

绿色公路理念下沥青路面施工节能减排技术应用分析

朱东志

新疆北新岩土工程勘察设计有限公司 新疆 乌鲁木齐 831400

摘要: 随着“双碳”战略目标的提出与生态文明建设的深入推进,交通基础设施建设领域正加速向绿色低碳转型。作为公路工程的重要组成部分,沥青路面施工过程中的高能耗、高排放问题日益受到关注。本文基于绿色公路理念,系统梳理了当前沥青路面施工中主要的节能减排技术路径,包括温拌沥青混合料技术、再生沥青混合料技术、智能施工与信息化管理、新型环保材料应用以及施工组织优化等方面。探讨了各项技术在降低能源消耗、减少温室气体及有害物排放方面的实际效果与推广瓶颈。研究认为,多种技术协同集成、政策机制引导与标准体系完善是推动沥青路面绿色施工的关键。最后,本文对绿色公路理念下沥青路面节能减排技术的发展趋势进行了展望,旨在为我国公路建设高质量、可持续发展提供理论支撑与实践参考。

关键词: 绿色公路; 沥青路面; 节能减排; 温拌技术; 再生利用; 智能施工

引言

交通运输行业是我国能源消耗和碳排放的重要来源之一。据交通运输部统计,2023年我国公路货运量占全社会货运总量的74%以上,公路基础设施建设规模持续扩大。然而,传统沥青路面施工依赖高温拌合(通常150–180℃)、运输与摊铺,不仅消耗大量化石能源,还释放大量二氧化碳(CO₂)、氮氧化物(NO_x)、挥发性有机物(VOCs)等污染物,对生态环境造成显著压力。在此背景下,“绿色公路”理念应运而生。绿色公路强调在全生命周期内实现资源节约、环境友好、生态协调与高效运营,其核心在于将可持续发展理念贯穿于规划、设计、施工、养护与运营全过程。2016年,交通运输部发布《关于实施绿色公路建设的指导意见》,明确提出要推广节能减排新技术、新材料、新工艺,推动公路建设向绿色化、智能化转型。沥青路面因其良好的行车舒适性、施工便捷性和维修便利性,在我国高等级公路中占比超过90%。因此,聚焦沥青路面施工环节的节能减排,具有显著的现实意义:从环境角度看,可有效减少温室气体与有害物排放,助力国家“双碳”目标;从经济维度看,能显著降低燃油、电力等能源成本,并延长材料使用寿命;从社会层面看,则有助于改善施工人员作业环境,提升公众对绿色基建的认可度。本文旨在系统分析绿色公路理念下沥青路面施工节能减排的关键技术,评估其应用效果,并提出优化路径,为行业实践提供理论依据。

1 绿色公路理念与沥青路面施工的耦合关系

绿色公路并非单一技术叠加,而是一种系统性思维模式。其核心内涵包括资源集约利用、生态保护优先、

全生命周期管理、技术创新驱动等。沥青路面施工作为绿色公路建设的关键环节,需从多个维度实现理念落地。首先,在源头上应通过材料替代与工艺优化,减少原材料开采与能源输入;其次,在施工过程中需对拌合、运输、摊铺、碾压等工序实施精细化控制,以降低能耗与排放;再次,在工程末端应推动废旧路面材料的再生利用,构建闭环资源循环体系;最后,还需借助物联网、大数据等现代信息技术提升施工精准度与整体效率。由此可见,沥青路面施工的绿色化转型,是实现绿色公路目标不可或缺的一环,二者在目标导向与实施路径上高度契合。

2 沥青路面施工节能减排关键技术分析

2.1 温拌沥青混合料技术(WMA)

温拌沥青混合料(Warm Mix Asphalt, WMA)通过添加有机添加剂、化学发泡剂或采用物理发泡工艺(如Aspha-Min、Sasobit、Evotherm等),使沥青在100至140摄氏度的较低温度下仍能与集料充分裹覆,从而较传统热拌沥青(HMA)降低拌合与压实温度20至40摄氏度^[1]。这一技术突破显著改变了传统高温施工模式。由于拌合温度的下降,燃料消耗大幅减少,研究表明拌合温度每降低10℃,燃料消耗可减少约8%至10%。以年产30万吨混合料的典型拌合站为例,年均均可节约燃油800至1200吨。与此同时,温室气体与有害物排放也同步削减,其中二氧化碳排放减少30%以上,挥发性有机物(VOCs)和氮氧化物(NO_x)排放降幅可达40%至60%。此外,施工现场烟雾明显减少,作业环境显著改善,不仅降低了施工人员的热暴露风险,也为夜间或低温季节施工创造了条件。京港澳高速河北段改扩建工程中采用Evotherm温拌技术铺设AC-13C

上面层，施工温度由165℃降至125℃，经现场监测，摊铺区域PM2.5浓度下降52%，综合能耗降低28%，充分验证了该技术的环境与工程双重效益。

2.2 再生沥青混合料技术 (RAP/RAS)

再生沥青混合料技术通过回收利用旧路面铣刨料 (RAP) 或废橡胶沥青屑 (RAS)，实现资源循环与碳减排。目前主流技术包括厂拌热再生、就地热再生和冷再生三种形式。厂拌热再生将旧料运至拌合站加热后与新集料、新沥青按比例重新拌合；就地热再生则在原路面上直接加热、翻松并添加再生剂后重新摊铺；冷再生则在常温下使用乳化沥青或泡沫沥青进行稳定处理。这些技术路径共同的核心价值在于节约自然资源与减少环境负荷。数据显示，每使用1吨RAP可节约1.5吨新集料和约0.05吨新沥青，同时避免旧料填埋带来的土地占用与渗滤污染。从碳排放角度看，掺加30% RAP的混合料可使全生命周期碳足迹降低15%至20%。然而，高掺量再生也面临技术挑战，如旧沥青老化导致混合料低温抗裂性下降、水稳定性不足等问题。对此，工程实践中常通过添加专用再生剂以恢复沥青胶结性能，或采用高黏改性沥青提升耐久性，并建立RAP分级存储与质量控制体系以保障材料均一性。沪宁高速江苏段大修工程中，成功应用40% RAP掺配配合再生剂的技术方案，路面各项性能指标均满足规范要求，全生命周期碳排放降低22%，为高掺量再生技术的推广应用提供了有力支撑。

2.3 智能施工与信息化管理

智能施工与信息化管理通过数字化手段提升沥青路面施工的精准性与能效水平。在拌合环节，智能拌合站集成物联网传感器与人工智能算法，可实时监测骨料含水率、沥青流量、温度等关键参数，并自动调节配比，有效减少人为操作误差与能源浪费。某试点项目数据显示，应用智能控制系统后，燃料消耗的波动标准差下降35%，显著提升了能源利用稳定性。在摊铺与碾压阶段，无人摊铺机依托北斗/GNSS高精度定位系统，实现毫米级摊铺精度，大幅减少因厚度不均导致的返工；智能压路机则能根据路面反馈自动调节振动频率与振幅，确保压实均匀，避免过压造成的能源浪费或欠压引发的质量隐患^[2]。更进一步，数字孪生与BIM技术的应用使得施工全过程可在虚拟环境中预演与优化。例如，雄安新区某干线公路项目通过BIM平台模拟不同施工组织方案下的设备运行轨迹与能耗分布，最终优化调度策略，减少设备空转时间18%，整体碳排放降低12%。这些技术不仅提升了施工效率，更从系统层面实现了能源流与物料流的协同优化。

2.4 新型环保材料应用

除工艺革新外，材料层面的创新也是沥青路面节能减排的重要方向。生物基沥青改性剂利用植物油、木质素等可再生资源部分替代石油沥青，已在部分国家进入工程应用阶段。美国已有项目采用大豆油改性沥青，其全生命周期碳足迹较传统沥青降低25%，展现出良好的环境潜力。相变材料 (PCM) 则被尝试用于调温路面，通过在沥青混合料中掺入微胶囊化的相变物质，白天吸收太阳辐射热量，夜间缓慢释放，从而缓解城市热岛效应，并间接降低周边建筑空调能耗。此外，光催化材料如二氧化钛 (TiO₂) 也被引入沥青路面体系，其在光照条件下可催化分解空气中的氮氧化物等污染物，兼具空气净化与自清洁功能。意大利米兰已建成试验路段，实测显示NO_x去除率超过40%。尽管这些新材料尚处于示范阶段，但其多维环境效益预示着未来沥青路面将从“被动承载”向“主动环境响应”转变。

2.5 施工组织与管理优化

技术之外，施工组织与管理方式的优化同样对节能减排具有重要影响。合理的施工组织可显著降低无效能耗。例如，推行集中拌合、科学调度运输车辆，可有效缩短运距、减少怠速等待时间；错峰施工避开日间高温时段，不仅有利于温拌技术发挥优势，还能减少冷却用水与能源消耗。设备层面，逐步淘汰高耗能老旧机械，推广电动或混合动力摊铺机、压路机等绿色装备，是降低施工碳排放的直接路径^[3]。此外，绿色供应链管理理念的引入也日益重要，优先采购本地化、低碳认证的原材料，可大幅减少运输环节的隐含碳排放。某省级高速公路项目通过整合上述管理措施，综合能耗较传统模式下降15%，证明精细化管理在绿色施工中具有不可忽视的作用。

3 节能减排效果综合评估

为量化不同技术的环境效益，本文进行对比分析 (见表1)。

表1 不同技术方案节能减排效果对比

技术方案	拌合温度 (°C)	燃料消耗 (kg/t)	CO ₂ 排放 (kg/t)	RAP掺量 (%)	综合节能率
传统HMA	165	8.5	26.8	0	基准
WMA	125	6.2	18.5	0	27%
HMA+30% RAP	160	7.0	22.1	30	18%
WMA+40% RAP	120	5.1	15.3	40	43%

数据来源：整理自《公路工程节能减排技术指南》及多个省级交通科研项目报告。

可见，温拌与再生技术的协同应用可实现最大化的节能减排效果。此外，生命周期评价 (LCA) 显示，

绿色施工技术虽初期投资略高，但全生命周期成本（LCC）更具优势。

4 推广应用中的主要障碍与对策

尽管节能减排技术前景广阔，但在实际推广中仍面临多重障碍。在技术层面，标准体系尚不完善，部分再生混合料的设计缺乏统一规范，且长期路用性能数据积累不足，导致设计单位和施工单位存在顾虑；不同气候区与交通荷载条件下技术适配性差异较大，亟需差异化指导^[4]。在经济层面，温拌添加剂、智能设备等初期投入较高，通常增加10%至15%的成本，而RAP的铣刨、破碎、筛分等预处理环节也需额外支出，影响中小企业采纳意愿。在管理层面，部分施工单位仍习惯于传统施工模式，对新技术接受度低；同时，现行验收体系尚未将节能减排成效纳入强制性指标，监管缺位削弱了推广动力。针对上述问题，应加快制定《温拌沥青混合料施工技术规范》《高掺量再生沥青路面设计指南》等专项标准，并依托国家级路面性能长期观测网积累实证数据；在经济激励方面，可探索碳减排补贴、绿色信贷等金融工具，并推动“使用者付费+政府激励”机制；在管理机制上，应将绿色施工成效纳入企业信用评价与招投标评分体系，并建立第三方绿色施工认证制度，形成闭环管理。

5 发展趋势与展望

未来，沥青路面施工节能减排将呈现深度融合与系统集成的发展态势。首先，温拌、再生与智能施工将不再孤立应用，而是形成“三位一体”的绿色施工体系，实现材料—工艺—管理的全链条优化。其次，材料创新将持续突破，生物沥青、石墨烯改性沥青等新型胶结料有望从实验室走向工程实践。第三，碳足迹核算将更加精准，覆盖原材料开采、生产、施工、养护全环节的碳排放数据库将逐步建立，为碳交易与绿色认证提供

依据。第四，政策法规将进一步强化，绿色施工要求或将纳入《公路法》修订及地方强制性标准。第五，国际合作将深化，我国可借鉴欧盟“绿色道路”计划、美国FHWA低碳指南等国际经验，提升技术标准与管理水平。长远来看，沥青路面施工将从“被动减排”迈向“主动固碳”，如探索碳捕集功能沥青材料、光伏—路面一体化等前沿方向，真正实现公路基础设施的负碳化发展。

6 结语

绿色公路理念为沥青路面施工提供了全新的发展范式。本文研究表明，温拌技术、再生利用、智能施工、环保材料及管理优化等路径在节能减排方面成效显著，尤其以温拌与再生协同应用最具潜力。然而，技术推广仍受制于标准缺失、成本压力与管理滞后等因素。未来需通过“技术研发—标准制定—政策激励—市场驱动”四轮联动，构建系统化、可复制的绿色施工体系。唯有如此，方能推动我国公路建设迈向高质量、低排放、可持续的新阶段，为全球交通绿色转型贡献中国方案。

参考文献

- [1]谢光宁,吕大伟,李启荣.绿色公路理念在沥青路面施工中的应用[C]//中国公路学会养护与管理分会.中国公路学会养护与管理分会第十一届学术年会论文集.公路交通安全与应急保障技术及装备交通运输行业研发中心;广东华路交通科技有限公司;广东惠清高速公路有限公司;2021:202-206.
- [2]陈立兵,高等级公路沥青路面绿色施工成套技术研究.湖北省,中交第二航务工程局有限公司,2020-07-21.
- [3]贺书云,周世鑫.沥青路面绿色施工技术[J].施工技术,2020,49(S1):1346-1349.
- [4]王震,陈祥龙.绿色功能性隧道沥青路面施工关键技术及性能评价[J].交通科技与管理,2023,4(10):87-89.