

桥梁加固工程中新材料对结构性能的优化

俞亮¹ 蒋楚楚²

1 浙江千航交通建设有限公司, 浙江余姚, 315400;

2 浙江甬舜交通工程有限公司, 浙江余姚, 315400;

摘要: 桥梁加固工程中新材料的技术革新为基础设施性能提升提供了突破性解决方案, 本文系统探讨了高性能混凝土、碳纤维复合材料及新型钢结构加固材料的核心特性, 揭示了其在增强结构力学性能、延长使用寿命及优化施工效能方面的作用机制, 通过分析材料抗拉压剪能力的协同强化效应与耐久性提升路径, 文章论证了新材料对桥梁全生命周期管理的变革性影响, 为桥梁加固领域的材料选择与工程实践提供了理论支撑与技术指引。

关键词: 桥梁加固; 新材料; 高性能混凝土

DOI: 10.69979/3029-2727.24.11.010

引言

随着既有桥梁老龄化与荷载标准提升, 传统加固技术已难以满足现代基础设施的性能需求, 材料科学的突破催生了高性能混凝土、碳纤维复合材料等新型工程材料, 其通过微观结构优化与功能设计创新, 正在重塑桥梁加固的技术范式。本文从材料特性、性能优化与发展趋势三个维度展开研究, 重点解析新材料在力学性能强化、耐久性提升及施工效率革新方面的作用机理, 探讨智能响应材料与绿色制造技术的融合路径, 旨在构建桥梁加固工程的性能提升理论框架, 为基础设施可持续发展提供前瞻性解决方案。

1 新材料的种类与特性

1.1 高性能混凝土

在桥梁加固工程中, 高性能混凝土因其独特的物理与化学特性成为传统混凝土的重要替代材料, 与普通混凝土相比, 其核心优势在于通过优化的材料配比与先进制备工艺, 显著提升了密实度与内部结构的均匀性, 这种致密化的微观结构有效阻隔了水分与侵蚀性介质的渗透, 还大幅降低了孔隙率, 在根本上延缓了碳化与氯离子侵蚀的进程。与此同时, 高性能混凝土通过掺入矿物掺合料与高效减水剂, 实现了力学性能全面提升, 其抗压强度与抗折强度的协同增长, 使得桥梁关键受力部位在承受复杂荷载时表现出更高的稳定性与耐久性, 其在加固工程中的应用能够有效修复既有结构的损伤, 并通过局部增强的方式优化整体受力体系, 为桥梁的长周期安全运营提供可靠保障。从功能拓展的角度而言, 高性能混凝土的另一个显著特性在于其环境适应性的

提升, 针对不同地理气候条件下的桥梁工程, 可通过调整胶凝材料体系与外加剂类型, 赋予混凝土抗冻融循环、耐盐雾腐蚀或抗硫酸盐侵蚀等专项性能, 例如: 在寒区桥梁加固中, 通过引入引气剂形成均匀分布的封闭气孔, 可有效缓解冻胀应力对结构的破坏; 而在海洋环境中, 采用低碱度胶凝体系则能抑制碱骨料反应的发生, 这种针对性的性能定制能力使得高性能混凝土能够满足多样化工程场景的需求, 在延长结构寿命与降低全生命周期成本之间实现平衡^[1]。

1.2 碳纤维复合材料 (CFRP)

碳纤维复合材料作为新型加固材料的典型代表, 其革命性意义在于突破了传统材料的性能边界, 该材料以碳纤维为增强相、环氧树脂为基体, 通过定向铺层工艺形成的层合结构, 展现出轴向拉伸强度超越钢材的卓越特性, 高强度与低密度的完美结合使得 CFRP 在加固施工中能够以极薄的厚度实现显著的补强效果, 避免因自重增加导致的结构负担, 更重要的是, 碳纤维的耐腐蚀特性彻底解决了钢结构加固中的锈蚀难题, 在酸雨、除冰盐等侵蚀性环境中表现出无可比拟的稳定性, 进而显著提升了加固措施的持久性。从工程实施维度分析, CFRP 的施工工艺革新极大提升了加固效率, 其预制片材可通过湿法粘贴或真空导入工艺与混凝土基体紧密结合, 无需重型机械即可完成高空或狭窄空间的作业, “非侵入式”的加固方式最大限度地保留原结构完整性, 避免钻孔、焊接等工序引发的次生损伤, 另外材料的可裁剪性赋予设计者高度灵活的方案调整空间, 能够针对裂缝分布、应力集中等特定缺陷进行精准补强, 这种兼具高

效性与适应性的特点，使 CFRP 尤其适用于历史桥梁或交通繁忙路段的快速加固工程，在最小化社会影响的同时达成结构性能提升目标。

1.3 钢结构加固材料

现代钢结构加固材料的发展重点聚焦于界面性能优化与动力响应改善两大领域，新型结构胶粘剂的分子设计突破了传统粘结剂的强度极限，其双组分环氧体系通过可控交联反应形成三维网络结构，在钢-钢或钢-混凝土界面形成强韧结合的过渡层，这种界面强化技术能够可靠传递剪应力与剥离应力，更具备良好的蠕变抗性，确保加固体系在长期动荷载作用下的性能稳定性。在可持续性维度，钢结构加固材料的创新方向体现出循环经济理念，自修复微胶囊技术的引入使涂层材料具备损伤自主修复功能，当钢结构表面出现微裂纹时，预埋的修复剂可自动释放并填充缺陷，智能材料的应用将维护周期从被动检修转变为主动预防，大幅降低全寿命周期内的资源消耗，同时冷成型加固技术的推广减少了高温焊接导致的能源浪费与残余应力，通过机械咬合或摩擦连接等物理结合方式实现加固目标，进而保持了施工过程的低碳排放，同时也避免了热影响区对母材性能的削弱。

2 新材料对桥梁结构性能的优化作用

2.1 提高抗拉、抗压和抗剪能力

在桥梁加固工程中，新材料的核心价值之一在于其能够系统性地提升结构的力学性能边界，以碳纤维复合材料 (CFRP) 为例，其轴向拉伸强度显著优于传统钢材，这一特性使得桥梁受拉区域的加固效率得到质的飞跃，碳纤维片材基于定向排列的纤维束形成高强度承载网络，能够有效分担原结构承受的拉应力，从而抑制混凝土裂缝的扩展并延缓钢筋锈蚀进程。与此同时，高性能混凝土通过优化骨料级配与胶凝体系，在微观层面构建出更为致密的内部结构，其抗压强度的大幅提升使得桥墩、拱肋等受压构件的荷载传递路径更加稳定，材料层面的性能突破直接增强了单一构件的承载力，同时通过应力重分布效应优化了整体结构的协同工作能力，使桥梁在复杂荷载组合下的抗剪性能得到显著改善。从结构体系的角度看，新材料的介入为传统加固理念提供了全新的可能性，钢结构加固材料中高强螺栓与复合胶粘剂的联合使用，能够在钢-混凝土界面形成多重传力机制，既通过机械咬合传递剪切力，又借助化学粘结抵抗剥离应力，多级抗剪体系的构建有效解决了传统加固中界面

滑移或应力集中的隐患；而对于大跨径桥梁的箱梁腹板加固，碳纤维布与预应力钢绞线的组合应用则实现了抗弯刚度与抗剪强度的同步提升，基于材料特性深度整合的复合加固策略突破了传统单一材料的技术局限，使桥梁结构在极端荷载或长期疲劳作用下的安全储备得到多维度的拓展。

2.2 延长桥梁使用寿命

桥梁耐久性的提升始终是加固工程的核心目标，而新材料的环境耐受性为此提供了根本性解决方案，高性能混凝土通过掺入活性矿物掺合料，能够持续进行二次水化反应，这一自修复机制可主动填充微裂缝并降低孔隙连通性，进而阻隔水分与侵蚀介质的渗透路径，在海洋环境或化冰盐频繁使用的区域，这种材料对氯离子扩散系数的抑制效果尤为显著，可将钢筋锈蚀的起始时间推迟数十年。与此同时，碳纤维复合材料固有的化学惰性使其在酸雨、紫外线辐射等恶劣条件下仍能保持性能稳定，这种特性彻底改变了传统加固材料因环境退化导致的周期性维护困局，为桥梁提供了近乎永久性的保护层。在结构损伤的长期演化控制方面，新材料的应用展现了前瞻性的防护理念，智能监测纤维与自修复涂层的集成化设计使加固体系具备实时感知与自主修复的双重功能，例如：埋设于混凝土中的导电碳纤维可实时反馈结构应变分布，而微胶囊包裹的修复剂能在裂缝萌生时自动释放修复物质，这种“感知-响应”一体化机制将被动维修转化为主动防护，极大延缓了材料老化与性能劣化的进程；对于钢桥面板的疲劳损伤防控，高阻尼合金材料的引入通过耗散振动能量，可将交变应力幅值降低 40% 以上，显著延长疲劳裂纹的萌生周期，通过全寿命周期的性能可控性重新定义了基础设施维护的范式^[2]。

2.3 减少加固工程的施工周期与成本

新材料带来的工艺革新正在重塑桥梁加固的经济性与时效性，碳纤维布等轻质材料的现场施工无需大型起重设备，仅需小型团队即可完成高空或狭窄空间的精准粘贴，这种特性将传统加固工程中占工期 30% 以上的支护与设备调度环节彻底省略，更值得关注的是，新型环氧树脂胶粘剂的室温快速固化特性可将层间粘结的养护周期从数周压缩至 48 小时以内，这对交通繁忙的市政桥梁而言，意味着社会影响成本的大幅降低。从全寿命周期成本视角分析，新材料的长期效益更为显著，传统加固方案因材料耐久性不足导致的周期性返修，往

往造成累计成本呈指数增长,而碳纤维复合材料超过50年的性能稳定期,可将维护频率降低至传统方法的1/5,钢结构加固中冷连接技术的推广避免了焊接工艺带来的能源消耗与后续防腐处理,单次施工即可实现永久性加固目标,另外智能材料的损伤预警功能使得维护策略从定期巡检转变为按需介入,这种预防性养护模式可减少30%以上的非必要维修开支。

3 新材料在桥梁加固中的发展趋势

3.1 技术创新与材料改进

当前桥梁加固领域的技术革新正朝着材料功能集成化与性能智能化的方向深度演进,新一代加固材料不再局限于单一力学性能的提升,而是通过跨学科技术融合赋予材料多维度响应能力,例如:纳米改性环氧树脂的研发突破了传统胶粘剂的性能极限,其通过纳米颗粒的界面增强效应,在分子尺度上优化了纤维与基体的结合强度,同时利用量子点示踪技术实现粘结层损伤的可视化监测,这种兼具结构强化与状态自感知的复合材料能够在承受荷载时同步反馈内部应力分布,为桥梁的实时健康评估提供直接依据。材料改进的另一核心方向在于极端环境下的性能稳定性突破,针对深海、极地等特殊场景的加固需求,科研人员正着力开发超疏水涂层与耐辐射复合材料,通过仿生学原理构建的微纳结构表面可有效抵御海水侵蚀与冰层附着力,而掺杂碳纤维的引入则显著提升了材料在中子辐射环境下的抗老化能力,这类材料的研发极大拓展了桥梁加固的适用边界,更为未来极端气候频发背景下的基础设施韧性提升提供了技术储备。与此同时,自供电传感器的嵌入式设计正成为研究热点,压电纤维与光伏涂层的集成化应用,使加固材料能够将机械振动或光能转化为电能,实现监测系统的能源自给,这种技术路径的突破为偏远地区桥梁的全生命周期管理提供了可持续解决方案^[3]。

3.2 环保与可持续发展

桥梁加固材料的绿色化转型已从辅助性指标上升为核心研发准则,其核心在于全产业链的碳足迹控制与资源循环体系的构建,生物基复合材料的规模化应用是当前最显著的技术路径,以植物纤维、菌丝体或甲壳素为原料的增强相,正在逐步替代石油基碳纤维,其能在生产过程中减少60%以上的碳排放,更具备自然降解特性,使得拆除阶段的建筑垃圾可回归生态循环,另外值

得关注的是,工业固废的高值化利用技术取得突破,冶金矿渣、废弃混凝土粉体经纳米活化处理后,可作为高性能地质聚合物的主要成分,其抗压强度甚至超越普通硅酸盐水泥,这种“以废治废”的模式正在重塑建筑材料供应链的生态逻辑。可持续发展理念的深化推动着施工工艺的清洁化革新,低温固化技术的普及大幅降低了环氧树脂等有机材料的挥发性有机物(VOC)排放,而紫外光固化体系的开发更实现了能源消耗的阶跃式下降,在钢结构加固领域,无镀层耐候钢与水性防腐涂料的组合应用,彻底消除了重金属污染风险。更具革命性的是,数字孪生技术的介入使材料用量精准化成为可能,通过BIM模型与物联网传感器的数据交互,可实时计算最优加固方案,将材料浪费率控制在3%以下,这种技术经济与生态效益的协同优化符合全球碳中和的战略目标,增强了新材料在市场竞争中的渗透力,未来,随着碳关税政策的实施与绿色金融工具的完善,环保型加固材料将逐步完成对传统材料的替代,推动基础设施行业进入低碳发展的新纪元^[4]。

4 结束语

新材料在桥梁加固工程中的深度应用,标志着基础设施维护从被动修复向主动预防的范式转变,通过高性能材料的力学性能突破与智能材料的损伤响应机制,现代桥梁得以实现全生命周期性能可控,未来,随着4D打印、生物基材料等前沿技术的成熟,桥梁加固工程将呈现功能定制化、运维智慧化与资源循环化的新特征,这一演进过程将极大提升结构安全储备,通过技术创新与生态价值的融合,为应对气候变化挑战下的基础设施韧性建设提供可复制范式。

参考文献

- [1] 杜永刚. 硅基聚氨酯复合材料在桥梁加固工程中的应用[J]. 合成材料老化与应用, 2022, 51(04): 165-166+129.
- [2] 刘国庆. 碳纤维复合材料在桥梁加固中的设计应用研究[J]. 交通世界, 2017, (09): 116-117.
- [3] 郭建才, 张彦群, 陈炳均, 等. 基于MPC复合材料进行钢筋混凝土实心板梁桥加固[J]. 公路, 2017, 62(03): 126-130.
- [4] 白海斌. 碳纤维新技术在桥梁加固工程中的应用[J]. 山西建筑, 2012, 38(18): 179-181.