

“双碳”目标引领下低碳公路的建设理念与实践

左仁广

(中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610000)

摘 要 随着全球气候问题应对策略的变革,在我国“碳达峰、碳中和”的“双碳”战略目标驱动下,公路建设的低碳化转型势在必行。本文从全生命周期碳管控理念、资源循环理念、制度协同创新理念三个方面进行了综合分析,构建了低碳公路的建设理念体系,以实际工程为例,按照该理念体系从规划设计—老路拆除—施工建造—运营期四个维度,推进构建在“双碳”背景下低碳公路全生命周期的建设方案,以期为相关人员提供借鉴。

关键词 “双碳”战略; 低碳公路; 建设理念; 工程实践

中图分类号: U411

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.12.027

0 引言

根据 Global Carbon Atlas 统计,2023 年全球交通领域碳排放达 8.24 Gt,其中道路运输占比为 75.2%。目前,中国公路里程已突破 528 万公里,碳排放强度为 0.89 tCO₂/万元产值,较欧盟高 38%。因此,道路运输行业是我国实现“双碳”战略的主要领域之一。实现公路行业低碳转型面临三重挑战:(1)技术惯性效应:传统的公路建设技术系统基于高碳排放材料,技术惯性效应明显;(2)区域发展不平衡:东部经济发达地区低碳公路建设理念先进、贯彻到位,中西部经济欠发达地区低碳公路建设推进较慢;(3)治理体系建设缓慢:碳排放路径监测覆盖率低,碳排放交易体系建设尚未在公路建设领域完全实现。

1 我国低碳公路的发展历程

我国低碳公路建设经历了从被动应对到主动引领的转型进程,其历史演进可划分为三个具有显著时代特征的发展阶段。

1.1 理念萌芽期(2005~2012)

2005 年《可再生能源法》颁布,首次将新能源应用纳入基础设施建设考量,2007 年国务院《节能减排综合性工作方案》提出交通领域节能目标,昭示了低碳公路理念的萌芽。此阶段主要特征为:技术零散应用,试点温拌沥青;政策框架初现,2011 年《公路水路交通运输节能减排“十二五”规划》首次提出碳排放强度下降目标(16%);基础研究起步:长安大学研发建筑垃圾路基填筑技术,再生骨料利用率达 30%^[1]。

1.2 体系构建期(2013~2020)

党的十八大将生态文明建设纳入“五位一体”总体布局,推动低碳公路制度化发展。2018 年《交通强国建设纲要》提出“生态优先、绿色发展”原则,2020 年《绿色交通标准体系》纳入碳足迹核算要求。此阶段主要特征为:(1)标准体系成型:发布《绿色公路建设技术指南》(2016)等 7 项行业标准;(2)示范工程涌现:港珠澳大桥应用钢箱梁自浮运输技术减少碳排放 12 Mt^[2];(3)技术创新突破:以云南鸡石高速大修项目施工为例,突出介绍了工程应用的关键工序,验证了该技术参数的可行性。实践证明,就地冷再生技术可以实现废旧沥青路面材料 100% 的循环利用^[3]。

1.3 深化发展期(2021 至今)

2021 年“双碳”目标写入《十四五规划》,低碳公路的建设进入高质量发展新阶段。此阶段主要特征为:(1)制度创新:2022 年实施《公路工程碳排放计算标准》(JTG/T 3);(2)技术集成:沪杭甬智慧高速集成光伏路面、数字孪生等 12 项低碳技术^[4];(3)模式变革:广连高速建立全国首个公路碳汇交易平台,碳汇量纳入 CCER 交易体系,重塑了低碳公路的内涵和外延。

2 “双碳”背景下低碳公路建设理念

2.1 全生命周期碳管控理念

基于生命周期分析理论(Life Cycle Assessment: LCA),根据公路全生命周期的四个阶段,建立“规划设计—施工建造—运营管理—拆除清理”四阶段碳流模型,该模型通过量化公路工程全生命周期各阶段的碳

排放输入与输出,构建碳足迹动态标定追踪信息系统。

1. 规划设计阶段:碳流规划。该阶段碳排放占公路全生命周期碳排放比例为 15%~20%。碳流热点主要为公路路线的选择和建筑材料的选用。该阶段可运用 GIS 多目标优化算法,选定生态敏感性(NDVI 指数)、碳排放强度(kgCO_2/km)与经济成本(万元/ km)等自变量,推导碳预算约束模型^[5],对公路沿线的生态敏感区进行精准识别与分析,有效减少公路建设对生态系统的破坏,降低因生态修复和补偿所产生的碳排放^[6]。

2. 施工建造阶段:过程管控。该阶段碳排放占公路全生命周期碳排放比例为 25%~30%。碳流构成主要为直接排放(施工机械燃油消耗,占比 65%)和间接排放(建材运输、临时设施能耗,占比 35%)。该阶段可采用数字化智能管理技术精准控碳。通过构建数字孪生系统,实现设备油耗实时监测与调度优化,有效降低设备空驶率。

3. 运营管理阶段:持续优化。该阶段碳排放占公路全生命周期碳排放比例为 40%~45%。碳流构成主要为传统燃油车辆的碳排放。该阶段是碳管控的主要阶段,碳流管控主要有两个途径:(1)能源系统革新:沪杭甬高速公路采用边坡光伏系统,年发电 4 800 万 $\text{kW}\cdot\text{h}$,雄安通道采用智慧照明能耗降低了 60%,碳排放减少了 820 t/年。(2)交通流优化:沪杭甬高速公路采用车路协同系统,智能车速引导,降低油耗 9%;动态称重系统使重载车绕行率上升 15%^[7]。

4. 拆除清理阶段:再生循环。该阶段碳排放占公路全生命周期碳排放比例为 5%~10%。碳流构成主要为直接排放(施工机械燃油消耗,占比 65%)和间接排放(建材运输、临时设施能耗,占比 35%)。该阶段是碳管控的收尾阶段,碳流管控主要体现在以下几个方面:拆除方法优化为冷铣刨技术,能耗较爆破拆除降低 35%;材料再生分级,沥青混合料和混凝土的再生利用率分别达到 95%和 80%。

2.2 资源循环理念

基于工业生态学的物质流理论分析(MFA),构建“开采—加工—使用—再生”四环节循环系统。该系统理论运用到低碳公路建设领域,主要考虑材料循环和能源循环两类关键技术。

1. 材料循环。沥青路面再生技术已获得深入研究并广泛应用,生物基材料作为一种新兴材料获得了蓬勃发展,生物改性沥青、植物纤维增强材料的应用在一定程度上减少了矿产资源的使用,有效降低了碳排放。

2. 能源循环。在公路建设与运营中,能源循环通过清洁能源替代、能源高效利用及废弃能源回收等技术,实现能源消耗减量与循环再生。

2.3 制度协同创新理念

低碳公路的建设时间跨度大、涉及部门多,需通过多维度、全周期的制度设计与协同,整合各方资源与责任。

在工作机制上,打通政策、市场、社会三者之间的纵向通道,探索建立碳绩效预算制度,提出绿色采购标准;在公路建设领域拓展碳汇交易市场,发行绿色金融产品^[8-9]。

3 “双碳”背景下低碳公路建设理念的实践:以 S330 省道快速化改造工程为例

3.1 项目概况

S330 省道快速化改造工程位于华东地区,项目全长约 18 km,设计标准为一级公路,双向六车道,设计速度 100 km/h 。项目位于省级经济开发区内,故在总体设计时按照市政道路标准设置了雨污排水系统、照明系统、景观绿化工程、海绵城市系统等工程。

项目在规划设计、老路拆除、施工、运营期的全生命周期内贯彻了绿色低碳的先进理念,将项目建设成为一个集数据收集、智能管理和个性化服务于一体的低碳综合交通平台。

3.2 规划设计阶段的降碳措施

项目在规划阶段综合运用 GIS 和 RS 技术,结合高精度地形图,采用计算机仿真平面和纵断面设计,进行不同方案的投资、碳排放强度分析。最终在生态敏感性、碳排放强度、经济成本之间寻求最优解。

设计阶段通过多维举措置前谋划项目的低碳化思路:

1. 路基设计。桥路分界处的路基工程推广采用泡沫轻质混凝土,使运输和施工过程中的能源消耗降低了 35%。

2. 路面设计。广泛采用老路铣刨料的厂拌热再生技术,废料循环利用率 95%,减少路面材料使用 30%以上。采用 3D 摊铺技术,在保证压实功的基础上减少碾压遍数,降低碾压阶段碳排放 5%。

3. 智慧交通系统(ITS)设计。通过对交通流的实时监测、分析和控制,优化了交通运行组织,提高了道路通行能力,减少了车辆的怠速和频繁启停,减少了车辆在交叉口的排队时间 15%~20%,降低了能源消耗和碳排放。

4. 智慧照明工程设计。项目采用节能型 LED 照明设施,发光效率提高 50%~80%,能耗降低 30%~50%。同时,智慧照明还可根据自然光线强弱、车流量大小等条件实时调整照度,项目采用的智慧照明工程较传统照明设计节省能源 40% 以上,有效降低了碳排放。

5. “零碳”服务区示范工程。项目某服务区打造“零碳”服务区示范工程。通过光伏发电、氢能综合站等举措,实现能源自给率 120%。构建该服务区零碳智慧管控平台,对全环节能耗、排放及管理行为实施实时监测,达成能源高效利用与排放精准控制的双重目标。

6. 海绵城市设计。项目把海绵城市的 LID 技术融入了 S330 总体设计。在分隔带中设置植草沟、雨水湿地、抬高绿化带、设置溢流口等措施,实现了公路雨水的自然积存与缓释,减少了地表径流峰值,大大减少了绿化带养护用水,从而减少了工程运营期的碳排放。

3.3 老路拆除阶段的降碳措施

项目铣刨产生的废旧沥青混合料 100% 通过热再生技术实现循环利用,显著减少了新材料开采与生产过程中的能源消耗和碳排放。项目的铣刨设备采用节能型动力系统和智能化控制系统,精准控制铣刨深度与范围,同时降低燃油消耗和废气排放。

3.4 施工阶段的降碳措施

1. 严格实施“零弃方、少借方”的土石方平衡策略,减少土地资源消耗、减少运输及施工过程中的碳排放。

2. 推广实施智能摊铺压实技术,通过 GPS 定位和实时监测提高施工精度,减少返工浪费。

3. 项目开发了零碳智慧管控平台,实现能耗、排放的实时监控与智能调控。建立施工期碳足迹核算体系,对生产、运输、施工各环节碳排放进行动态监测,针对性优化减排方案。

4. 推行生态友好型工艺,采用液压喷播、客土喷播等技术进行边坡生态修复,减少了硬质防护对环境的影响。结合污水处理回用、雨水调蓄利用等技术,实现降碳与减污协同。

3.5 运营期阶段的降碳措施

通车运营后,S330 项目实施数字化监测与智能调控,构建公路运营期碳管理智慧平台,集成传感器、物联网等技术,实时监测能源消耗、车辆排放、生态环境等数据。通过人工智能算法优化能源调度,例如根据光照强度自动调节照明模式,根据车流量动态调整全线交控系统,实现碳排放的精准控制。

后续将建立公路运营期碳足迹核算体系,量化分析能源消耗、运输活动、养护作业等环节的碳排放。通过碳足迹评估,识别高排放环节并制定针对性减排措施,例如优化物流运输路线、推广低碳养护工艺等。

4 总结与展望

在“双碳”战略驱动的背景下,公路工程作为经济可持续发展的重要领域,其资源与能源消耗规模巨大的传统特性决定了其碳排放规模庞大、渠道多样。尽管我国公路建设规模已稳居世界前列,但部分领域仍存在产能结构滞后、技术成本壁垒难以攻克、碳排放强度居高不下、绿色发展理念落实不到位等问题,与我国生态文明建设战略要求存在明显差距。在此背景下,深入探讨低碳公路建设理论与实践路径,将低碳、环保、高效的发展理念贯穿于公路工程规划设计、施工、运营养护、老路拆除等各个阶段,构建覆盖全生命周期的低碳公路建设体系,同时淘汰落后产能、推动产业升级,不仅是交通运输行业践行生态文明战略、实现“双碳”目标的关键举措,更是加速交通强国建设、推动行业可持续发展的必然选择。

参考文献:

- [1] 刘建.西安市建筑垃圾替换二灰碎石基层中部分石料的研究[D].西安:长安大学,2006.
- [2] 刘鹏,贺拴海,赵英策.港珠澳大桥大节段钢箱梁海上运输关键技术研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2015,38(01):85-90.
- [3] 刘东美.就地冷再生技术工程应用研究[C]//中国公路学会养护与管理分会第六届学术年会论文集.2016.
- [4] 崔优凯,王昌将,陈建新,等.智慧高速关键技术研究及应用示范-智慧高速人车路协同信息交互关键技术研究及应用示范[Z].浙江数智交院科技股份有限公司,2023.
- [5] 刘泽森.基于生态保护的公路线形设计[J].工程技术研究,2018(13):147-148.
- [6] 黄裕婕,沈毅,秦晓春.绿色公路定量研究的构思[J].公路交通科技(应用技术版),2010,06(10):296-299.
- [7] 李祝龙,王艳华.绿色公路的建设要点[J].科技创新与应用,2013(36):207-208.
- [8] 刘杰,高嘉蔚.交通基础设施碳排放核算关键问题及对策探索[J].交通节能与环保,2021,17(05):4-9.
- [9] 沈琳.碳交易体系下交通行业碳交易机制研究[J].低碳经济,2022,12(03):166-168.