

砌体结构抗震加固研究进展

张杰明, 周婧婷, 占宗霖, 汪志伟, 石邦宇

云南大学建筑与规划学院, 云南 昆明

收稿日期: 2025年3月28日; 录用日期: 2025年4月19日; 发布日期: 2025年4月29日

摘要

本文结合30篇论文综述了当前砌体结构的抗震加固方法及其研究进展。由于砌体结构材料脆性大、抗震性能差, 地震中易遭破坏, 因此抗震加固需求迫切。在砌体加固方面, 纤维复合材料以轻质高强见长, 适合高层建筑; 钢筋网砂浆因成本低廉更适合农村建筑; 而聚合物砂浆和高延性混凝土在保护性加固中更具优势。未来, 砌体结构抗震加固有望在材料性能、设计规范和施工经济性方面进一步优化。

关键词

砌体结构, 抗震, 加固, 方法, 进展

Research Progress on Seismic Strengthening of Masonry Structures

Jieming Zhang, Jingting Zhou, Zonglin Zhan, Zhiwei Wang, Bangyu Shi

School of Architecture and Planning, Yunnan University, Kunming Yunnan

Received: Mar. 28th, 2025; accepted: Apr. 19th, 2025; published: Apr. 29th, 2025

Abstract

Through a systematic review of 30 peer-reviewed studies, this paper summarizes the current seismic strengthening methods and research progress of masonry structures. Due to the brittleness of masonry structure materials and poor seismic performance, it is easy to be damaged in earthquakes, so the demand for seismic reinforcement is urgent. In terms of masonry reinforcement, fiber composite materials are characterized by light weight and high strength, which are suitable for high-rise buildings. Steel mesh mortar is more suitable for rural buildings because of its low cost; polymer mortar and high ductility concrete have more advantages in protective reinforcement. In the future, the seismic reinforcement of masonry structures is expected to be further optimized in terms of material properties, design specifications and construction economy.

文章引用: 张杰明, 周婧婷, 占宗霖, 汪志伟, 石邦宇. 砌体结构抗震加固研究进展[J]. 土木工程, 2025, 14(4): 906-914.
DOI: 10.12677/hjce.2025.144097

Keywords

Masonry Structure, Anti-Vibration, Reinforcement, Method, Progress

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

凭借广泛的材料来源和低廉的成本优势，砌体结构在建筑工程领域获得了广泛的应用。然而，由于砌体材料本身的脆性特征，其在地震荷载下易发生脆性破坏，存在较高的结构安全风险。近年来，国内外学者针对砌体结构的抗震加固展开了大量研究，不同加固方法的出现显著提升了砌体结构的抗震性能。本文作者通过 60 篇文献阅读，将其中的近 30 篇文献中所提及的加固方法按其材料特性和作用机理进行分类(见表 1)，对各类加固方法的实验结果和研究现状进行回顾。

Table 1. The main masonry structure reinforcement methods and their characteristics in present China
表 1. 当前我国主要的砌体结构加固方法及其特性

主要的砌体结构加固方法及其特性	
钢筋混凝土面层加固法	刚性增强、结构稳定、耐久提升
钢筋网水泥砂浆面层加固法	网格强化、粘接牢靠、抗裂性好
外包型钢加固法	钢材强化、截面增大、受力明确
外加预应力撑杆加固法	预应力施加、撑杆支撑、变形控制
粘贴纤维复合材料加固法	轻质高强、施工便捷、耐腐蚀性好
钢丝绳网 - 聚合物改性水泥砂浆面层加固法	柔性加固、聚合物改性、整体性好
增设砌体扶壁柱加固法	扶壁支撑、承载提升、稳定性好
砌体结构构造性加固法	构造优化、整体加强、细节处理
砌体裂缝修补法	裂缝封闭、强度恢复、耐久性增强

2. 加固方法的分类与研究进展

2.1. 纤维复合材料加固

在砌体结构抗震加固领域，纤维复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)加固法应用广泛。其主要类型涵盖纤维编织网增强混凝土(TRC)、纺织增强砂浆(TRM)、碳纤维增强复合材料(CFRP)等。这些材料对于提升砌体的抗剪强度、延性以及耗能能力效果显著[1]。

2.1.1. 纤维编织网增强混凝土(TRC)加固

纤维编织网增强混凝土(Textile Reinforced Concrete, TRC)作为常用加固材料之一，是通过在砌体表面将纤维网与混凝土面层相结合的方式，来提升墙体抗震性能。曲烽豪等[2]通过研究发现，TRC 能显著增强砖砌体墙的变形能力与耗能能力，并改变墙体的破坏模式。尹世平等[3]进一步对单面 TRC 加固技术展开研究，发现 TRC 可有效提升损伤砌体的剪切承载力和延性，从而为基于性能的砌体结构抗震设计提供有力支持。陈氏凤等[4]进行了纤维编织网混凝土单侧加固砌体墙的研究，提出 BTRC 单侧加固可改变砌

体墙的破坏形态并显著提高其侧向承载能力。TRC 加固技术作为一种创新的加固方法,已经在建筑结构中展现出其独特的优势。随着研究的不断深入和技术的不断完善,在未来 TRC 加固技术有望在更多领域得到广泛应用,为建筑结构的加固和改造提供更多更好的解决方案。

2.1.2. 纺织增强砂浆(TRM)加固

纺织增强砂浆(Textile Reinforced Mortar, TRM)在受损砌体结构修复方面展现出卓越性能如图 1。E. Bertolesi 等[5]通过试验对 TRM 加固脆弱砌体的作用进行评估,结果表明,TRM 能有效提升砌体结构的承载能力和位移能力,并显著降低地震损伤风险。因其材料特性不会对原有结构造成严重破坏,TRM 在对历史建筑或老旧建筑的保护性加固中具有独特优势。



Figure 1. Masonry wall reinforced by TRM
图 1. TRM 加固的砌体墙

2.1.3. 纤维增强复合材料(FRP)加固



Figure 2. A volcanic stone masonry model strengthened with FRP
图 2. 用 FRP 加固的火山石砌体模型

加固用的 FRP 种类主要有 CFRP (碳纤维)、BFRP (玄武岩纤维)、GFRP (玻璃纤维)、AFRP (芳纶纤维)等。近年来国内外学者使用 FRP 对砌体结构进行加固已经开展了广泛的研究和应用, ElGawady 等[6]研究了使用纤维增强聚合物(FRP)加固前后的 URM 墙体的平面内抗震性能,提出 FRP 加固技术对于显著提高无筋砌体墙(URM 墙)的平面内强度、刚度和变形能力十分有效。Cosgun 等[7]使用 FRP 对砌体进行加固设计,基于加固状态进行了线性和非线性分析。提出了一种采用线性、非线性和动力极限分析来评估砌体结构抗震性能的方法。熊雯磊等[8]在火山石砌体结构研究中采用 FRP 材料,验证了 FRP 在热带海洋腐蚀环境下对抗震性能的提升效果如图 2 所示。景杰婧等[9]提出的内嵌 FRP 技术(NSM-FRP)特别适用于历史砌体建筑,通过使用该技术,人们可在不破坏原有建筑的前提下实现抗震加固。碳纤维(CFRP)

由于具有极高的抗拉强度和轻质特性,常被用于提升砌体墙的抗剪强度和变形能力,目前在实际工程中的应用已经较多。近年来 L. Dan 等[10]利用有限元分析(FEA)验证了 CFRP 对砖墙抗震性能的显著提升效果,尤其是外粘贴 CFRP 时,墙体的剪切承载力和变形能力可大幅提高。除 CFRP 外,玻璃纤维(GFRP)和玄武岩纤维(BFRP)在砌体加固中的应用也日益增多。S. Olivito 等[11]的研究表明,玄武岩纤维增强复合材料(Basalt-FRCM)能在拱门砌体结构中实现有效的加固。

2.2. 钢筋网砂浆面层加固

钢筋网水泥砂浆面层加固(Reinforced Cement Mortar, RCM)是一种传统经济的砌体结构抗震加固方法,常用于提升低强度砖砌体结构的抗震性能。该加固技术通过在墙体表面布置钢筋网并涂抹水泥砂浆面层形成增强层,从而提升砌体的抗剪承载力、耗能能力和延性。

在钢筋网水泥砂浆面层加固的实际应用中,设计标准的选择对加固效果至关重要。吴乐乐等[12]对比分析了《砌体结构加固设计规范》(GB 50702-2011)与《建筑抗震加固技术规程》(JGJ 116-2009)中的钢筋网水泥砂浆加固设计要求,发现两者在加固可靠性指标上存在显著差异。《砌体结构加固设计规范》和《建筑抗震加固技术规程》中砂浆面层加固砌体墙验算表达式的抗震可靠水平有较大不同,两标准在实际工程应用中容易出现矛盾。在实际工程中,规范的选择应综合考虑建筑物的使用功能、加固需求及经济因素,以确保结构抗震加固的可靠性和可行性。

基于实验验证,钢筋网水泥砂浆加固对低强度砌体结构的抗震性能提升效果显著。吴乐乐等[13]通过等效框架法系统研究了钢筋网水泥砂浆面层在低强度砖砌体中的加固效果,研究表明,这一方法能够显著降低砌体结构在地震荷载作用下的失效概率。吴碧野等[14]利用数值模拟方法研究低强度砂浆强震损伤砖墙采用钢筋网砂浆面层加固的适宜性及加固后抗震性能,采用通用大型有限元软件 LS-DYNA 分析墙体未加固及加固后的承载能力及变形能力得到了很好的拟合效果。Pengfei Ma 等[15]研究了采用灌浆铁丝网水泥抹面加固(GFOR)方法加固的受损 URM 墙体如图 3,发现受损墙体在采用 GFOR 技术后呈现出更合理的破坏模式。



Figure 3. Reinforce damaged URMs with GFOR
图 3. 使用 GFOR 加固受损的 URMs

2.3. 高性能聚合物砂浆加固

高性能聚合物砂浆加固是近年来发展出的新型砌体结构抗震加固技术,通过采用高韧性、高粘结力的聚合物改性砂浆与增强网相结合的复合材料加固层,以提高砌体结构的抗剪强度、耗能能力和延性。

与传统水泥砂浆相比, 聚合物砂浆不仅具有较好的延展性和抗裂性, 还能有效改善墙体在地震作用下的破坏模式, 降低脆性破坏的风险。

在使用高性能聚合物砂浆加固中。聚合物砂浆作为面层, 具有良好的延性和粘结性能, 在地震荷载作用下能够有效分散拉应力并限制裂缝的扩展, 而增强材料则提供了额外的抗拉强度和延展性。两者相结合形成的复合层使墙体在地震中表现出延性破坏特征, 能够显著提升墙体的耗能能力和抗震韧性。张风亮等[16][17]的实验研究表明, 通过在砌体表面应用单面聚丙烯网聚合物砂浆层, 可显著提高砖砌体农房的抗震性能, 在受剪承载力和变形能力方面表现优异。Penggang Tian [18]等系统评估了聚丙烯网复合聚合物砂浆对乡村砌体建筑墙体的抗震加固效果如图 4。试验结果显示, 采用聚丙烯网复合聚合物砂浆加固后的墙体在剪切强度和变形能力方面均表现出了显著提升, 特别是在地震荷载下, 墙体的破坏模式从脆性破坏转为延性破坏。该研究表明, 聚合物砂浆与聚丙烯网结合的复合层不仅提升了墙体的抗剪强度, 还有效提高了结构的耗能能力。



Figure 4. Masonry wall paved with polypropylene mesh composite polymer mortar
图 4. 聚丙烯网复合聚合物砂浆铺设的砌体墙

2.4. 纤维增强水泥基复合材料(ECC)加固

纤维增强水泥基复合材料(ECC)和 FRP 虽然都利用纤维来增强材料性能, 但它们的力学行为和加固机理存在显著差异。ECC 侧重于提高材料的延性和韧性, 而 FRP 则以其高强度和高模量来提高结构的承载力和刚度。ECC 作为一种创新的工程材料, 因其独特的力学性能和结构性能改善潜力而受到学术界的广泛关注。ECC 通过在水泥基体中分散短切纤维, 实现材料的多缝开裂行为和高延性, 对于提高既有砌体结构的抗震性能具有重要意义。

刘海平等[19]研究者在其研究中深入探讨了 ECC 面层对砌体结构压剪性能的影响。通过实验分析, 他们发现 ECC 面层能够显著提升砌体墙的抗剪承载力与变形能力, 能够有效改变砌体的破坏模式, 使砌体墙从传统的脆性破坏转变为更为延性的破坏特征。这种转变使砌体结构在不发生灾难性破坏的情况下能吸收和耗散更多的能量, 对于提高结构在地震作用下的抗震性能至关重要。相信在未来使用 ECC 材料对砌体结构进行加固的应用研究将会更加广泛。

高延性混凝土(HDC)是根据工程水泥基复合材料(ECC)的设计理论制备而来, 具有高强度、高韧性以及拉伸荷载作用下表现出应变硬化及多裂缝开展的特点, 其延性比普通混凝土高得多, 能够承受较大的变形而不发生脆性破坏。这种材料通常通过添加纤维或使用特殊的水泥基复合材料来实现。与普通混凝土相比其有着更强的变形能力, 使其在受到外力作用时能够承受更大的塑性变形而不发生断裂, 成为了加固易损砌体结构的理想选择。

在寇佳亮等[20][21]的研究中, HDC 被用于震损古旧砌体结构的加固, 通过 HDC 构造带面层加固的方式, 显著提升了结构的抗震性能。实验结果表明, HDC 加固后的试件在低周反复荷载作用下表现出了更好的延性和耗能能力, 且破坏模式更为合理。张伟等[22]的研究进一步证实了 HDC 在限制墙面开裂、改善墙体破坏形态以及提高承载力和变形能力方面的有效性。他们通过建立 HDC 加固试件的剪切滑移和弯曲摇摆承载力计算模型, 为 HDC 加固设计提供了理论支持。混杂纤维改良活性粉末混凝土(HFMRPC)作为 HDC 的一种, 通过形成延性较好的加固层提升墙体的抗剪强度和抗震韧性。刘国安等[23]根据 HFMRPC 与砌体墙表面有着良好的粘结性能, 通过抹面的方式来对砌体墙进行加固, 发现采用 HFMRPC 面层通过不同加固方式加固构造柱约束的带窗洞口的砌体墙, 可以显著提升墙体的性能, 而双面加固的加固方式对试件的提升效果最为显著。王欣等[24]针对老旧砌体结构房屋使用了 HFMRPC 对不同高宽比砌体窗间墙进行加固, 提出了适用于 HFMRPC 面层加固的抗剪承载力计算公式, 为实际工程的应用提供了理论基础。

当前 HDC 作为一种新型的加固材料, 其在提高砌体结构抗震性能方面的潜力已经得到了初步验证。随着研究的深入, HDC 加固技术有望在建筑结构加固领域得到更广泛的应用, 为提升既有建筑的抗震能力提供强有力的技术支持。

2.5. 创新材料和组合加固技术的应用

近年来, 随着材料科学的不断进步, 创新材料和组合加固技术在砌体结构加固领域得到了广泛研究和应用。这些新技术不仅提高了砌体结构的抗震性能, 还带来了施工的便捷性和经济效益的提升。

在材料创新方面, Zhang Maohua [25]等对纳米二氧化硅(NS)增强砂浆来建造砌体填充墙 RC 框架结构进行了研究。这种新砂浆的应用显著提高了构件的剪切强度和粘结强度, 有效缓解了平面内损伤, 提高了墙体的稳定性。同时, 它还减缓了纯平面外墙体开裂, 显著降低了倒塌风险。这一创新材料的应用不仅增强了结构的安全性, 还为砌体结构的耐久性提供了新的解决方案。刘链波等[26]为改善传统砖墙承重房屋的抗震性能, 采用 YS-JGF 作为嵌缝胶泥嵌筋加固墙体、嵌缝胶泥、钢筋三者粘结为一个整体, 从而达到改善墙体抗震性能、提高其抗剪承载力和变形能力的目的。刘洋等[27]提出了喷涂聚氨酯技术加固村镇砖砌体墙结构的方法。他们发现, 喷涂聚氨酯弹性体可有效抑制和延缓墙体裂缝的发展, 显著提高墙体的滞回性能、耗能能力及变形能力。这一技术不仅提高了砌体结构的整体性能和抗倒塌性能, 还因其施工便捷性而具有广泛的应用前景。而 Ranjan [28][29]等则更关注于环保和可持续性, 他们通过使用两种不同的废弃纤维——椰壳纤维和尼龙纤维作为砂浆的增强材料, 来改善砌体结构的抗震性能。这种方法不仅提高了 URM 建筑的抗震性能, 还显著减少了碳排放, 缓解了垃圾填埋的问题, 为绿色建筑材料在砌体结构加固中的应用提供了新的思路。

在组合加固技术方面, 李杜渊等[30]则提出了一种采用高性能聚合物砂浆与普通砂浆组合加固砌体结构墙体的方法。通过实际应用表明, 该方法不仅具有较好的施工性能, 还能显著降低加固成本, 提高经济效益。乔崎云等[31][32]则进一步探索了新型钢-聚合物砂浆组合加固方法和斜向碳纤维布条带或斜向聚合物砂浆条带与外覆角钢组合的加固方式对震后砌体结构的加固效果。他们发现, 使用钢-聚合物砂浆组合加固砌体结构具有较高的承载力安全储备, 能够有效提升结构的抗震性能, 采用碳纤维布-聚合物砂浆条带的加固方式能很好地恢复震损墙体的承载能力和变形能力。Zhong Zilan 等[33]提出了一种采用防腐内衬(CPL)和高分子水泥复合材料(HPCCM)的砌体墙结构组合加固方法, CPL-HPCCM 结构加固方法是一种有效的结构加固技术, 显著提高了砌体墙的侧向承载能力和能量耗散能力。

创新材料和组合加固技术在砌体结构加固领域的应用取得了显著成效。这些新技术不仅提高了结构

的抗震性能和耐久性，还带来了施工便捷性和经济效益的提升。随着材料科学的不断进步和技术的不断创新，相信未来会有更多高效、环保、经济的加固技术涌现出来，为砌体结构的加固提供更好的解决方案。

3. 研究展望

技术的适用性与局限性

(1) 纤维复合材料加固可以显著提高混凝土结构的抗弯、抗剪承载力，有效减轻结构自重，适用于需要提高结构强度和刚度的场合。但其耐火性、锚固问题、经济型以及未来对环境的影响还存在着一定的局限性。

(2) 钢筋网水泥砂浆加固法由于其低成本和便捷的施工工艺，广泛适用于低层砖砌体结构尤其是农村住宅的抗震加固工程。然而，该方法较易受到人为因素影响。同时，钢筋网水泥砂浆加固在高湿度和腐蚀性环境中易受材料劣化影响，影响其长期耐久性。

(3) 高性能聚合物砂浆加固有着提高结构的粘接力增强耐久性的优点是一种不错的提高砌体结构抗震性能的手段，但其成本较高，长期性能和老化特性仍需进一步研究和验证。

(4) 纤维增强水泥基复合材料是一种具有超高延展性的水泥基复合材料，广泛应用于结构加固和修复。与传统的水泥基材料相比，ECC 在拉伸和变形方面表现出色，能够有效提高结构的耐久性和抗裂性能。然而 ECC 的生产过程较为复杂，对基底材料的较高适应性要求和环境的耐受性限制了其在大规模加固中的应用。

经过对既有建筑加固技术的系统性对比分析，各方法呈现出显著的性能差异与适用边界特征。FRP 材料凭借轻质高强的特性，更加适用于高层或对抗震性能要求高的砌体结构，但实际应用受到材料成本高昂及界面处理工艺复杂性的限制；钢筋网砂浆面层加固具有较好的经济性，适合应用于农村及低成本建筑。而高性能聚合物砂浆和高延性混凝土在历史建筑等对保护性要求较高的结构中因其卓越的力学性能与保护性修缮要求的高度适配性运用较多。组合加固技术、纳米材料及废弃纤维增强材料虽然技术前景广阔，但在工程化应用中仍需进一步验证和规范，建立系统化的技术标准和实践体系。

4. 结论

综上，砌体结构抗震加固研究虽然取得了一定进展，但仍面临诸多挑战。传统加固方法在经济性和施工可行性上表现良好，但在复杂条件下适用性不足；新型材料技术的运用展现出了优异的性能，但在成本和施工标准方面仍需改进；因此，我认为未来研究和工程实践应着重于以下几个方面：

(1) 材料性能优化与成本控制：对新型加固材料的研发应兼顾性能提升和成本控制。开发性能优异但成本更低的复合材料或新型环保材料，以提升其工程应用潜力。

(2) 设计标准化与流程优化：性能化抗震设计和数据驱动设计方法应进一步规范化，建立易于操作的设计流程和评价标准，以提高其在工程项目中的实用性。

(3) 跨学科融合与多层次协作：砌体结构抗震加固是结构工程、材料科学和计算科学等多学科交叉领域，未来应加强学科间协作，推动新技术与新材料的结合应用，优化抗震加固方案。

(4) 人工智能与大数据技术应用：在未来的砌体结构抗震加固研究中，应深度融合人工智能、大数据、新材料等技术，通过智能算法驱动优化模型构建，形成系统性创新框架，实现创新技术与工程实践的深度融合。

(5) 环境和可持续性考虑：在加固设计中，应考虑材料和技术的环保性，优先选择绿色环保材料和低能耗的施工方法，探索再生建材和低碳技术的应用之路，实现建筑结构安全与环境保护的双重目标。

基金项目

云南大学省级大学生创新训练计划项目 S202410673257。

参考文献

- [1] 郭晓云, 唐永明, 陈杰. FRP 对砌体结构抗震加固的研究进展[J]. 防灾科技学院学报, 2020, 22(4): 36-42.
- [2] 曲烽豪, 尹世平, 王飞, 等. 纤维编织网增强混凝土双面加固不同损伤程度砌体墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(S1): 83-91.
- [3] 尹世平, 曲烽豪, 王飞, 等. TRC 单面加固受损砖砌体墙抗震性能研究与受剪承载力分析[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(S2): 107-115.
- [4] 陈氏凤, 王激扬, 沈军, 等. 纤维编织网混凝土单侧加固砌体墙的拟静力试验研究[J]. 混凝土, 2022(4): 56-60.
- [5] Bertolesi, E., Buitrago, M., Giordano, E., Calderón, P.A., Moragues, J.J., Clementi, F., *et al.* (2020) Effectiveness of Textile Reinforced Mortar (TRM) Materials in Preventing Seismic-Induced Damage in a U-Shaped Masonry Structure Submitted to Pseudo-Dynamic Excitations. *Construction and Building Materials*, **248**, Article 118532. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118532>
- [6] ElGawady, M.A., Lestuzzi, P. and Badoux, M. (2005) 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>
- [7] Cosgun, T., Uzdil, O., Sayin, B. and Zengin, K.K. (2022) Seismic Vulnerability Assessment of a Masonry Structure and an FRP-Strengthening Proposal. *Case Studies in Construction Materials*, **17**, e01680. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01680>
- [8] 熊雯磊, 王珍珍, 周智, 等. 海南火山石砌体结构的 FRP 抗震加固试验研究[J]. 自然灾害学报, 2023, 32(1): 161-170.
- [9] 景雯婧, 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.
- [10] Dan, L. and Dejian, Y. (2011) Seismic Property and Influential Factors Analysis of Reinforced Brick Masonry Wall with CFRP. 2011 *International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)*, Xianning, 16-18 April 2011, 1639-1642. <https://doi.org/10.1109/cecn.2011.5769275>
- [11] Olivito, R.S., Scuro, C., Porzio, S. and Codispoti, R. (2019) Experimental and Analytical Analysis on a Masonry Arch Strengthened with Basalt FRCM. *Procedia Structural Integrity*, **24**, 310-318. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.02.028>
- [12] 吴乐乐, 唐曹明, 罗开海, 等. 水泥砂浆面层加固砌体墙抗震可靠指标研究[J]. 世界地震工程, 2023, 39(2): 42-51.
- [13] 吴乐乐, 唐曹明, 黄世敏, 等. 钢筋网水泥砂浆面层加固低强度砖砌体结构的地震易损性分析[J]. 建筑科学, 2023, 39(5): 54-65.
- [14] 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.
- [15] Ma, P., Xin, R. and Yao, J. (2021) Assessment of Failure Mode and Seismic Performance of Damaged Masonry Structures Retrofitted with Grout-Injected Ferrocement Overlay Reinforcement (GFOR). *Construction and Building Materials*, **305**, Article 124778. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124778>
- [16] 张风亮, 梁钰强, 刘祖强, 等. 聚丙烯网水泥砂浆面层加固砖砌体农房振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(5): 69-80.
- [17] 张风亮, 马东, 刘祖强, 等. 单面聚丙烯网聚合物砂浆加固砖砌体墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(12): 137-147.
- [18] Tian, P., Yang, W., Cao, C., Bian, Z., Yun, Z. and Lu, J. (2024) A Study of the Seismic Resistance Performance of Strengthened Masonry Walls Using Polypropylene Mesh-Composite on the Surface. *Structures*, **68**, Article 107270. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107270>
- [19] 刘海平, 董方园, 蒋芳明, 等. 纤维增强水泥基复合材料(ECC)面层加固砌体墙的压剪性能研究[J]. 工程力学, 2023, 41(12): 201-214.
- [20] 寇佳亮, 马铭, 孙国兴, 等. 高延性混凝土加固震损弱粘结古旧砌体抗震性能试验研究[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(6): 142-152.
- [21] 寇佳亮, 樊明艳, 孙国兴, 等. 高延性混凝土加固震损古旧砌体抗震性能试验及恢复力模型研究[J]. 振动与冲

- 击, 2022, 41(7): 106-115+125.
- [22] 张伟, 贺晶晶, 胡炜, 等. 高延性混凝土加固砌块砌体墙抗震性能试验及承载力研究[J/OL]. 工程力学, 1-14. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.o3.20240612.1136.014.html>, 2025-04-27.
- [23] 刘国安, 王欣, 杨哲, 等. HFMRPC 面层加固带窗洞口砌体墙抗震性能试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(4): 752-762+777.
- [24] 王欣, 高永超, 陈浩, 等. HFMRPC 加固不同高宽比砌体窗间墙抗震性能试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(5): 1057-1066+1111.
- [25] Zhang, M., Ding, K., Pang, L. and Ding, J. (2023) In-Plane/Out-of-Plane Seismic Performance of Masonry Infilled RC Frame Structure Made of Nano-SiO₂ Reinforced Mortar: Experimental Study. *Journal of Building Engineering*, **68**, Article 106104. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.106104>
- [26] 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+129.
- [27] 刘洋, 刘阳, 田颖, 等. 喷涂聚氨酯弹性体加固砌体墙抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2024, 41(4): 174-183.
- [28] Ranjan, N., Banerjee, S., Nayak, S. and Das, S. (2024) Seismic Safety Evaluation of Coir and Nylon Fiber-Reinforced Masonry Building Models Subjected to Bi-Axial Shaking Table Test. *Journal of Building Engineering*, **85**, Article 108767. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.108767>
- [29] Ranjan, N., Banerjee, S., Nayak, S. and Das, S. (2024) Upgrading Seismic Safety of Masonry Building Models Built Using Recycled Waste Fiber-Reinforced Mortar through Uni-Axial Shake Table Testing. *Structures*, **65**, Article 106624. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106624>
- [30] 李杜渊, 陈洪敏, 刘文超, 等. 高性能聚合物砂浆组合加固砌体墙抗震性能与工程应用[J]. 建筑结构, 2022, 52(S2): 725-729.
- [31] 乔崎云, 许虎, 杨璟, 等. 钢-聚合物砂浆加固震损后砌体结构振动台试验研究[J]. 自然灾害学报, 2023, 32(6): 141-150.
- [32] 乔崎云, 高晓鹏, 曹万林, 等. CFRP-聚合物砂浆加固震损构造柱约束砖砌体墙试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2024, 46(1): 133-141.
- [33] Zhong, Z., Pan, J., Shen, J., Wang, H., Zhang, Y. and Du, X. (2024) Experimental Study on Seismic Performance of Damaged Masonry Walls Reinforced with High-Polymer Cementitious Composite Material. *Journal of Building Engineering*, **96**, Article 110629. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.110629>