

Application and Research of New Eco-Friendly Materials in Highway Maintenance Engineering

Fuyan Ma

Yunnan Huayi Road & Bridge Technology Engineering Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650000, China

Abstract

Highway maintenance serves as a critical component in ensuring smooth traffic network operations and promoting sustainable development in the transportation sector. Traditional maintenance materials, plagued by high pollution and excessive resource consumption, have become incompatible with the demands of green transportation. New eco-friendly materials, characterized by environmental sustainability, superior road performance, and resource recycling capabilities, demonstrate significant application value in highway repair, protective reinforcement, and subgrade consolidation. These materials effectively mitigate ecological impacts of maintenance projects. Through systematic classification of material properties, laboratory performance testing, engineering validation, and economic analysis, this study identifies optimal application scenarios and construction techniques for various eco-friendly materials. An evaluation system for application effectiveness is established, along with targeted optimization strategies. The research findings provide technical support for standardized implementation of new eco-friendly materials in highway maintenance, offering substantial practical significance for advancing green transformation and upgrading in the field.

Keywords

new eco-friendly materials; highway maintenance; performance evaluation

新型环保材料在公路养护工程中的应用及研究

马福艳

云南华怡道桥技术工程公司, 中国 · 云南 昆明 650000

摘要

公路养护是保障交通路网畅通、推动交通行业可持续发展的关键环节,传统养护材料存在高污染、资源消耗大等问题,难以适配绿色交通发展需求。新型环保材料兼具环境友好、路用性能优异、资源循环利用等核心特征,在公路病害修补、防护延寿、路基加固中展现出重要应用价值,可有效降低养护工程的生态影响。本文通过分类梳理材料特性、开展室内性能试验与工程应用验证,结合经济性分析,明确不同环保材料的适配场景与施工工艺,构建应用效果评价体系,提出针对性优化策略。研究成果为新型环保材料在公路养护中的规范化应用提供技术支持,对推动公路养护领域的绿色转型升级具有重要意义。

关键词

新型环保材料;公路养护;性能评价

1 引言

我国公路路网规模已位居世界前列,截至 2024 年底,全国公路总里程突破 550 万公里,其中高速公路超 17 万公里。随着服役年限增长,大量公路面临路面开裂、坑槽、路基沉降等病害,养护需求持续攀升,2024 年全国公路养护投资额超 8000 亿元。当前养护工程正朝着“精细化、绿色化、高效化”转型,不仅要求快速修复病害、延长公路使用寿命,更需契合“双碳”目标,推动交通行业可持续发展,传统粗放式养护模式已难以满足新时代高质量发展需求。

新型环保材料凭借低污染、可循环、高性能等优势,成为破解传统养护困境的关键。此类材料或源于工业固废回收利用(如粉煤灰基修补剂),或采用生物基、水性环保配方(如生物酶固化剂、水性防水涂料),可大幅降低碳排放与污染物排放,契合绿色交通发展理念。在路用性能上,其抗压强度、粘结性、耐久性等指标更优,能精准适配不同养护场景,有效提升修复效果与公路服役年限。此外,部分环保材料施工便捷、养护周期短,可减少交通中断时间,兼顾生态效益、技术效益与社会效益,对推动公路养护行业转型升级、实现交通可持续发展具有重要现实意义。

【作者简介】马福艳(1982-),女,中国云南昆明人,回族,本科,从事公路工程养护研究。

2 公路养护工程常用新型环保材料分类及特性

2.1 公路养护工程常用新型环保材料分类

常用新型环保材料分类及具体性能，详见表 1。

2.2 新型环保材料的核心特性

环境友好性是核心优势，表现为低污染（无重金属、低 VOCs、无刺激性气味）、部分材料可生物降解或自然风化，且大量利用工业固废、再生骨料等废弃物，减少原生资源开采与碳排放，契合“双碳”目标与绿色交通发展理念；路用

性能全面优于传统材料，具备高强度（抗压、粘结、拉伸强度达标）、高耐久性（抗冻融、抗老化、耐腐蚀）及强适配性，可根据不同气候（高寒、高湿）、地质（软土、盐渍土）及路况（裂缝、沉降、防滑不足）场景精准适配，保障养护工程质量；经济性与施工便捷性显著，多数材料无需高温加热、复杂设备，施工流程简化，养护周期缩短 50% 以上，虽部分材料初始单价略高，但综合考虑资源节约、污染治理成本及延长公路服役年限等因素，全生命周期成本比传统材料降低 20%-30%，兼具技术效益与经济价值。

表 1 公路养护常用新型环保材料性能对比表

材料类别	代表材料	核心优势	适用场景	关键性能指标
环保修补材料	透水混凝土修补剂	透水保孔、潮湿施工	透水路面裂缝修补	透水系数 $\geq 0.5\text{mm/s}$
	生物基沥青再生剂	低温再生、低 VOC	沥青路面再生	旧料利用率 $\geq 95\%$
	聚合物改性环保砂浆	快硬高强、无甲醛	混凝土路面修补	抗压 $\geq 40\text{MPa}$
环保防护材料	水性环保防水涂料	低 VOC、耐老化	桥涵隧道防水	VOC $\leq 50\text{g/L}$
	生态型路面封层	可降解、无污染	景区 / 乡村道路	降解率 $\geq 85\%$
	环保抗滑耐磨料	高防滑、再生骨料	山区 / 高速路段	BPN ≥ 60
环保加固材料	纤维增强复合材料	轻质高强、耐腐蚀	桥涵补强 抗拉	强度 $\geq 800\text{MPa}$
	工业固废基固化料	固废利用、无重金属	软土路基加固	固废掺量 $\geq 70\%$
	生物酶土壤固化剂	生态可还原、易施工	乡村便道路基	强度提升 2~5 倍

3 新型环保材料在公路养护中的应用场景与施工工艺

3.1 路面病害修补中的应用

3.1.1 裂缝、坑槽修补需精准选型

宽度 $\leq 3\text{mm}$ 的微裂缝采用生物基沥青再生剂灌注，利用其高渗透性激活老化沥青；3-10mm 裂缝选用聚合物改性环保砂浆嵌填，兼顾粘结力与抗裂性；面积 $\geq 0.1\text{m}^2$ 的坑槽优先采用透水混凝土修补剂，潮湿基层场景需搭配界面处理剂增强附着力。材料选型需同步考虑气候条件，高寒地区侧重低温抗冻性，多雨地区强化水稳定性。

3.1.2 施工工艺优化聚焦全流程管控

搅拌环节采用机械搅拌，聚合物改性环保砂浆水灰比控制在 0.35-0.45，搅拌时间不少于 3 分钟；透水混凝土修补剂需按比例添加固化剂，搅拌至无结块即可摊铺。摊铺时坑槽需清理杂物、凿毛处理，修补剂摊铺厚度比设计高 5-10mm，采用平板振动器振捣密实；裂缝修补需先用高压气清除粉尘，再生剂灌注采用低压慢注工艺。养护阶段，常温下聚合物砂浆养护 72 小时，透水混凝土修补剂养护 48 小时后可开放交通，高寒地区需采取保温养护措施。

3.1.3 应用案例分析

某城市主干道水泥混凝土路面坑槽修补工程，采用聚合物改性环保砂浆施工，共修复坑槽 23 处，总面积 18.6m^2 。施工后 6 个月跟踪监测，修补处无脱落、开裂现象，平整度达标，粘结强度保持 2.3MPa，较传统水泥砂浆修补寿命延长 1 倍，交通封闭时间缩短 60%。

3.2 路面防护与延寿中的应用

3.2.1 路面防水防护

选用水性环保防水涂料，喷涂于桥涵桥面、隧道进出口等易积水区域；抗老化防护采用生态型路面封层材料，适配沥青路面预防性养护；抗滑防护针对急弯、陡坡路段，铺设环保型抗滑耐磨材料。多目标防护可采用“防水涂料+封层材料”复合体系，兼顾防水与抗老化性能。

3.2.2 封层、罩面施工技术要点

生态型封层施工前需清理路面油污、裂缝，采用同步碎石封层机喷洒，沥青用量控制在 $1.2-1.5\text{kg/m}^2$ ，碎石覆盖率达 70%-80%；水性防水涂料采用高压无气喷涂工艺，喷涂厚度 1.5-2.0mm，分 2 遍施工，间隔 4 小时。罩面施工需先处理基层病害，环保型罩面材料摊铺厚度 3-5cm，碾压采用双钢轮压路机，碾压速度 2-4km/h，压实度 $\geq 95\%$ 。

3.2.3 应用效果初步评估

某高速公路沥青路面预防性养护工程，采用生态型封层材料施工，总里程 8.2km。施工后 1 年检测，路面渗水系数降低 65%，抗老化指数提升 40%，路面平整度改善明显，未出现龟裂、松散等病害，预计延长路面服役年限 3-5 年。

3.3 路基加固与改良中的应用

3.3.1 软土路基加固

优先选用工业固废基固化材料，搭配生物酶土壤固化剂复合使用；冻融路基侧重纤维增强环保复合材料，采用格栅铺设与固化剂改良结合方案。加固场景需结合地质勘察数据，承载力要求 $\geq 150\text{kPa}$ 的路段，工业固废基固化材料掺量为土壤质量的 10%-15%。

3.3.2 环保固化材料施工工艺与参数控制

施工前需将土壤粉碎、晾晒，含水率控制在最佳含水率 $\pm 2\%$ ；工业固废固化材料采用分层摊铺，每层厚度 20cm，机械拌匀后碾压，压实度 $\geq 93\%$ 。生物酶土壤固化剂按 1:500 比例兑水稀释，均匀喷洒后翻拌，翻拌深度 $\geq 30\text{cm}$ ，碾压分初压、复压、终压三步进行。纤维增强复合材料铺设时需拉直绷紧，搭接宽度 $\geq 15\text{cm}$ ，与固化土层紧密贴合。

3.3.3 工程应用实例

某乡村公路软土路基加固工程，采用工业固废固化材料（粉煤灰掺量 70%）施工，加固长度 1.2km，路基宽度 6m。施工后检测，路基承载力提升至 180kPa，工后沉降量 $\leq 3\text{cm}$ ，较传统水泥固化方案减少碳排放 40%，工业固废利用率达 85%，综合成本降低 25%。

3.4 特殊环境公路养护中的应用

高寒地区需选用低温抗冻型材料，如含抗冻剂的聚合物砂浆、低温固化型防水涂料，避免材料脆裂；高温地区侧重水稳定性强的透水修补剂、耐水型封层材料；盐渍土地区优先采用耐腐蚀的纤维增强复合材料、抗盐蚀固化剂，防止盐胀破坏。

高寒地区施工需避开冻土融化期，采用保温搅拌设备，固化材料添加早强剂，养护采用棉被覆盖保温；高温地区需延长基层干燥时间，采用透水性材料改善排水，施工前检测基层含水率，达标后方可施工。盐渍土地区施工前需清除表层盐渍土，采用“固化材料+隔离层”方案，隔离层选用土工布，防止盐分上移，同时加强施工后排水系统建设^[1]。

4 新型环保材料应用效果评价与经济性分析

4.1 应用效果评价指标体系

评价指标主要包括技术指标、环保指标、社会指标，具体量化目标及控制目标，详见表 2

表 2 新型环保材料应用效果评价指标体系表

评价维度	一级指标	二级量化指标	控制目标
技术指标	病害修复效果	裂缝、坑槽修复率	$\geq 98\%$
	使用寿命提升	路面服役年限提升	$\geq 30\%$
	路用性能	抗压强度提升	$\geq 20\%$
		抗滑值（BPN）提升	$\geq 15\%$
环保指标	污染减排	VOCs 排放量降低	$\geq 60\%$
		碳排放强度下降	$\geq 40\%$
	资源利用	工业固废利用率	$\geq 70\%$
		再生骨料掺量	$\geq 50\%$
社会指标	交通影响	施工封闭时间缩短	$\geq 50\%$
	施工安全	安全事故发生率	0
	环境友好	气味、辐射、污染	无毒无害无辐射

4.2 实际工程应用效果评价

短期应用效果跟踪周期为施工后 1-6 个月，重点监测病害修复完整性、路面平整度及材料粘结状态。某高速公路

抗滑防护工程采用环保型抗滑耐磨材料后，3 个月内路面抗滑值稳定在 65BPN 以上，无骨料脱落现象，交通通行顺畅，未因施工造成拥堵。

长期服役性能监测周期为 1-5 年，跟踪路用性能衰减规律与环保效应持续性。某乡村公路软土路基加固工程，采用工业固废固化材料后，5 年监测数据显示，路基承载力保持在 160kPa 以上，工后沉降量 $\leq 5\text{cm}$ ，土壤及周边水体未检测到重金属污染，环保效益持续凸显。

与传统材料对比显示，新型环保材料在技术指标上更优，病害复发率较传统材料降低 70%，路面使用寿命延长 1.5 倍；环保指标优势显著，碳排放平均减少 45%，固废利用率提升 60%；社会指标方面，施工封闭时间缩短 60%，施工人员健康投诉率为零，综合应用效果全面超越传统材料。

4.3 经济性分析

4.3.1 成本核算

涵盖全流程支出，材料成本方面，新型环保材料单价较传统材料高 10%-30%，但单位面积用量更省，如聚合物改性环保砂浆用量较传统水泥砂浆减少 20%；施工成本因工艺简化、效率提升降低 15%-25%，无需高温加热、复杂设备租赁，人工成本减少 30% 左右。

4.3.2 全生命周期成本（LCC）分析

采用 5 年周期测算，新型环保材料初始投资虽高，但养护周期延长、病害复发率低，后期维护成本仅为传统材料的 30%-40%。以 1km 沥青路面预防性养护为例，新型生态封层材料 LCC 较传统沥青封层降低 28%，长期经济性优势明显。

4.3.3 成本-效益优化建议

推广规模化采购降低材料单价，建立区域化生产基地减少运输成本；优化施工工艺，提高材料利用率，降低损耗率至 5% 以下；政策层面争取环保材料补贴，将环保效益纳入工程成本核算体系，进一步提升新型环保材料的市场竞争力^[2]。

5 新型环保材料应用存在的问题与优化策略

5.1 应用中存在的主要问题

5.1.1 材料性能稳定性与适配性不足

部分环保材料受温湿度影响显著，高寒地区易脆裂、高温环境下粘结强度衰减，针对特殊地质（如盐渍土、软土）的专项适配产品匮乏，不同批次材料性能波动偏差达 15%-20%，影响工程质量稳定性。

5.1.2 施工工艺不成熟与标准化缺失

现有工艺多借鉴传统材料施工经验，未形成适配环保材料特性的标准化流程，如水性涂料喷涂厚度控制不当、固化材料掺量凭经验调整，导致施工质量参差不齐；智能化施工设备应用不足，人工操作误差较大，材料损耗率高达 10%-15%。

5.1.3 成本偏高与市场接受度有限

新型环保材料研发投入大，原材料成本较传统材料高10%-30%，且生产规模较小导致单位成本居高不下；业主方对环保材料的长期效益认知不足，更侧重短期投资回报，市场推广面临阻力。

5.1.4 相关技术标准与规范不完善

目前缺乏针对新型环保养护材料的统一质量标准、检测方法及施工规范，不同地区采用的评价指标差异较大，如固废基材料的环保检测项目不统一，导致材料质量难以有效管控，工程验收缺乏明确依据。

5.2 优化策略与解决方案

5.2.1 材料配方改良与性能提升路径

针对不同环境研发专用改性配方，高寒地区添加抗冻剂与弹性体改性剂，盐渍土地区引入耐腐蚀组分；采用纳米复合、交联改性等技术提升材料稳定性，建立材料性能数据库，实现不同工况的精准适配。

5.2.2 施工工艺标准化与智能化升级

编制分材料、分场景的施工操作规程，明确搅拌比例、摊铺厚度、养护周期等关键参数；推广自动化喷涂设备、精准配料系统，利用物联网技术实时监测施工过程，将材料损耗率控制在5%以内。

5.2.3 成本控制与产业规模化发展建议

通过产学研合作优化生产工艺，降低研发成本；扩大生产规模实现规模效应，建立区域化原材料采购与生产基地，减少运输成本；政府出台环保材料补贴政策，将环保效益纳入工程招标评审体系，提升市场接受度。

5.2.4 技术标准与规范完善建议

由行业主管部门牵头，联合科研机构、企业制定统一

的材料质量标准、检测方法及施工规范，明确环保指标（如VOCs含量、固废利用率）与技术指标（如强度、耐久性）的限值要求；建立动态更新机制，结合技术发展持续完善标准体系，为工程应用提供依据^[3]。

6 结论与展望

新型环保材料可分为修补、防护、加固三类，兼具环境友好、路用性能优异、施工便捷等特性，透水混凝土修补剂适配路面病害修复，生态型封层材料适用于防护延寿，工业固废基固化剂适配路基加固，可精准匹配不同养护场景需求。路用性能试验与工程应用验证表明，新型环保材料在强度、耐久性等指标上优于传统材料，病害修复率 $\geq 98\%$ ，使用寿命延长30%以上，同时实现VOCs减排60%、固废利用率 $\geq 70\%$ ，综合效益显著。针对应用情况，需通过材料配方改性提升稳定性、制定标准化施工工艺、规模化生产控制成本、完善技术标准体系，为推广应用提供保障。

未来研发方向聚焦低成本、多功能材料，如工业固废高掺量复合改性材料、自愈型环保修补剂。推进多材料协同应用，结合无人机喷洒、智能监测设备实现施工智能化。构建涵盖技术、环保、经济的全生命周期评价体系，建立材料质量长效监管机制，助力行业绿色转型。

参考文献

- [1] 王秋实,樊晨光.溶剂型冷再生沥青建材的制备与性能分析.粘接,2025(02)
- [2] 段国忠.桥梁隧道渗漏修复用注浆粘接材料机理及性能分析.粘接,2025(01)
- [3] 方明东.钉形水泥搅拌桩在道路工程中的应用与性能分析.中国建筑金属结构,2025(14)