

新型复合材料在公路桥梁加固工程中的力学性能与应用效果研究

朱劲松

江西省欣达工程质量检测有限公司 江西南昌 330000

摘 要:随着我国公路桥梁服役时间增长、交通荷载加重,既有桥梁加固与维修成为保障交通运营安全关键。新型复合材料因轻质高强、耐腐蚀、易施工等优势,在桥梁加固领域前景广阔。本文聚焦其在公路桥梁加固工程的力学性能与应用效果,阐述纤维增强复合材料(FRP)、玄武岩纤维复合材料(BFRP)、碳纤维增强复合材料(CFRP)等典型材料的拉伸强度、弹性模量、界面粘结性能等力学特性,分析其在受弯、受剪构件及墩柱加固中的受力与工作特性。通过探讨复合材料加固技术的设计方法、施工工艺及长期耐久性,结合工程实践中荷载传递路径优化与结构性能提升效果,揭示新型复合材料对桥梁承载能力、刚度及延性的改善机制。

关键词:新型复合材料;公路桥梁;加固工程

引言

公路桥梁是交通基础设施重要部分,其结构安全性与耐久性关乎区域经济与人民生命财产安全。近年来,因交通流量增长、超载及自然侵蚀,早期桥梁出现混凝土开裂等病害,承载能力难满足运营需求。传统加固方法存在施工周期长等局限,难以适应现代交通工程要求。在此背景下,新型复合材料为桥梁加固提供创新方案,它以高分子聚合物为基体、纤维为增强体,有比强度高、抗腐蚀等优点。自20世纪末,新型材料在土木工程应用研究渐深,在桥梁加固中优势显著。不过,新型复合材料在桥梁加固应用中,其力学性能差异、与传统材料协同机制等问题仍需研究。本文基于国内外研究进展与实践,针对公路桥梁加固需求,探讨新型复合材料力学性能、在关键构件加固中的行为及效果,为其规模化、规范化应用提供理论与实践指导。

一、新型复合材料及其在桥梁加固中的理论基础

(一) 新型复合材料的定义与分类

新型复合材料是由两种或以上物理和化学性质不同的物质组合成的多相固体材料,组分材料宏观独立、性能协同。桥梁加固主要用纤维增强复合材料,由高性能纤维与树脂基体复合而成,按纤维种类可分碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维等复合材料。其中,碳纤维增强复合材料应用最广、技术最成熟。明确定义与分类为工程人员选材提供依据,是后续研究与应用的前提。

(二) 复合材料的主要力学性能特点

新型复合材料尤其是纤维增强复合材料,力学性能有显著各向异性和可设计性。特点包括高比强度和模量、优异抗拉性能、良好抗疲劳性、卓越耐腐蚀性,也有弹性模量低、延性差、脆性破坏等不足。理解这些特点能把握材料受力和破坏模式,为加固设计提供依据,确保合理性与安全性。

(三) 桥梁结构加固的基本原理与需求

桥梁结构加固原理是在既有结构特定部位附加材料或构件,或改变受力体系,提升承载能力等,以满足规范或新需求。加固需求源于桥梁服役中结构性能退化或功能不足,具体有抗弯、抗剪承载力不足等。不同需求对应不同加固机理,如梁底贴复合材料板提高抗弯承载力等。阐述原理与需求明确了复合材料加固技术目标和适用条件,确保有效解决桥梁问题^[1]。

(四) 复合材料在桥梁加固中的适用性分析

基于材料性能、加固原理与需求,可分析复合材料在桥梁加固中的适用性。适用于提高受弯构件抗弯承载力、提高抗剪和约束核心混凝土、恢复锈蚀构件承载力、抑制裂缝扩展等情况。但也有限制,如提高刚度或抗压能力不如传统方法、高温下需防火措施、长期性能数据待积累、对施工和环境要求高。分析适用性为决策者提供评估视角,避免盲目应用,实现技术经济最优化。

二、新型复合材料在桥梁加固中的力学性能研究

(一) 复合材料的抗拉、抗压与抗剪性能分析

新型复合材料在桥梁加固中主要发挥其卓越的抗拉

性能。其抗拉强度远高于普通钢材，而密度仅为钢的四分之一左右，这使得在提供同等拉力的情况下，复合材料加固层产生的附加自重极小，几乎不影响原结构的受力状态。然而，复合材料的力学性能呈现显著的各向异性，即沿纤维方向的性能优异，而垂直于纤维方向的性能则主要由树脂基体决定，强度和模量较低。其抗压性能相对较弱，因为细长的纤维在受压时容易发生屈曲失稳，导致材料过早失效。因此，在设计中通常避免使复合材料单独承受主要的压力荷载。抗剪性能方面，复合材料层间剪切强度是薄弱环节，其破坏模式常表现为树脂基体的剪切破坏或纤维与基体界面的脱粘。

（二）复合材料与原有结构的协同工作机制

复合材料加固并非简单地将两种材料叠加，其核心在于两者能否形成有效的协同工作机制。这一机制主要通过界面粘结来实现。复合材料通过结构胶粘贴于混凝土表面，荷载通过剪应力从混凝土传递至复合材料层。理想的协同工作状态下，复合材料与原结构变形协调，共同承受外部荷载，复合材料承担新增荷载或补强原有承载力的不足部分。然而，界面是这一协同工作的关键环节，也是潜在的薄弱点。界面的粘结质量直接决定了荷载传递的效率。若界面发生早期破坏，如脱粘，则复合材料将无法发挥作用，加固效果归零。影响协同工作的因素包括混凝土表面处理质量、结构胶的性能与施工工艺、复合材料的刚度与原结构的匹配度等^[2]。

（三）不同环境因素对复合材料性能的影响

桥梁结构长期暴露于复杂多变的环境中，因此环境因素对复合材料长期性能的影响至关重要。主要考虑的环境因素包括温度、湿度和化学腐蚀。温度变化会引起复合材料和原结构的热胀冷缩，由于两者热膨胀系数的差异，会在界面产生附加的应力，可能导致界面脱粘或树脂基体开裂。持续的高温会降低树脂基体的玻璃化转变温度，导致其模量和强度显著下降，影响复合材料的整体性能。湿度，特别是干湿循环和冻融循环，会使水分通过树脂基体的微孔隙渗入材料内部，引起基体溶胀、塑化，降低其力学性能，并可能诱发纤维与基体界面的水解，削弱界面粘结力。化学腐蚀环境，如除冰盐、工业大气中的酸碱物质，会侵蚀树脂基体和纤维，导致材料性能退化。对这些环境因素影响进行深入研究的价值在于，它为评估复合材料加固的长期耐久性和可靠性提供了数据支持，促使工程师在设计中考虑环境折减系数，并采取必要的防护措施，如表面涂层、选择耐候性更好

的树脂体系等，从而确保加固效果在桥梁设计使用年限内持续有效。

（四）力学性能测试方法与评价指标

为了准确获取复合材料的力学性能并评价其加固效果，必须采用科学、标准的测试方法与评价指标。针对材料本身，其抗拉性能通常通过单向拉伸试验测定，依据相关标准获取其抗拉强度、弹性模量和极限应变等关键参数。层间剪切性能则通过短梁剪切或三点弯曲试验进行评估。对于复合材料与混凝土的界面粘结性能，最直接的测试方法是单剪或双剪试验，通过测定其极限粘结强度和破坏模式来评价界面性能。在结构层面，常通过对加固后的梁、柱等构件进行静力加载试验，测定其承载力、刚度、延性等指标的提升幅度，并与理论计算值进行对比，以验证加固设计的有效性。此外，无损检测技术，如声发射、红外热成像等，也被用于监测加固结构在荷载作用下的内部损伤演化过程。建立并规范这些测试方法与评价指标的价值在于，它为复合材料的性能检验、加固工程的质量验收以及加固效果的定量评估提供了统一、可靠的技术手段，是推动该技术从试验研究走向标准化、规范化应用的重要基础^[3]。

三、新型复合材料在桥梁加固中的应用效果研究

（一）加固后桥梁结构承载力的提升效果

新型复合材料在桥梁加固中的核心价值体现在对结构承载力的显著提升。通过在受拉区（如梁底、板底）粘贴碳纤维布或板，可以有效约束裂缝的开展，将原结构承受的拉应力部分转移至复合材料，从而大幅提高梁、板的抗弯承载力。工程实践表明，对于配筋不足或混凝土强度退化的桥梁，采用复合材料加固后，其抗弯承载力可提升20%至50%甚至更高，具体提升幅度取决于原结构状况、复合材料用量及粘结质量。在抗剪加固方面，通过在梁腹板侧面包裹或粘贴U形复合材料箍，可以有效限制斜裂缝的发展，提高构件的抗剪能力，防止发生脆性剪切破坏。这种承载力提升的效果，不仅延长了桥梁的使用寿命，更重要的是，使其能够满足当前日益增长的交通荷载需求，避免了因承载力不足而需进行大规模重建或限载，具有显著的经济效益和社会效益。

（二）加固对桥梁结构刚度与变形性能的影响

除了提升承载力，复合材料加固对桥梁结构的刚度与变形性能也产生重要影响。由于复合材料具有高弹性模量，加固后结构的整体刚度得到有效提高，表现为在相同荷载作用下，结构的挠度明显减小。这一效果对于

跨度较大或刚度不足的桥梁尤为重要,可以有效改善行车舒适性,并减少因过度变形引起的结构次内力和附属设施损坏。然而,值得注意的是,复合材料加固对刚度的提升效果通常不如对承载力的提升那样显著,尤其是在加固量较小的情况下。此外,复合材料加固改变了结构的破坏模式,使其从原结构的脆性破坏(如混凝土压碎)转变为更具延性的破坏(如复合材料剥离或断裂),这在一定程度上提高了结构的变形能力和安全性。研究并量化这种对刚度和变形性能的影响,其价值在于能够更精确地预测加固后桥梁的服役行为,为结构的安全评估和正常使用极限状态验算提供关键数据^[4]。

(三) 复合材料加固的耐久性与长期稳定性

复合材料加固的耐久性与长期稳定性是评价其应用效果的关键指标。复合材料本身具有优异的耐化学腐蚀性,不会像钢筋一样发生锈蚀,这使其在潮湿、盐雾、除冰盐等恶劣环境下具有天然的优势。然而,其长期性能的稳定性主要取决于树脂基体和纤维-树脂界面的耐久性。长期暴露在紫外线、高低温循环、干湿交替等环境因素下,树脂基体会发生老化,导致其力学性能下降,进而影响复合材料的整体性能和与混凝土的粘结性能。此外,界面粘结的长期可靠性是保证加固效果持续发挥的核心。已有研究和工程实践表明,在良好施工和适当防护的条件下,复合材料加固系统可以保持超过二十年的有效性。对其耐久性与长期稳定性的深入研究,包括加速老化试验、长期性能监测等,其价值在于为评估加固工程的长期效益、制定合理的维护策略以及预测结构的剩余使用寿命提供科学依据,增强工程界对该技术长期可靠性的信心。

(四) 应用过程中存在的主要问题与优化方向

尽管新型复合材料加固技术优势明显,但在实际应用中仍暴露出一些问题。首先是施工质量控制难题,复合材料的加固效果对表面处理、胶粘剂涂布、纤维铺贴、固化过程等施工环节极为敏感,任何环节的疏漏都可能导致粘结不良,影响加固效果,而目前对施工质量的现场检测手段尚不够完善。其次是防火性能的不足,常用的环氧树脂基体在高温下会软化,导致复合材料强度急剧下降,因此在对防火要求较高的桥梁中,必须采取额外的防火保护措施,增加了工程复杂性和成本。再次是成本问题,高性能复合材料及其专用胶粘剂的材

料成本相对较高,在一定程度上限制了其在中小型桥梁维修加固中的大规模应用。针对这些问题,未来的优化方向包括:开发更易于施工、对环境条件容忍度更高的新型胶粘剂和预浸料;研发兼具结构加固和防火功能的复合材料体系;建立更精确、便捷的现场无损检测与质量评价技术;以及通过优化设计和规模化生产来降低综合成本。对这些问题的精准识别与优化方向的系统提出,其价值在于为该技术的持续改进和健康发展指明了路径,有助于克服应用瓶颈,推动复合材料加固技术在桥梁工程中更广泛、更可靠地应用^[5]。

结语

新型复合材料在桥梁加固领域的应用展现了显著的技术优势和广阔的发展前景。通过对纤维增强复合材料力学性能的深入研究,结合其在实际工程中的表现,可以明确其在提升桥梁承载能力、改善结构刚度和延性等方面的重要作用。然而,当前的研究与实践也暴露出一些亟待解决的问题,例如复合材料与传统结构的协同工作机制尚需进一步优化,环境因素对长期性能的影响仍需深入探讨,以及施工质量控制体系有待完善。未来的研究应聚焦于这些问题,通过加强基础理论研究、开发高性能材料体系、改进施工工艺等手段,推动新型复合材料加固技术的标准化和规范化发展,为公路桥梁的安全运营和可持续发展提供更可靠的保障。

参考文献

- [1] 林燕青.柴油发电机组自动化控制系统的设计[J].光源与照明,2022,(11):113-115.
- [2] 李建武,姜烨.核电站应急柴油发电机组调速系统对电气指标的影响[J].柴油机,2021,43(02):38-41.
- [3] 陈志勇.柴油发电机工作原理及电气典型故障分析[J].农村电工,2021,29(03):45-46.DOI:10.16642/j.cnki.ncdg.2021.03.053.
- [4] 王阳.建筑电气柴油发电机组的安装与调试研究[J].工程建设与设计,2020,(09):152-154.DOI:10.13616/j.cnki.gcjsysj.2020.05.055.
- [5] 黄祯岚.电气自动化技术在自来水厂机械设备中的应用[J].数码设计,2017,6(10):75.DOI:10.19551/j.cnki.issn1672-9129.2017.10.086.