

纤维增强复合材料加固砌体结构的界面剥离准则

陈寿德

新疆鼎天力商品混凝土有限公司 新疆乌鲁木齐

【摘要】砌体结构因抗拉、抗剪强度低，抗震性能不足，常需加固。纤维增强复合材料（FRP）因诸多优势在砌体加固领域应用广泛。但加固中界面剥离问题突出，影响加固效果与结构安全。本文聚焦纤维增强复合材料加固砌体结构的界面剥离准则，深入剖析界面剥离的破坏模式，从材料特性、粘结性能、受力状态等多方面探讨影响因素，构建全面准确的界面剥离准则数学模型，并进行验证与应用分析。研究成果为 FRP 加固砌体结构设计提供关键依据，可有效提升加固结构可靠性与耐久性，对保障砌体结构安全、推动加固技术发展意义重大。

【关键词】纤维增强复合材料；砌体结构；界面剥离准则；破坏模式；影响因素

【收稿日期】2025 年 3 月 12 日

【出刊日期】2025 年 4 月 5 日

【DOI】10.12208/j.ace.2025000126

Interface peeling criteria for fiber-reinforced composite (FRP) reinforcement in masonry structures

Shoude Chen

Xinjiang Dingtianli Commercial Concrete Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang

【Abstract】Masonry structures, due to their low tensile and shear strength and inadequate seismic performance, often require reinforcement. While fiber-reinforced composites (FRP) demonstrate extensive applications in masonry reinforcement owing to their multiple advantages, interface peeling remains a prominent issue during reinforcement processes, significantly impacting both reinforcement effectiveness and structural safety. This study focuses on establishing interface peeling criteria for FRP-reinforced masonry structures. Through comprehensive analysis of failure modes and influencing factors—including material properties, bonding performance, and stress states—we develop a comprehensive mathematical model for interface peeling criteria, which is subsequently validated and applied through case studies. The research findings provide critical guidance for FRP-reinforced masonry structure design, effectively enhancing structural reliability and durability. These advancements hold significant implications for ensuring masonry safety and advancing reinforcement technology development.

【Keywords】Fiber-reinforced composites; Masonry structures; Interface peeling criteria; Failure modes; Influencing factors

引言

砌体结构在建筑领域应用广泛，但其自身抗拉、抗剪强度较低，在地震等灾害作用下易遭受破坏。纤维增强复合材料以其轻质、高强、耐腐蚀等特性，成为砌体结构加固的理想材料。在实际加固工程中，纤维增强复合材料与砌体结构之间的界面剥离问题频繁出现，严重影响加固效果与结构的长期稳定性。深入研究纤维增强复合材料加固砌体结构的界面剥离准则，对于提高加固工程质量、保障结构安全具有重要的现实意义。

1 纤维增强复合材料与砌体结构界面破坏模式分析

纤维增强复合材料与砌体结构协同工作时，界面

处的破坏模式呈现出复杂的力学响应特征。界面粘结失效破坏是最为常见的失效形式，其本质是材料间力的传递机制出现障碍。在实际工程中，粘结材料的性能参数直接影响界面稳定性。环氧树脂基粘结剂的固化程度不足时，其分子链无法形成完整的交联网络，导致粘结强度显著降低。施工环节中，若界面处理仅进行简单清扫而未采用喷砂或打磨工艺，残留的灰尘和疏松层会形成隔离层，阻碍粘结材料与基材的有效接触。

砌体基体破坏反映了加固与被加固材料间的力学适配性问题。砌体作为多孔脆性材料，其力学性能存在显著的离散性。当纤维增强复合材料提供的约束刚度

远高于砌体的承载能力时, 应力集中现象尤为明显^[1]。典型表现为, 在门窗洞口等应力敏感部位, 加固后砌体因无法承受纤维材料传递的集中力, 沿灰缝或块体内产生阶梯状裂缝。

纤维增强复合材料自身破坏是极端受力条件下的失效形式, 涉及材料的本构特性与结构响应。碳纤维增强复合材料 (CFRP) 虽具有优异的抗拉强度, 但在面外荷载作用下表现出明显的脆性特征。当加固结构遭受地震或冲击荷载时, 纤维材料可能因局部应力状态复杂而发生层间剪切破坏。材料制造过程中的缺陷, 如纤维丝束的不均匀分布或树脂浸润不充分, 会形成内部薄弱点, 在荷载作用下引发应力集中^[2]。实际工程中, 若纤维材料的铺层方向与主应力方向不一致, 其力学性能无法充分发挥, 在荷载作用下可能提前发生断裂, 导致加固体体系失效。

2 影响界面剥离的关键因素探讨

材料特性对界面剥离的影响本质上是不同材料力学性能协同性的问题。纤维增强复合材料的弹性模量差异直接影响界面应力分布。当复合材料弹性模量远高于砌体时, 两者在荷载作用下的变形不协调会导致界面产生剪应力集中。玻璃纤维增强复合材料 (GFRP) 与低强度砌体结合时, 由于 GFRP 的弹性模量相对较高, 在长期荷载作用下, 界面处的剪应力无法有效耗散, 容易引发剥离。材料的断裂伸长率差异同样关键, 若纤维材料的变形能力显著低于砌体的变形需求, 在结构发生微小变形时, 界面就可能因应力超限而破坏。

粘结材料的性能是维持界面完整性的核心要素。粘结强度不仅取决于材料的化学成分, 还与固化工艺密切相关。环氧树脂粘结剂的固化过程中, 温度和时间控制不当会导致固化不完全, 影响其最终粘结性能。韧性是衡量粘结材料抵抗变形能力的重要指标, 具有高韧性的粘结剂能够在界面产生微小滑移时通过塑性变形耗散能量, 延缓剥离进程。耐久性方面, 粘结材料在紫外线、酸碱环境等作用下会发生化学降解, 其力学性能随时间逐渐衰减。聚酯基粘结剂在潮湿环境中易发生水解反应, 导致粘结层强度下降, 增加界面剥离风险。

砌体结构的表面状况通过影响粘结过程的物理化学作用, 对界面性能产生决定性影响。表面粗糙度通过增加机械咬合作用提升粘结效果, 采用喷砂处理的砌体表面可形成微米级的凹凸结构, 显著增大粘结面积^[3]。清洁度是保证粘结效果的前提, 若砌体表面残留油污或脱模剂, 会阻碍粘结材料的浸润, 形成弱界面层。含水率对粘结过程具有双重影响: 过高的含水率会稀释

粘结材料, 降低其有效浓度; 而过低的含水率则可能导致砌体吸收粘结材料中的水分, 影响固化反应。

受力状态的复杂性决定了界面剥离过程的动态特性。荷载类型对界面的作用机制存在显著差异, 静载作用下界面的破坏主要由应力累积导致, 而动载和反复荷载会引起材料的疲劳损伤。桥梁等交通工程中的砌体结构在车辆荷载作用下, 界面处的应力状态随时间周期性变化, 疲劳裂纹会在应力集中部位萌生并扩展^[4]。荷载大小直接影响界面的应力水平, 超出设计承载力的荷载会导致界面应力迅速超过其极限强度。加载速率同样影响界面破坏模式, 快速加载时材料的惯性效应导致应力重分布, 界面可能因来不及发生塑性变形而产生脆性破坏。

3 构建界面剥离准则的数学模型

从力学平衡角度构建界面剥离准则, 需系统考虑加固体体系各组成部分的力传递机制。界面处的力学行为可简化为二维应力状态, 包含剪应力和法向应力两个分量。在静力平衡条件下, 纤维增强复合材料、粘结层与砌体之间的力需满足牛顿第三定律, 即作用与反作用力关系。通过建立界面应力平衡方程, 可量化不同材料间的力传递效率。在均匀受拉荷载作用下, 界面剪应力需将纤维材料承受的拉力传递至砌体, 其大小与界面粘结强度直接相关。考虑结构的几何非线性效应, 当界面发生较大变形时, 平衡方程需引入变形协调条件, 以准确描述应力状态的变化。

结合材料本构关系是提升模型精度的关键环节。纤维增强复合材料通常采用线弹性本构模型描述其在弹性阶段的力学行为, 该模型基于胡克定律建立应力 - 应变关系。粘结材料的力学特性较为复杂, 常采用粘结 - 滑移本构模型进行表征, 该模型通过界面剪应力与相对滑移量的关系, 反映粘结层的非线性力学行为^[5]。砌体材料由于其多孔结构和脆性特征, 需采用非线性本构模型描述其力学响应, 常见的模型包括弹塑性模型和损伤模型。

数学推导与数值模拟是验证和优化模型的必要手段。在模型求解过程中, 常采用有限元方法将连续体离散为有限个单元, 通过迭代计算求解各单元的应力和位移。利用数值模拟技术, 可系统分析不同参数对界面力学性能的影响, 如改变纤维材料的弹性模量、粘结层厚度等参数, 观察界面应力分布的变化规律。模型验证需结合试验数据进行对比分析, 通过设计不同工况的试验, 获取界面破坏时的应力、应变等关键数据^[6]。若数值模拟结果与试验数据存在偏差, 需对模型中的参

数进行敏感性分析,识别影响模拟精度的关键参数,进而对模型进行修正和优化,确保其在工程应用中的可靠性。

4 界面剥离准则的验证与应用分析

试验研究是验证界面剥离准则有效性的核心环节。在试验设计阶段,需系统考虑影响界面性能的关键参数,包括纤维增强复合材料的类型(如碳纤维、玻璃纤维)、粘结材料的种类(环氧树脂、丙烯酸酯)以及砌体结构的形式(砖墙、石墙)等。试件制备过程需严格控制施工工艺,确保界面处理、粘结材料涂抹厚度等参数的一致性。在加载试验中,采用位移控制加载方式,实时监测界面处的应力、应变变化,通过应变片和位移传感器获取关键数据。破坏模式的观察需结合宏观现象与微观分析,利用显微镜等设备研究界面破坏的微观机理。将试验结果与数学模型的预测值进行对比,评估模型在不同工况下的准确性,为模型修正提供依据。

实际工程应用是检验界面剥离准则实用性的最终标准。以某历史建筑砌体结构加固项目为例,首先需对既有结构进行详细检测,获取砌体的强度等级、损伤状况等基础数据。基于界面剥离准则,结合结构的使用功能和耐久性要求,确定纤维增强复合材料的选型和用量。在加固设计阶段,通过有限元分析优化纤维材料的粘贴方式,如采用 U 型箍或条带粘贴以提高约束效果。施工过程中,严格执行界面处理规范,确保砌体表面的清洁度和粗糙度满足要求,同时控制粘结材料的固化条件^[7]。加固完成后,通过长期监测系统对结构进行实时监控,采用应变计和裂缝观测仪监测界面应力变化和裂缝发展情况。定期评估加固效果,根据监测数据验证界面剥离准则在实际工程中的适用性,为后续类似项目提供经验参考。

通过试验研究与工程应用的循环验证,不断完善界面剥离准则的理论体系和应用方法。在不同地域和环境条件下开展应用实践,分析环境因素对准则适用性的影响,如冻融循环、酸雨侵蚀等对界面性能的作用^[8]。结合新材料和新工艺的发展,持续优化界面剥离准则,使其能够更好地指导纤维增强复合材料加固砌体结构的设计与施工,推动该技术在既有建筑加固领域的广泛应用。

5 结语

对纤维增强复合材料加固砌体结构的界面剥离准则研究进行总结,明确破坏模式、影响因素及数学模型等关键内容。当前研究虽取得一定成果,但在复杂环境下的长期性能、不同加固方式的协同作用等方面仍需深入探索。未来应加强多学科交叉研究,结合先进监测技术与数值模拟方法,完善界面剥离准则,推动纤维增强复合材料加固砌体结构技术更广泛应用,为建筑结构安全提供更有有力保障。

参考文献

- [1] 孙路革,王珍珍.碳纤维增强陶瓷基复合材料(CfRC)在建筑结构加固中的应用研究[J].佛山陶瓷,2025,35(06):32-33+36.
- [2] 徐冉,董泽坤,王耀,等.高延性纤维增强水泥基复合材料(ECC)加固砌体平面外力学性能研究[J/OL].工程力学,1-13[2025-07-15].
- [3] 万向阳.高延性纤维增强水泥基复合材料在砌体房屋加固中的技术应用[J].居舍,2024,(35):31-34.
- [4] 张楠,许琦玥.高性能纤维增强复合材料在建筑结构加固中的应用研究[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(22):171-173.
- [5] 岳永兵.纤维增强复合材料在土建结构加固工程中的应用[J].合成材料老化与应用,2024,53(03):74-76.
- [6] 刘代智,李媛,李晓琴.不同轴压比下纤维增强水泥基复合材料加固砌体墙抗震性能数值模拟研究[J].新型建筑材料,2023,50(10):76-81.
- [7] 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,2024,41(12):201-214.
- [8] 刘萍.双剪切加固结构下混凝土—环氧树脂—纤维增强复合材料界面力学试验分析[J].中国水能及电气化,2023,(02):50-55+61.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



OPEN ACCESS