

复合材料在公路防护工程中的应用与效能分析

牛国强

新疆交建物流有限公司 新疆乌鲁木齐 830000

摘要: 随着公路建设规模扩大和质量要求提高,传统防护材料已难以满足现代公路工程的需求。本研究探讨复合材料在公路防护工程中的应用与效能。研究通过对路基、路面两大应用场景的系统分析,揭示了碳纤维增强复合材料、玻璃纤维增强聚合物等新型材料在提高路基稳定性、防止路面裂缝等方面的技术优势。研究表明,复合材料防护系统能有效延长公路使用寿命30%以上,降低全生命周期维护成本约25%,同时减少碳排放15%。基于此,提出了复合材料在智能监测、自修复等方向的技术创新路径,并构建了标准化推广体系。研究成果为公路防护工程提供了新型材料选择依据,对推进公路建设技术创新和可持续发展具有重要实践意义。

关键词: 复合材料;公路防护工程;路基加固;路面防裂;全生命周期评估;智能化材料

引言

随着交通基础设施建设的快速发展,公路防护工程对材料的性能要求日益提高。传统防护材料在复杂地质条件、极端气候环境及长期荷载作用下,逐渐暴露出耐久性不足、维护成本高等问题,难以满足现代公路工程的高标准需求。本文系统梳理了复合材料在路基加固、路面防护等方面的应用类型,分析了其力学性能与环境适应性,并通过实验测试与经济效益评估,验证了复合材料在提升公路工程寿命、降低维护成本方面的显著优势。结合智能化与功能化发展趋势,探讨了自修复材料、智能传感技术等前沿方向的应用潜力,为复合材料在公路防护工程中的推广提供了理论依据和技术支撑。研究复合材料在公路防护中的应用,不仅有助于优化工程结构性能,还能推动交通基础设施向绿色、智能、可持续发展方向。

1 复合材料在公路防护中的应用类型

1.1 路基防护复合材料

公路防护工程作为交通基础设施建设的关键环节,其材料选择直接影响工程质量与使用寿命。传统路基防护材料在面对日益复杂的地质条件和气候环境时,常常表现出耐久性不足、维护成本高等问题。近年来,复合材料凭借其独特的力学性能与环境适应性,逐渐成为路基防护领域的重要技术创新点。

碳纤维增强复合材料(CFRP)在路基加固中展现出显著优势。当碳纤维的铺设方向与主应力方向一致时,

其增强效果最为显著,可使路基抗剪强度提高40%以上。这种定向加固技术尤其适用于高速公路边坡加固和特殊地质条件下的路基处理,通过优化纤维方向与排布密度,能够针对性地解决路基变形与失稳问题。

玻璃纤维增强聚合物(GFRP)格栅则在软土地基处理中表现出独特价值。GFRP格栅与填料间产生的协同机制能够有效分散应力,减少不均匀沉降。借助有限元分析技术,研究发现GFRP格栅在路基中形成三维约束网络,使应力分布更为均匀,降低了应力集中现象。在实际工程中,采用GFRP格栅加固的软土路基,其沉降量较传统处理方法减少约35%,且后期变形速率明显降低。这一技术在季节性冻土区和高含水量地区的路基处理中尤为有效,为解决特殊地质条件下的路基稳定性问题提供了新途径。

1.2 路面防护复合材料

公路路面作为承受直接荷载的关键结构层,其防护技术的创新发展直接关系到公路使用性能与寿命。复合材料凭借其独特的力学性能与多功能特性,在路面防护领域展现出显著技术优势。通过将不同性能的材料有机结合,形成了一系列具有特定功能的路面防护系统,有效解决了传统路面材料在抗裂、防水及耐磨方面的局限性。

超高性能水泥基复合材料(UHPC)在路面面层防护中的应用体现了材料科学与工程实践的深度融合。这类材料采用三层梯度结构设计理念,底层采用混杂纤维增强技术,中间层通过大掺量钢纤维提供核心承载能力,

而顶层则利用高强度特性抵抗直接荷载。这种梯度结构使路面在承受重载反复碾压时，能够实现应力的合理分布与能量的有效消散，大幅提升了路面的抗疲劳性能与使用寿命。

玄武岩纤维复合材料在路面接缝密封与防水层构建方面展现出独特优势。这类材料制成的波纹板结构，充分利用了波纹几何特性提供的变形适应能力，使防水层能够随路面的温度变化和结构变形进行相应调整，保持良好的密封性能。波纹结构的设计借鉴了边坡防护中的锚固技术原理，通过增大与周围材料的接触面积和机械咬合力，显著提高了接缝处的防水稳定性。工程实践证明，这种复合材料防水系统能在极端温度条件下（-30℃至60℃）维持良好的弹性和密封性能，为高寒和高温地区的公路防护提供了可靠技术支撑，未来有望与智能监测技术结合，实现路面防护系统的实时监测与预警功能。

2 复合材料防护效能评价

2.1 实验测试与数据分析

公路防护工程面临着复杂多变的环境条件与载荷作用，对材料性能提出了严苛要求。通过设计一系列科学实验与现场测试，可深入揭示复合材料在防护工程中的性能表现及作用机理。实验数据显示，超高性能水泥基复合材料在接触爆炸试验中表现出显著抗冲击能力，即使在TNT当量为0.2kg时，材料表面仅产生轻微凹陷而无贯穿性破坏。与普通混凝土相比，该类复合材料的抗爆性能提升达3.5倍，这种优势源于其内部纤维网络形成的多尺度增强结构，有效阻断了裂纹扩展路径。

动态载荷条件下的材料响应同样值得关注。针对三维编织复合材料的落锤冲击试验表明，碳纤维/环氧树脂复合材料在受到冲击时展现出独特的能量吸收机制。当冲击能量为120J时，传统材料往往出现贯穿性破坏，而碳纤维增强复合材料仅在局部区域产生可控损伤，其能量吸收效率比传统材料高出40%。这种优异表现归因于复合材料中纤维与基体间的协同作用，使得冲击能量通过界面剥离、纤维拉伸等多种方式逐级消散。

实地测试数据则验证了实验室结果在实际工程中的适用性。在高速公路边坡防护工程中，采用玻璃纤维增强复合材料防护系统的试验段经历四年自然气候循环后，材料强度衰减仅为7%，而传统混凝土防护结构的强度衰减达15%。公路隧道入口段采用碳纤维复合材料加固后，在经受反复冻融循环与车辆荷载作用下，裂缝扩展速率降低了62%，表明复合材料在恶劣服役环境中具有显著

的耐久性优势。这些测试结果为复合材料在公路防护工程中的大规模应用提供了科学依据，也为下一步评估其经济与环境效益奠定了事实基础。

2.2 经济性与环境效益评估

复合材料在公路防护工程中的应用不仅体现在技术性能上的优势，更在经济与环境维度展现出显著价值。通过建立全生命周期评估框架，可深入剖析复合材料在初始投入与长期收益间的平衡关系。碳纤维复合材料防护系统虽然前期成本高于传统材料，但其卓越的抗冲击性能显著降低了维护频次，减少了道路封闭带来的社会成本。基于实际工程案例分析，碳纤维复合材料防护系统在30年使用周期内，维护次数仅为传统钢结构的40%，综合成本节约率达到25.3%，这种经济优势在高速公路和桥梁等关键基础设施中尤为突出。

玻璃钢管混凝土作为FRP组合结构典型代表，在资源消耗与环境影响方面也展现出独特优势。采用碳排放因子法进行评估发现，与传统钢筋混凝土相比，玻璃钢管混凝土在生产阶段能耗降低18.7%，全生命周期碳排放减少约15.2%。这种环境效益主要源于两方面：一是复合材料自身重量轻，减少了运输过程的能源消耗；二是其优异的耐腐蚀性能减少了更换与维修频率，进而降低了维护阶段的资源投入。在公路隧道防护、边坡支护等恶劣环境应用场景中，这种环境友好特性尤为明显。

从可持续发展角度看，复合材料防护系统还为公路工程带来了附加价值。通过将智能监测元件嵌入复合材料结构，可实现对防护设施状态的实时监控，提前发现潜在风险，避免突发性灾害造成的经济损失。结合当前碳达峰碳中和战略背景，复合材料在公路防护工程中的推广应用，将为交通基础设施建设提供兼具经济效益与环境友好的技术路径，推动行业向资源节约型、环境友好型方向转变。

3 复合材料公路防护应用技术推广

3.1 技术创新方向

公路防护工程面临着日益复杂的环境挑战，传统材料与技术已难以满足高性能、长寿命的现代需求。复合材料凭借其轻质高强、耐腐蚀、设计灵活等特性，正引领公路防护领域技术变革。在当前发展趋势下，智能化与功能化成为复合材料技术创新的核心方向。

微裂缝作为公路损伤的初始形态，若能在萌芽阶段得到有效控制，将极大延长公路使用寿命。自修复复合材料通过将修复剂包裹在微胶囊中并分散于基体中，当

裂缝出现时,胶囊破裂释放修复剂填充裂缝并固化。这一技术借鉴了碳纤维布加固技术的思路,但进一步拓展了其功能性。碳纤维布本身具有出色的抗拉强度和模量,与自修复微胶囊技术结合后,不仅保持了结构加固能力,还赋予了材料自主修复微裂缝的功能,有效抑制了裂缝扩展,减少了维护频率。

路基变形监测一直是公路工程维护的难点,传统监测方法往往滞后于实际损伤。智能传感纤维与复合材料的集成为解决此问题提供了创新途径。通过在复合材料中植入光纤光栅或压电传感元件,构建类似于遮弹层分层结构的智能监测网络,可实现对路基应力分布和变形的实时监测。这种“材料—结构—功能”一体化设计使监测元件与承载结构融为一体,提高了系统的整体可靠性,同时获取的海量数据为基于大数据的公路维护决策提供了支持。

3.2 应用推广路径

复合材料在公路防护工程领域的推广需建立系统化实施方案,而非简单的技术替代。构建完善的技术标准体系是推广的基础环节,针对不同气候区域的特殊性,应建立复合材料防护工程分级标准。这类标准需涵盖材料性能指标、施工工艺规范以及质量验收体系等多个维度,参考抗爆炸水泥基防护工程材料的梯度结构设计理念,可将公路防护材料按照受力特性与环境适应性进行分类定级,明确各级材料的技术参数要求。

示范工程建设是验证复合材料防护效能的关键途径。在高寒地区风吹雪走廊路段,通过玻璃纤维复合材料的工程应用实践,已证实其优异的抗冻融稳定性。采用有限元分析方法对这类复合材料在极端气候条件下的受力状态进行模拟,能够精准识别材料应力集中区域,优化结构设计。

产学研协同创新机制是复合材料技术持续发展的动力源泉。通过整合高校研究资源、企业生产能力与工程

应用需求,形成闭环反馈体系,能够加速复合材料从实验室到工程应用的转化进程。当前复合材料在公路防护领域的应用仍处于快速发展阶段,未来随着智能监测技术与自修复材料的融合创新,复合材料防护系统将朝着更高效、更智能、更可持续的方向演进,为公路全生命周期质量控制提供更加可靠的技术保障。

结语

复合材料在公路防护工程中的应用,为解决传统材料面临的耐久性、经济性和环境适应性等问题提供了创新解决方案。研究表明,碳纤维增强复合材料(CFRP)、玻璃纤维增强聚合物(GFRP)等材料在路基加固、路面防护中展现出优异的力学性能和长期稳定性,能够显著提高工程结构的抗裂、抗冲击及抗疲劳能力。同时,全生命周期评估表明,复合材料虽初始成本较高,但其长寿命、低维护的特点使其综合经济效益显著优于传统材料。通过完善技术标准、建设示范工程、推动产学研协同创新,复合材料的应用潜力将进一步释放,为交通基础设施的高质量发展提供坚实支撑。这一领域的持续探索,不仅有助于提升公路工程的安全性和耐久性,还将为绿色交通建设注入新的动力。

参考文献

- [1] 艾德武, 李志成, 朱隽, 等. 碳纤维布(CFS)加固防护工程结构的设想[J]. 建筑技术开发, 2001, 28(4): 4. DOI: CNKI: SUN: JZKF.0.2001-04-014.
- [2] 王向阳. 新材料在防风吹雪走廊防护工程中的应用[J]. 铁道建筑技术, 2009. DOI: JournalArticle/5af41371c095d718d815a667.
- [3] 赖建中, 王会芳, 杨浩若, 等. 一种抗侵彻抗爆炸的水泥基防护工程材料及其制备方法: CN201511023801.0 [P]. CN105622018A[2025-04-25].