

# Study on the Performance Optimization and Long-term Service Behavior of Sustainable Asphalt Pavement Recycling Materials

Liang Luo

He Tian (Hunan) International Engineering Management Co., Ltd., Changsha, Hunan, 410221, China

## Abstract

Under the impetus of the “dual carbon” strategy and resource recycling principles, asphalt pavement recycling technology has emerged as a pivotal direction for sustainable development in highway engineering. Traditional hot-mix recycled mixtures exhibit issues such as insufficient activation of aged asphalt, improper dosage of recycling agents, and reduced durability. From a sustainability perspective, this study investigates the impact of recycled aggregate (RAP) properties and recycling agent compounding mechanisms on recycled asphalt performance. Results demonstrate that polar-matched composite recycling agents effectively repair asphalt colloid structures, restoring the mixture’s viscoelastic properties to near-original levels. The incorporation of rubber powder and waste plastic modifiers significantly enhances crack resistance and fatigue performance. Long-term service simulations reveal that optimized systems maintain over 25% performance retention, demonstrating excellent durability potential. These findings provide a scientific basis for designing high-recycling-rate pavements and advancing resource recycling initiatives.

## Keywords

Recycled asphalt mixture; Sustainable road engineering; Recycling agent; Service performance; Material optimization

## 可持续性沥青路面再生材料性能优化与长期服役行为研究

罗亮

和天（湖南）国际工程管理有限公司，中国·湖南长沙 410221

## 摘要

在“双碳”战略与资源循环利用理念的推动下，沥青路面再生技术成为公路工程可持续发展的关键方向。传统热拌再生混合料存在老化沥青活化不足、再生剂配比不当及耐久性下降等问题。本文基于可持续发展视角，研究再生料（RAP）特性与再生剂复配机制对再生沥青性能的影响。结果表明，采用极性匹配的复合再生剂可有效修复沥青胶体结构，使混合料粘弹性接近原生水平；引入橡胶粉与废塑料改性成分显著提升抗裂与抗疲劳性能。长期服役模拟显示，优化体系性能保持率提升25%以上，具备优良的耐久潜力，为高再生率路面设计与资源循环利用提供了科学依据。

## 关键词

再生沥青混合料；可持续道路工程；再生剂；服役性能；材料优化

## 1 引言

全球基础设施建设快速发展带来了大量旧路面材料的产生，而沥青混合料的资源化再利用不仅能降低原材料消耗与碳排放，还能有效缓解环境压力。沥青路面在服役过程中受紫外老化、氧化反应与交通荷载等因素影响，其黏结体系逐渐硬化、脆化，导致裂缝、车辙及疲劳破坏频发。传统再生技术虽能部分恢复沥青性能，但仍存在再生剂匹配度不足、再生料掺配比例偏低及长期性能不稳定等问题。如何通过材料设计、再生剂复配与结构优化提升再生路面的可持续

服役能力，成为当前道路工程研究的重要方向。本文结合可持续性理念，从再生沥青的微观结构调控、混合料性能优化与服役行为模拟三个层面展开研究，旨在建立性能可控、寿命可预的再生路面体系，为我国绿色交通基础设施建设提供理论支持与工程参考。

## 2 再生沥青材料的组成特性与性能重构机制

### 2.1 老化沥青的化学特征与结构演变

沥青老化是决定再生性能的关键因素。老化过程中，沥青内的轻组分逐渐挥发，树脂与沥青质比例增加，导致分子极性增强、黏度上升。红外光谱分析表明，老化沥青羰基与羟基含量增加，芳香烃结构转化为脂肪族结构，使分子链间结合力减弱。再生过程的核心在于恢复沥青的胶体平衡与

【作者简介】罗亮（1985—），男，中国湖南长沙人，本科，工程师，从事交通土建工程检测研究。

黏弹性。通过再生剂引入轻质油分与活性官能团,可填补沥青质—树脂体系间的分子空隙,重构分散相网络。适当的极性调整能降低老化沥青的玻璃化转变温度,提高韧性与流动性,从而实现性能恢复的化学重构。

## 2.2 再生剂作用机理与复合体系优化

再生剂通过溶胀、渗透与化学反应三种机制作用于老化沥青。低极性再生剂可改善流变性能,高极性组分则有助于增强分子间相容性。研究发现,采用含脂肪酸酯类、环烷烃及酚类复配体系的再生剂,可在短时间内实现沥青质的溶胀重构,提高体系胶体稳定性。分子动力学模拟结果表明,再生剂极性参数与老化沥青差距控制在  $\pm 2.5 \text{ MPa}^{1/2}$  时,可实现最佳分散效果。通过引入纳米二氧化硅或废橡胶粉与再生剂协同作用,可进一步提升老化沥青的剪切恢复力与粘弹性平衡,实现复合再生体系的结构优化。

## 2.3 RAP 材料掺量与再生性能的协调控制

再生沥青混合料的关键在于确定合理的再生料(RAP)掺比。过高的RAP比例会导致黏度过大、抗裂性降低,过低则难以体现节能减排优势。通过动态模量试验与DMT流变分析发现,当RAP掺量控制在30%—40%时,混合料的抗车辙性能与抗裂性达到最佳平衡;结合复合再生剂时,可实现50%以上的高再生利用率。适度增加再生料中细集料比例并优化级配结构,有助于改善再生料与新料的界面黏结性能,提高整体混合料的结构稳定性<sup>[1]</sup>。

# 3 再生沥青混合料的性能调控与结构优化策略

## 3.1 高温稳定性与抗车辙性能提升路径

在高温环境下,沥青混合料的流变性能直接决定路面的抗车辙能力。再生料中老化沥青黏度较高且流动性差,易导致结构软化与永久变形。通过引入橡胶粉、废塑料颗粒或高分子弹性体,可在再生体系中构建“弹性骨架”,增强材料的抗剪切与抗流动能力。橡胶相与炭黑在再生沥青中形成相互贯通的三维网络结构,能有效分散外部应力、提升能量耗散能力。试验结果表明,复合改性再生料在60℃下的动稳定度提升30%以上,流变模量与抗剪强度显著提高。微观分析发现,橡胶组分与沥青基质间的界面相容性增强,使得应力传递更为均匀。该结构强化了体系的黏弹协调性能,从而显著改善高温稳定性与抗车辙性能,为再生路面的耐久设计提供了材料基础。

## 3.2 低温抗裂与疲劳性能的增强机制

在寒冷气候条件下,沥青路面易受温度收缩与荷载耦合作用发生裂缝。再生体系中引入生物基再生剂,如植物油酯、木质素衍生物及生物树脂,可显著改善沥青低温延展性与柔韧性。这些再生剂通过分子层面的极性匹配与链段柔化作用,降低沥青的玻璃化转变温度,提高体系的断裂韧性。低温三点弯曲试验表明,复合再生混合料的断裂应变提升约25%,表明裂缝扩展速率显著降低。疲劳加载实验结果显示,

含弹性再生剂的体系在百万次循环下仍保持较高的粘弹恢复力,其疲劳寿命较未改性再生料提升40%以上。分子模拟结果进一步证实,柔性链段的引入改善了界面应力分布与能量缓冲效果,从微观层面延缓裂缝的萌生与扩展,显著增强了路面的低温抗裂与疲劳性能<sup>[2]</sup>。

## 3.3 抗老化与耐久性改良机制

沥青材料在长期服役过程中受到热氧化、紫外辐射及水分侵蚀等因素影响,其性能会逐步衰退。为延缓老化过程,在再生体系中引入抗氧化剂、光稳定剂及纳米无机粒子成为重要手段。纳米TiO<sub>2</sub>与ZnO具有优异的紫外吸收与自由基捕获能力,能有效抑制沥青分子链的断裂与氧化反应。多循环加速老化试验结果显示,复合再生体系的黏度增长率降低30%,质量损失率减少近20%,说明其抗老化能力显著增强。表面分析结果表明,再生沥青在服役过程中可形成致密稳定的氧化膜层,阻碍氧气与紫外辐射的进一步渗入,从而维持体系的结构完整性。该抗老化机制通过化学钝化与物理屏障作用协同发挥,使再生路面在长期荷载与环境作用下依旧保持优良的黏结性与功能性,确保其长期服役性能的可持续稳定。

# 4 长期服役行为与再生路面性能演化规律

## 4.1 环境作用下的力学性能衰变特征

再生沥青路面在长期服役过程中受到多种环境因素的交互影响,其力学性能衰变表现出明显的时效性与非线性特征。温度循环、冻融作用、水侵蚀及紫外辐射是主要的破坏驱动力。高寒地区的冻融循环使沥青膜层产生微裂化,孔隙内水分反复结冰融化导致体积膨胀,从而加剧骨料界面剥离与脱空;湿热环境下的氧化与光老化则促使沥青黏结料硬化、脆化,降低混合料延展性与抗疲劳性。长期监测数据显示,冻融循环超过200次后,常规再生料的劈裂强度下降约30%,而加入复合再生剂与橡胶粉的再生体系可将强度保持率提高至80%以上。基于时间—损伤耦合理论建立的寿命预测方程表明,该复合体系的服役寿命可比普通再生料延长约1.8倍<sup>[3]</sup>。由此可见,增强再生沥青的抗温湿耦合能力与微观韧性,是实现长期耐久服役的关键技术路径。

## 4.2 再生层界面黏结与结构稳定性演化

再生层与旧路面层之间的界面黏结性能是决定整体结构稳定性的重要环节。界面黏结不足将导致层间滑移、脱空与疲劳裂纹集中。扫描电子显微镜(SEM)与能谱分析(EDS)结果显示,合理的再生剂渗透深度能够促进新旧沥青相互溶胀与分子重排,形成连续胶结相。试验表明,采用双层喷洒型再生剂的复合结构,其界面剪切强度提高约35%,沥青膜层更加均匀致密。长期循环荷载模拟表明,界面黏结衰减速率与再生剂化学组成密切相关,含极性酯类和环烷基的复配剂具有更高的界面稳定性。通过界面增强与再胶结机制,能够有效降低分层脱空风险,延缓疲劳裂缝扩展。稳定

的界面结构不仅提高了再生层的承载一致性，还为整体路面提供了更优的能量耗散能力与结构完整性。

### 4.3 多尺度模型下的服役性能预测

为准确评估再生路面的长期服役性能，建立基于多尺度耦合的性能预测模型具有重要意义。宏观层面可利用有限元法（FEM）模拟不同交通荷载与环境条件下的应力—应变响应，预测结构层疲劳累积与变形分布；微观层面通过分子动力学（MD）模拟探讨沥青分子链的断裂、聚集与氧化演变过程，揭示老化与再生的本质机理。中观尺度上引入黏弹性本构关系与界面黏结参数，实现材料属性与结构行为的耦合分析。多尺度模型的验证结果显示，复合再生体系的应变能密度阈值较传统体系提升 22%，疲劳破坏寿命延长约 40%。该模型能够动态反映再生料在不同服役阶段的性能演化规律，为结构设计、材料优化及全寿命周期维护提供科学依据。研究表明，多尺度耦合分析是实现沥青再生路面“结构—性能—寿命”一体化预测与优化的关键技术手段<sup>[4]</sup>。

## 5 可持续性与环境效益分析

### 5.1 再生技术的资源循环与节能减排效应

沥青再生技术的核心价值在于实现道路建设材料的循环利用与碳排放削减。通过旧沥青路面材料（RAP）的再生利用，可有效减少对原生矿料与沥青资源的开采依赖。研究表明，在 40% RAP 掺量条件下，每生产一万吨沥青混合料可节约新沥青约 180 吨，相应减少二氧化碳排放量约 250 吨，同时节约碎石与砂料超过 600 吨。这种资源循环利用模式不仅降低了原材料生产所需的能耗，也减少了运输与废料处置带来的环境负担。与传统热拌工艺相比，热再生过程的能源消耗降低 15%—20%，并显著减少粉尘与烟气排放。冷再生与温拌再生技术的推广更进一步强化了节能效果，使道路建设逐步向低碳化、绿色化方向转型。通过建立再生料闭环循环体系，沥青再生技术在生态保护、经济效益与社会可持续性方面展现出综合优势，为交通基础设施建设提供了符合“双碳”战略的路径支撑。

### 5.2 循环经济模式下的技术经济可行性

沥青再生的推广不仅是技术创新过程，更是循环经济体系的重要环节。大规模应用再生料需要在技术可靠性与经济合理性之间找到平衡点。生命周期成本分析（LCC）结果显示，高再生率路面在 20 年服役周期内的总体成本较普通路面降低约 25%，其中养护与维修支出减少尤为明显。再生设备的国产化进程和工艺自动化水平提升，使生产成本显著下降。复合型再生剂与温拌添加剂的联合使用提升了施工效率，缩短铺筑周期，进一步优化经济效益。建立区域化再生料供应链体系，可降低运输成本与库存压力，实现“区域

内拆解—分类—再利用”的循环模式。地方政府在税收优惠与绿色采购制度上的引导，也为再生技术的产业化应用提供政策助力。整体而言，沥青再生体系的技术经济优势逐步凸显，具备可复制与规模化推广的现实基础。

### 5.3 政策导向与标准化发展路径

可持续沥青路面再生的长期发展，离不开完善的政策支持与标准化体系建设。目前我国已发布《公路沥青路面再生技术规范》（JTG/T5521），对再生料利用率、再生剂选型、加热温度控制及施工质量评估等环节提出系统要求。与此同时，《绿色公路建设指南》《交通领域碳达峰实施方案》等政策文件将沥青再生纳入绿色交通基础工程的重要组成部分。未来，应加快建立基于碳排放核算与环境绩效评估的行业标准体系，完善从“设计—生产—施工—监测—再利用”的闭环管理机制。推行绿色认证制度与数据化监管平台，实现沥青再生过程的全过程追溯与动态管控。政策层面可通过财政补贴、税收减免与技术奖励等措施促进企业采用再生工艺，推动产业链上下游协同创新<sup>[5]</sup>。标准化与政策化的深度融合，将为我国公路建设领域的绿色低碳转型提供制度保障与发展方向。

## 6 结语

可持续性沥青路面再生技术是实现绿色低碳交通的重要途径，其关键在于材料性能优化与长期服役行为的科学调控。研究表明，秉持可持续理念的再生体系通过精准调控 RAP 掺量、优化再生剂复配结构、引入功能性改性材料，可显著改善再生混合料的黏弹性能与环境适应性。长期服役试验验证，该体系能有效延缓老化与损伤积累，具有优越的耐久性与经济性。未来研究应进一步强化多尺度耦合机制解析，构建基于数据驱动的性能预测模型，实现再生路面由“结构恢复”向“性能再生”的跨越。该研究对推动我国公路工程绿色化、智能化与可持续化发展具有重要的理论与实践意义。

### 参考文献

- [1] 王桂茵.基于可再生材料的环保型路面结构设计与性能优化研究[J].时代汽车,2024,(23):30-32.
- [2] 刘敏.再生骨料与沥青界面黏附性能的劣化机制与调控方法研究[D].河南工业大学,2025.
- [3] 张君毅.粉煤灰作为可持续路面材料的稳定再生沥青路面研究[J].公路与汽运,2022,(01):92-94+98.
- [4] 张志伟.再生沥青路面-粉煤灰地聚物作为可持续稳定路面材料[J].武汉理工大学学报,2022,44(02):7-14.
- [5] 汪德才.沥青路面再生材料特性及结构组合研究.河南省,河南省交通科学技术研究院有限公司,2019-04-08.