%, 5.5%, 13.7%，表明玄武岩纤维加固几乎不改变砌体砖墙初始抗侧刚度。

#### 4.4. 墙顶变形恢复能力

采用墙顶变形残余变形率衡量墙顶变形的恢复能力，墙顶变形残余变形率为试件墙顶最终残余变形  $\Delta_e$  与最大变形  $\Delta_{max}$  之比，即  $\Delta_e/\Delta_{max}$ 。墙顶变形恢复性能指标见表 4。

由表可知：1) 未加固试件的剪切残余变形率(正负向均值)介于 0.37~0.67 之间，这表明未加固试件剪切破坏较为严重，砖墙剪切变形恢复能力较低；2) 加固试件的残余变形率(正负向均值)较未加固试件均出现不同程度的下降，其中纤维加固试件 (SW2, SZW2, SDW2)较同类型未加固试件(W1, ZW1, DW1)分别下降 47.8%, 46.5%, 13.5%，这表明 BFRP 加固砖墙可以有效提高墙顶变形的恢复能力。

#### 4.5. 耗能能力

各试件正负向累计耗能如图 9 所示。由图可知：1) 在弹性阶段，试件耗能能力小。进入弹塑性阶段后，加固砖墙因纤维加固作用，极限变形和承载能力较未加固试件有明显提高，且破坏更为充分，累计耗能能力有显著提高，其中加固试件的正负向累计耗能为同类型未加固试件的 7.4、5.2、2.5 倍。2) 砖墙开裂后，同级位移下各试件的正负向累计耗能不等，这主要是由于砖墙进入弹塑性变形阶段后，试件在同级位移下的裂缝发展和损伤程度存在差异。

#### 4.6. 玄武岩纤维布应变值

表 5 列出了各个加固试件达到其峰值荷载时对应的水平和斜向玄武岩纤维平均应变值，表中 H1-H5 为墙体底部到顶部各道水平纤维编号，D1(D3), D2(D4)为“X”型对角纤维编号。由表可知：1) 由于墙体各处变形不一样，水平、斜向纤维应变值不等，且后者约为前者的 2 倍(除试件 SDW2 外)。2) 试件 SZW2 水平、斜向纤维平均应变值均为试件 SW2 的 1.59 倍，表明混凝土约束构件可以有效提高纤维加固效果的发挥。3) 由于开洞影响，试件 SDW2 水平加固纤维仅布置上下两道，斜向纤维受到的水平纤维约束小

Table 4. Recovery capacity of deformation

表 4. 墙顶变形恢复能力

试件编号	加载方向	$\Delta_{max}/mm$	$\Delta_e/mm$	残余变形率	均值
W1	+	10.00	6.15	0.62	0.67
	-	6.99	5.03	0.72	
SW2	+	21.42	7.60	0.35	0.35
	-	24.44	8.24	0.34	
ZW1	+	10.8	4.6	0.43	0.43
	-	10.8	4.6	0.43	
SZW2	+	22.5	4.6	0.20	0.23
	-	21.0	5.3	0.25	
DW1	+	7.4	1.6	0.22	0.37
	-	7.0	3.6	0.51	
SDW2	+	11.4	3.5	0.31	0.32
	-	11.1	3.6	0.32	

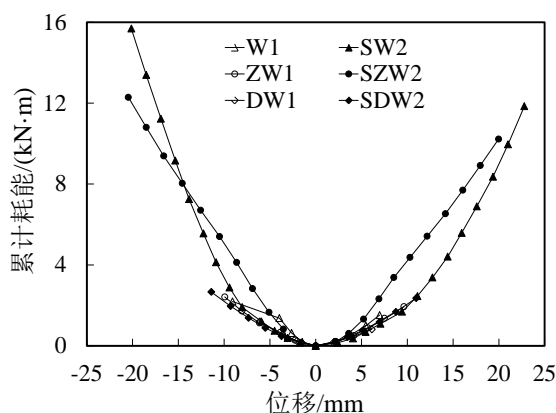


Figure 9. Accumulated energy dissipation curves

图 9. 累计耗能

Table 5. FRP strain/ $10^{-4}$

表 5. 纤维布应变/ $10^{-4}$

试件 编号	水平纤维						斜向纤维		
	H1	H2	H3	H4	H5	均值	D1(D3)	D2(D4)	均值
SW2	15.89	35.06	13.34	8.60	0.53	14.89	35.52	25.53	30.53
SZW2	53.56	10.76	16.38	7.24	0.25	23.63	61.24	35.91	48.58
SDW2	/	/	/	/	/	/	25.18 (26.68)	29.53 (27.73)	27.28

于试件 SW2 和 SZW2，斜向纤维平均应变值分别为不开洞试件的 89.4%、56.2%，表明开洞及水平纤维道数减少对斜向纤维加固效果的不利影响。4) 砖墙达到峰值荷载时，加固纤维应变值并未达到纤维峰值应变。

## 5. 结论

1) 采用玄武岩纤维加固后，砌体砖墙的峰值荷载和极限位移均有所提高，提高幅度与墙体材料强度、纤维用量、墙体类型均有关，且后者提高幅度远大于前者。

2) 玄武岩纤维与墙体共同作用，延缓试件的承载力及刚度退化速率，增强耗能能力，改善墙体变形恢复能力。

3) 开洞降低了未加固试件的极限荷载和极限位移，其中对试件变形能力的削弱更为显著。同时，墙体开洞也限制了玄武岩纤维的加固效果。

4) 水平玄武岩纤维起到了类似箍筋的作用，限制了斜裂缝的开展，提高了砌体砖墙的抗剪承载力，同时也对斜向纤维起到了锚固作用，增强了砖墙的整体性。

## 基金项目

云南省科技厅应用基础研究计划青年项目(2015FD005)；云南省教育厅科学研究基金理工类重点项目(2014Z008)；云南省教育厅科学研究基金项目(2015Y017)；云南大学“东陆中青年骨干教师”培养计划项目。

## 参考文献 (References)

[1] 曹雷雨, 王礼杭, 李重稳, 等. 碳纤维钉及碳纤维布加固砌体结构试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(6):

109-114.

- [2] 孟令运. 碳纤维布加固红砖砌体抗震性能研究[J]. 佳木斯大学学报, 2010, 28(6): 839-865.
- [3] 樊越, 左宏亮, 郭亮. 粘贴 CFRP 砖砌体墙在低周反复荷载作用下的试验[J]. 沈阳建筑大学学报, 2012, 28(2): 208-214.
- [4] 王全凤, 柴振岭, 黄奕辉, 杨勇新. GFRP 复合材料加固砖墙抗震抗剪承载力[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2009, 30(2): 186-190.
- [5] 柴振岭, 王全凤, 黄奕辉, 杨勇新. 玻璃纤维布加固砖墙抗震性能试验[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2007, 28(1): 59-62.
- [6] Alcaino, P. and Santa-Maria, H. (2008) Experimental Response of Externally Retrofitted Masonry Walls Subjected to Shear Loading. *Journal of Composites for Construction*, **12**, 489-498. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2008\)12:5\(489\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:5(489))
- [7] Capozucca, R. (2011) Experimental Analysis of Historic Masonry Walls Reinforced by CFRP under In-Plane Cyclic Loading. *Composite Structures*, **94**, 277-289. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.06.007>
- [8] Santa-Maria, H. and Alcaino, P. (2011) Repair of In-Plane Shear Damaged Masonry Walls with External FRP. *Construction and Building Materials*, **25**, 1172-1180. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.030>
- [9] ElGawady, M.A., Lestuzzi, P. and Badoux, M. (2006) Aseismic Retrofitting of Unreinforced Masonry Walls Using FRP. *Composites Part B-Engineering*, **37**, 148-162. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2005.06.003>
- [10] 杨勇新, 杨萌, 赵颜, 廉杰. 玄武岩纤维布的耐久性试验研究[J]. 工业建筑, 2007, 37(6): 7-13.
- [11] 欧阳煜, 王鹏, 李翔. 玄武岩纤维布加固钢筋混凝土梁受弯试验研究[J]. 建筑结构, 2008, 38(11): 74-84.
- [12] 苏磊, 陆洲导, 张克纯, 余江涛, 程莉. BFRP 加固震损混凝土框架节点抗震性能试验研究[J]. 东南大学学报, 2010, 40(3): 559-564.
- [13] 雷真, 周德源, 张晖, 等. 玄武岩纤维加固震损砌体结构振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(15): 130-137.
- [14] Zhou, D.Y., Lei, Z. and Wang, J.B. (2013) In-Plane Behavior of Seismically Damaged Masonry Walls Repaired with External BFRP. *Composite Structures*, **102**, 9-19. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.01.031>
- [15] JGJ101-96 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7613, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>  
期刊邮箱: [ms@hanspub.org](mailto:ms@hanspub.org)