

A Review of Interfacial Adhesion Properties between FRP and Masonry Structures Reinforced with FRP

Zhen Lei, Liu Bai*, Hongbo Guo, Pengxiang Tan, Rui Qian, Zhongmin Luo

School of Architecture and Urban Planning, Yunnan University, Kunming Yunnan
Email: leizhen0916@163.com, *1604502499@qq.com

Received: Oct. 25th, 2018; accepted: Nov. 8th, 2018; published: Nov. 16th, 2018

Abstract

Fiber reinforced Polymer (FRP) is widely used in the restoring and reinforcement of building structures due to their light weight, high strength and durability. FRP can improve the mechanical properties of the reinforcement system and improve the integrity of the brickwork structure. The key to improve the integrity of the whole structure lies in the bonding properties between FRP and brick masonry. The shearing force acting on the FRP is transmitted to the brick masonry substrate by the cohesive effect of the binder, thereby improving the flexural and shear strength of the structures. Because the bond strength of the reinforcement system is affected by the interfacial bonding performance, this paper collects a series of experimental and theoretical analyses for external strengthening of masonry structures by domestic and foreign scholars in the past five years, and summarizes the influence of the mortar joint strength and degraded environmental conditions for the interface bonding performance and the improvement of the bearing capacity of the whole reinforcement system by different external bonding FRP methods were compiled, and some calculation formulas of the bonding capacity of FRP-masonry interface were concluded. Aiming at the current research on masonry structures reinforced with FRP, some problems are raised, which provide some reference value for the related research to be carried out later.

Keywords

FRP, Brick Masonry, Interface, Bond Behavior

FRP加固砌体结构的界面粘结性能综述

雷真, 白柳*, 郭洪波, 谭鹏祥, 钱睿, 罗中民

云南大学, 建筑与规划学院, 云南 昆明
Email: leizhen0916@163.com, *1604502499@qq.com

*通讯作者。

收稿日期：2018年10月25日；录用日期：2018年11月8日；发布日期：2018年11月16日

摘要

纤维增强复合材料(FRP)因其轻质、高强、耐久而被广泛用于房屋建筑结构的修复和加固中。FRP能改善加固系统的力学性能,提高砖砌体结构的整体性。而提高整个结构的整体性的关键就在于FRP与砖砌体之间的粘结性能,通过粘结剂的粘合作用,将作用在FRP上的剪力传递给砖砌体基层,从而提高结构的抗弯、抗剪强度。因FRP加固结构的粘结强度受到界面粘结性能的影响,本文收集了近年来国内外学者对FRP加固砖砌体的一系列试验研究和理论分析,总结了砂浆接缝强度、劣化环境条件对界面粘结性能的影响,以及不同的FRP加固方式对整个加固系统承载能力的改善情况的相关研究,整理出目前主要的FRP-砌体界面粘结承载力的计算经验公式。针对目前FRP加固砌体结构领域仍值得研究的相关问题进行分析,为今后拟开展的相关研究提供一定的参考价值。

关键词

FRP, 砖砌体, 界面, 粘结性能

Copyright © 2018 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

纤维增强复合材料(FRP)因其强度高、质量轻、耐腐蚀性耐久好、施工工期短、经济性好等优势被广泛应用于结构加固行业中。常用的纤维增强复合材料有GFRP(玻璃纤维增强复合材料)、AFRP(芳纶纤维增强复合材料)、CFRP(碳纤维增强复合材料)、BFRP(玄武岩纤维复合材料)。

在使用FRP对砌体结构进行加固时,通常使用粘结剂使FRP粘贴于砌体表面来提高结构的受力承载能力。FRP加固砌体的性能在很大程度上取决于FRP与基层之间的粘结,粘结强度、最大粘结应力和界面刚度受到界面处理方法的影响。近年来,随着研究的不断深入,在使用粘结剂的基础上,增加了一些新的锚固措施来提高整个加固系统的整体性,从而达到更好的加固效果。粘结剂可以使FRP和砌体共同受力,因此,FRP-砌体间的粘结界面能否达到很好的传力效果,对整个加固系统的承载能力大小起着至关重要的作用。研究FRP-砌体间的界面粘结性能显得尤为重要。

Enricoi [1]等人认为砖砌体的力学性能(包括抗拉、抗压、抗弯强度)和物理微观结构性能(包括表面粗糙度、孔隙率、孔径分布和吸水率)都能对FRP-砖的粘结性能造成影响。砖表面的粗糙度及性能能够影响树脂胶对砖基层的浸润深度,从而影响FRP加固结构的粘结性能。本文将对影响FRP-砌体界面的粘结性能的因素(主要有砂浆接缝,环境条件以及FRP加固方式)及目前国内外学者已经得到的界面粘结模型的研究现状进行综合分析。

2. 国内外FRP加固砌体结构的界面粘结性能现状

2.1. 材料性能、砂浆接缝对界面粘结性能的影响

FRP因其优质的性能,最早被应用于航空航天领域。现今,高性能材料FRP也越来越广泛的应用于

建筑工程领域。FRP 不仅能提高建筑结构的抗弯、抗剪性能,还能提高结构的抗震性能。姬瑞璞[2]等进行了 CFRP、GFRP、BFRP 预应力下的剪切实验和纯剪切试验,发现部分 FRP 筋在预应力状态之下所承担的剪力要比纯剪切状态下的值高。魏洋[3]通过在竹梁受拉区配置 FRP,证实了纤维增强复合材料对竹梁抗弯承载力的加强,与未配置的相比,提高 30.16%~52.44%。刘华新[4]等利用碳纤维和包裹约束混凝土柱进行试验,受 FRP 约束的棱柱体的承载力得到大幅度提高,且改善了变形性能。雷真[5]等进行了钢筋混凝土-砖组合开洞墙体的预损伤试验,证实了玄武岩纤维增强复合材料对组合墙体抗剪性能的提高。李保亮[6]等将 CFRP 嵌入到砌体表面进行试验,大大提高了砌体结构的抗剪性能,提高了抗剪强度。然而,砂浆接缝的存在,将对 FRP 加固砌体结构系统的承载力造成影响。

一些学者开展了试验,对砂浆接缝的影响进行了研究。Enricoi [7]用两种砖和性能明显不同的砂浆做成的砌体墙进行试验。研究表明,忽略砂浆节点的存在,只考虑砖的力学性能,忽略了砖的表面和微观结构特性,可能会导致对剥离力的估计有明显的不准确。由于砂浆的存在,会提供一个“连锁效应”来增加粘脱荷载。F. Ceroni [8]等人也认为接缝的“连锁效应”会提供额外的粘结抵抗机制。在三个实验室完成了三种不同的砌体(凝灰石 tuff stone, 莱切石 lecce stone 及黏土砖)基层上粘贴四种 FRP 类型(碳纤维、玻璃纤维、玄武岩纤维、钢纤维)的粘结实验。结果表明,剥离荷载很明显的受到砂浆层的影响,荷载增量随着砂浆接缝的数量而变化,它会有效粘结长度增大。F. Ceroni 认为,由于接缝的“连锁效应”提供了额外的粘结抵抗机制,砂浆接缝会在轻微提高剥离荷载值,而抹灰则会在一定程度上抑制这种“连锁效应”。

一些学者则对 FRP-砌体界面的非线性规律进行了分析,深入探讨砂浆性能对界面粘结滑移的影响规律。M. Malena [9]利用四种粘结-滑移(CML)多线性关系对 FRP 与砌体间界面应力传递的影响进行研究。当达到 FRP 抗拉强度后,FRP 开始剥离且往往控制着界面间的应力传递机理。M. Malena 用四种(双线性关系、有两个斜率的上升段三线性、有两个斜率的下降段三线性以及四线性关系)从试验数据中得到的多线性 CML 关系来获取 FRP-砌体界面的荷载响应。砂和砂浆灰缝的几何关系会明显影响各 CML 关系的荷载响应的差异。Ernesto [10]用一维有限元直接模型的非线性本构规律,模拟了 FRP 与砌体结构间的界面性能。作者将结果与 Mancusi [11]、CNRDT200 [12]的报告以及实验结果的对比,最大力和最佳粘结长度的值和 Mancusi 研究结果吻合较好,相差 15%左右,并得出了 FRP 加固砌体结构的特性在很大程度上依赖于砂浆性能的结论。Capozucca R [13]等人通过推拉实验得到的实验数据来分析应力-滑移关系和断裂能大小,证实砂浆接缝对断裂能和粘结性能的影响很大的结论。Christian [14]用能量平衡方法来确定 FRP-砌体界面剥离时砂浆接缝的影响,建立了 FRP-砌体界面间的可传递荷载与 FRP-砖、FRP-砂浆之间的关系。结果表明,FRP-砂浆中的剪应力比 FRP-砖中的剪应力低,若要界面可传递的荷载与 FRP-砖块的界面粘结能力相等,在纤维方向上,砖块的长度要大于 FRP-砖界面的有效粘结长度。F. Freddi [15]使用了一种新的界面模型研究了 FRP 加固砌体构件的剥离过程,尤其是砂浆性能影响的数值模拟。结果显示,砂浆接缝的刚度和强度会导致界面应力的降低。当荷载传递路径涉及到砂浆接缝时,应力值减小。由于砂浆接缝的存在,剥离荷载会减少 15%。承载力的减少与 CNR 文件的相符。C. Mazzotti [16]等人研究了四种类型的黏土砖基层的非线性行为对粘结性能的影响研究。在剥离期间,薄弱的垂直砂浆接缝的存在会阻止应力向下一块砖传递。若是增强砂浆接缝的强度,剥离过程可能会有些变化,这需要更深入的研究。Antonio [17]等人用数值模拟的方法得到,荷载值的下降与砂浆接缝的存在有关,砂浆接缝越厚,荷载值减少越多。

2.2. FRP 加固方式对界面粘结性能的影响

不同的粘贴方法会给整个加固系统的受力性能产生影响。Paolo [18]以三种不同方式(树脂胶粘贴、真

空条件下的树脂胶粘贴和具有 FRP 锚钉加固方式的树脂胶粘贴)在开裂墙体的表面粘贴 FRP, 进行试验。结果表明,在真空状态下粘贴 FRP 和用 FRP 锚钉加固方式的粘结强度是传统树脂胶粘贴方法的接近两倍,两种方法都并没有增加有效粘结长度。此外,将砂浆接缝的强度进一步提高可以进一步增加真空法的粘结强度。

随着研究的不断深入,锚固方式多种多样。Mario [19]等人使用 FRP 作为机械锚固,不仅有效地增加荷载的最大值和耗散能力,还增加了 FRP 加固砌体的延性。Hamid [20]等人研究了砌体近表面嵌入粘贴 FRP 的粘结性能。试验结果表明,具有较大尺寸的槽的试件,表现出更好的粘结性能,试件的失效模式并没有改变。Francesca [21]对在纤维末端粘贴相同材质的横向纤维布和在砌体基层嵌入风帽状 FRP 两种不同锚固形式进行了研究。带有锚固的试样,剥离发生被延迟并且剥离时有更高的荷载。对于横向锚固的试样,剥离荷载会增加 7%~10%。扇形形式的锚固试件破坏时[22],粘结强度达到抗拉强度的 40%~50%,直接嵌入砖块的 FRP 筋形式锚固的锚固模式[22],最终的破坏表现为砖基层的内聚力破裂,极限强度达到了 FRP 抗拉强度的 60%,最大荷载达到 FRP 抗拉强度的 80%。郑晓龙[23]等对 FRP 筋加固黏土砖进行了拉拔试验。结果表明,预浸折叠式 FRP 束能有效提高锚固强度、预钻孔尺寸和 FRP 束共同影响锚固强度,并提出了有效投影面积这一参数,发现锚固强度和破坏的有效投影面积相关。在 Francesca [21]的研究中,结果证明了“宽度效应的存在”,若砌体基层具有较低的抗拉强度,也会限制锚固系统的有效性。

GFRCM (玻璃纤维增强胶凝复合材料)的应力传递机理不同于 FRP 材料[24],总是纤维先失效破坏。Francesca [25]等人对 CFRCM (碳纤维增强胶凝复合材料)进行了试验测试,结果表明,试件形状和固化情况会严重影响实验结果,纤维宽度的增大会导致试件对齐和应力分布的问题。试件破坏类型也不一样。考虑纤维网格和砂浆间的机械连锁程度是很重要的,它受网格尺寸、砂浆骨料尺寸和流变性能的影响。

2.3. 环境条件对界面粘结性能的影响

FRP 加固系统在正常使用条件下,常常需要考虑其不同环境条件下的耐久性使用要求。Hamid Maljaee [26] [27] [28] [29]等人对 FRP 加固砖块系统进行了长达一年时间的水浸泡试验研究。结果显示,砖、环氧树脂、底漆和 GFRP 的力学强度分别下降 12%、6%、10%、37%,GFRP 和环氧树脂的弹性模量没有明显的改变,但是底漆的弹性模量下降了 44%。Maljaee [26] [27] [28] [29]还研究了砌体结构外贴 FRP 在温度和湿度耦合环境条件下的界面粘结性能。环氧树脂和底漆的性能由线弹性转为非线性,强度和刚度随所处环境周期的增加而降低。断裂能有轻微的增加,可归因于界面处的环氧树脂的物理老化作用。Pérez-Pacheco [30]的研究证实了湿热老化是引起复合材料湿热老化的主要原因之一。Hamid [26] [27] [28] [29]等用差示扫描量热法研究了环境条件对冷固化环氧树脂的热性能的影响,观察结果得到,在 IC (实验室内)条件下,环氧树脂固化 11 个月后,玻璃化转变温度 T_g 提高了 12%。WI (长期水浸泡)试验的 T_g 由于塑化作用而降低,浸泡七个月,由于长期吸水的矛盾效应, T_g 增加。在 HG (湿热暴露)条件下,环氧树脂的后固化导致 T_g 的增加。Mahdireza [31]等使用七种类型的 FRP,将 525 个试件放入 5 种化学溶液(pH 值分别为 2.5、7、10、12.5)和等效海水中,一段时间后进行单剪试验。结果表明,酸性溶液对单向纤维粘结的砖砌体的影响最大,碱性溶液(pH 值分别为 12.5 和 10)对双向纤维粘贴的砌体粘结性能退化的影响较大。淡水对粘结强度的影响大于海水溶液,单向纤维比双向纤维在化学溶液里更易受到破坏。

加固系统能否有效的传递剪力,关键在于 FRP-砌体间的粘结。因此,对粘结层材料相关性能的研究显得尤为重要。Ghiassi B [32]等人通过数值模拟研究了两种不同的环境条件下对 FRP-砌体结构整体性能的影响。使用疏水性环氧树脂可减少水分对粘结界面的影响。FRP 的宽度增加,粘结退化程度越小,粘结退化导致墙体上 FRP 产生更大的拉应力。Patricia [33]等针对结构环氧树脂在五种环境条件下浸泡 16 个月的力学性能做了研究。在 TC (热环境)条件下,环氧树脂的弹性模量和抗拉强度增加,FT (冻融)条件

下相反；而在 PW (纯水)和 CW (含氯的水)条件下，环氧树脂的动弹性模量下降，能量耗散大。Maria [34] 等人进一步测试了环氧树脂在潮湿环境下的疲劳性能，得到，干燥的环氧树脂试样具有更好的疲劳寿命，尽管由于水分的降解，在 200 多万个循环周期内，环氧树脂仍然能够超过其准静态强度 25% 的最大循环应力荷载。Chaichanawonga [35] 用短玻璃纤维含量不同(0~30 wt%)的复合材料开展了湿度试验。浸泡于纯净水中 60 天后，试验结果表明：玻璃纤维复合材料的屈服强度、极限抗拉强度、抗弯强度在初期(1~7 天)出现了显著下降，随后趋于稳定；延性在浸泡初期无明显变化，而在末期却明显降低。

在紫外线照射条件下，关于 FRP 材料的力学性能的研究。乔琨[36]等通过对碳纤维增强环氧树脂基复合材料进行人工加速紫外老化实验发现，紫外老化使复合材料玻璃化转变温度提高，老化前期提高幅度相对较大，后期变化不明显；随着老化时间增加，受到紫外辐射的最外层碳纤维/环氧树脂界面受到一定程度削弱。郭明映[37]等研究表明芳纶/环氧复合材料经紫外老化后的拉伸强度、失重率有明显的变化，芳纶结构和复合材料的玻璃化转变温度无明显的变化。危成英等[38]对同一批次试件在西北地区(新疆)、华北地区(北京)和东南地区(泉州)的不同环境条件下，比较分析 CFRP 复合材料的自然老化性能的耐久性。结果表明：东南、华北与西北地区的自然环境因素对碳纤维复合材料(CFRP)性能的影响不大，但是对两种树脂的影响较大。杨越飞等[39]为探明玄武岩纤维/不饱和聚酯复合材料的耐久性和力学性能，通过人工模拟加速气候箱对复合材料进行紫外光和冷凝处理，并测试、分析老化前后复合材料的力学性能、微观结构及化学结构的变化。力学性能测试发现，老化后的复合材料力学性能下降明显，拉伸强度、断裂伸长率、弯曲强度和弹性模量与未老化相比下降 20%~52%。

2.4. 理论研究

F. Ceroni [8] 在意大利规范基础上，统计分析给出了设计公式来计算 FRP 材料粘贴在不同砌体基层的剥离荷载，并考虑了粘结剪应力沿试件宽度不均匀分布的外形效应 K_b ，以及修正系数。最小二乘法回归线的斜率 $k_{G,m}$ 根据砖基层材质的不同，而有不同的计算方法。计算如下式(1)：

$$F_{deb,th,m} = \sqrt{k_{G,m}} \cdot F_{deb,th} = b_f \cdot \sqrt{2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot k_b \cdot E_f \cdot k_{G,m} \sqrt{f_{cm} \cdot f_m}} \quad (1)$$

Iman [40] 用遗传表达编程(GEP)这种新工具来预测 FRP 加固气构件的脱粘强度。作者将新模型及其他 12 个模型的预测值与实验结果进行比较，其中，Kashyap [41] 模型具有最好的预测结果。结果表明，作者提出的模型相对于最好的 Kashyap 模型，从训练数据和测试数据来说，均方根误差分别减少了 51.7% 和 41.3%，新模型具有最好的效率。该模型的最大力 P_{max} 的计算式如下式(2)：

$$P_{max} = \left[f_{ut}^{1.5} L_b - L_b t_p c_1 \right] + \left[f_{ut}^3 b_m - b_p^2 t_p \right] + \left[L_b^{1.5} + c_2 + \frac{t_p}{c_0} (L_b + E_p) \right] \quad (2)$$

f_{ut} —砌体抗拉强度； L_b —FRP 的粘结长度；

b_p —FRP 的宽度； t_p —FRP 的厚度；

b_m —砌体的宽度； E_p —FRP 弹性模量；

$C_1 = 9.941346$ ， $C_2 = 9.58728$ ， $C_3 = 9.351684$ 。

Kashyap 模型，通过对 15 个既有混凝土和砌体强度模型与拉伸试验数据库中的统计结果得对比评估，在与粘结强度预测试验的比较统计基础上，得出了以下模型(3)：

$$P_{max} = 13.69 \varphi_f^{0.84} f_{ut}^{0.90} \sqrt{L_{per} (EA)} \quad (3)$$

其中， $\varphi_f = 1 / (2 + b_p)$ ， $L_{per} = 2 + b_p$ 。

$(EA)_p$ —FRP 的轴向刚度；

f_{ut} —砌体单元抗拉抗拉强度均值;

b_p 为 FRP 的长度, 详见参考文献[41]。

作者指出, 在计算砌体最大力时, 不能简单的将混凝土最大力计算式中的混凝土抗拉强度 f_c 替换成砌体抗拉强度 f_{ut} 来计算。此外, 作者还提出了界面最大剪应力 τ_{\max} 和最大滑移值 δ_{\max} 的经验表达式, τ_{\max} 、 δ_{\max} 等粘结特性对计算 FRP 加固砌体结构的临界粘结长度和分析 FRP 加固结构性能的必要条件。 τ_{\max} 、 δ_{\max} 经验公式如下(4)、(5):

$$\tau_{\max} = 8.83\varphi_f^{0.15} f_{ut}^{0.2} \quad (4)$$

$$\delta_{\max} = 0.45\varphi_f^{0.23} f_{ut}^{0.74} \quad (5)$$

Francesca [42]等提出了一种基于断裂能模型的粘结强度计算模型, 引入了修正系数, 以考虑粘结长度和宽度对粘结强度的影响。对外贴 CFRP 的单砖采用双面推拉剪切实验, 结合文献研究成果构成扩展数据库, 提出了荷载传递机理的分析模型(6):

$$F_{\max} = \beta_1 b_f \sqrt{2\Gamma_f E_f t_f} \quad (6)$$

$$\text{其中, } \Gamma_f = \frac{1}{4} k_b k_G \delta_u \sqrt{f_{cm} f_{ctm}}, k_b = \sqrt{\left(3 - \frac{b_f}{b_s}\right) / \left(1 + \frac{b_f}{b_s}\right)}$$

F_{\max} —实验最大传递荷载; Γ_f —断裂能;

δ_u —界面最终滑移量; E_f —CFRP 弹性模量;

L_b —粘结长度; L_e —有效粘结长度; t_f —CFRP 厚度;

b_f 、 b_s —分别为 CFRP、砖砌体的宽度;

k_b 、 k_G —分别为 CFRP 宽度、断裂能修正系数;

f_{cm} 、 f_{ctm} —分别为黏土砖的抗压、抗拉强度;

β_1 —粘结长度修正系数, 当 $L_b/L_e < 1$, 按下式取值; $L_b/L_e > 1$ 时, 按 $L_b/L_e = 1$ 取值。

$$\beta_1 = \frac{L_b}{L_e} \left(2 - \frac{L_b}{L_e}\right)$$

最后, 本文对断裂能参数 k_G 进行了统计分析, 并在正态分布和对数分布假设下进行拟合得到。

Gao [43]等人提出, 在复合热和机械荷载作用下, 通过 6 个不同的粘结 - 滑移模型(包括弹性 - 脆性模型、双线性模型、弹性 - 塑性 - 脆性模型、梯形模型、刚性 - 柔性模型、指数模型), 得到 FRP-基层界面模式 II 剥离破坏过程的封闭解。结果表明, 粘结长度足够长, 剥离荷载仅受界面断裂能和温度的影响, 温度的增加会导致剥离荷载和有效粘结长度的增加, 而后者的增长率取决于粘结 - 滑移模型。作者提出了在粘结长度足够长情况下的极限荷载的计算式(7):

$$P_u = b_p \sqrt{2G_f \frac{E_p t_p}{\left(1 + \frac{b_p E_p t_p}{b_s E_s t_s}\right)} - \frac{b_p E_p t_p}{\left(1 + \frac{b_p E_p t_p}{b_s E_s t_s}\right)} (\alpha_p - \alpha_s) \Delta T} \quad (7)$$

p_u —FRP-基层剥离荷载; G_f —FRP-基层断裂能;

E_p —FRP 弹性模量; E_s —基层的弹性模量;

t_p —CFRP 厚度; t_s —基层的厚度;

b_p 、 b_s —分别为 FRP、基层的宽度;

α_p 、 α_s —分别为 FRP、基层的热膨胀系数;

ΔT —温度改变量。

注：该模型可用于两薄板接缝的计算以及多种材料的基层计算，比如 FRP-混凝土、FRP-钢材、钢材-混凝土、铝-混凝土等在复合热力和机械荷载作用下的计算。

3. 结论与展望

FRP 加固结构的性能受到界面粘结能力的影响，本文主要列举了砂浆接缝强度、劣化环境条件对界面粘结性能的影响，以及不同的 FRP 加固方式对整个加固系统承载能力的改善情况的相关研究。

综合近年来对 FRP 加固砌体粘结性能的研究，可以得出以下结论：

- 1) 锚固措施能有效增加整个加固系统的剥离荷载值以及延性。
- 2) 宽度效应是存在的，在相应的力学模型中，引入几何尺寸的修正系数是有必要的。
- 3) 粘结层有水分，会对 FRP 和砖石的粘附力造成退化，为了避免这种情况带来的不利影响，可以使用疏水性环氧树脂，保持粘结界面的干燥。
- 4) 剥离荷载、断裂能等粘结性能会受到砂浆接缝的影响。砂浆接缝越厚，荷载值减少越多。砂浆接缝的存在会使有效粘结长度增大。FRP-砂浆中的剪应力比 FRP-砖中的剪应力低，若要界面可传递的荷载与 FRP-砖块的界面粘结能力相等，在纤维方向上，砖块的长度要大于 FRP-砖界面的有效粘结长度。
- 5) CNR [12] 准则中提出的剥离力计算式得出的值往往偏高。

结合已经开展的试验研究，以下方面的研究内容相对欠缺，宜加强此方面的研究：

- 1) FRP 加固砌体的耐久性研究，尤其是在紫外线辐射作用下的老化。
- 2) 在锚固加强措施下，特别是在 FRP 钉和扇状锚固加强措施下的 FRP 的粘结机理，并提出其剥离的锚固强度模型以更好地预测此加固方式的锚固强度。
- 3) 经过长时间浸泡后，GFRP 的弹性模量究竟怎样变化，有待进行更加深入的研究。Tavakkolizadeh [44] 研究发现 16 周浸水环境下 GFRP 的弹性模量下降 38%，而 Hamid Maljaee [26] [27] 发现长达一年时间的水浸泡条件后，GFRP 和环氧树脂的弹性模量没有明显的改变。
- 4) 增加砂浆接缝的强度，剥离过程会发生变化。因此，有必要对增强砂浆接缝强度的 FRP-砌体剥离行为做出更加准确的解释。砂浆接缝的“连锁效应”值得被深入的探讨。
- 5) 强度理论计算式、粘结滑移模型多种多样，理论计算式中的影响参数、修正系数也各有不同。因此，要得到简洁而准确的理论计算式还需要进一步的研究，以为 FRP 加固砌体结构的设计标准提供一定的参考。

基金项目

云南省科技厅应用基础研究计划青年项目(2015FD005)；云南大学“东陆中青年骨干教师”培养计划项目(WX069051)；云南大学教学改革研究项目(2017Y16)。

参考文献

- [1] Enrico, S., Serena, A. and Alessandro, B. (2017) Influence of Mechanical Properties, Anisotropy, Surface Roughness and Porosity of Brick on FRP Debonding Force. *Composites Part B*, **108**, 257-269. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.10.020>
- [2] 姬瑞璞, 张宁远. 预应力状态下 FRP 筋材剪切性能的试验研究[J]. 中国市政工程, 2018(4): 101-104.
- [3] 魏洋, 骆雪妮, 周梦倩. 纤维增强竹梁抗弯力学性能研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, 38(2): 11-15.
- [4] 刘华新, 孙英明, 张金玲, 刘蓓蓓. FRP 布约束素混凝土的轴压性能试验研究[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学

- 版), 2015, 35(1): 29-33.
- [5] 雷真, 屈俊童, 王勇. 纤维加固震损钢筋混凝土-砖组合开洞墙体的抗震性能[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2015, 43(7): 84-91.
- [6] 李保亮, 丁百湛, 朱强强. CFRP 嵌入式加固砌体结构抗剪性能试验研究[J]. 砖瓦世界, 2014(7): 33-35.
- [7] Enrico, S. and Valentina, S. (2018) The Role of Mortar Joints in FRP Debonding from Masonry. *Composites Part B: Engineering*, **135**, 166-174. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.10.021>
- [8] Ceronia, F., Leoneb, M. and Rizzob, V. (2018) Influence of Mortar Joints on the Behaviour of FRP Materials Bonded to Different Masonry Substrates. *Engineering Structures*, **153**, 550-568. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.10.030>
- [9] Malena, M., Focacci, F. and Carloni, C. (2017) The Effect of the Shape of the Cohesive Material Law on the Stress Transfer at the FRP-Masonry Interface. *Composite Part B: Engineering*, **110**, 368-380. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.012>
- [10] Ernesto, G. and Maura, I. (2016) A Simple 1D-Finite Element Approach for the Study of the Bond Behavior of Masonry Elements Strengthened by FRP. *Composite Part B*, **91**, 548-558. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.02.005>
- [11] Mancusi, G. and Ascione, F. (2013) Performance at Collapse of Adhesive Bonding. *Composite Structures*, **96**, 1e6.
- [12] CNR DT200 (2004/2013) Guide for the Design and Construction of an Externally Bonded FRP System for Strengthening Existing Structures. Italian National Research Council, Rome.
- [13] Capozucca, R., Magagnini, E. and Pace, G. (2017) Bond of FRP Strips in the Strengthening of Brickwork Masonry. American Institute of Physics, College Park.
- [14] Christian, C. and Francesco, F. (2016) FRP-Masonry Interfacial Debonding: An Energy Balance Approach to Determine the Influence of the Mortar Joints. *European Journal of Mechanics—A/Solids*, **55**, 122-133. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2015.08.003>
- [15] Freddia, F. and Sacco, E. (2015) Debonding Process of Masonry Element Strengthened with FRP. *Procedia Engineering*, **109**, 27-34. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.206>
- [16] Mazzotti, C. and Murgio, F.S. (2015) Numerical and Experimental Study of GFRP-Masonry Interface Behavior: Bond Evolution and Role of the Mortar Layers. *Composites Part B*, **75**, 212-225. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.01.034>
- [17] Antonio, M.D., Christian, C. and Stefano de, M. (2018) Numerical Modeling of FRP Strips Bonded to a Masonry Substrate. *Composite Structures*, **200**, 420-433.
- [18] Paolo, F. (2016) Effectiveness of Novel Methods to Increase the FRP-Masonry Bond Capacity. *Composites Part B*, **107**, 214-232. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.060>
- [19] Mario, F., Giovanna, R. and Carmelo, C. (2014) The Efficiency of Mechanical Anchors in CFRP Strengthening of Masonry: An Experimental Analysis. *Composites Part B*, **64**, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.03.018>
- [20] Hamid, M., Bahman, G. and Paulo, B. (2018) Bond Behavior in NSM-Strengthened Masonry. *Engineering Structures*, **166**, 302-313. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.03.091>
- [21] Francesca, C. (2017) Bond Tests to Evaluate the Effectiveness of Anchoring Devices for CFRP Sheets Epoxy Bonded over Masonry Elements. *Composites Part B*, **113**, 317-330. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.01.042>
- [22] Francesca Giulia, C., Pierluigi, C. and Giulia, F. (2018) Mechanical and Bond Properties of FRP Anchor Spikes in Concrete and Masonry Blocks. *Composite Structures*, **183**, 185-198. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.02.026>
- [23] 郑晓龙, 陶毅, 史庆轩, 陈建飞. 后植型 FRP 束锚固件与砌体材料锚固性能研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(1): 41-50.
- [24] Marianovella, L., Maria Antonietta, A. and Alberto, B. (2017) Glass Fabric Reinforced Cementitious Matrix: Tensile Properties and Bond Performance on Masonry Substrate. *Composites Part B*, **127**, 196-214. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.06.028>
- [25] Francesca Giulia, C., Alessandro, B. and D'Antino, T. (2017) Experimental Investigation of Tensile and Bond Properties of Carbon-FRCM Composites for Strengthening Masonry Elements. *Composites Part B*, **128**, 100-119. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.06.018>
- [26] Hamid, M., Bahman, G. and Paulo, B. (2016) FRP-Brick Masonry Bond Degradation under Hygrothermal Conditions. *Composite Structures*, **147**, 143-154. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.03.037>
- [27] Hamid, M., Bahman, G. and Paulo, B.L. (2016) Moisture-Induced Degradation of Interfacial Bond in FRP-Strengthened Masonry. *Composites Part B: Engineering*, **87**, 47-58. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.10.022>

- [28] Ghiassi, B., Lourenco Paulo, B. and Oliveira Daniel, V. (2014) Hygrothermal Durability of Bond in FRP-Strengthened Masonry. *Materials and Structures*, **47**, 2039-2050. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0375-7>
- [29] Ghiassi, B., Lourenco Paulo, B. and Oliveira Daniel, V. (2015) Accelerated Hygrothermal Aging of Bond in FRP-Masonry Systems. *Journal of Composites for Construction*, **19**, Article ID: 04014051.
- [30] Perez-Pacheco, E., Cauich-Cupul, J.I., Valadez-Gonzalez, A. and Herrera-Franco, P.J. (2013) Effect of Moisture Absorption on the Mechanical Behavior of Carbon Fiber/Epoxy Matrix Composites. *Journal of Materials Science*, **48**, 1873-1882. <https://doi.org/10.1007/s10853-012-6947-4>
- [31] Mahdireza, Y., Vahab, T. and Massod, M. (2018) Experimental and Analytical Evaluation of FRPs Bonded to Masonry-Long Term. *Surface & Coatings Technology*, **344**, 729-741. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.02.088>
- [32] Ghiassi, B., Lourenco, P.B. and Oliveira, D.V. (2016) Effect of Environmental Aging on the Numerical Response of FRP-Strengthened Masonry Walls. *Structural Engineering*, **142**, 1-32. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001358](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001358)
- [33] Patricia, S., Pedro, F. and Sena-Cruz, J. (2016) Effects of Different Environmental Conditions on the Mechanical Characteristics of a Structural Epoxy. *Composites Part B*, **88**, 55-63. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.10.036>
- [34] Maria, S., Thomas, K. and Anastasios, P. (2017) Vassilopoulos. Fatigue Performance of a Cold-Curing Structural Epoxy Adhesive Subjected to Moist Environments. *International Journal of Fatigue*, **103**, 405-414. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.06.022>
- [35] Chaichanawonga, J., Thongchueaa, C. and Areeratb, S. (2016) Effect of Moisture on the Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polyamide Composites. *Advanced Powder Technology*, **27**, 898-902. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2016.02.006>
- [36] 乔琨, 朱波, 高学平, 谢奔, 袁华, 吴益民, 张春雷. 紫外老化对碳纤维增强环氧树脂复合材料性能的影响[J]. 功能材料, 2012, 43(21): 2989-2992.
- [37] 郭明映, 李海斌, 张晖, 等. 紫外老化对芳纶/环氧复合材料性能和结构的影响[J]. 纤维复合材料, 2008, 1(35): 35-38.
- [38] 危成英, 王全凤, 杨勇新, 等. 不同地区自然环境下 CFRP 复合材料的自然老化性能试验[J]. 复合材料学报, 2010, 31(5): 557-561.
- [39] 杨越飞, 杨文斌, 徐建锋, 等. 玄武岩纤维布/不饱和聚酯复合材料耐老化性能[J]. 农业工程学报, 2014, 30(22): 332-337.
- [40] Iman, M., Jong, W.H. and Ozgur, K. (2016) Novel Predictive Model of the Debonding Strength for Masonry Members Retrofitted with FRP. *Composite Structures*, **158**, 281-291.
- [41] Kashyap, J., Willis, C.R., Griffith, M.C., Ingham, J.M. and Masiac, M.J. (2012) Debonding Resistance of FRP-to-Clay Brick Masonry Joints. *Engineer Structures*, **41**, 186-198. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.03.032>
- [42] Francesca Giulia, C., Pierluigi, C. and Carlo, P. (2015) Calibration of End-Debonding Strength Model for FRP-Reinforced Masonry. *Composite Structures*, **120**, 366-377. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.09.033>
- [43] Gao, W.-Y., Dai, J.-G. and Teng, J.G. (2015) Analysis of Mode II Debonding Behavior of Fiber-Reinforced Polymer-to-Substrate Bonded Joints Subjected to Combined Thermal and Mechanical Loading. *Engineering Fracture Mechanics*, **136**, 241-264. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2015.02.002>
- [44] Tavakkolizadeh, M. and Saadatmanesh, H. (2004) Environmental Effects on Tensile Properties of FRP Laminates Made Using Wet Lay-Up Method. In: Hollaway, L.C., Chryssanthopoulos, M.K. and Moy, S.S.J., Eds., *Advanced Polymer Composites for Structural Applications in Construction*, University of Surrey, Guilford, 619-632. <https://doi.org/10.1533/9781845690649.6.619>

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