

微表处在沥青路面日常养护中的施工控制及耐久性能研究

史财山

新疆公路建设(集团)有限责任公司, 中国·新疆 昌吉 831100

摘要: 随着我国公路网全面进入“建养并重”的存量时代, 沥青路面的预防性养护已成为保障路网服务水平、延长使用寿命、降低全寿命周期成本的核心策略。微表处作为一种高效、经济、环保的薄层罩面技术, 凭借其优异的抗滑、防水、封缝及平整度恢复能力, 在日常养护中得到广泛应用。然而, 工程实践表明, 微表处的实际服役效果差异显著, 早期脱落、泛油、开裂、耐久性不足等问题频发, 其根源在于施工控制精细化程度低与材料-结构-环境耦合作用下耐久性能演化规律认知不清。本文系统综述了微表处在沥青路面日常养护中的施工控制关键技术及耐久性能研究进展, 涵盖原材料优选与配比设计、施工工艺参数精准调控、界面粘结质量保障、服役性能衰变机理及寿命预测模型等核心环节。文章指出, 当前研究正从经验型施工向数据驱动的精细化管控转变, 从单一性能评价向多因素耦合耐久性评估深化, 从短期效果验证向全寿命周期性能预测延伸。但仍面临原路面状况适应性评价标准缺失、施工过程动态反馈机制不健全、耐久性评价指标与实际服役性能脱节、长期性能数据积累不足等瓶颈。针对上述问题, 提出构建基于原路面状况分级的差异化施工控制体系、发展施工-材料-环境协同的耐久性提升策略、建立多维度耐久性评价与寿命预测方法、完善标准化施工与质量控制规范等系统性对策。研究表明, 微表处的成功应用依赖于施工控制的精准化与耐久性能的可预测化, 需将材料科学、施工工艺、检测技术与管理体系深度融合。唯有实现从“能做”到“做好、做久”的跨越, 方能真正发挥微表处在沥青路面日常养护中的核心价值, 支撑公路交通高质量发展。

关键词: 微表处; 沥青路面; 日常养护; 施工控制; 耐久性能; 界面粘结; 预防性养护

Microsurfacing Construction Control and Durability Performance Research in Daily Maintenance of Asphalt Pavements

Shi Caishan

Xinjiang Highway Construction (Group) Co., Ltd., China Xinjiang Changji 831100

Abstract: As China's highway network fully enters the "construction and maintenance equally emphasized" phase of existing infrastructure, preventive maintenance of asphalt pavements has become a core strategy to ensure service levels, extend service life, and reduce lifecycle costs. Microsurfacing, as an efficient, economical, and environmentally friendly thin-layer overlay technology, has been widely applied in routine maintenance due to its excellent skid resistance, waterproofing, crack sealing, and surface smoothness restoration capabilities. However, engineering practice shows significant variations in actual performance, with frequent issues such as early delamination, oil bleeding, cracking, and insufficient durability. The root causes lie in inadequate construction control precision and insufficient understanding of the evolution mechanisms of durability under coupled effects of materials, structure, and environment. This paper systematically reviews key technologies in microsurfacing construction control and advances in durability performance research for daily asphalt pavement maintenance, covering critical aspects including raw material selection and mix design, precise regulation of construction parameters, interface bonding quality assurance, service performance degradation mechanisms, and lifespan prediction models. It highlights that current research is transitioning from experience-based construction toward data-driven, fine-grained management; from single-performance evaluation to multi-factor coupled durability assessment; and from short-term effectiveness verification to full lifecycle performance prediction. Nevertheless, challenges remain, including lack of standardized criteria for assessing compatibility with existing pavement conditions, incomplete dynamic feedback mechanisms during construction, disconnection between durability evaluation indicators and actual in-service performance, and insufficient long-term performance

data accumulation. To address these issues, systematic solutions are proposed, including establishing a differentiated construction control system based on pavement condition classification, developing integrated strategies to enhance durability through coordinated construction-material-environment interactions, building multidimensional durability evaluation and lifespan prediction methods, and improving standardized construction and quality control specifications. The study demonstrates that successful application of microsurfacing depends on precise construction control and predictable durability, requiring deep integration of materials science, construction techniques, testing technologies, and management systems. Only by achieving a transition from "being able to do" to "doing it well and making it last" can the core value of microsurfacing in daily asphalt pavement maintenance be fully realized, supporting high-quality development of highway transportation.

Keywords: Microsurfacing; Asphalt pavement; Routine maintenance; Construction control; Durability; Interface bonding; Preventive maintenance

0 引言

我国高速公路通车里程已居世界首位,大量早期建设的沥青路面陆续进入养护高峰期。在“双碳”目标与交通强国战略背景下,预防性养护因其“治早、治小、治未病”的理念,成为实现公路可持续发展的必然选择。微表处作为预防性养护的代表性技术,以聚合物改性乳化沥青、级配集料、填料、水和添加剂组成的稀浆混合料为材料,通过专用摊铺设备在原路面上形成厚度通常为 5–10mm 的薄层罩面,具有施工快捷、开放交通早、成本低、环保性好等优势,被广泛用于修复路面轻微病害、恢复表面功能、延缓结构性损坏。然而,微表处并非“万能药”,其适用性高度依赖原路面状况、材料匹配性、施工工艺及环境条件。现实中,因施工控制粗放导致的早期失效案例屡见不鲜:有的路段通车数月即出现大面积脱落,有的因泛油导致抗滑性能骤降,有的在低温环境下迅速开裂。这些问题的背后,是施工控制缺乏与原路面状态的精准适配,是材料设计与现场工况的脱节,更是对微表处在复杂服役环境下耐久性能演化规律认知的不足。与此同时,随着新材料(如高性能改性乳化沥青、纤维增强、纳米改性)、新装备(智能摊铺机、在线监测设备)和新方法(无损检测、数字孪生)的涌现,微表处技术正迎来升级契机。但碎片化的技术进步尚未形成系统集成能力,施工控制仍多凭经验,耐久性评价仍以短期指标为主,难以支撑科学决策。因此,亟需以日常养护实际需求为导向,系统梳理微表处施工控制的关键要点与耐久性能的研究脉络,剖析现实痛点并探索系统性解决方案。这不仅是技术问题,更是关乎养护投资效益、路网安全与服务水平的战略性命题。

1 现实审视:微表处施工控制与耐久性能的成效与瓶颈

要推动微表处技术高质量发展,必须客观评估其在日常养护中的实际应用效果与深层制约因素。

1.1 施工控制进步显著提升初期使用性能

近年来,微表处施工控制在多个维度取得积极进展,有效改善了初期使用性能。在原材料方面,sbr、sbs 等聚合物改性乳化沥青的普及,显著提升了混合料的粘结力、柔韧性与耐候性;级配优化与填料比例调整,使混合料兼具良好的和易性与密实度。在施工工艺上,摊铺速度、用水量、添加剂掺量等参数的精细化调控,减少了离析、破乳过快或过慢等问题;接缝处理、边缘压实等细节工艺的改进,提升了整体平整度与美观度。更重要的是,部分项目开始引入施工过程监控手段,如实时监测摊铺厚度、混合料状态、环境温度等,初步实现了从“事后检验”向“过程控制”的转变。大量工程案例表明,规范施工的微表处能有效封闭路面裂缝、恢复抗滑系数至 0.6 以上、降低渗水系数至 10ml/min 以下,显著改善行车舒适性与安全性,且成本仅为铣刨重铺的 1/3–1/2。这些成果证明,微表处在适宜条件下是一种高效可靠的日常养护手段,其技术成熟度与经济优势已得到行业广泛认可。这种从“粗放施工”到“精细管控”的认知跃迁,为后续耐久性提升奠定了坚实基础^[1]。

1.2 原路面适应性差与界面弱化制约长期耐久性

尽管初期性能良好,但微表处的长期耐久性仍受多重因素制约。首要问题是原路面状况适应性评价标准缺失:现行规范对微表处适用条件的规定较为笼统,未充分考虑原路面损坏类型、程度、结构承载力及表面纹理的细微差异。例如,对存在隐性基层裂缝或局部松散的路面实施微表处,往往在短期内反射开裂或剥落;对光滑旧路面未做拉毛处理,界面粘结强度不足,易在车轮剪切作用下脱层。其次,界面粘结是耐久性的薄弱环节:微表处与原路面之间仅靠物理嵌挤与化学粘附结合,无热拌沥青的熔融融合过程;在水分侵入、温度循环及交通荷载反复作用下,界面易发生疲劳损伤,导致分层、推移等病害。现有施工控

制多关注混合料本身性能,忽视界面对接质量的保障,缺乏针对性的界面处理工艺与粘结强度检测方法。更深层的是,耐久性评价与实际服役性能脱节:室内试验多采用湿轮磨耗、负荷轮碾压等加速老化方法,但其应力水平、环境谱与真实交通-气候耦合条件相差甚远,难以准确预测长期性能;现场评价仍以外观检查和简单功能测试为主,缺乏对内部损伤演化的无损探测手段。这种“初期好看、后期不耐用”的反差,暴露出施工控制与耐久性研究的断层^[2]。

1.3 标准化缺失与数据积累不足阻碍技术升级

技术推广的深度与广度,最终取决于标准化水平与知识沉淀能力。目前,微表处施工控制缺乏统一、细化的技术标准:不同地区、不同单位对原材料指标、配比设计方法、施工参数范围、验收标准的理解与执行差异较大,质量波动显著;施工过程数据采集零散、格式不一,难以进行横向对比与纵向分析;耐久性评价方法未纳入常规养护检测体系,长期性能数据严重匮乏,无法支撑寿命预测模型的校准与验证。产业链协同亦显不足:乳化沥青生产商、集料供应商、施工单位、检测机构之间信息割裂,材料性能与施工需求脱节;养护决策多依赖经验判断,缺乏基于性能衰变规律的科学依据。此外,经济性评价片面强调初期造价,忽视全寿命周期成本,导致“低价中标、劣质施工、频繁返修”的恶性循环。部分地区虽开展过微表处长期观测,但因测点少、周期短、变量多,数据价值有限。这种“有实践无总结、有数据无模型、有标准无细化”的局面,使得微表处技术难以从经验技艺升华为可复制、可预测的工程科学。若不夯实数据基础、完善标准体系、强化全链条协同,再好的技术也难逃“昙花一现”的命运^[3]。

2 路径探索:面向耐久性的施工控制与性能提升创新策略

破解上述难题,需以耐久性为核心目标,重构施工控制逻辑与技术评价体系。

2.1 构建基于原路面状况分级的差异化施工控制体系

应超越“一刀切”施工思维,建立“诊断-分级-适配”的精准控制模式。首先,开发原路面状况快速诊断与分级评价方法:综合运用探地雷达、激光纹理仪、弯沉仪、高清摄像等设备,量化评估裂缝密度、车辙深度、表面纹理、结构强度及含水率等关键指标,建立微表处适用性分级标准(如a/b/c三级),明确各级对应的预处理要求与施工参数范围。其次,针对不同等级路面,制定差异化施工方案:对a级良好路面,采用标准配比与常规工

艺;对b级轻度病害路面,增加界面拉毛、裂缝预灌缝等预处理,调整乳化沥青用量与级配;对c级临界适用路面,慎用微表处或采用增强型配方(如纤维增强、高粘改性),并加强后期监测。特别要强化界面质量控制:推广高压水清洗、机械拉毛、粘层油洒布等界面处理工艺;研发便携式粘结强度测试仪,实现施工中界面质量的快速抽检;优化摊铺速度与破乳时间匹配,确保混合料在最佳状态下与原路面结合。通过“精准诊断+分级适配+界面强化”三位一体,使施工控制真正响应原路面状态,而非仅满足通用规范^[4]。

2.2 发展施工-材料-环境协同的耐久性提升策略

必须将耐久性视为施工、材料与环境共同作用的结果,而非单一因素决定。在材料层面,研发面向特定环境的专用改性乳化沥青:寒冷地区侧重低温柔韧性与抗冻融性,湿热地区强调高温稳定性与抗水损害能力;引入纳米材料、纤维、再生剂等组分,提升混合料内聚力与界面粘结力。在施工层面,建立环境自适应调控机制:根据实时温湿度、风速、日照等调整用水量、添加剂掺量及摊铺速度,避免破乳异常;推广温拌微表处技术,降低施工温度敏感性,延长有效作业窗口。在结构层面,探索微表处与其他养护技术的复合应用:如对中度车辙路段先铣刨再微表处,对裂缝密集区先贴缝带后罩面,形成“组合拳”效应。同时,加强施工过程数据与后期性能数据的关联分析,识别影响耐久性的关键施工因子(如摊铺均匀性、压实度、界面处理质量),建立施工质量-耐久性映射模型,指导工艺持续优化。通过“材料定制+施工适配+结构协同”的系统集成,使微表处具备抵抗复杂服役环境的能力^[5]。

2.3 健全多维度耐久性评价与寿命预测方法

应重建一套贴近实际、可操作的耐久性评价体系。在评价指标上,除传统抗滑、渗水、平整度外,增加界面粘结强度、内部空隙率、老化程度等反映内在耐久性的指标;推广探地雷达、红外热像、超声波等无损检测技术,实现对内部损伤的早期识别。在评价方法上,建立“室内加速试验+现场长期观测+数值模拟”三位一体的验证体系:室内试验模拟真实应力-环境谱,提高加速老化的代表性;现场设立长期观测段,定期采集多维度性能数据;利用有限元或离散元模型,模拟微表处在交通-气候耦合作用下的损伤演化过程。在此基础上,构建寿命预测模型:整合材料性能、施工质量、交通荷载、气候数据等多源信息,采用机器学习或可靠性分析方法,预测微表处功能衰变轨迹与剩余寿命,为养护时机选择提供科学依据。

同时,推动将耐久性评价纳入养护工程验收与后评估体系,倒逼施工质量提升。通过将评价从“表面合格”转向“内在耐久”,从“静态验收”升级为“动态预测”,真正实现微表处性能的可预期、可管理^[6]。

3 结语

微表处在沥青路面日常养护中的应用,绝非简单的薄层覆盖,而是一场涉及材料科学、施工工艺、检测技术与管理体系的系统性工程。它要求我们超越“快速修复”的短期视角,重新定义微表处的价值坐标——不是临时的遮瑕膏,而是承载长期服役使命的功能性结构层。在这一进程中,既要尊重原路面状态的个体差异,也要把握材料-环境交互的普遍规律;既要追求施工过程的精准可控,也要关注服役性能的持久稳定;既要依靠单项技术的突破,更要注重全链条知识的积累与传承。未来的进步,必将诞生于对界面行为的深刻理解,成型于对施工细节的极致把控,升华于对长期数据的耐心沉淀。我们应当以敬畏之心对待每一平方米微表处,它们虽是薄层,却承载着万千车轮的碾压与四季风雨的考验,是公路生命延续的重要一环。

这不仅是技术的精进,更是对“畅安舒美”公路服务承诺的务实践行。

参考文献:

- [1] 古培杉. 某高速公路路面科学养护决策研究[J]. 西部交通科技, 2025(12): 143-145. DOI:10.13282/j.cnki.wccst.2025.12.040.
- [2] 张倩, 华子全, 裴晓梅等. 国省干线沥青路面不同养护类型的碳排放核算与分析[J]. 公路工程, 2025, 50(4): 213-222. DOI:10.19782/j.cnki.1674-0610.2025.04.028.
- [3] 杜艳玲. 公路沥青路面裂缝成因及日常养护关键技术[J]. 运输经理世界, 2024(15): 116-118.
- [4] 王永阁. 立式搅拌热再生路面养护车开发. 浙江省, 浙江美通筑路机械股份有限公司, 2022-08-18.
- [5] 段宝清. 微表处预防性养护技术在某高速公路的应用和效果评价[D]. 兰州大学, 2015.
- [6] 刘勇. 沥青混凝土路面快速维修施工的技术研究[D]. 山东大学, 2013.