

公路养护施工安全管理与新材料应用研究

侯森林

江安县公路养护管理段，四川 宜宾 644000

DOI:10.61369/ERA.2025080032

摘 要： 本文围绕公路养护展开，涵盖传统工艺弊端、施工安全风险、智能自修复材料、固废及生物基材料应用、技术集成与安全管控装备研发、应急预案模拟推演、协同机制构建、综合评价模型、示范工程应用及成本和社会效益评估等多方面内容，指出新技术的优势及未来发展方向。

关 键 词： 公路养护；新材料；安全管理

Research on Safety Management and Application of New Materials in Highway Maintenance Construction

Hou Senlin

Jiang'an County Highway Maintenance Management Section, Jiang'an County, Yibin, Sichuan 644000

Abstract： This article focuses on highway maintenance, covering various aspects such as the drawbacks of traditional techniques, construction safety risks, intelligent self-healing materials, solid waste and biobased material applications, technology integration and safety control equipment research and development, emergency plan simulation and deduction, collaborative mechanism construction, comprehensive evaluation models, demonstration project applications, and cost and social benefit assessments. It points out the advantages and future development directions of new technologies.

Keywords： highway maintenance; new materials; safety management

引言

随着交通运输行业的快速发展，公路养护面临着诸多挑战。2019年发布的《交通强国建设纲要》强调了提升交通基础设施养护水平的重要性。传统公路养护工艺如沥青修补和水泥混凝土养护存在能耗高、效率低、难以精准控制等问题，无法满足日益增长的交通需求。同时，公路养护工程施工安全风险受多种因素影响，呈现复杂性和多样性特征。在此背景下，智能自修复材料研发、工业固废再生骨料和生物基粘结剂应用等新技术的探索以及施工安全管理系统构建成为研究热点，旨在提高公路养护的质量、效率和安全性，实现可持续发展。

一、公路养护工程现状与挑战

（一）传统养护技术局限性

常规沥青修补和水泥混凝土养护是传统公路养护常用工艺。沥青修补过程中，往往需要对材料进行加热等处理，能耗较高。同时，其施工效率受限于材料特性和施工环境，难以快速完成修补作业，导致交通拥堵等问题^[1]。水泥混凝土养护在时间和资源投入上要求较高，且传统养护方式难以精准控制养护条件，容易出现养护不足或过度的情况，影响公路使用寿命。从交通流量数据来看，随着车辆日益增多，公路使用频率大幅提高，传统养护技术的低效率已无法满足快速恢复交通的需求，技术升级迫在眉睫。

（二）施工安全风险特征分析

公路养护工程施工安全风险受多种因素影响。基于事故统计

报告分析，人-机-环境风险因子关联紧密。在夜间施工场景中，光线不足导致作业人员视线受阻，增加了操作失误的风险，同时机械设备的运行也更易出现故障且难以被及时发现^[2]。临时交通组织方面，交通流的改变易造成道路拥堵，增加车辆与养护作业区发生碰撞的可能性。作业人员在复杂的交通环境下，心理压力增大，也会影响其操作的准确性。这些特殊场景下的安全隐患相互交织，使得公路养护施工安全风险呈现出复杂性和多样性的特征。

二、新型养护材料技术体系

（一）智能自修复材料研发

智能自修复材料研发主要聚焦于微胶囊自修复沥青和形状记忆聚合物。微胶囊自修复沥青中，微胶囊包含修复剂，当沥青出

现裂缝，微胶囊破裂释放修复剂填充裂缝，其作用机理涉及到裂缝产生的应力诱导微胶囊破裂过程^[9]。形状记忆聚合物则是利用其特殊的记忆性能，在受到外界刺激（如温度变化）时，能够恢复到原始形状，从而对裂缝进行修复。通过实验室对比试验，对两者的裂缝自愈效能进行验证。结果表明，在特定条件下，微胶囊自修复沥青和形状记忆聚合物均能在一定程度上实现裂缝自愈合，为公路养护提供了新的材料技术支持。

（二）环保型复合材料的应用

公路养护中，工业固废再生骨料和生物基粘结剂的应用需构建完善的技术参数体系。对于工业固废再生骨料，要明确其颗粒大小、强度等参数，确保其能满足公路养护的基本力学要求^[4]。同时，需考虑其不同环境条件下的稳定性。生物基粘结剂方面，要确定其粘结强度、固化时间等关键技术参数，以保障其在公路养护中的粘结效果。开展全生命周期环境影响评估至关重要，从原材料获取、生产加工到使用后的废弃处理，都要评估其对环境的影响，以便更好地优化材料的应用，实现公路养护的可持续发展。

三、施工安全管理系统构建

（一）风险评估与预警机制

1. BIM-5D 动态风险识别

集成 BIM 模型与物联网传感数据，开发实时风险预警算法。BIM 模型能够整合公路养护施工的多维度信息，包括结构、材料和施工流程等，为风险识别提供全面的数据基础^[9]。物联网传感技术则可实时采集施工现场的环境、设备运行等关键数据。通过将两者集成，利用先进的数据分析技术开发风险预警算法。该算法能够实时监测施工过程中的潜在风险因素，如结构变形、材料老化、环境异常等，并根据设定的阈值及时发出预警信号，以便施工人员进行相应的措施，有效预防安全事故的发生。

2. 安全态势预测模型

在施工安全管理系统构建中，风险评估与预警机制至关重要，其中安全态势预测模型是核心部分。通过应用机器学习技术，综合考虑多种影响施工安全的因素，建立事故概率预测系统。该系统能够对各种复杂的施工环境和作业流程进行分析，识别潜在的安全风险。例如，考虑天气条件、施工人员操作熟练程度、设备运行状况等多方面因素的耦合作用^[6]。通过对大量历史数据的学习和分析，模型可以预测不同情况下事故发生的概率，为提前采取预防措施提供科学依据，从而有效降低施工过程中的安全风险，保障施工安全管理系统的高效运行。

（二）现场安全管控技术

1. 智能安全防护装备

研发具有定位报警功能的可穿戴设备及自动防撞隔离设施是现场安全管控技术中智能安全防护装备的关键部分。可穿戴设备通过定位技术实时掌握施工人员位置，一旦发生危险可迅速报警，保障人员安全^[7]。自动防撞隔离设施能在车辆意外闯入施工区域时自动启动，避免车辆对施工人员和设备造成伤害。这些智能

安全防护装备利用先进技术，提高了公路养护施工的安全性，降低了事故发生的可能性，为施工安全管理系统的构建提供了有力支持。

2. 应急响应决策支持

构建基于数字孪生的应急预案模拟推演系统是应急响应决策支持的关键。该系统利用数字孪生技术，精确复现公路养护施工场景，包括地形、设施、人员分布等要素^[8]。通过设定不同的事故类型和参数，模拟事故发生发展过程，为应急决策提供真实可靠的数据基础。系统能够对应急预案进行全面评估，分析其不同情境下的有效性和可行性，发现潜在问题并及时优化。同时，为应急人员提供虚拟训练环境，使其熟悉应急流程和操作技巧，提高应急响应能力和协同配合水平，从而保障公路养护施工在面对突发情况时能够迅速、有效地做出决策，降低事故损失。

四、技术集成与工程实践

（一）综合管理体系构建

1. 材料 - 工艺 - 安全协同机制

公路养护施工中，需构建材料 - 工艺 - 安全协同机制。新材料应用需与配套施工规程紧密衔接，确保施工安全与质量。在材料选择上，依据公路养护需求和环境特点，筛选合适的新材料，并制定严格的质量标准^[9]。同时，针对新材料的特性，研发与之匹配的施工工艺，明确施工流程、操作要点和质量控制方法。在安全管理方面，分析新材料应用和新工艺实施过程中可能存在的安全风险，制定相应的安全措施和应急预案。通过建立这种协同机制，实现材料、工艺和安全的有机统一，提高公路养护施工的综合效益。

2. 多维绩效评价指标体系

综合考虑公路养护施工的多方面因素，构建包含经济性、安全性、耐久性的综合评价模型至关重要。在经济性方面，需考量养护成本、材料费用、设备使用及人力投入等^[10]。通过精确核算和分析这些成本因素，评估不同养护方案的经济可行性。安全性评价则涉及施工过程中的人员安全、道路使用安全以及对周边环境的安全影响。例如，评估新材料应用对道路防滑性能、结构稳定性的影响，确保施工过程及后期使用的安全。耐久性主要关注公路在长期使用过程中的性能保持，包括路面抗磨损能力、抗老化性能以及抵御自然环境侵蚀的能力。综合这三个维度的评价指标，能够全面、科学地评估公路养护施工的绩效。

（二）示范工程应用验证

1. 试验段参数优化

在示范工程应用验证中，于典型路段进行新材料铺装与智能监测设备联调测试至关重要。通过对试验段各项参数的优化来确保工程效果。在实际操作中，需综合考虑多方面因素，如材料特性、环境条件以及交通流量等对铺装效果的影响。依据现场测试数据，精准调整材料配比、铺装厚度等关键参数，以实现最佳的公路养护效果。同时，对智能监测设备的监测频率、精度等参数进行优化，使其能准确反馈公路使用状况。通过不断调整和优化

试验段参数,为新材料在公路养护施工中的大规模应用提供可靠的技术支撑和实践经验。

2. 全流程监控实施

在示范工程中,通过部署无人机巡检系统与边缘计算终端的数据融合方案实现全流程监控。无人机巡检系统获取公路养护施工区域的实时图像和数据,包括施工进度、人员操作、设备状态以及潜在的安全隐患等。边缘计算终端则对这些海量数据进行快速处理和分析,提取关键信息。通过两者的数据融合,不仅能够实现对施工过程的实时、精准监控,还能及时发现并预警可能出现的安全问题和施工异常情况。同时,这种融合方案有助于优化施工流程,提高施工效率,为公路养护施工安全管理提供了有力的技术支持,确保新材料应用过程中的施工质量和安全性。

(三) 技术经济性分析

1. 全寿命周期成本核算

全寿命周期成本核算对于公路养护施工至关重要。需综合考虑从建设到运营维护的所有成本。对于传统工艺,其材料成本可能相对较低,但由于耐久性较差,后期维护成本较高,且频繁维护可能影响公路正常使用,带来间接经济损失。而新技术体系虽初期投入可能较大,包括新材料研发和应用成本等,但因其具有更好的性能,如更强的耐久性和抗损性,能有效减少后期维护次数和成本,从全寿命周期来看,可能更具经济优势。同时,还需考虑不同工艺和材料对环境的影响,环境成本也是全寿命周期成本的一部分,环保的新技术在长期可能带来更多隐性经济效益。

2. 社会效益量化评估

公路养护施工安全管理与新材料应用研究中,社会效益量化评估至关重要。构建包含交通延误、碳排放等要素的社会成本计算模型是关键。交通延误方面,需考虑车辆在养护施工路段的滞留时间、排队长度等因素,通过实地调研和数据分析,确定不同交通流量下的延误成本。碳排放方面,要综合车辆怠速、缓行等工况下的排放数据,结合养护施工时长和交通流量,计算出因施工导致的额外碳排放成本。该模型还应考虑噪声污染、对周边居民生活的影响等其他社会成本因素,通过量化这些因素,全面评估公路养护施工的社会效益,为决策提供科学依据。

五、总结

公路养护施工安全管理与新材料应用的研究具有重要意义。新型养护材料的技术突破带来了诸多优势,如提高养护质量和效率等。安全管理体系的创新也极具价值,保障了施工过程的安全。多源数据融合及材料智能感知是未来的发展方向,多源数据融合能够整合各方信息,为养护施工提供更全面准确的决策依据;材料智能感知则有助于实时监测材料性能,及时发现问题并调整养护策略。为更好地推动公路养护施工安全管理与新材料应用的发展,建立跨学科协同研发平台至关重要,通过汇聚不同学科的专家和资源,能够实现技术的创新和突破,促进公路养护行业的可持续发展。

参考文献

- [1] 李利伟. 基于 TQM 的 WJ 公路养护安全管理研究 [D]. 江苏科技大学, 2015.
- [2] 李绍森. 高速公路养护施工安全管理研究与实践 [D]. 华中科技大学, 2015.
- [3] 张静. 高速公路养护施工安全管理研究 [D]. 长安大学, 2014.
- [4] 刘显含. 新疆公路养护管理研究 [D]. 大连海事大学, 2014.
- [5] 徐蕾. 浅谈公路养护工程成本管理体系研究与应用 [J]. 财经界, 2015(17):122.
- [6] 陈嘉臻. 公路养护施工安全管理 [J]. 建筑工程技术与设计, 2018.
- [7] 程国琴. 浅谈公路养护工程成本管理体系研究与应用 [J]. 中国经贸, 2017(1):93-93.
- [8] 朱永光, 何培勇, 于会江. 高速公路养护工程全寿命周期成本理论的研究与应用 [J]. 中国高新技术企业, 2013(15):96-97.
- [9] 宿宝明, 张成成. 公路养护机械施工安全管理 [J]. 商品与质量, 2016(10):270-271.
- [10] 沈志鹏. 高速公路养护施工的安全管理 [J]. 内蒙古公路与运输, 2017(5):52-53,62.