

混凝土结构中外粘结纤维增强聚合物复合材料的耐久性： 批判性综述

桑德拉·鞞鞞，约万·米列夫

所属：美国土木与环境工程系

摘要：外粘结纤维增强聚合物复合材料在民用基础设施中已经使用了几十年，但由于在理解降解机理方面存在许多知识差距，其长期性能仍然难以预测。本文总结了与纤维增强聚合物（FRP）复合材料在混凝土结构修复中的应用相关的关键耐久性问题，讨论了影响FRP复合材料寿命的各种因素：安装，质量控制，材料选择和环境条件。另外，本文对各种国际设计准则中目前使用的设计方法进行了批判性审查，以确定在耐久性方面改进设计指南的潜在机会。最后，结合材料和结构工程的跨学科方法被认为具有提高复合材料的耐久性的潜力。

关键词：纤维增强聚合物；复合材料；耐用性；降解；民用基础设施

Durability of Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer Composites in Concrete Structures: A Critical Review

Sandra Tatar, Jovan Milev

Affiliation: Department of Civil and Environmental Engineering, USA

Abstract: Externally bonded fiber-reinforced polymer composites have been in use in civil infrastructure for decades, but their long-term performance is still difficult to predict due to many knowledge gaps in the understanding of degradation mechanisms. This paper summarizes critical durability issues associated with the application of fiber-reinforced polymer (FRP) composites for rehabilitation of concrete structures. A variety of factors that affect the longevity of FRP composites are discussed: installation, quality control, material selection, and environmental conditions. Critical review of design approaches currently used in various international design guidelines is presented to identify potential opportunities for refinement of design guidance with respect to durability. Interdisciplinary approaches that combine materials science and structural engineering are recognized as having potential to develop composites with improved durability.

Keywords: Fiber-Reinforced Polymer (FRP); Composites; Durability; Degradation; Civil infrastructure

引言：

外粘（EB）纤维增强聚合物（FRP）复合材料是最经济的技术之一，显示出回收劣化混凝土结构以及提高全球关键基础设施弹性的前景。EB FRP 可用于升级各种混凝土结构中的柱子、梁和墙体，从住宅和商业建筑到关键基础设施（例如道路、桥梁、隧道和海洋结构）。FRP 复合材料由嵌入聚合物基质（树脂）中的纤维组成。纤维为材料提供强度和刚度，而树脂确保纤维对准，在纤维之间传递应力，并为纤维提供环境保护。复合材料与结构构件的表面外部粘合，树脂类似于用于形成复合材料基体的树脂。

尽管复合材料已经在土木工程中使用了近30年，但EB FRP 复合材料加固系统在整个土木工程界仍然是一种相对未知的做法。它们被广泛采用的潜在限制因素是缺乏全面的设计标准和长期测试数据，无法保证这些系统的耐用性。自EB FRP 应用早期以来，人们就对这些材料的长期耐用性提出了担忧，特别是当面临持续载荷，疲劳和环境因素的综合影响时 - 典型的户外应用。

矛盾的是，复合材料的出色耐用性经常被认为是在航空航天，汽车和海洋工业中使用FRP而不是其他材料的主要原因之一。虽然复合材料已成功用于这些行业，而没有遇到任何明显的耐久性问题，但应该指出的是，

这些“母”复合材料系统与当今基础设施应用中使用的复合材料系统有很大不同。组成材料的质量、加工和固化条件以及环境负荷通常有很大不同。例如，为了降低成本并受到特定应用要求的限制，土木工程师采用湿铺层应用工艺（树脂传递模塑和高压灭菌器成型）和环境固化环氧树脂（高温固化环氧树脂）等树脂。这些选择使EB FRP复合材料更便宜，但性能不如上述行业中使用的复合材料。

此外，航空航天工业中使用的材料必须通过保守的规格和资格测试要求，才能产生极高的安全性（即，低故障概率）。资格测试协议涉及广泛的耐久性测试（例如，加速调节），旨在规定材料设计性能，超标概率低，而不是准确评估复合材料随时间推移的劣化。在土木工程应用中，决策主要是成本驱动的，满足如此高的材料资格要求将大大增加EB FRP成本，使其与混凝土和钢铁等传统建筑材料相比没有竞争力。同样，使用过高的材料设计安全系数会推高EB FRP加固系统的总体成本，并使其成为结构升级的可行性较低的解决方案。因此，人们希望准确表征复合材料的降解，以确保设计不那么保守，并使EB FRP在成本驱动的决策过程中更具竞争力。

在世界各地，人们越来越需要在混凝土结构的恶劣环境条件下实施EB FRP，以延长其使用寿命并确保危险恢复能力。EB FRP在恶劣环境中的一些应用示例包括混凝土桥梁和水坝，水处理设施和核反应堆，其中EB FRP复合材料必须承受多种环境压力源和结构载荷的综合影响，同时保持足够长的使用寿命。设计这种结构升级系统的土木工程师经常面临缺乏关于正确处理耐久性问题的指导。本文旨在概述EB FRP系统中最常见的劣化机制，并对全球在恶劣环境条件下使用的EB FRP材料的现有设计指南进行批判性评估。读者应注意，尽管注意提供最新信息，但在开发新材料，耐久性设计指南和测试方法的同时，该领域的研究仍在进行中。

实践现状：EB 玻璃钢安装

EB FRP的安装是一个相对简单的过程，但即使与规定程序的偏差相对较小，也可能导致粘合系统中的缺陷，从而导致EB FRP的长期性能不佳。通常，控制系统有效性的最关键组成部分是EB FRP与混凝土之间的粘合质量，这是安装程序，环境条件以及粘合剂和基材材料质量的函数。

一、键关键与接触关键

EBFRP应用需要在EB FRP和混凝土基材之间进行强力粘合，以便在粘附物之间有效传递应力；此类应用

的例子包括弯曲和剪切强化。接触关键型应用保证了EB FRP与混凝土之间的紧密接触，而EB FRP与混凝土之间的粘结强度并不那么重要。最典型的接触关键应用是塔中的FRP限制。在粘合关键型应用中，环境耐久性方面，复合材料和复合混凝土粘合剂粘合的耐久性都起着至关重要的作用。在接触关键型应用中，复合材料的耐久性是比复合材料/混凝土粘结更重要的变量，因为复合材料提供了被动限制。

二、表面处理和安装

EB FRP应用是粘结关键还是接触关键，都会影响适当的混凝土表面处理的重要性。尽管基材制备和粘合剂粘合质量在粘合关键应用中更为重要，但最近的证据表明，EB FRP/混凝土界面处的缺陷会显著降低EB FRP受限柱的强度。由于粘接关键型应用依赖于FRP和混凝土之间的强粘合，因此必须确保混凝土基材中满足足够的条件，以允许发生强粘附。虽然已经开发了多种类型的EB FRP系统，但最常用的系统是湿式铺层EB FRP系统，因为它们易于在原位条件下应用，并且能够符合各种几何形状和配置（在粘结关键和接触关键应用中）。

EB 玻璃钢安装过程从混凝土表面处理开始。根据现有混凝土基材的质量，一般建议是（1）去除有缺陷的，损坏的或变质的混凝土，（2）修复有缺陷的钢筋，以及（3）恢复混凝土部分。然后对混凝土表面进行粗化（通过喷砂，研磨，针刺结垢等），以达到所需的粗糙度水平并暴露骨料。美国（U.S.）建筑规范建议的最低表面粗糙度对应于国际混凝土修复协会（ICRI）混凝土表面轮廓芯片No.3（ACI 440.2R）。为混凝土表面处理提供详细指导的示例文件是ACI 546R和ICRI No. 310.2R。还建议将任何尖角以及内外边缘倒圆角或倒角到足够的曲率半径，以最大限度地减少EB FRP中的应力集中，并防止在安装过程中在EB FRP和混凝土之间形成气穴。任何表面瑕疵（虫洞，大的突出骨料颗粒，表面压痕等）都应进行平滑和/或填充糊状环氧树脂（环氧树脂粘合剂与矿物填料也称为“腻子”），以确保表面均匀。表面处理的最后阶段包括表面清洁，以去除任何污垢，花边，碎屑，油等，并且通常通过压力清洗和压缩空气吹扫来执行。

在混凝土表面处理之后，将环氧底漆涂覆在混凝土表面。底漆可以是用于饱和干纤维织物的相同环氧树脂，也可以专门配制以促进EB FRP与混凝土基材之间的粘合。混凝土表面上的水会显著影响底漆与混凝土之间的附着力。因此，NCHRP 514建议底漆施用混凝土表面水分应低于0.05%（通过表面湿度计测量）。尽管市场

上存在防水底漆,但有限的实验证据表明,它们在减轻基材中存在的水分引起的附着力损失方面并不完全成功。现有的安装指南进一步表明,如果混凝土表面受到湿气蒸汽传输,则不应安装EB FRP,因为蒸汽传输会导致EB FRP混凝土粘结线起泡。

在涂底漆的混凝土表面之前,干纤维织物用树脂用手浸渍(使用特殊的饱和辊)或通过树脂浸渍机浸渍。浸渍的EB FRP织物可以直接涂在涂底漆的表面上,也可以先涂上腻子层来平衡表面并去除任何几何缺陷。应特别注意实现适当的纤维取向,同时确保FRP的扩散没有折痕和夹带的气泡。

安装后,EB玻璃钢允许根据制造商的规格进行固化。鉴于树脂固化取决于环境温度,正确的固化可能需要几天时间。在某些情况下,出于美学目的,谨慎的做法是在固化的EB FRP表面上涂上适当的涂层,并防止紫外线(UV)暴露和其他环境因素。虽然保护涂层保持EB FRP耐久性的能力通常被认为是假设的,但证明其有效性的实验证据却相当稀缺。

三、质量控制

在安装和初始固化之后,美国目前的实践状态是对任何脱粘或不完全树脂固化的迹象进行目视检查,然后根据ASTM D7522进行拉拔测试。通常的做法是接受拉拔强度超过1.4 MPa(200 psi)且混凝土基材内有故障的测试。ACI 440.2R进一步建议将低于1.4 MPa(200 psi)或故障模式(“G”除外)的测试结果提交给持牌设计专业人员进行评估和验收。质量控制指南通常认识到,在接触关键型应用中,正确的粘接可能不那么重要。但是,本文的作者鼓励在接触关键型应用中执行相同的评估标准,以全面提高此类EB FRP应用中的质量(以及随之而来的使用寿命)。

进行拉拔测试既昂贵又耗时,同时也不是完全非破坏性的。因此,有必要开发快速无损检测方法,以利于对粘接力的评估。此外,还对测试位置引入的应力集中提出了担忧。因此,这些测试应在预期应力较低的位置进行。测试位置通常通过在测试现场安装EB FRP贴片进行修复,以确保复合材料的连续性。

一般而言,缺乏标准化的技术和程序阻碍了检查协议的发展和量化FRP安装质量的能力。一些研究人员还研究了使用热成像,声学方法和最近的智能传感器(电传感器,压电传感器,光纤传感器)来测量位移,应变,键合质量和固化反应进展的可能性。尽管在开发使用“智能”材料的非破坏性方法方面已经进行了大量的

研究工作,但在从业者采用这种创新方法之前,还需要进行更多的研究。

材料选择、环境暴露和负载条件

EB FRP是一个复杂的多层系统,由三种组成材料及其相应的界面组成。粘接接头通常由混凝土,环氧树脂和FRP复合材料组成。由于混凝土基材的孔隙率,粘合剂和混凝土基材之间形成了相对突出的中间相。尽管纤维和聚合物基体之间的相间相要小得多,但在FRP复合材料的整体性能和长期耐久性中起着重要作用。鉴于其多尺度性质和单个组成材料(混凝土基材,环氧树脂和FRP复合材料)的可能劣化机制,FRP混凝土粘结体系中可能的劣化机制可能非常复杂。虽然EB FRP的整体性能可能会受到任何一种系统组件(混凝土,环氧树脂,FRP复合材料)恶化的影响,但沿着环氧树脂和混凝土基材之间的粘合线以及纤维-环氧树脂间相形成的过渡区域可以控制粘合系统的耐久性能。评估FRP-混凝土粘结接头的耐久性并不像单独研究每个系统组件(混凝土,环氧树脂,FRP)的耐久性那么简单。相反,考虑到系统的复杂性,这个问题需要在组件和系统级别对耐用性进行评估。

在服务期间,EB FRP系统暴露在各种环境条件下,其中许多同时起作用。高湿度、高温、冻融循环、紫外线辐射和除冰剂都会影响EB FRP强化系统的性能。到目前为止,这些暴露条件的影响主要在实验室环境中使用加速测试进行研究。对在自然环境中老化的FRP复合材料进行的一些研究报告了关于自然暴露与实验室条件之间相关性的相互矛盾的结果。Frigione等人报告说,人工调节样品的降解水平较高。Tatar和Hamilton得出结论,与短使用寿命的现场暴露数据相比,实验室耐久性数据提供了复合材料耐久性的悲观估计。其他研究人员发现,与加速老化测试相比,FRP在户外自然暴露下的降解程度更高。为了能够验证人工老化测试以精确预测使用寿命,需要更多关于复合材料在自然条件下老化的数据。近年来,来自实地研究的更多数据已经可用。

荷载条件(循环荷载和疲劳、持续荷载和冲击)是影响玻璃钢长期性能的另一个重要因素,因为荷载的存在加速了玻璃钢的退化,缩短了修复结构的使用寿命。疲劳和持续荷载都放大了环境行为的影响。对于应用于桥梁或铁路的FRP,疲劳行为对于其安全性至关重要,因为这些结构会承受循环车辆荷载。纤维的类型是影响疲劳性能的参数之一,但基质组成更为重要。GFRP复合材料的拉伸强度的预期下降约为每十年10%,而CFRP和

AFRP复合材料的拉伸强度每十年下降5%至8%。

此外,与具有高模量纤维的复合材料相比,在低模量纤维的复合材料中观察到随着循环次数的增加,应力的急剧降低。对不同类型的树脂:环氧树脂,聚酯树脂,酚醛树脂的测试表明,环氧树脂比其他类型的树脂具有优越的性能。环氧树脂的韧性在复合材料的疲劳性能中起着重要作用-韧性较高的基质具有较差的疲劳性能。设计规范使用不同的方法来控制疲劳性能—ACI 440.2R和TR55限制FRP中的应力水平,CNR指定了应用于静态载荷下脱粘应力极限的折减系数,纤维通过减少内部钢筋中的应力间接解决了这个问题。由于应力松弛和蠕变,在涉及FRP的长期性能时,还应考虑土木工程结构典型的恒定静载荷水平。在玻璃钢加固结构中,玻璃钢通常不承载持续载荷。FRP强化体系的流变性能主要由树脂基体主导。高水平的持续载荷、固化不足的树脂和较高的工作温度会增加蠕变变形,从而导致结构部件水平的过度变形。玻璃钢加固结构在其使用寿命期间容易受到冲击损坏(与车辆和飞行物体的碰撞)。冲击可能对(1)光纤造成损坏,这将显著影响其承载载荷的能力;(2)基体,影响其向纤维传递应力的能力(据测定,环氧树脂受损的FRP试样保留了80%的初始强度);(3)基材,当穿透复合材料时发生导致局部力学性能降低。

一、树脂和粘合剂

基础设施应用中常用的树脂和粘合剂是耐热固性聚合物,如聚酯、乙烯基酯和环氧树脂。虽然聚酯和乙烯基酯树脂可以配制为具有良好的机械性能,但它们在固化过程中会显示出过多的收缩,并且通常容易在潮湿的情况下加速变质。此外,已经注意到这些树脂在持续负载下也表现出较差的抗蠕变性。

现代湿法铺层EB FRP系统几乎完全使用常温固化环氧树脂作为复合基体以及EB FRP和混凝土之间的粘合剂。如果配制得当,常温固化的环氧树脂比其他类型的树脂具有更好的机械性能和更好的耐化学性。环氧树脂可以具有一系列粘度,并且可以在环境条件下以最小的收缩率固化。该粘合剂还具有好的润湿性和对包括混凝土在内的各种工程材料的附着力。环氧树脂是一种双组分粘合剂,由两种前体组成:(1)含环氧化物基团的聚合物(或单体)和(2)固化剂或硬化剂。树脂的主链通常是双酚A二缩水甘油醚(DGEBA)分子,其具有环氧化物基团。环氧化物基团与硬化剂(通常是含胺物质)反应,这导致固化反应的开始,其中环氧化物环打开并与硬化剂的活性官能团反应以形成永久共价键,也

称为交联。环氧树脂的固化程度通常以转化率表示,其表示反应的环氧化物官能团的百分比。交联网络的密度会影响粘合剂的机械性能和定义其从玻璃状状态到橡胶状态(T_g)的转变的温度。除单体和硬化剂外,环氧粘合剂通常还含有可以改变粘合剂性能的添加剂。环氧树脂中常见的添加剂类型是促进剂、偶联剂、抗氧化剂和增韧剂。

环氧粘合剂的耐久性不仅受其使用环境的影响,还受到原位湿铺应用所需的加工和固化条件的影响。由于环氧粘合剂是在环境条件下固化的,因此粘合剂的性能会受到其固化环境的影响。例如,实验证据表明,在标准实验室条件下固化的环氧粘合剂通常达到不到85%的固化率,而提高固化温度(即使在湿热条件下)可以显著加速转化。在环境条件下“缓慢”固化的后果是,树脂可能需要较长的固化时间(特别是在较冷的气候下)才能获得足够的机械性能。因此,强烈建议不要在低于10℃的环境和混凝土表面温度下施用环氧树脂,以促进树脂的正确固化。此外,鉴于固化反应是一种温度依赖性和扩散受限的反应,因此在环境条件下通常永远不会达到完全固化,这导致粘合剂的 T_g 在EB FRP的使用寿命期间(通常在55至75℃之间)保持相对较低。鉴于世界许多地方夏季的混凝土表面温度可能接近60℃或更高,因此,有可能超过环氧树脂 T_g 。这可能导致树脂的机械性能损失,最终损害EB FRP/混凝土粘合剂粘合的完整性以及纤维和基体之间的应力传递。

除了影响环氧树脂的机械和热性能外,不完全固化还可能使环氧树脂更容易受到某些劣化机制的影响。未反应的极性位点可以“吸引”水分子进入交联环氧树脂网络,导致塑化开始,从而导致弹性模量降低(高达50%),强度降低, T_g 显著降低。根据使用温度的不同,塑化(压低 T_g)和后固化(提高交联密度和增加 T_g)是两种竞争机制。D在调节温度下,湿热调节可导致同一树脂中 T_g 的抑制或增加。使问题的复杂性进一步复杂化,塑化的影响可以部分或完全恢复。

除了在潮湿条件下易降解外,环氧树脂还被发现对紫外线照射敏感,从而导致乙醚和氨基的氧化。氧化通常伴随着透明树脂的特征性黄变以及表面结垢和微裂纹。紫外线照射与湿热调节相结合,被发现会导致水解。由于长期接触氯化物,FRP增强结构中粘合剂和基体树脂的劣化也是一个问题,因为它会降低弹性模量,拉伸强度和极限应变。

根据一些研究,与盐水相比,蒸馏水中弹性模量和

拉伸强度的降低更大。然而，其恶化机制仍不明确，需要进一步研究。碱性和盐溶液对粘合剂耐久性的影响是Yang等人广泛审查的主题通常，暴露于除冰盐伴随着冻融循环，这是FRP复合材料和由于热膨胀差而导致的粘合性能的主要考虑因素。在Al-Mahmoud的一项研究中，在SEM下分析环氧树脂，以更好地了解FRP与混凝土在冻融循环期间粘合的降解。SEM图像没有显示对照样品和暴露于冻融循环的样品之间存在任何差异。然而，在其他研究中已有报道，暴露于冻融循环后树脂的机械性能（拉伸强度，极限应变，剪切强度）可分别降低28%，30%和60%。当FRP复合材料用于废水处理厂，管道或储存厂时，树脂基质暴露于酸中。在这种情况下，树脂的耐久性取决于其化学成分 - 乙烯基酯树脂比环氧树脂表现出更好的耐酸性。所有这些劣化机制都会显著降低环氧树脂的强度、弹性模量、断裂韧性或附着性。

二、纤维和复合材料

EB FRP 湿法铺层应用中最常用的纤维是玻璃（E 玻璃和 S 玻璃牌号）和碳纤维。芳纶纤维虽然具有比玻璃略好的机械性能，但价格要高得多，同时存在严重的耐久性问题。玄武岩纤维是玻璃纤维的有吸引力的替代品，因为它们具有改进的机械性能和更低的碳足迹。然而，目前正在进行调查，以阐明它们在典型的基础设施环境暴露下的性能保持。设计指南也没有为使用外部粘合的玄武岩纤维增强聚合物（EB BFRP）的增强体系的设计提供重要的指导。

玻璃纤维是经济的，因此对土木工程应用最具吸引力。由于建筑行业希望用非腐蚀性玻璃纤维增强聚合物（GFRP）棒代替易腐蚀的低碳钢增强材料，因此对其耐久性进行了彻底的研究。土木工程应用中通常使用的玻璃纤维等级（E-Glass 和 S-Glass）对湿气，碱和酸的抵抗力相对较差。发现GFRP复合材料中基质的水分吸收会导致基质的塑化并随后降低弹性模量。水分进入还可以通过基质膨胀，渗透压和基质 - 纤维化学键的减弱来诱导纤维 - 基质界面的开裂。然而，到目前为止，GFRP复合材料在混凝土结构中最有害的环境是混凝土渗滤液溶液中典型的高碱度（ >13.5 ），这可能导致多种劣化机制 - 主要是二氧化硅（ SiO_2 ）链的断裂，因为它们与氢氧离子（ OH^- ）反应以及 OH^- 使玻璃网络水解。众所周知，典型的玻璃纤维及其复合材料容易受到应力腐蚀开裂的影响。在EB GFRP的设计中，通常限制服务载荷下的应力水平，以避免复合材料的蠕变断裂失效（例如，ACI 440.2R）。

耐腐蚀（ECR-Glass）和耐碱（AR-Glass）等级的玻璃纤维可以缓解一些观察到的耐久性问题。虽然ECR和AR玻璃比E玻璃和S玻璃提供更好的耐久性特性，但这些纤维仍然具有低弹性模量（与碳相比）的特点，这限制了它们在EB FRP用于解决可维护性（例如，挠度和刚度）问题的情况下的适用性。与CFRP相比，GFRP复合材料更容易受到环境降解的影响，特别是当浸入溶液中时，它们不适合在腐蚀性环境中应用。当谈到冻融效果时，在GFRP试样中测量了拉伸强度的小幅下降 - Sheikh等人仅测量了3%。在同一项研究中，CFRP试样抗拉强度降低约12%。观察到的差异没有解释，但暴露于冻融循环的CFRP性能较差的可能原因可能是由于纤维和树脂之间的热膨胀系数（CTE）不匹配。碳纤维的热膨胀系数在轴向方向上负值低，在径向方向上具有较高的正值，而树脂在热膨胀系数方面具有正值。由于热应力过程中的差分变形，CTE引起的缺陷（如开裂）可能导致过早失效。

当EB FRP在基础设施的恶劣环境条件下使用时，碳纤维几乎只被使用。碳纤维对民用基础设施通常遇到的所有环境都是惰性的。它们还具有优异的机械性能和高抗蠕变断裂性。碳纤维比玻璃和芳纶纤维具有更好的耐化学侵蚀性。然而，纤维外层的降解，涉及纤维与酸中的金属离子之间的离子交换反应，导致间期的降解。

为评估湿铺碳纤维增强聚合物（CFRP）复合材料的寿命而进行的许多研究证实了其优异的耐久性。这些研究一致认为，在各种环境条件（碱性溶液，淡水，酸性，海水，紫外线辐射）下，复合材料在加速调配下的性能下降可以忽略不计。复合性能的恶化归因于基质和纤维 - 基质界面的降解，而不是纤维的降解。然而，由于基质的“软化”效应（特别是当超过其 T_g 时），CFRP复合材料的机械性能在温度升高时可能会受到影响。如上所述，暴露于冻融循环会导致由于组成材料的热不相容性而降低机械性能。许多作者已经报道了盐和酸溶液的作用。作为结论，这种类型的暴露导致基质主导性能的退化，而纤维控制性能（拉伸强度和模量）的退化可以忽略不计。

三、EB 玻璃钢与混凝土的粘结

虽然EB CFRP复合材料在加速调节下表现出优异的耐久性，但对于EB FRP混凝土粘结接头来说，情况并非如此。对EB FRP粘结到混凝土上的加速调节研究表明，根据调节环境，调节时间和应力状态（拉伸与剪切应力）的不同程度，粘结劣化程度不同。多位研

究人员评估了EB FRP与混凝土在潮湿, 干热, 冻融循环, 碱性环境, 盐和水分, 湿/干循环, 紫外线辐射下粘合的耐久性。Tatar和Hamilton从25项研究中汇编了一个数据库, 其中包含600多个关于粘合强度劣化的数据点。该数据集考虑了不同的调节时间, 暴露条件, 复合材料制造商, 粘合剂, 粘合测试方法等。整个数据集的键属性平均损失为15%, 标准差为24%。数据的变化非常显著, 因为根据测试变量, 特别是暴露条件, 观察到了不同程度的键降解。尽管如此, 数据清楚地表明, 加速调节会显著降低EB FRP/混凝土粘结。在大多数情况下, 研究一致认为, 水分暴露对粘合性能最有害。由于潮湿引起的粘结强度损失也与失效模式从“粘结”(混凝土基材内的失效)到粘合剂和基材之间的界面分离(也称为“粘接”失效模式)的变化有关, 这表明粘附力丧失。

环氧树脂和混凝土之间的粘合是通过化学粘合和机械连锁形成的。发现粘附体之间的主要化学相互作用是氢键, 其比共价键弱几个数量级。低粘度环氧树脂流经粗糙混凝土表面上的开放孔隙、缝隙和不规则性, 形成机械连锁。固化后, 树脂与基材产生强剪切键, 便于EB FRP复合材料和混凝土之间的应力传递。有人提出, 由于塑化(或环境温度超过环氧树脂的 T_g)导致环氧刚度的降低会松动机械连锁, 再加上由于水分子相互作用引起的氢键断裂, 导致长时间暴露于湿气后粘附力损失和粘结强度降低。相对较新的研究还表明, 环氧树脂-混凝土界面在水分调节下容易受到应力-腐蚀开裂速率增加的影响。

四、材料开发

加固系统对水分的固有敏感性, 特别是EB FRP/混凝土粘合剂粘合, 仍然是一个重大问题。材料方面相对较新的发展已经使粘合剂具有改进的机械和耐久性。纳米颗粒, 如纳米粘土, 碳纳米管, 石墨烯, 纳米硅胶和核壳橡胶纳米颗粒, 仅举几例, 可以产生具有增强性能的粘合剂和FRP复合材料。

例如, Aboubakr和Kandil证明, 在基环氧树脂中添加纳米粘土可以通过降低粘合剂的蠕变顺应性, 显著提高FRP钢粘结接头在持续负载下的性能。最近的一项研究表明, 在环氧粘合剂中添加纳米颗粒, 特别是核壳橡胶纳米颗粒, 可以增强EB FRP/混凝土在湿热条件下的耐久性。还报道了常温固化纳米硅-环氧纳米复合材料的粘合强度, 粘合耐久性和 T_g 的增加。Ghosh等人通过在复合基体中添加石墨烯, 在GFRP抗蠕变断裂性方面

取得了显著改善。除了机械和耐久性增强外, 还可以利用导电纳米颗粒(如碳纳米管和碳纳米纤维)为EB FRP复合材料或粘合剂层增加自感测能力, 从而允许在大面积上进行分布式感测并检测损伤。

对于弯曲加固, FRP棒材产品(例如板材, 牵引板和钢筋)连接到砖石, 混凝土和木材基材的张力侧, 环氧纤维平行于主应力对准。在带材类型中使用CFRP复合材料可以为有缺陷的RC板坯的弯曲强化提供一种具有成本效益的方法。在弯曲加固中, 这些方法主要使用 0° FRP纤维, 并将板坯的承重强度提高到40%。此外, 玻璃钢加固梁的抗弯强度提高了36%~57%, 抗弯刚度在45~53%的范围内, 弯曲延展性和刚度降低, 原因是玻璃钢复合材料对拉伸断裂的弹性行为和损伤程度降低。使用CFRP片材加固的RC梁被确定为容易过早, 脆弱和非常不利的失效, 因为该过程避免了将强度特性应用于聚合物拉伸的整个过程。

对于剪切强化, FRP棒材以垂直U形形式连接到梁的外部, 作为外部马镫。墙体剪切加固, 例如RC下, 墙体和未加固的砌体墙, 可以通过以垂直, 水平或x模式(45°)将FRP翘曲到墙的两侧或一侧来实现。剪切强化以非常微小的边缘完成, 只有两张或一张厚度为0.5~1.0毫米的板材, 并获得了显著的抗震增强, 特别是对于面内剪切壁的响应。现有的环氧树脂坚固耐用; 因此, 表面破坏通常发生在混凝土中, 特别是在RC构件中的弱接头处, 需要进行剪切加固。EBR方法用作连续护套或带材。玻璃钢加固的三种主要形式, 即U型包覆, 完全包覆和侧粘。结构RC元件的完全包裹被认为是FRP剪切加固的最有效方法, 因为它在存在一些几何限制的情况下具有可行性。

FRP复合材料是RC结构钢筋的渐进式合适替代品, 包括原位浇注和预张紧桥, 柱, 梁, 预制混凝土管道和其他单元。玻璃钢和钢筋的性能, 包括耐腐蚀性。柱结构也受益于FRP加固。使用结构作为原始加固来加固其他结构越来越多地被私人 and 公共建筑行业的结构设计工程师指定。目前, 玻璃钢的柱式缠绕是抗震改造中的一种共同解决方案。这种方法与其他常规护套选择相关, 具有几个优点, 例如可逆性, 易于应用和出色的耐腐蚀性。此外, 该策略在RC元件的改造中得到了批准, 具有多种用途, 例如提供延展性, 防止棒材屈曲, 增加剪切能力和增强空心元件。

结论

由于现有的基础设施在全球范围内正在老化, 因此

迫切需要开发和实施新的强化方法以延长其使用寿命。EB 玻璃钢复合材料是最经济的解决方案之一。然而, EB FRP在恶劣环境中的长期耐久性可能会限制这些系统的功效。正如本文所证明的那样, 环氧树脂、纤维、纤维-环氧界面和环氧-混凝土界面中存在多种相互竞争的降解机制, 这些机制会影响EB FRP的性能。最近对纳米改性树脂的研究表明, 有可能开发能够承受恶劣环境和负载条件的改进材料。

虽然设计指南认为EB FRP的耐久性是一个重要因素, 但在如何解决耐久性问题方面存在很大差异。一些设计指南提供了明确的环境减排系数, 而在另一些设计指南中, 要么提出材料的资格标准, 要么通过材料安全系数来考虑耐久性。指南之间最不一致的可能是弯曲EB FRP设计的FRP中的最大可用应变 - 一些指南提出了特定的应变极限, 而另一些指南则提供了基于基材和复合性能计算EB FRP中最大可用应变的解粘应变方程。

参考文献:

- [1]Morshed SA, Sinha A, Zhang Q, et al. Hygrothermal conditioning of wet-layup CFRP-concrete adhesive joints modified with silane coupling agent and core-shell rubber nanoparticles. *Constr. Build. Mater.* 2019; 227: 116531.
- [2]Gallo GJ, Thostenson ET. Electrical characterization and modeling of carbon nanotube and carbon fiber self-sensing composites for enhanced sensing of microcrack. *Mater. Today Commun.* 2015; 3: 17 - 26.
- [3]Al-Sabagh A, Taha E, Kandil U, et al. Monitoring damage propagation in glass fiber composites using carbon nanofibers. *Nanomaterials* 2016; 6: 169.
- [4]Schumacher T, Thostenson ET. Development of structural carbon nanotube - based sensing composites for concrete structures. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 2014; 25: 1331 - 1339.
- [5]Tatar J, Torrence CE, Mecholsky JJ, et al. Effects of Silane Surface Functionalization on Interfacial Fracture Energy and Durability of Adhesive Bond between Cement Paste and Epoxy. *Int. J. Adhes. Adhes.* 2018; 84: 132 - 142.
- [6]Stewart A, Scholsser B, Douglas EP. Surface modification of cured cement pastes by silane coupling agents. *Appl. Mater. Interfaces* 2013; 5: 1218 - 1225.
- [7]Grelle SV, Sneed LH. Review of Anchorage Systems for Externally Bonded FRP Laminates. *Int. J. Conc. Struct. Mater.* 2013; 7: 17 - 33.
- [8]Kalfat R, Gadd J, Al-Mahaidi R, et al. An efficiency framework for anchorage devices used to enhance the performance of FRP strengthened RC members. *Constr. Build. Mater.* 2018; 191: 254 - 275.
- [9]Bae SW, Belarbi A. Behavior of Various Anchorage Systems Used for Shear Strengthening of Concrete Structures with Externally Bonded FRP Sheets. *J. Bridg. Eng.* 2013; 18: 837 - 847.