

沥青路面全生命周期低碳技术 ——基于LCA的框架构建与研究进展

夏雨欣*, 聂忆华, 徐智成, 邓胜良

湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2026年4月9日; 录用日期: 2026年4月22日; 发布日期: 2026年5月21日

摘要

为系统梳理沥青路面全生命周期碳排放核算方法与低碳技术, 支撑行业低碳转型, 本文在界定原材料生产、施工建造、运营维护、报废回收四个阶段的基础上, 构建了从量化方法到技术应用的系统性综述框架。首先, 明确了以全生命周期评价(LCA)为核心的方法论体系, 辨析了系统边界、清单分析、不确定性及敏感性分析等关键问题。进而, 分阶段综述了钢渣资源化、RAP高掺量再生、低碳沥青替代、温拌/冷拌技术、预防性养护及固废闭环利用等关键技术的减排机理与量化效果, 揭示了材料掺量、运输距离与拌合温度等关键参数的影响规律。最后, 针对当前研究在方法统一性、数据标准化、技术-政策协同方面的挑战, 提出了建设全行业数据库、发展数字孪生平台、构建碳价耦合模型及路网协同优化等未来研究方向。本文旨在为沥青路面低碳技术的研发、评估与应用提供系统性的理论参考与决策支撑。

关键词

沥青路面, 全生命周期评价(LCA), 碳排放, 低碳技术

Low-Carbon Technologies for Asphalt Pavement Throughout Its Life Cycle

—Framework Construction and Research Progress Based on LCA

Yuxin Xia*, Yihua Nie, Zhicheng Xu, Shengliang Deng

School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: April 9, 2026; accepted: April 22, 2026; published: May 21, 2026

Abstract

To systematically sort out the carbon emission accounting methods and low-carbon technologies

*通讯作者。

for the full life cycle of asphalt pavements and support the low-carbon transformation of the industry, this paper establishes a systematic review framework from quantitative methods to technical applications based on defining four stages: raw material production, construction, operation and maintenance, and demolition and recycling. First, a methodological system centered on Life Cycle Assessment (LCA) is clarified, and key issues such as system boundary, inventory analysis, uncertainty and sensitivity analysis are distinguished. Furthermore, the emission reduction mechanisms and quantitative effects of key technologies are reviewed stage by stage, including steel slag resource utilization, high-content RAP recycling, low-carbon asphalt substitution, warm-mix/cold-mix technology, preventive maintenance, and closed-loop utilization of solid waste, revealing the influence laws of key parameters such as material dosage, transportation distance and mixing temperature. Finally, in view of the current challenges in methodological uniformity, data standardization, and technology-policy synergy, future research directions are proposed, such as building an industry-wide database, developing a digital twin platform, constructing a carbon price coupling model, and optimizing road network collaboration. This paper aims to provide a systematic theoretical reference and decision support for the research, evaluation and application of low-carbon technologies in asphalt pavements.

Keywords

Asphalt Pavement, Life Cycle Assessment (LCA), Carbon Emission, Low-Carbon Technology

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

全球气候变暖是人类生存发展面临的重大威胁和挑战之一，探寻有效的方法应对气候变化已成为全球课题。全球气候变暖是人类生存发展面临的重大威胁和挑战之一，探寻有效的方法应对气候变化已成为全球课题[1]。据国际道路联盟(IRF)预计，2050年交通运输能耗量比2016年将会增加21%~25%，因此交通运输领域降碳减排潜力巨大[2]，而我国2024年年末全国公路里程549.04万km[3]，在“碳达峰、碳中和”国家战略背景下，公路交通基础设施作为能源消耗与碳排放的重点领域，其低碳转型已成为行业高质量发展的核心议题。沥青路面因行车舒适性高、养护便捷等优势，在我国高等级公路和城市公路中占比较大，其全生命周期涵盖原材料生产、施工、运营维护及报废回收等多个环节，涉及大量能源消耗与碳排放，仅原材料生产与施工阶段的碳排放量便占全生命周期总排放的60%以上，成为公路领域减排的核心对象[4]。开展沥青路面全生命周期碳排放核算与低碳技术研究，不仅是支撑交通行业应对气候变化、参与碳交易市场的技术基础，也是实现碳排放精准管控、助力“双碳”目标落地的关键环节。

根据国内外相关研究，沥青路面碳排放核算方法已形成以全生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)为核心的技术体系[5]。随着LCA方法在道路工程中的深入应用，沥青路面碳排放研究边界不断拓宽，相关技术探索已覆盖全生命周期各阶段。现有研究已为沥青路面低碳发展奠定了基础，但仍面临碎片化挑战：核算方法层面，排放因子区域差异大、不确定性分析深度不足，导致核算结果可比性不强；技术应用层面，多聚焦单一环节或单一技术，缺乏全生命周期视角下的多技术协同减排研究；政策适配层面，区域差异化减排策略与技术经济耦合模型的研究仍显薄弱。为确保本综述的系统性与科学性，研究遵循以下步骤展开：在文献检索策略上，以中文数据库和英文数据库为主要来源，检索时间为2015~2025年，关键词包括“沥青路面/LCA/碳排放”，并拓展至“钢渣”、“RAP”等具体技术词；在筛选标准方

面, 纳入核心研究沥青路面 LCA 碳核算或低碳技术评估、提供量化数据或机理分的文献, 排除非沥青路面研究、仅关注路用性能及无法获取全文的文献; 在信息整合方法上, 对纳入文献精读, 按“原材料生产 - 施工建造 - 运营维护 - 报废回收”四阶段框架提取技术机理、关键参数及减排效果等信息。鉴于此, 本文以图 1 沥青路面全生命周期碳排放分析系统框架图为纲领, 系统梳理了从量化方法、分阶段关键技术到系统挑战的研究进展, 以期为推动沥青路面低碳研究从“点的突破”迈向“系统集成”提供参考。

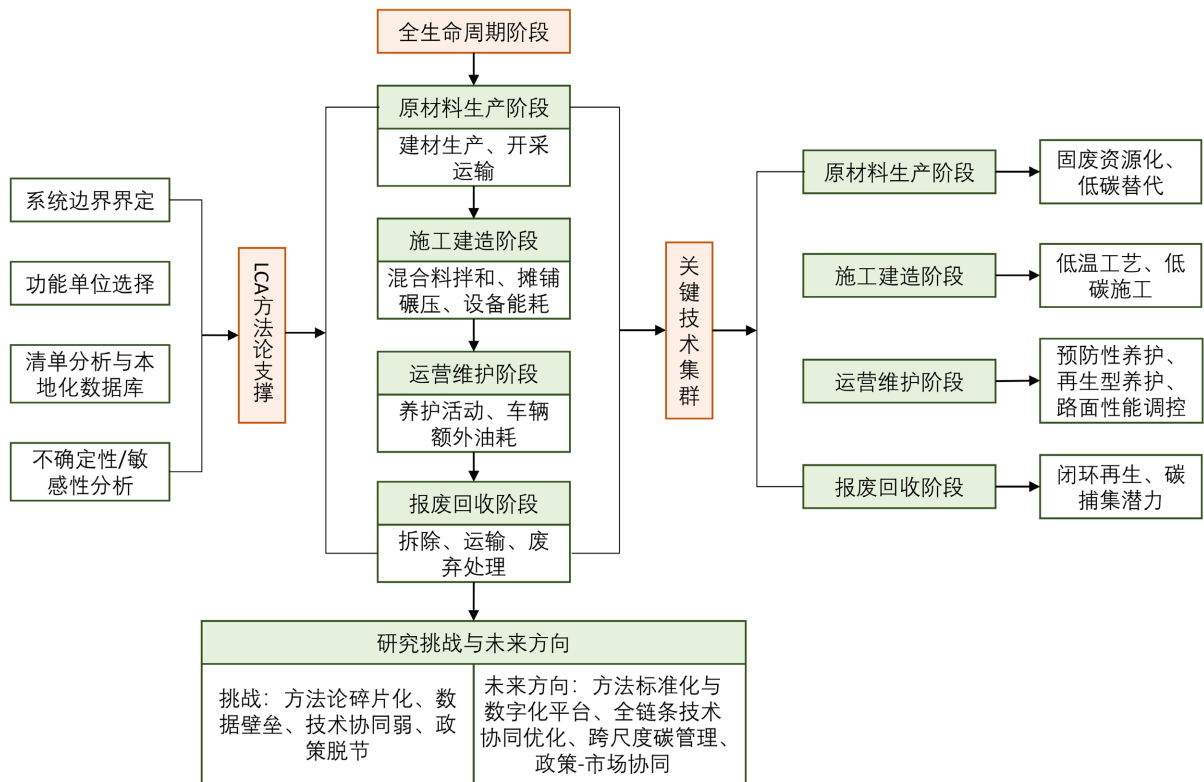


Figure 1. System framework diagram for life cycle carbon emissions analysis of asphalt pavement

图 1. 沥青路面全生命周期碳排放分析系统框架图

2. 低碳技术发展

2.1. LCA 评价体系应用

全生命周期评价(LCA)是低碳技术效果验证的核心工具, 通过定义功能单元、划分系统边界、清单分析与影响评估, 量化技术的全周期减排效应。

功能单位的设定则为所有输入输出数据提供了统一的比较基准, 常见的选择包括“1 公里 × 车道 × 年”、“吨成品沥青混合料”“单位铺装面积”。清单分析阶段需要量化各单元过程的资源、能源消耗及排放。其准确性高度依赖于本地化的、动态更新的碳排放因子数据库。

在材料优化类技术评价中, LCA 可对比天然沥青与石油沥青的全周期碳排放, 明确天然沥青的减排优势集中在生产与运输阶段[6]; 在路面建设期的工艺改进类技术评价中, LCA 可量化温拌再生技术在原材料生产、拌和等阶段的减排贡献。该研究表明, 在建设期内, 混合料拌和阶段是温拌技术实现节能和减排的关键环节之一[7]; 在固废利用类技术评价中, LCA 可核算钢渣、RAP 再生利用的环境效益, 包括减排量、资源节约量、固碳量等[8]。

不同 LCA 分配方法对评价结果的影响不可忽视。50/50 分配法与 Cut-off 分配法的碳排放比值约为 1.02~1.03, 差异较小, 但在多次铣刨重铺情景下, 差异略有扩大[5]。不同方法在原理、适用场景上存在差异, 如表 1 所示。

Table 1. Comparison between the 50/50 allocation method and the cut-off allocation method [5]

表 1. 50/50 分配法与 Cut-off 分配法对比[5]

核算方法	核心原理	差异显著性	关键影响因素	案例研究适用性
50/50 分配法	在再生料使用系统与旧料回收系统之间平均分配原材料生产、回收及废弃环节的环境负担	差异不显著	基层/底基层密度、生产柴油的 N ₂ O 排放、路面旧料循环利用率等参数的变化	适用于考虑材料循环利用、需在再生料生产者与使用者之间公平分配环境责任的场景
Cut-off 分配法	系统仅承担与再生料比例相应的回收环节影响, 不承担旧料回收的环境负担	差异不显著	基层/底基层密度、生产柴油的 N ₂ O 排放、路面旧料循环利用率等参数的变化	适用于追求计算简便、系统边界清晰, 且不强调回收环节激励的场景

2.2. 不确定性与敏感性分析

低碳技术减排效果受多种参数影响, 不确定性分析可量化结果的可靠程度, 敏感性分析可识别关键影响参数[6]。

不确定性分析: 采用蒙特卡洛模拟方法, 对排放因子、材料掺量、运输距离等参数进行概率分布赋值, 运行 10,000 次模拟后, 得到减排效果的置信区间[5]。例如, 在钢渣沥青混合料的碳排放评价中, 钢渣的固碳率与相关排放因子是导致评估结果产生不确定性的关键参数来源[8];

敏感性分析: 采用单因素敏感度分析, 计算参数变化 1%时减排效果的变化率。综合相关研究可知, 影响低碳技术减排效果的关键参数为材料掺量(RAP、钢渣)、运输距离、拌合温度、排放因子。例如, RAP 掺量变化 1%, 再生沥青混合料减排效果变化 0.8%~1.2% [9]。

2.3. 全生命周期各阶段低碳技术: 机理、量化与参数规律

依据图 1 框架, 分阶段系统综述关键技术。为便于直观对比与查阅, 核心技术的减排效果与关键参数已汇总于表 2, 见下表。

Table 2. Summary of emission reduction effects and key parameters for major low-carbon technologies in asphalt pavement
表 2. 沥青路面主要低碳技术减排效果与关键参数一览表

生命周期阶段	技术类别	具体技术	主要减排机理	关键影响参数	典型减排效果/范围	参考文献
原材料生产	固废资源化	钢渣替代集料	替代天然集料开采与加工; 高热容降低拌合温度; 碳化固碳	钢渣安定性处理工艺、掺量、运输距离。	替代减排: 23~33 kg CO ₂ /t 钢渣; 拌合节能: 10%~15%; 固碳潜力: 80~120 kg CO ₂ /t 钢渣。	[8] [12] [13] [14]
		废旧沥青路面材料 (RAP)再生	替代部分新沥青和集料, 避免其生产排放; 减少废弃物处置	RAP 掺量、再生工艺(热/冷/厂拌/就地)、运输距离	掺量 30%→60%, 生产碳排放减少约 25.9%; 环氧再生 + 高掺量 RAP 可使建设期碳排放降低 47%以上	[9] [15]
	低碳粘结剂替代	天然岩沥青	开采加工碳排放低于石油沥青炼制	天然沥青掺量、产地运输距离	掺量高于 18%时, 全周期碳排放低于石油沥青	[6]

续表

	长寿命设计	环氧沥青/高模量沥青	提升路面耐久性, 减少全寿命周期内的养护次数和材料消耗	材料性能提升幅度、设计寿命延长比例	通过减少养护频次可达30%以上, 实现全生命周期净减排	[9]
施工建造	低温拌和技术	温拌沥青	降低拌合与压实温度, 减少燃料消耗	温拌剂类型、降温幅度、沥青类型	降低拌合能耗 12%~25%, 减少 CO ₂ 排放 12%~25%。	[7] [22]
		冷拌沥青	常温施工, 极大降低生产能耗。	乳化剂或再生剂性能、养生条件	生产能耗和 CO ₂ 排放仅为热拌的 10%~15%和 5%~8%。	[16]
	低碳施工工艺	就地热再生	一体化作业, 减少 RAP 运输与新料生产	旧料掺量、加热效率、施工连续性	较传统铣刨重铺, 全建设期碳排降低 30%~40%	[22]
	能源优化	施工设备电动化/绿电	用低碳电力替代柴油等化石燃料	电网碳排放因子、设备能效	电动拌合较柴油拌合, 每吨混合料可减排约 3.2 kg CO ₂	[23]
运营维护	养护策略优化	预防性养护	在性能轻微衰减时低成本干预, 避免后期高碳排大修; 保持平整度降低车辆油耗。	养护时机 (PCI/IRI 阈值)、措施类型	可延长寿命 10~15 年, 减少大修碳排 45%~50%; 保持平整度可降低车辆油耗 5%~8%	[32] [33]
	耐久性提升	长寿命路面结构	从设计源头减少养护需求	材料与结构设计参数、环境与交通荷载	大幅减少养护活动次数, 降低全周期碳排	[37]
报废回收	资源循环利用	RAP/钢渣再生	报废料作为资源回用, 形成闭环, 替代原生材料	拆除分选精细度、再生技术路线	每有效利用 1 公里报废路面固废, 可减排约 50~80 t CO ₂	[14] [39]
	碳捕集与储存	钢渣碳酸化	利用碱性固废化学固定 CO ₂	碳酸化反应条件、钢渣成分与粒径	每吨钢渣可封存 CO ₂ 80~120 kg	[12]

3. 原材料阶段低碳技术应用进展

3.1. 工业固废资源化利用技术

3.1.1. 工业固废资源化利用技术

钢渣作为钢铁冶炼的副产物, 年排放量超 1 亿吨, 但其具有剪强度高、剪磨剪性强、与沥青黏附剪性好等优良性能, 且含有 CaO、MgO 等活性成分, 具备固碳潜能, 是“双碳”目标下被重点研究的新剪型低碳路面材料之一[10]。其基本物理化学性质表现为: 密度 2.8~3.2 g/cm³, 高于天然集料, 剪磨剪比玄武岩高 30% 以上; 化学组成以 CaO、SiO₂、Fe₂O₃ 为主, 矿相含 C₃S、C₂S 等胶凝成分, 可与沥青形成稳定的界面结合[11]。但钢渣中游离 CaO (f-CaO)和游离 MgO (f-MgO)的水化膨胀易导致混合料安定性不足, 需通过针对性技术提升。

碳酸化技术: 通过通入 CO₂ 使钢渣中的 Ca²⁺、Mg²⁺形成碳酸盐矿物, 既降低膨胀性又实现固碳。研究表明, 钢渣固碳率受粒径影响显著, 例如在最优条件下可达 27.9%, 而当粒径增大至 204.4 μm 时, 固碳率降至 2.6% [12]。

热闷消解技术: 采用熔融钢渣高效罐式有压热闷处理, 利用钢渣余热促进 f-CaO 水化, 是目前国内应用最广的钢渣预处理技术[8], 其处理后的钢渣需满足《道路用钢渣》(GB/T 25824-2010)的安定性要求

(浸水膨胀率 $\leq 2\%$), 但该技术存在处理效果不稳定的问题。

微生物处理技术: 添加产碳酸酐酶微生物加速 CO_2 水解, 提升钢渣碳酸化效率, 处理后钢渣安定性显著提升, 可用于高等级公路面层[13]。

钢渣沥青混合料的碳排放优势主要体现在两个环节。原材料生产阶段, 钢渣替代天然集料可减少集料开采、破碎及长距离运输的碳排放, 相比天然玄武岩集料, 每吨钢渣可减排 CO_2 23~33 kg; 拌合阶段, 钢渣比热大、蓄热能力强, 可降低混合料拌合温度 $5\sim 10^\circ\text{C}$, 减少燃料消耗 10%~15%。此外, 钢渣的固碳潜能进一步提升了环境效益, 1 吨钢渣经碳酸化处理可固定 CO_2 80~120 kg, 相当于减少同等质量的工业排放。

钢渣沥青混合料的碳排放效益高度依赖于应用层位和替代的集料类型。研究表明, 在原材料生产及运输阶段, 当钢渣用于沥青路面上面层替代玄武岩时, 可因其运距较短而实现显著的碳减排, 每 1000 m^3 混合料在该环节可减少碳排放约 60.61 吨; 但当用于中面层替代石灰岩时, 由于运距相近(50 km vs. 70 km), 其减排效益有限, 全建设期碳排放可能反而略有增加[14]。此外, 钢渣具备理论固碳潜能, 不同来源钢渣的理论最大固碳量约为 0.33~0.48 吨 CO_2 /吨钢渣。

3.1.2. 旧沥青路面材料(RAP)再生利用

RAP 作为沥青路面铣刨产生的主要固废, 年产生量超 2 亿吨, 其再生利用可减少原生沥青和集料消耗, 是原材料阶段减排的核心技术[15]。RAP 掺量是影响减排效果的关键因素。案例研究进一步证实了掺量的关键作用及环氧再生技术的优势。例如, 刘峰等[9]在 G25 高速公路梅州段的工程案例分析表明, 对于环氧再生沥青混凝土, 当 RAP 掺量从 30%提升至 60%时, 其生产能耗从 715 MJ/t 降至 530 MJ/t, 碳排放从 38.57 kg/t 降至 28.58 kg/t。该研究还指出, 采用环氧再生技术且 RAP 掺量达 60%时, 相比原路面碳排放可降低 47.64%, 降碳效果显著优于传统热再生技术。

不同再生工艺的减排效应存在差异, 厂拌热再生、就地热再生等热再生工艺需将 RAP 加热至较高温度, 如 $130\sim 150^\circ\text{C}$, 虽能耗高于冷再生, 但混合料路用性能更优, 适用于高等级公路面层; 乳化沥青冷再生、泡沫沥青冷再生等冷再生工艺无需加热, 生产阶段能耗仅为热再生的 30%~50%, 但初期强度低, 多用于基层或低等级公路[16]。此外, RAP 再生过程中产生的粒径 $< 0.075\text{ mm}$ 再生微粉可作为填料替代矿粉, 进一步提升固废利用率, 减少矿粉开采与研磨的碳排放, 每 1 吨再生微粉替代矿粉可减排 CO_2 7.17 kg [5]。

3.2. 低碳型原材料替代技术

3.2.1. 旧沥青路面材料(RAP)再生利用

天然沥青(QRA)作为天然形成的沥青类物质, 无需原油炼制过程, 且含有大量沥青质和树脂, 可显著改善沥青混合料的高温稳定性与水稳定性。其生产环节碳排放核算涵盖开采、运输、加工三个阶段: QRA 开采的 CO_2 当量仅为原油生产的 9.4%, 运输碳排放为石油沥青的 1/3, 加工阶段碳排放比石油沥青低 44.7% [6]。

天然沥青掺量对减排效果的敏感性显著。当 QRA 掺量低于 18%时, 其改性沥青碳排因加工能耗与运输距离叠加略高于石油沥青; 当掺量超过 18%后, 碳排放优势逐渐显现, 掺量 30%时 CO_2 当量比石油沥青低 11.4%。通过层次分析法计算, 石油沥青的生产与运输环节是碳排放的主要来源, 当 QRA 掺量为 25%时, 该环节的碳排放权重高达 74.3%, 而天然沥青可通过减少这两个环节的排放实现全局减排[6]。此外, 天然沥青与石油沥青的相容性良好, 物理共混过程无额外有害气体排放, 其含有的极性官能团($\text{C}=\text{O}$, $\text{Si}-\text{O}$)可提升混合料抗剥落性能, 间接减少运营期水损害引发的养护排放。从全生命周期成本视角看, 低碳

原材料的减排优势往往伴随一定的经济效应。天然沥青虽初始成本偏高,但其提升的耐久性可延长路面使用寿命,从而降低长期的养护与用户成本。

3.2.2. 环氧再生沥青技术

环氧再生沥青以环氧树脂为改性剂,与RAP料、新集料复配而成,其材料特性表现为黏度低、流动性好,可填充RAP料空隙[9],且固化后形成不可逆交联网络,提升混合料强度与耐久性[9][17]。制备能耗方面,环氧再生沥青的拌合温度为140~160℃,比传统SBS改性沥青低20~30℃,每吨混合料制备能耗可降低15%~20%。其减排效应体现在建设期与运营期的协同:建设期,环氧再生沥青可提高RAP掺量至60%以上,减少新沥青和集料消耗,相比传统热拌沥青混合料,建设期碳排放降低17.62%[9];运营期,得益于环氧树脂固化形成的不可逆交联网络,环氧再生路面具有优异的力学性能与耐久性,其使用寿命显著长于普通再生路面[17]。这种长寿命特性可大幅减少路面养护与大修的频次,从而间接降低了运营阶段因养护作业产生的碳排放,形成了建设期直接减排与运营期间接减排的双重效应。

4. 建设期低碳技术应用进展

4.1. 沥青混合料低碳拌和技术

4.1.1. 温拌沥青技术

温拌沥青技术是实现沥青路面低碳减排的重要途径之一[18],这种技术通过物理或化学手段,能够显著降低沥青混合料的拌和与压实温度,通常可比热拌沥青降低20~50℃,根据其作用机理,该技术的核心类型主要可分为四类:有机降黏剂、化学添加剂、沥青发泡型及其他类型[19]。

有机降黏剂类(如Sasobit)通过蜡质成分降低沥青黏度,其最佳掺量为3%,可降低混合料成型温度约18℃,显著提升高温抗车辙性能,但会对低温抗裂性能产生不利影响,应用中需加以关注[20];化学添加剂类(如Evotherm)通常通过表面活性剂等成分改善沥青与集料的裹覆作用,从而在掺量较低(如0.5%~0.6%)时可有效降低施工温度,且制备的混合料水稳定性能够达到或接近热拌沥青混合料的要求[19]。沥青发泡类(如Aspha-min)通过添加剂(如合成沸石)内部水分的释放与蒸发,使沥青产生微发泡,从而增大其与集料的接触面积。其典型掺量为混合料质量的0.3%~0.5%,可降低施工温度20~30℃。由于发泡效果依赖于水分在拌和过程中的平稳释放,掺加工工艺对保证温拌效果的持久性较为重要。硫磺类温拌剂(如SEAM)通过替代部分沥青或与沥青发生化学作用来改变其流变特性。在同等的较低掺量下,硫磺类温拌剂主要作为结合料降低沥青黏度,从而可降低施工温度20~30℃;在较高掺量下,则通过化学改性提升混合料的高温抗车辙性能。需注意,其生产或使用过程中可能产生如H₂S等的有害气体[19]。

温拌沥青技术在改性/再生沥青混合料中的应用效果显著,温拌改性沥青混合料拌合能耗比热拌减少19%,CO₂排放减少12%[10];温拌再生沥青混合料可使RAP掺量提升至50%以上,将拌和温度降低至130~140℃,在RAP掺量为40%的条件下,其建设期CO₂排放可比热拌再生技术降低约20.11%[7]。泡沫温拌技术和软/硬沥青复配技术是两种有效的温拌工艺。研究表明,泡沫温拌技术可显著降低施工能耗并减少碳排放[21],而软/硬沥青复配技术则能在约135℃的较低温度下实现拌和,并具有良好的路用性能[19]。

4.1.2. 冷拌沥青技术

冷拌沥青混合料在常温下拌合施工,核心胶结料为乳化沥青或稀释沥青,无需加热集料和沥青,具有显著的节能减排优势[18],在建设期减排效果突出。

冷拌再生沥青混合料无需加热集料和沥青,可实现RAP料的高效利用。研究表明,其全流程总能耗与碳排放较热拌沥青混合料分别降低56%和50%,节能减排效果显著[16]。与热拌技术相比,该技术解

决了热拌产生的高能耗与高排放问题,但存在初期强度低、水稳定性差等短板。近年研究通过优化胶结料性能,使其能满足基层和低等级公路面层要求。在 RAP 再生应用中,冷拌再生技术无需加热旧料,施工便捷,适用于应急养护和偏远地区道路建设[16]。

4.2. 施工工艺优化技术

4.2.1. 就地热再生施工技术

基于全生命周期碳排放估算模型的分析表明,材料生产与运输是公路建设期碳排放的主要来源,约占总排放量的 70%以上[23]。就地热再生技术通过现场加热、铣刨、拌和、摊铺一体化作业,减少 RAP 料运输与场外拌和的能耗,核心减排环节包括原材料环节、拌和环节、施工环节[22]。

在原材料环节,RAP 料现场再生利用,省去了 RAP 料的运输过程,显著减少了运输阶段的能耗与碳排放;在拌和环节,旧料预热温度为 120~140℃,低于新料拌和温度,能耗减少 25%~30% [7];在施工环节,一体化设备作业实现了铣刨、拌和、摊铺的同步进行,减少了设备闲置等待,显著提高了施工效率与能源利用率[22]。

与传统铣刨重铺工艺相比,就地热再生技术节能减排效益显著,其能耗和碳排放仅为铣刨重铺的 35.6% 和 49.2%。这主要是由于就地热再生技术原路面材料回收利用率高,新添加材料比例仅为 15%左右,大幅降低了原材料生产及运输环节的能耗与碳排放。核心减排环节包括减少 RAP 料运输与场外拌和的能耗。同时,就地热再生技术充分利用旧料,显著节省了新材料购置费与废料处置费,从全生命周期成本(LCCA)角度具有显著的经济优势,是兼具环境与经济可行性的优选养护方案。该技术适用于路面表层病害修复,从年均碳排放量角度考量,就地热再生是更为绿色的养护技术[22]。

4.2.2. 低碳型路面结构施工

钢渣沥青路面、环氧再生沥青路面等低碳型路面结构的施工能耗控制核心在于适配材料特性的工艺优化[24][25]。

钢渣沥青路面施工:钢渣集料密度大,导致混合料拌和及运输环节机械台班消耗增加约 12% [14];但在原材料运输阶段,若利用钢厂周边就近取材优势(如运距 50km vs 玄武岩 200 km),集料运输碳排放可显著降低约 89% [14]。

环氧再生沥青路面施工:采用温拌技术,混合料生产温度不高于 140℃,且由于高 RAP 掺量(可达 60%)大幅减少了原材料生产能耗,相比传统再生路面,建设阶段总碳排放可降低 17.62% [9]。

不同路面结构碳排放对比显示,钢渣沥青路面全生命周期碳排放比普通沥青路面低 69.6%,主要得益于原材料准备阶段碳排放降低 42.8%及维护阶段的大幅减排;环氧再生沥青路面相比传统再生路面可进一步降低碳排放 17.62%,核心在于高 RAP 掺量降低了原材料生产能耗。此外,科学设计路面结构可延长路面寿命,减少运营期养护碳排放,实现全生命周期减排[25]。

4.3. 施工设备与能源优化

4.3.1. 设备能耗管控

拌合站、摊铺机、压路机等施工设备是建设期碳排放的重要来源,其能耗影响因素包括设备型号、作业效率、燃料类型[26][27]。

拌合站:能耗占施工总能耗的 80%以上,是碳排放的主要来源。核心影响因素包括拌合时间、集料加热温度和设备热效率,通过优化燃烧系统(如引进新型固体燃料加热系统)或采用智能控制系统,可有效提升能源利用效率,降低能耗[26]。

摊铺与碾压设备:摊铺机行驶速度、压路机碾压遍数是影响能耗的关键因素,优化作业参数并加强

设备组合优化,可显著降低燃油消耗。

燃料类型改造对减排效果显著,拌合站采用天然气替代重油,CO₂排放可减少约 29.82% [28];推广电动化施工设备可显著降低施工阶段的直接碳排放。此外,加强设备运维管理(如确保设备性能稳定、避免故障闲置)是保障施工效率、降低能耗的基础措施[29]。

4.3.2. 可再生能源应用

施工阶段可再生能源应用潜力巨大:在施工场站布设光伏板可为办公及辅助设施供电,减少电网依赖[29];推广电动化施工设备是减排关键,电动拌合站相比传统柴油拌合站,基于柴油能耗测算每吨混合料可减少碳排放约 9 kg,若配套绿电供电,可实现施工阶段直接碳排放归零[23]。未来需通过技术集成解决供电稳定性问题,拓宽应用场景。

5. 运营维护期低碳技术应用进展

5.1. 预防性养护低碳技术

5.1.1. 预防养护技术类型与碳排放关联

预防性养护技术针对路面轻微病害,在结构强度未衰减前采取措施,核心技术包括微表处、超薄罩面、稀浆封层、雾化封层等[30][31]。

微表处采用聚合物改性乳化沥青冷拌混合料,摊铺厚度通常为 6~10 mm,施工能耗显著低于铣刨重铺,碳排放强度远低于大修工程;超薄罩面的摊铺厚度通常为 10~20 mm,采用高模量沥青混合料,施工能耗显著低于传统铣刨重铺方案[31];雾化封层则直接喷洒雾化乳化沥青修复早期裂缝,施工便捷,能耗极低,碳排放强度显著低于微表处等工艺。

预防养护的间接减排效应显著,研究表明,在路面使用周期内进行 3~4 次预防性养护,可延长使用寿命 10~15 年,减少大修次数 2~3 次,间接减少大修产生的碳排放 45%~50%。此外,预防性养护可提升路面平整度,降低车辆行驶阻力,间接减少车辆能耗与碳排放——路面平整度 IRI 值从 6 m/km 降至 2 m/km,车辆油耗可降低 5%~8% [32]。

在路面使用周期内进行 3~4 次预防性养护,可延长使用寿命 10~15 年,节约养护费用 45%~50% [10]。此外,预防性养护可提升路面平整度,延缓路面性能衰变,从而降低车辆行驶阻力,间接减少车辆能耗与碳排放[32]。

5.1.2. 养护工程能耗与碳成本分析

养护工程碳排放主要来源于原材料生产及混合料拌合前加热环节,两者合计占总能耗的 80%以上;运输与施工环节占比较小。通过构建能耗指数(ESI)和碳成本指数(ECCI),可量化不同养护技术的环境成本,其中 ECCI 定义为单位养护面积的碳排放量与碳排放价格的乘积[26]。

不同养护策略的启动时机对生命周期碳成本影响显著。如图 2 所示,预防性养护在路面性能指数处于较高水平时启动,其生命周期单位碳成本最低且保持稳定;功能性修复(中修)在路面性能指标 PCI 降至 80 左右启动,碳成本随路面性能衰减呈上升趋势;结构性修复(大修)则在 PCI 降至 60 左右启动,碳成本显著增加。若 PCI 进一步降至 40 以下的严重病害区,碳成本将急剧攀升。

量化分析显示,不同养护技术的碳排放强度差异明显。预防性养护通过延缓路面衰变,避免了昂贵的大修工程,在全生命周期内往往具有更优的经济性与环境效益,是解决养护资金不足与碳减排双压力的有效途径。结构性修复工程(如铣刨重铺)的单位使用寿命碳排放指标显著高于预防性养护工程,说明预防性养护能有效延缓路面性能衰变,大幅降低全寿命周期的环境成本[33]。

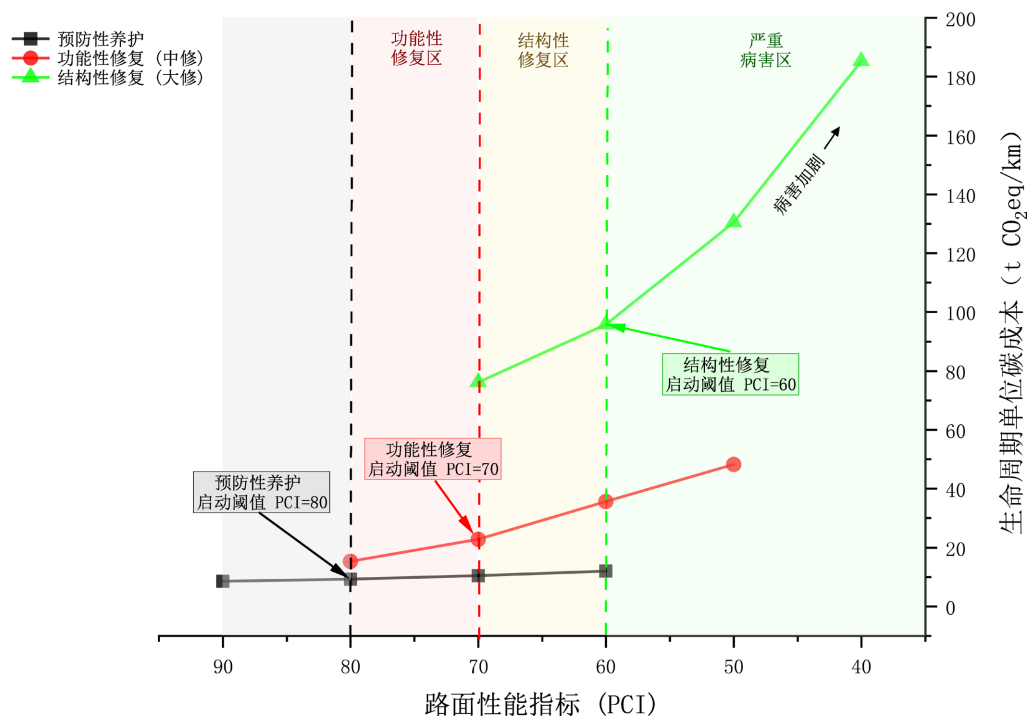


Figure 2. Schematic diagram of carbon cost and applicable timing of typical maintenance measures
图 2. 典型养护措施碳成本及适用时机示意图

5.2. 再生型养护技术

再生型养护技术将养护产生的 RAP 料现场再生利用, 核心包括就地热再生、厂拌冷再生、就地冷再生等[22] [34]。

就地热再生养护可实现 RAP 料 100%现场再生利用, 其碳排放比铣刨重铺降低约 50%, 碳排放主要集中于施工阶段, 且具有施工速度快、对交通干扰小等优点; 厂拌冷再生养护将 RAP 料运至拌合站再生, 生产过程无需加热, 能耗与碳排放显著低于热再生工艺, 碳排放主要集中于原材料生产阶段, 但需关注材料运输环节带来的环境负荷; 就地冷再生养护采用乳化沥青或泡沫沥青现场拌合, 施工过程无需加热, 具有显著的节能减排效益。同时, 提高 RAP 掺量利用废料制备再生沥青混合料, 可降低能耗与碳排放并提升环境效益[35]。

5.3. 运营期路面性能调控技术

5.3.1. 路面结构耐久性提升

采用高稳定性材料与优化结构设计, 延长路面服役寿命, 减少养护频次[36] [37]。

在材料层面, 钢渣沥青混合料、环氧再生沥青混合料的抗车辙性能比普通沥青混合料高 30%~50%, 抗疲劳寿命延长 2~3 倍, 可减少运营期养护次数 30%以上; 在结构层面, 采用“粒料基层 + 半刚性底基层 + 高模量中面层”复合结构, 路面结构寿命从 15 年延长至 20~25 年, 全周期养护碳排放减少 25%~30% [10]。从结构与材料层面提升路面抗损毁能力, 是减少全周期养护活动次数的根本途径, 具有显著的间接减排效益[17]。

耐久性提升的间接减排效应显著, 延长路面使用寿命可大幅减少全寿命周期内的养护与大修次数, 从而显著降低碳排放。此外, 采用橡胶沥青等抗水损害材料, 可延长路面服役寿命, 进一步减少养护过程中的碳排放。

5.3.2. 交通效率关联减排

路面性能与交通效率直接相关，优化路面平整度、抗滑性能可降低车辆能耗与碳排放[4] [32]。

在平整度优化方面，改善路面平整度，可使小型车油耗降低约 1.0%，大型货车油耗降低约 1.5%，从而有效减少车辆运营阶段的碳排放；在抗滑性能优化方面，提升路面抗滑性能，可有效缩短车辆制动距离，提升行车安全性，并可能通过改善行驶平顺性间接降低车辆能耗与碳排放

公路交通安全设施(如波形梁钢护栏)在其全生命周期中，材料生产阶段是碳排放的主要来源，占总量的 88.19%。通过发展低碳智能制造施工工艺、科学降低设施材料用量、强化老旧设施再利用等措施，可以有效降低其全生命周期碳排放[38]。此外，在路面设置光伏板(光伏路面)，可为道路照明、监控设备供电，同时降低路面温度，减少车辙病害，实现“发电减排 + 养护减排”双重效应。

6. 报废回收期低碳技术应用进展

6.1. 路面拆除与固废再生

6.1.1. 拆除环节低碳管控

路面拆除环节的碳排放主要来源于拆除、运输及废料处理设备的能耗。低碳管控的核心在于推进废旧材料的回收与再生利用[10]，并辅以优化运输、选用低碳设备及改进施工工序。

在材料回收利用方面，对拆除产生的废旧沥青混合料(RAP)等进行分类收集和高效再生利用，可大幅减少新材料生产需求，是实现该环节碳减排的最根本途径。在设备与能源优化方面，在条件允许时，可采用电动或更高能效的拆除设备，以降低直接能耗产生的碳排放。在工序与运输优化方面，优化拆除与清运工序，减少设备空转和废料二次转运，缩短运输距离，均可降低相应能耗。

6.1.2. 全生命周期固废闭环

路面固废有 RAP、钢渣、水泥稳定碎石等，报废路面固废的闭环利用是报废回收期减排的核心，实现“拆除 - 再生 - 再利用”的循环模式[35]：

RAP 闭环利用：报废路面 RAP 料经破碎、筛分后，可用于再生沥青混合料。研究表明，提高 RAP 掺量可有效减少原生材料消耗并降低碳排放。在技术可行范围内(如采用温拌、环氧再生等技术)，RAP 掺量可达 60%甚至更高。具体的原生集料替代量和碳减排量，需根据混合料设计、RAP 特性及生产工艺进行详细核算。

钢渣闭环利用：钢渣作为大宗工业固废，其资源化利用对于减排具有重要意义。经安定性处理(如陈化)后，钢渣可重新用于沥青混合料或水泥混凝土。目前，我国钢渣的综合利用率仍有巨大提升空间。此外，钢渣自身具有一定的固碳潜能，通过碳酸化等前沿技术可进一步固化 CO₂，但其实际固碳效率受技术条件限制。

基层材料闭环利用：报废的水泥稳定碎石等基层材料经破碎后，可作为再生集料用于新路面基层，减少水泥和原生集料的消耗，从而降低新材料生产阶段的碳排放。

研究表明，固废的资源化利用具有显著的减碳效益，例如炉渣沥青路面相比常规路面的降碳率最高可达 17.1% [39]。此外，固废再生利用可减少废弃物填埋，从而节约土地资源并避免填埋带来的潜在环境负担。

6.2. 报废阶段碳捕集与利用

钢渣固碳技术应用

路面拆除环节的碳排放主要来源于拆除、运输及废料处理设备的能耗。低碳管控的核心在于推进废

旧材料的回收与再生利用[10]，并辅以优化运输、选用低碳设备及改进施工工序。

报废钢渣沥青路面中的钢渣含有大量 CaO、MgO 等活性成分，可通过碳酸化技术捕集 CO₂，实现固废资源化与碳封存的协同[8]。

钢渣碳酸化固碳：将钢渣破碎至较细的粒径，在 60℃、湿法环境的适宜条件下，通入 CO₂ 进行碳酸化反应，可实现 CO₂ 的固定。研究表明，在优化条件下，固碳率可达 27.9%，即每吨钢渣可捕集约 279 kgCO₂ [12]。但实际固碳效率受多种因素影响，通常低于其理论最大值。

为减少钢渣运输带来的碳排放，可考虑在拆除现场对钢渣进行安定化处理。例如，利用前沿的碳酸化技术处理钢渣，既能提升其体积安定性，又能实现 CO₂ 封存。经有效处理后的钢渣，安定性显著改善(如压蒸线性膨胀率可满足 ≤0.5%的国家标准)，可作为沥青混合料集料、水泥掺合料等建筑材料重新利用[8][13]。

7. 研究挑战与未来展望

7.1. 当前研究存在的不足

7.1.1. 技术层面：减排效果量化不充分

部分低碳技术的减排效应缺乏精准量化数据，尤其是路面性能提升带来的车辆能耗减少、固废利用带来的土地节约减排等间接减排环节[18]。碳捕集技术的固碳量核算多基于实验室数据，缺乏工程尺度的长期监测；光伏路面的发电减排与养护减排协同效应尚未形成统一量化方法。部分技术存在性能与减排的矛盾，如冷拌沥青混合料减排效果显著，但路用性能有待提升。

7.1.2. 数据层面：数据库标准化程度低

碳排放数据库缺乏统一标准，区域排放因子差异大，导致不同研究的减排效果可比性差[39]。例如，沥青生产的碳排放因子在不同区域差异可达 10%~15%，集料运输距离的核算边界不统一[28]。此外，数据缺失问题突出，如生物沥青、地聚合物基材料等新型材料的碳排放数据，以及运营期路面性能衰变与碳排放关联的数据不足[40]。

7.1.3. 政策层面：技术与政策衔接不足

低碳技术与碳政策的衔接机制尚未完善[41][42]。在碳限额交易政策下，沥青混合料生产企业的低碳技术选择缺乏明确的利润模型，难以判断技术应用的经济可行性；区域差异化减排政策尚未考虑公路建设的技术适配性，导致部分低碳技术因缺乏政策支持难以推广。此外，低碳技术的评价标准与认证体系不健全，钢渣沥青混合料的固碳效益未纳入绿色建材认证。

7.2. 未来研究方向

7.2.1. 技术创新：新型低碳材料与工艺研发

为突破现有低碳技术的性能与成本瓶颈，未来需聚焦高性能、低排放的新型材料与工艺研发[18]。

应持续研发生物沥青、地聚合物基材料等，以降低原材料生产碳排放并填补基础数据空白；开发复合型抑烟剂等添加剂，减少沥青混合料生产施工过程中的污染物排放；研发高性能抗老化剂，提升路面耐久性，间接降低全生命周期养护碳排放[10]。

在新型低碳工艺方面，需优化如钢渣微生物固碳等前沿技术，切实提升固碳效率与安定性处理效果[8][13]；推动拌和、施工等过程的智能化与精准控制，以优化温度管理与能耗水平；同时，深化报废沥青路面材料的高效再生利用技术，提高 RAP 掺量并保障路用性能，这是当前最主流且已验证的固废资源化减排路径。

7.2.2. 方法升级：智能核算与数字孪生应用

借助信息技术提升碳排放核算的精准度与效率[23] [32]。

智能核算：基于 AI 算法(如神经网络、随机森林)构建碳排放智能估算模型，整合材料特性、施工参数、环境条件等多源数据，实现减排效果的实时预测；

数字孪生：搭建沥青路面全生命周期数字孪生平台，集成 LCA 评价、不确定性分析、技术适配性评价功能，为技术选择与政策制定提供可视化决策支持；

数据标准化：建立全国统一的沥青路面碳排放数据库，规范排放因子、核算边界、数据采集方法，提升研究结果的可比性。

7.2.3. 政策协同：碳政策与技术选择的耦合优化

构建碳政策与低碳技术的耦合模型，实现环境效益与经济效益的双赢[41] [42]。

碳交易下的技术选择模型：量化碳价波动对企业低碳技术应用成本的影响，优化技术组合方案；

区域差异化政策制定：基于区域资源禀赋与技术适配性评价结果，制定针对性的低碳技术推广政策(如钢渣产地加大钢渣技术补贴，RAP 产生量大的地区加大再生技术支持)；

认证与激励机制：将低碳技术的固碳效益、资源节约效益纳入绿色公路认证体系，建立“技术认证 - 政策补贴 - 碳交易”的激励闭环。

7.2.4. 跨尺度管控：从路面单体到路网系统的协同

拓展研究尺度，实现从单一路面到路网系统的全生命周期碳排放协同管控[2] [29]。

路网尺度的技术优化：基于路网内各路段的服役状态、交通流量、资源分布，优化低碳技术的空间布局(如繁忙路段采用高耐久性技术，偏远路段采用固废再生技术)；

跨行业协同减排：推动公路建设与钢铁、能源行业的协同，如钢铁企业为公路提供钢渣原料，公路施工采用绿电供电，实现跨行业碳循环。

7.2.5. 推动环境 - 经济综合决策，构建 LCA-LCCA 集成优化模型

当前研究多侧重于单一维度的环境或经济评价，难以支撑复杂工程决策。未来应着力构建环境效益与经济效益的集成决策优化模型，应在满足路面性能要求的前提下，同步寻优碳排放最低与全生命周期成本最小的技术组合。例如，在碳限额与交易政策背景下，企业需权衡减排成本与碳配额收益，通过模型可量化不同减排技术的边际减排成本，从而确定最佳减排策略，这将打破环境目标与经济目标的对立，为低碳路面规划提供兼具科学性与操作性的量化工具。

8. 结论

本文系统梳理了低碳技术在沥青路面原材料、建设期、运营维护期、报废回收期的全生命周期的应用进展，构建了“材料优化 - 工艺改进 - 养护优化 - 固废利用”的技术分类框架，阐述了各类技术的减排机理、应用效果与核算方法，并建立了区域技术适配性评价体系。

研究表明，原材料阶段的钢渣资源化、RAP 再生利用，建设期的温拌/冷拌技术、就地热再生工艺，运营期的预防性养护、性能调控技术，报废期的固废闭环利用、钢渣固碳技术，均可实现显著减排，多技术协同应用能产生更大的协同减排效应；LCA 全生命周期评价 LCA 是低碳技术效果验证的核心工具，结合蒙特卡洛模拟的不确定性分析与单因素敏感度分析，可提升评价结果的可靠性；区域技术筛选需兼顾建设效益与匹配度，实现技术与资源、气候、政策的适配。

当前研究仍面临技术减排量化不充分、数据标准化程度低、政策衔接不足等挑战，未来需聚焦新型材料与工艺研发、智能核算方法升级、碳政策与技术耦合优化、跨尺度协同管控，推动沥青路面低碳技

术从“单点突破”向“系统集成”发展。

沥青路面低碳技术的研发与应用是公路建设领域实现“双碳”目标的关键路径，未来需通过技术创新、方法升级、政策协同的多维度发力，构建“技术-数据-政策”的闭环管控体系，助力公路交通行业的绿色低碳转型。

参考文献

- [1] 吴金群, 梅乐怡. 我国实现碳中和愿景的挑战与对策[J]. 中南民族大学学报(人文社会科学版), 2022, 42(9): 132-138, 186.
- [2] 孙彦明, 刘士显. “双碳”目标下中国交通运输碳排放达峰预测[J]. 生态经济, 2023, 39(12): 33-40.
- [3] 2024 年我国交通运输行业发展统计公报发布[J]. 隧道建设(中英文), 2025, 45(6): 1101.
- [4] 张金喜, 苏词, 王超, 等. 道路基础设施建设中的节能减排问题及技术综述[J]. 北京工业大学学报, 2022, 48(3): 243-260.
- [5] 乔亚宁, 文霞, Gao Yang-Ming, 等. LCA 分配方法对道路生命周期碳排放核算的影响及不确定性分析[J]. 交通运输工程学报, 2025, 25(5): 82-95.
- [6] Zhang, X., Zeng, Y., Feng, Y., Zhang, C. and Zhang, L. (2023) Carbon Emissions Analysis of Producing Modified Asphalt with Natural Asphalt. *Green Processing and Synthesis*, 12, Article ID: 20228146. <https://doi.org/10.1515/gps-2022-8146>
- [7] 杨彦海, 时铭阳, 杨野, 等. 基于 LCA 的温拌再生融合技术节能减排效果分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2025, 44(4): 52-57.
- [8] 吴跃东, 闫文, 岳昌盛, 等. 钢渣沥青混凝土低碳应用及安定性提升技术发展现状[J/OL]. 矿产综合利用, 1-11. <https://link.cnki.net/urlid/51.1251.TD.20241125.1420.006>, 2026-05-15.
- [9] 刘峰, 刘逸璇, 许新权, 等. 高废旧沥青掺量环氧再生沥青路面施工能耗与碳排放分析[J]. 热固性树脂, 2025, 40(2): 6-13, 20.
- [10] 邵楷模. “双碳”目标下的沥青路面减碳技术发展研究综述[J]. 交通节能与环保, 2023, 19(5): 136-140.
- [11] 陈宗武, 冷真, 肖月, 等. 面向沥青混凝土矿料全替代的钢-铁渣梯级利用[J]. 中国公路学报, 2021, 34(10): 190-203.
- [12] 涂茂霞, 雷泽, 吕晓芳, 等. 水淬钢渣碳化固定 CO₂[J]. 环境工程学报, 2015, 9(9): 4514-4518.
- [13] 伊海赫. 微生物提升钢渣胶凝材料安定性和利用率的作用及机理[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2020.
- [14] 王宏祥, 黄毅, 查旭东. 基于全寿命周期的钢渣沥青混合料环境及经济效益分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2024, 44(3): 20-33.
- [15] 司文静, 封喜波, 秦瑛琪, 等. 基于 LCA 的 RAP 再生沥青路面排放与能耗分析[J]. 公路, 2025, 70(9): 308-313.
- [16] 王兆仑, 宁金成, 栗威. 冷拌再生沥青混合料能耗与碳排放量分析[J]. 公路, 2021, 66(5): 263-268.
- [17] 刘士南, 王厚植, 张磊, 等. 基于全寿命周期的环氧再生路面碳排放研究[J]. 材料导报, 2022, 36(S2): 121-128.
- [18] 石福周, 崔武军, 段伟, 等. 低碳减排沥青及评价体系研究综述[J]. 工业建筑, 2023, 53(S2): 57-61, 6.
- [19] 梁波, 张海涛, 梁缘, 等. 温拌沥青技术研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(2): 24-46.
- [20] 章清涛, 徐书东, 王晓然, 等. Sasobit 温拌剂对 SBS 改性沥青及混合料性能影响研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2024, 48(5): 974-978.
- [21] 郑炳锋, 吉增晖, 黄毅, 等. 泡沫温拌橡胶沥青混合料施工能耗与碳排放测算[J]. 公路, 2022, 67(2): 16-23.
- [22] 陈宇亮, 黄毅, 彭孝南, 等. 就地热再生沥青路面建设期能耗与碳排放分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2022, 42(4): 30-39.
- [23] 乔兰, 邓乃夫, 李庆文, 等. 公路工程建设阶段全生命周期碳排放智能估算方法[J]. 工程科学学报, 2023, 45(12): 2173-2186.
- [24] 董俊杰, 李鹏, 魏艳萍, 等. 基于 LCA 的不同路面结构建设期碳排放和能耗评价研究[J]. 材料导报, 2025, 39(S1): 138-142.
- [25] 刘颖昊, 肖永力, 汪水泽, 等. 普通沥青路面与钢渣沥青路面碳足迹评价[J]. 钢铁, 2025, 60(9): 204-213.
- [26] 仪明伟, 肖月, 林翔, 等. 沥青路面典型养护施工全过程直接能耗及碳排放量化分析[J]. 材料导报, 2024, 38(20):

111-121.

- [27] 马士杰, 周子栋, 张正超, 等. 水泥稳定钢渣碎石混合料环境影响和经济效益分析[J]. 公路, 2023, 68(1): 368-377.
- [28] 孟祥晨, 李源渊. 沥青路面建设期拌和阶段能耗与碳排放量化研究[J]. 公路工程, 2022, 47(5): 94-101.
- [29] 黄学文, 王凯, 黄山倩, 等. 绿色公路节能降碳技术应用与分析[J]. 中外公路, 2025, 45(4): 218-225.
- [30] 王志科. 公路沥青路面预防性养护技术应用研究[J]. 施工技术, 2015, 44(4): 92-94.
- [31] 叶海新, 严煜杨, 毕研秋, 等. 全寿命周期理论下沥青路面预防养护技术环境效益后评估[J]. 山西建筑, 2025, 51(21): 141-145.
- [32] 严建财, 朱骏, 梁远路, 等. 考虑碳排放的沥青路面养护策略优化[J]. 公路, 2022, 67(12): 375-381.
- [33] 田恬. 沥青路面养护全寿命周期碳排放研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2024.
- [34] 杨强光. 沥青路面典型再生工艺能耗与碳排放量化研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2022.
- [35] 雷斌, 周健英, 余林杰, 等. 利用废料制备再生沥青混合料全生命周期的环境效益评价[J]. 新型建筑材料, 2023, 50(5): 56-60.
- [36] 王林, 韦金城, 张晓萌, 等. “四个一体化”破解长寿命沥青路面技术瓶颈[J]. 科学通报, 2020, 65(30): 3238-3246.
- [37] 郑健龙, 吕松涛, 刘超超. 长寿命路面的技术体系及关键科学问题与技术前沿[J]. 科学通报, 2020, 65(30): 3219-3227.
- [38] 龚柏岩, 李欣, 汪乐文. 公路交通安全设施碳排放估算方法研究[J]. 公路交通科技, 2023, 40(S2): 299-307.
- [39] 王娇娇. 沥青路面建设碳排放计算方法及固废资源化减碳效应研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
- [40] 冉茂平, 邓须红, 关佳希, 等. 基于 LCA 的道路基础设施碳排放核算与低碳减排技术综述[J]. 交通运输工程学报, 2025, 25(5): 23-37.
- [41] 李松, 牛子恒, 暴斌硕, 等. 碳限额与交易政策下沥青混合料生产企业碳减排技术优化[J]. 交通运输工程学报, 2025, 25(5): 65-81.
- [42] 张赫, 张丽莎, 王睿, 等. 低碳技术筛选评估体系研究——以天津城乡建设领域为例[J]. 南方建筑, 2025(10): 1-8.