

重载道路废旧面层材料循环复用技术创新研究

曹强彬

新疆公路建设（集团）有限责任公司，中国·新疆 昌吉 831100

摘要：随着我国交通基础设施建设全面进入“建养并重”的新阶段，重载道路废旧沥青面层材料的规模化处置与高值化再生利用，已成为制约交通运输行业绿色低碳转型的关键瓶颈。重载道路因其承受轴载大、渠化交通显著、环境耦合效应强等特殊工况，对路面材料的抗车辙、抗疲劳及长期耐久性提出了远超常规道路的严苛要求。传统再生技术多基于轻中载场景开发，直接应用于重载道路时普遍存在性能衰减快、使用寿命短、质量波动大等问题，导致废旧面层材料在重载领域的循环复用率长期偏低。本文系统综述了重载道路废旧面层材料循环复用技术的创新研究进展，从材料损伤演化机理、再生体系分子设计、多级配伍优化、施工工艺适配及全寿命周期评价等维度展开深入分析。

关键词：重载道路；废旧沥青面层；循环复用；再生技术；界面强化；数字孪生；全寿命周期评价

Innovative Research on Recycling and Reuse of Waste Surface Materials from Heavy-Duty Roads

Cao Qiangbin

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

Abstract: As China's transportation infrastructure construction enters a new phase emphasizing both construction and maintenance, the large-scale disposal and high-value recycling of waste asphalt surface materials from heavy-duty roads has become a critical bottleneck constraining the green and low-carbon transformation of the transportation industry. Due to their unique operating conditions—including high axle loads, highly channelized traffic, and strong environmental coupling—heavy-duty roads impose much stricter requirements on pavement materials for rut resistance, fatigue resistance, and long-term durability than conventional roads. Traditional recycling technologies, primarily developed for light-to-medium load scenarios, often suffer from rapid performance degradation, short service life, and significant quality fluctuations when directly applied to heavy-duty roads, resulting in persistently low recycling rates for waste surface materials in such applications. This paper systematically reviews recent advances in innovative research on recycling and reuse technologies for waste surface materials from heavy-duty roads, conducting in-depth analyses across multiple dimensions including material damage evolution mechanisms, molecular design of recycling systems, multi-grade gradation optimization, construction process adaptation, and full-life cycle evaluation.

Keywords: Heavy-duty roads; Waste asphalt surface; Recycling and reuse; Recycling technology; Interface strengthening; Digital twin; Full-life cycle evaluation

0 引言

我国高速公路网历经三十余年高速发展，累计通车里程已居世界首位，其中大量承担煤炭、矿产、港口集疏运等重任的重载通道，正集中进入大修或改扩建周期。据交通运输部统计，全国每年产生的废旧沥青混合料（rap）总量已超过 2 亿吨，其中来自重载路段的面层材料因长期承受高频重载、高温剪切及复杂气候耦合作用，老化程度深、性能变异大、杂质含量高，成为再生利用领域最难啃的“硬骨头”。若将这些材料简单填埋或降级用于低等级道路，不仅造成优质玄武岩集料与石油沥青资源的巨大浪费，更与国家“双碳”战略下交通基础设施绿色转型的要求背道

而驰。近年来，厂拌热再生、就地冷再生、温拌再生等技术虽已在普通道路中成熟应用，但在重载场景下却屡屡遭遇“再生易、耐久难”的困境：再生混合料高温稳定性不足引发严重车辙，低温抗裂性衰减导致早期开裂，水损害敏感性增加缩短服役寿命，最终陷入“反复维修、反复废弃”的恶性循环^[1]。

1 现实审视：重载道路废旧面层循环复用的成效与瓶颈

要推动循环复用技术真正落地于重载道路，必须首先客观评估其在真实工程场景中的价值贡献与应用局限，避免陷入技术乐观主义或悲观主义的两极误区。

1.1 再生技术进步显著提升资源利用率与环保效益

近十年来,我国在废旧沥青面层再生技术领域取得了长足进展,为重载道路的应用奠定了初步基础。厂拌热再生技术通过精确控制加热温度、拌合时间与新料掺配比例,使 rap 掺量稳定达到 30% - 50%,部分高标准示范项目甚至实现了 70% 以上的高掺量应用;就地冷再生结合泡沫沥青或乳化沥青稳定技术,在基层补强与旧路改造中广泛应用,大幅减少了开挖、运输及新料生产环节的碳排放。更重要的是,针对重载特点的适应性技术改良已初见成效:采用 sbs/sbr 复合改性再生剂可有效恢复老化沥青的弹性恢复能力,添加聚酯纤维或玄武岩纤维显著提升了混合料的抗剪强度与韧性,引入温拌技术降低了施工温度,有效减轻了二次老化对材料性能的损伤^[2]。

1.2 材料异质性与界面弱化制约重载适应性

尽管宏观性能指标在特定条件下能够达标,但微观层面的结构性隐患仍严重威胁着重载道路再生路面的长期耐久性。首要问题是废旧材料的高度异质性:同一批次 rap 中,不同颗粒的老化程度差异可达两个数量级,这源于原路面摊铺时的不均匀性、交通荷载在横断面上的分布差异以及回收破碎过程中的选择性破碎效应。传统再生设计普遍采用的均质化假设,导致再生剂用量“一刀切”,造成过再生区域软化过度、高温稳定性下降,欠再生区域脆性过大、低温抗裂性不足,整体性能呈现“木桶效应”。其次,新旧沥青界面是再生体系中最薄弱的环节。老化沥青表面极性官能团增多、分子量增大、芳香分减少,与新沥青的化学相容性显著降低,形成物理与化学双重弱边界层;在重载车辆反复施加的高频剪切应力作用下,该界面极易发生脱粘,诱发微裂纹萌生与扩展,最终导致宏观破坏。现有再生剂研发多聚焦于整体流变性能的恢复,忽视了对界面特异性的靶向修复,致使许多室内试验合格的混合料在实际重载交通下提前失效。更深层次的问题在于重载工况模拟的严重失真:现行室内试验多采用标准马歇尔、车辙仪或小梁疲劳试验,其加载频率、应力水平、温度谱及边界条件与实际重载交通相差甚远,无法真实反映材料在高应力累积损伤、温度 - 荷载耦合及水分侵蚀共同作用下的复杂响应。

1.3 标准缺失与产业链割裂阻碍规模化高值应用

技术能否从示范走向普及,不仅取决于其自身性能,更依赖于配套的制度环境与市场生态。目前,国家及行业标准对再生混合料的设计方法、质量控制及验收指标仍以普通道路为基准,缺乏针对重载等级的差异化规定。例如,

《公路沥青路面再生技术规范》未区分重载与非重载路段的性能阈值与设计参数,导致设计要么过于保守造成浪费,要么盲目套用带来风险;再生剂产品无统一分类与质量标准,市场上产品质量参差不齐,用户选择困难,劣币驱逐良币现象时有发生。产业链上下游协同严重不足:铣刨设备精度低、刀具磨损快,导致 rap 粒径分布失控、含泥量超标;拌合楼改造滞后,加热不均、计量不准问题突出;检测机构缺乏重载专用评价设备与方法,只能沿用常规手段敷衍了事;施工单位对再生工艺掌握不熟练,压实温度、遍数控制随意,质量波动大。各环节各自为政,信息不通,责任不清,难以形成闭环质量控制体系^[3]。

2 路径探索:面向重载需求的循环复用技术创新策略

破解上述系统性难题,必须以重载工况为核心约束条件,重构技术研发逻辑与应用推广路径,推动循环复用从“被动适应”走向“主动引领”。

2.1 构建基于智能分选与分子设计的精准再生体系

应彻底超越传统的均质化处理思维,建立“分级识别 - 靶向修复 - 界面强化”三位一体的精准再生新模式。首先,加快研发基于近红外光谱、介电特性、机器视觉或激光诱导击穿光谱的在线智能分选装备,实现对 rap 颗粒老化程度、沥青含量、集料类型的实时识别与自动分流,做到“老料老治、新料新用、杂质剔除”,从源头上保障再生体系的均匀性与稳定性。其次,针对不同老化等级的组分,设计专用再生剂:对轻度老化组分采用轻质油分补充以恢复流动性,对重度老化组分引入含活性官能团(如环氧基、羧基、羟基)的生物基或聚合物改性再生剂,通过化学反应重建沥青质网络,实现性能的定向修复。同时,结合分子动力学模拟、流变学测试与微观表征手段,建立再生剂分子结构 - 界面粘结力 - 宏观力学性能的构效关系模型,指导再生剂的理性设计与迭代优化。特别要强化界面修复策略:在再生过程中添加硅烷偶联剂、纳米二氧化硅、石墨烯或碳纳米管等界面改性剂,提升新旧沥青的化学相容性与物理锚固力;优化拌合工艺参数(如预热温度、拌合时间、投料顺序),促进界面分子扩散与愈合,消除弱边界层。通过“精准识别 + 靶向修复 + 界面增强”的系统集成,使再生体系真正具备抵抗重载高应力、大应变的能力,而非仅仅满足常规技术指标的表面合格^[4]。

2.2 发展重载导向的多尺度性能评价与数字孪生设计方法

必须重建一套真正面向重载工况的评价与设计范式,

彻底摆脱对轻载标准的依赖。在试验评价层面,研发重载专用加速加载设备与多功能环境耦合试验箱,精确模拟实际轴载谱、轮胎接地压力分布、温度梯度、湿度变化及冻融循环等多因素耦合作用,开展高频、高应力、长周期的疲劳、永久变形与水稳定性试验;结合工业 CT 扫描、扫描电镜-能谱分析、原子力显微镜等先进表征手段,量化观测界面损伤萌生、微裂纹扩展、孔隙结构演化等微观过程,建立宏微观关联的损伤本构模型,揭示重载下再生材料的失效机理。在设计方法层面,摒弃纯经验试配法,构建数字孪生辅助的智能设计平台:集成材料本构模型、路面结构响应模型、环境作用模型及实际交通荷载谱,虚拟仿真再生路面在全寿命周期内的性能衰变轨迹与剩余寿命;通过参数敏感性分析、贝叶斯优化与机器学习算法,快速寻优 RAP 掺量、再生剂类型与剂量、级配曲线、改性方案及施工参数,实现“性能预测-方案迭代-风险预警-成本核算”一体化决策。该平台还应支持与拌合站、摊铺机、压路机等施工装备的数据互联,实时采集拌合温度、出料温度、摊铺速度、压实度、厚度等过程参数,动态反馈至设计模型,自动调整配合比与工艺指令,确保设计意图在施工端精准落地,形成“设计-施工-评价”闭环。通过将评价从“静态验收”转向“动态预测”,设计从“试错调整”升级为“智能寻优”,从根本上提升重载再生路面的可靠性、耐久性与经济性^[5]。

2.3 健全标准规范、产业协同与政策激励长效机制

技术创新的最终落地,离不开制度保障与市场生态的同步完善。应由交通运输部牵头,联合行业协会、科研院所与龙头企业,尽快制定《重载道路沥青路面再生技术指南》或专项标准,明确重载等级划分依据、再生混合料性能分级指标、差异化设计方法、施工质量控制要点及竣工验收标准,填补规范空白,为工程实践提供权威依据。推动建立再生材料产品认证、质量追溯与信用评价体系,对再生剂、RAP 加工设备、再生混合料等关键环节实施标准化管理,保障供应链质量稳定可靠。鼓励组建涵盖“铣刨-加工-再生-施工-检测-养护”全产业链的创新联盟或产业共同体,统一数据接口与技术标准,共享试验平台与工程案例,开展联合攻关、示范验证与成果转化,打破信息孤岛与利益壁垒。在政策激励层面,应将再生材料使用比例纳入绿色公路评价、品质工程创建及招投标评分体系,给予实质性加分或优先权;设立重载道路再生技术应用专项补贴、增值税即征即退或研发费用加计扣除等财税支持政策,降低企业创新成本与市场风险;推行性能担保

合同与工程质量保险机制,由再生材料供应商或技术服务商承担一定期限的质量保证责任,分散业主风险,增强市场信心;建立再生技术应用效果后评估与反馈机制,将实际服役数据反哺标准修订与技术迭代。同时,加强复合型人才培养,在高等院校开设再生材料与重载路面交叉学科课程,在企业设立实训基地与技术培训中心,培育既懂材料科学、又精通重载工程、还熟悉数字技术的实战型人才队伍。唯有将技术创新深度嵌入制度框架与市场生态之中,方能实现从项目式探索到产业化应用的跨越,让循环复用真正成为重载道路建设与养护的主流选择^[6]。

3 结语

重载道路废旧面层材料的循环复用,绝非简单的废物再利用或低成本替代,而是一场涉及材料科学、固体力学、信息科学与制度经济学的系统性变革。它要求我们彻底超越“替代新材”的狭隘工具理性,重新定义再生材料的价值坐标——它不是廉价的妥协品,而是承载重载使命、体现循环经济理念的高性能工程介质。在这一漫长而艰巨的进程中,既要拥抱微观机理的深邃洞察,也要尊重重载工况的严苛现实;既要追求实验室数据的完美自治,更要关注施工现场的可控性与全寿命周期的经济可行性;既要依靠单项技术的突破,更要注重全链条系统的协同演进。未来的重大突破,必将诞生于多学科交叉融合的边界处,孕育于产学研用深度协同的土壤中,成型于政策支持与市场机制共振的浪潮里。我们应当以敬畏之心对待每一吨废旧面层材料,它们曾是道路的肌肤与骨骼,承载着无数车轮的碾压与风雨的侵蚀,如今等待被科技与责任赋予新的生命。这不仅是工程技术的精进,更是对自然资源、生态环境与子孙后代负责的文明自觉。当再生路面在重载车轮下安然无恙地延伸,当废旧材料在循环中重获尊严与价值,那便是对“绿水青山就是金山银山”理念最坚实、最沉默、也最有力的诠释。这条通往可持续未来的循环之路注定漫长而曲折,但每一步扎实的探索,都在为交通强国与美丽中国奠定更加稳固的基石。

参考文献:

- [1] 狄海波,陈代磊,熊保林等.宽温域型橡胶沥青改性机理与综合性能评价研究[J].市政技术,2026,44(1):221-230.DOI:10.19922/j.1009-7767.2026.01.221.
- [2] 张龙.旧水泥路面共振碎石化施工效果影响因素及控制技术[J].四川水泥,2025(9):217-219.DOI:10.20198/j.cnki.scsn.2025.09.038.
- [3] 任海庆.活化胶粉复合改性沥青研制及其路用性能

研究[D].山东建筑大学,2025.DOI:10.27273/d.cnki.gsajc.2025.000168.

[4] 金明亮. 一种环保型高掺量橡胶复合改性沥青. 甘肃省, 甘肃公航旅路业有限公司, 2023-11-01.

[5] 章志. 基于病害分析的城市路面桥面修缮方案研究[J]. 上海公路, 2023(1): 33-37+180.

[6] 鄢然. SBS 改性沥青多次再生性能与机理研究[D]. 华南理工大学, 2018.