

纤维增强复合材料在结构加固中的界面行为与设计方法

张 甜

江西可欣建设工程有限公司 江西九江 332000

摘 要: 纤维增强复合材料 (FRP) 因其高强、轻质、耐腐蚀及施工便捷的特性, 已成为结构工程领域重要的加固技术手段。FRP 加固效果的核心在于其与既有结构基体材料 (如混凝土、钢材) 之间的界面性能。本文深入研究了 FRP-基体界面行为的内在机理, 系统分析了界面应力传递机制、破坏模式及其关键影响因素。通过对现有界面性能测试与评价方法的梳理, 构建了包含粘结强度、耐久性及疲劳性能在内的综合评价体系。研究重点在于将界面行为的微观机理与宏观结构加固设计相结合, 剖析了现有设计规范中对界面因素考虑的不足, 并提出了以界面行为为导向的加固设计新思路。本文明确了界面优化设计的核心控制参数, 如有效粘结长度、界面剪切刚度及极限滑移量, 并在此基础上构建了一套从材料选择、构造措施到施工质量控制的全流程设计建议。研究成果旨在提升 FRP 加固技术的可靠性与耐久性, 为工程实践提供更具科学性和前瞻性的理论依据与技术指导。

关键词: 纤维增强复合材料; 结构加固; 界面行为; 粘结性能; 设计方法

引言

随着大量既有建筑老化和使用功能提升需求增加, 结构加固改造工程增多。纤维增强复合材料作为新型加固材料, 解决了传统加固方法增加结构自重、施工复杂、耐久性差等问题。但 FRP 加固技术并非简单粘贴材料, 其加固效能依赖 FRP 与基体的界面, 该界面是应力传递唯一路径, 性能决定加固体系整体性、承载能力和破坏形态。当前工程中, 部分设计对 FRP 界面行为复杂性认识不足, 致加固结构界面过早失效、材料强度利用率低且有安全隐患。因此, 深入研究 FRP-基体界面行为并融入加固设计方法, 是推动该技术从经验应用向科学设计发展的关键, 有重大理论和工程应用价值。

一、纤维增强复合材料与基体材料的界面行为机理

(一) 界面粘结的基本概念与作用

FRP 与基体材料间的界面是包含树脂渗透层、化学键合等作用的复杂三维区域, 称“界面相区”。界面粘结的根本作用是传递剪应力, 使 FRP 纤维轴向受拉发挥高抗拉强度。优良界面能确保应力均匀高效传递, 避免应力集中; 薄弱界面会致应力传递中断, 使结构提前破坏。因此, 界面是连接 FRP 与基体协同工作的核心, 其粘结质量决定加固体系成败。

(二) 界面应力传递机制

FRP 加固结构的界面应力传递本质是剪切应力从加

载点向两端衰减的过程。剪应力先在 FRP 端部达峰值, 再向全长扩散, 有效传递剪应力的长度为“有效粘结长度”。当 FRP 实际粘贴长度大于有效粘结长度, 超出部分对提升承载力贡献小。界面应力传递效率取决于界面层剪切刚度, 刚度高则应力集中、有效粘结长度短但易脆性破坏, 刚度低则应力平缓、有效粘结长度长利于发挥延性但需更长粘贴长度。理解该机制是计算结构承载力和构造设计的基础。

(三) 界面破坏模式与影响因素

FRP-基体界面破坏模式分三类: 一是 FRP 与树脂剥离, 因 FRP 表面处理或树脂浸润问题导致; 二是树脂层剪切破坏, 与树脂性能和厚度有关; 三是基体材料破坏, 常见为薄层混凝土被剥离, 表明基体材料常是薄弱环节。影响界面破坏模式及承载力的因素众多, 包括基体材料强度、FRP 表面粗糙度、胶粘剂性能, 以及施工环境和质量等^[1]。

(四) 界面行为的试验研究与表征方法

对界面行为的试验研究主要采用单剪和双剪试验, 可测量界面极限粘结强度等关键数据, 通过应变片能捕捉界面剪应力分布规律。数字图像相关法等非接触式测量技术可观测应变场和位移场。这些试验数据是建立本构模型、验证数值模拟和制定设计规范的依据, 通过统计分析可揭示不同因素对界面性能影响的量化规律, 为设计提供参数支持。

二、纤维增强复合材料加固结构中的界面性能评价

(一) 界面粘结强度的测试方法

界面粘结强度的测试是评价界面性能最直接的手段。除了前述的单剪和双剪试验,针对不同加固形式,还有特定的测试方法。例如,对于缠绕加固的柱体,可采用轴向压缩试验来评估FRP对核心混凝土的约束效果,其约束效率与界面粘结性能密切相关。对于受弯构件加固,常采用梁式试验,通过四点弯曲加载,观察FRP在梁底受拉区的剥离行为。这些测试方法获取的核心数据是极限粘结应力。然而,仅用极限粘结应力一个指标来评价界面性能是不全面的。一个完整的评价还应关注界面达到极限强度前的变形能力,即界面韧性,以及破坏时的滑移量。这些参数共同构成了界面的力学性能全貌,对预测加固结构的延性和破坏模式具有同等重要的意义^[2]。

(二) 界面耐久性及其环境影响因素

FRP加固结构在设计使用年限内,不可避免地会暴露于各种恶劣环境中,因此界面耐久性是评价其长期性能的关键。环境因素对界面的侵蚀作用是多方面的。水分的侵入会降低胶粘剂的玻璃化转变温度,使其软化,同时也会破坏FRP与基体之间的化学键合,导致粘结强度下降。温度的循环变化会在FRP、胶层和基体之间产生热应力,由于三者热膨胀系数不同,这种循环应力可能导致界面疲劳和微裂纹的萌生与扩展。化学介质,如酸、碱、盐溶液,会与胶粘剂或基体发生化学反应,腐蚀界面层。紫外线辐射会使胶粘剂老化、变脆。评价界面耐久性,通常通过加速老化试验,将试件置于高温高湿、冻融循环、化学介质浸泡等环境中,定期取样测试其粘结性能的衰减规律,从而预测其在真实环境下的长期性能表现。

(三) 界面疲劳性能与长期性能表现

对于承受交通荷载、机械振动等循环荷载作用的加固结构,界面的疲劳性能至关重要。在循环荷载作用下,即使荷载水平远低于静力极限荷载,界面也可能因累积损伤而发生疲劳破坏。其过程通常表现为界面微裂纹的萌生、稳定扩展,最终形成宏观裂缝导致剥离。界面疲劳性能的评价,主要通过疲劳试验进行,测定界面在不同应力幅值下的疲劳寿命,并绘制S-N曲线。长期性能不仅包括环境侵蚀和疲劳损伤,还涉及材料的徐变和应力松弛。胶粘剂作为一种高分子材料,在长期持续应力作用下会产生徐变变形,导致界面应力随时间重新分布,可能引起FRP中的应力水平升高,增加长期失效的风险。

因此,一个全面的界面性能评价体系,必须综合考量静力强度、耐久性、疲劳性能和长期徐变效应,才能确保加固结构在全生命周期内的安全可靠。

(四) 界面性能评价的关键指标体系

为了科学、系统地评价FRP-基体界面性能,需要建立一个多维度的关键指标体系。该体系应包含以下几个层面的指标。第一是强度指标,如极限粘结强度,这是评价界面承载能力的核心。第二是变形指标,如极限滑移量和界面剪切模量,它们反映了界面的变形能力和刚度。第三是能量指标,如界面断裂能,即单位面积界面破坏所消耗的能量,它综合了强度与变形,是评价界面韧性的重要参数。第四是耐久性指标,如经特定老化周期后强度保留率、模量保留率等。第五是疲劳性能指标,如指定应力幅下的疲劳寿命或疲劳极限。将这些指标量化,并明确其测试标准,形成一个完整的评价体系,可以为材料选择、施工质量控制和加固设计提供统一、客观的依据,避免单一指标评价带来的片面性和潜在风险^[3]。

三、基于界面行为的纤维增强复合材料加固设计方法

(一) 界面行为在加固设计中的重要性

在传统的FRP加固设计中,设计人员往往更关注FRP材料的抗拉强度和加固量(如FRP的截面积),而将界面视为一个理想的无缺陷连接。这种设计理念忽略了界面行为的复杂性和其在结构失效过程中的主导作用。实际上,绝大多数FRP加固结构的失效模式并非FRP被拉断,而是界面发生剥离破坏。这意味着,结构的最终承载力是由界面性能决定的,FRP的高强度并未得到充分利用。因此,将界面行为置于加固设计的核心地位,是实现“材料性能”向“结构性能”转化的关键。设计的目标不应仅仅是配置足够的FRP,更应确保所配置的FRP能够通过一个可靠的界面,将其强度有效地传递给基体结构,从而实现预期的加固效果。忽视界面行为的设计,是一种不完整且偏于不安全的设计^[4]。

(二) 现有加固设计方法中界面因素的考虑

当前,国内外主流的纤维增强复合材料(FRP)加固设计规范,诸如美国的《ACI 440指南》、欧洲的《fib Bulletin 14》以及中国的GB系列规范,均已开始将界面因素纳入考量范围,然而其考量方式相对简化。这些规范通常借助限制FRP的应变水平,以间接防范界面剥离现象的发生。具体而言,是设定一个FRP有效应变值,

该值显著低于FRP材料的极限拉应变，以此确保界面应力处于合理范围，避免过高。这种方法的优势在于简便实用，便于工程师实际操作。但其弊端亦十分显著：有效应变值的确定是基于大量试验数据的统计下限，具有较强的保守性，致使FRP材料强度的利用率普遍偏低，造成材料的浪费。此外，这种方法无法体现不同基体强度、不同胶粘剂性能以及不同施工工艺对界面性能的具体影响，属于“一刀切”的处理模式，缺乏精细化设计所需的灵活性。因此，现有的设计方法在考虑界面因素方面，仍存在较大的改进空间。

（三）界面优化设计策略与控制参数

实现基于界面行为的优化设计，需要从被动限制转向主动控制。其核心策略是围绕界面的关键控制参数进行精细化设计。第一个关键控制参数是有效粘结长度。设计时应确保FRP在关键受力区域的实际粘贴长度大于其有效粘结长度，以保证FRP强度的充分发挥。第二个关键控制参数是界面剪切刚度和极限滑移量。这直接关系到加固结构的延性。通过选择韧性较好的胶粘剂，可以增加极限滑移量，使结构在破坏前有更明显的预兆，避免脆性剥离。第三个关键控制参数是界面应力峰值。通过在FRP端部设置U型箍或采取其他锚固措施，可以有效降低端部的应力集中，延缓剥离的起始。第四个关键控制参数是基体强度。当基体强度较低时，界面破坏模式多为混凝土层破坏，此时单纯提高FRP用量效果有限，应先考虑对基体进行修复或增强。这些控制参数为设计提供了明确的抓手，使设计过程更具针对性和科学性^[5]。

（四）界面行为导向的加固设计流程与建议

基于以上分析，可以构建一个界面行为导向的FRP加固设计新流程。首先，进行详细的现场勘察与检测，准确评估既有结构的材料性能，特别是基体（混凝土）的强度和表面状况。其次，根据结构加固的目标（如抗弯、抗剪、抗压）和荷载水平，初步选择FRP的类型和规格。然后，进入核心的界面设计环节：根据基体强度和所选胶粘剂的性能，计算或查表确定有效粘结长度、界面粘结强度和极限滑移量等关键参数。基于这些参数，精确计算所需FRP的用量和粘贴长度，并设计必要的端部锚固措施，以控制界面应力峰值。设计完成后，应进

行详细的施工技术交底，明确对基体表面处理、胶粘剂配制、粘贴工艺和养护环境的严格要求，因为施工质量是保证设计界面性能得以实现的前提。最后，在条件允许时，可对加固后的结构进行现场荷载试验或无损检测，验证界面实际工作状态。这一流程将界面行为从设计中的一个隐含假设，转变为贯穿始终的显性设计主线，能够显著提升FRP加固设计的精准度、经济性和安全性。

结语

纤维增强复合材料加固技术的效能，其根本在于FRP与基体材料之间界面的性能表现。本文通过对界面行为机理、性能评价方法和设计方法的系统论述，强调了界面在加固体系中的核心地位。研究表明，界面的应力传递机制、破坏模式及耐久性，直接决定了加固结构的承载能力、破坏形态和长期可靠性。当前的设计方法虽已开始关注界面，但仍存在较大的保守性和局限性。未来的发展方向，必然是建立一套以界面行为为导向的精细化、量化设计方法。这需要深化对界面多尺度、多场耦合作用下力学行为的认识，发展更精确的界面本构模型和数值仿真技术，并最终将这些研究成果转化为工程师易于理解和应用的实用设计指南与规范。通过将界面研究的前沿成果与工程实践紧密结合，才能充分释放FRP材料的潜力，推动结构加固技术向着更安全、更经济、更耐久的方向发展，为保障既有基础设施的可持续服役提供坚实的技术支撑。

参考文献

- [1] 陈建宏. SiC纤维增强 Ni_3Al 复合材料制备及界面扩散行为研究[D]. 2019.
- [2] 袁宜环. 细直径连续碳化硅纤维增强铝基复合材料的界面结构演化与控制机制[D]. 厦门大学, 2022.
- [3] 杜敏, 陈思远, 郭兢业, 等. 纤维增强复合材料网格-环氧砂浆加固混凝土梁的抗剪性能试验[J]. 工业建筑, 2021(206-213, 119). DOI: 10.13204/j.gyjzG20110320.
- [4] 王伟伟. 基于工艺过程的Z-pin增强复合材料多尺度建模及内损伤机理研究[D]. 浙江大学, 2022.
- [5] 郭晓龙, 姚寅, 陈少华. 一种预测颗粒增强复合材料界面力学性能的新方法[J]. 力学学报, 2021(005): 053.