

绿色低碳理念下公路施工技术体系的重构路径

李宗檀

新疆北方建设集团有限公司 新疆 奎屯 833200

摘要:公路建设行业作为能源消耗和碳排放的重要领域,在“双碳”目标下面临着从传统高能耗、高排放施工模式向绿色低碳模式转型的迫切需求。本文立足于绿色低碳理念对公路施工技术体系的重构要求,系统分析了现行施工技术体系在材料应用、工艺装备和过程管理三个维度上的结构性缺陷,进而提出以材料循环化、工艺精密化、能源清洁化和管控数字化为四大支柱的技术体系重构框架。在此基础上,从绿色材料替代与再生利用技术集成、低碳施工工艺与装备升级、施工组织优化与能效管理、全生命周期碳排放核算与动态调控四个方面论述了具体的重构路径。研究指出,技术体系重构的本质是从“末端治理”转向“源头减碳”,需要同步推动标准规范更新、评价体系建立和制度激励机制完善,方能实现技术变革与低碳目标的深度耦合。

关键词:绿色低碳;公路施工;技术体系重构;碳排放;材料循环

引言

公路建设与养护是典型的资源依赖型和能源密集型产业。从原材料开采、加工运输到施工机械作业,再到后期运营维护,每一环节都伴随着大量的能源消耗和温室气体排放。据统计,公路建设行业的碳排放约占交通基础设施总排放的相当比重,且随着路网加密和改扩建工程增多,这一占比呈持续上升趋势。在国家明确碳达峰、碳中和目标的政策背景下,公路施工领域面临着前所未有的低碳转型压力。然而,长期以来形成的公路施工技术体系是以“效率优先、成本导向”为核心逻辑构建的,其技术路径、装备配置、工艺标准和作业习惯均围绕提高施工速度和降低直接成本而设计,对能源消耗和环境影响的考量处于边缘位置。这意味着,简单地增加几项绿色措施或在个别环节引入低碳设备,并不能从根本上改变体系的碳排放底色。真正的转型必须触及技术体系的结构性层面——重新定义施工技术的功能目标、构建新的技术要素组合方式、形成以碳排放为约束指标的技术选择和优化方法。本文的核心命题是探讨公路施工技术体系在绿色低碳理念下如何进行系统性重构,而非零散的技术改良。通过分析现行体系与低碳要求的结构性矛盾,提出重构的逻辑框架和具体路径,旨在为公路建设行业的低碳转型提供理论参考和方法论引导。

1 现行公路施工技术体系的结构特征与低碳困境

1.1 现行体系的功能目标与技术逻辑

现行公路施工技术体系是在大规模基础设施建设浪

潮中逐步成形和固化的。该体系以“进度—成本—质量”为三角核心目标,所有技术选择、工艺设计和装备配套均服务于这三者的优化。其技术逻辑具有三个显著特征:其一是材料使用上的“原生优先”原则,即尽可能采用天然矿产资源和新鲜冶炼产品,因为原生材料性能稳定、供应可靠且单位成本较低;其二是工艺选择上的“连续高效”原则,力求通过大型机械化和流水线作业缩短工期;其三是能源供给上的“依赖化石能源”模式,施工机械几乎全部以柴油和汽油为动力来源。这套逻辑在资源约束不紧、环境容量充裕的时代具有其合理性,但在绿色低碳的新语境下,其内在缺陷逐渐暴露。

1.2 施工过程中的碳排放结构分析

从全施工过程来看,公路建设的碳排放主要集中在三个环节。材料生产阶段的碳排放占比最大,包括水泥、钢材、沥青等主要建材的制造过程,这部分属于“隐含碳”或“物化碳”。材料运输阶段的碳排放来源于大宗物料的远距离调运,特别是优质筑路材料分布不均衡导致的跨区域运输。现场施工阶段的碳排放则主要来自各类机械设备的燃油消耗和电力使用,包括土石方开挖、材料拌和、摊铺碾压、吊装运输等作业^[1]。这三个环节的碳排放相互关联、逐级叠加,形成一个从“矿山到工地”的完整碳流链条。现行技术体系在每个环节上都存在碳锁定效应——大规模使用水泥和沥青等碳密集材料、依赖长距离运输、机械能效偏低且电气化程度不足。

1.3 低碳约束下的结构性矛盾

将绿色低碳作为新的约束条件引入时,现行技术体系暴露出三重结构性矛盾。第一重矛盾是“目标冲突”——低碳技术与成本目标之间存在张力,绿色材料往往初始成本较高,节能工艺可能需要更长的工期,如何在多元目标间进行权重调整是体系重构首先面临的难题。第二重矛盾是“标准缺失”——现有施工技术规范 and 计价依据中几乎没有碳排放相关的指标要求,低碳施工缺乏技术标准引导和验收依据,使得即使有低碳意愿也难以付诸实施。第三重矛盾是“路径依赖”——施工企业的人员技能、设备资产和管理流程全部围绕传统技术体系配置,转向低碳技术意味着大量的沉没成本和再学习成本,这种惯性本身就是变革的阻力。三重矛盾相互交织,使得低碳转型不可能通过局部改良完成,必须走向系统性的体系重构。

2 绿色低碳施工技术体系重构的理论框架

2.1 绿色低碳施工的内涵与外延

绿色低碳施工并非简单的“少排碳”,而是一个内涵丰富的综合性概念,至少包含四个维度的要求。第一是资源维度,要求提高材料利用效率、增加再生材料使用比例、减少不可再生资源的消耗。第二是能源维度,要求降低化石能源消耗强度、提高清洁能源占比、提升机械能效水平。第三是环境维度,要求减少粉尘、噪声、有害气体和固体废弃物的排放,保护施工区域生态环境。第四是碳维度,要求对施工全过程碳排放进行量化管控,实现单位工程量的碳排放强度持续下降。这四个维度相互关联,共同构成绿色低碳施工的完整内涵。就外延而言,绿色低碳施工覆盖从临时设施建设、场地准备到主体工程施工、场地恢复的全过程,甚至延伸至材料供应链的上下游。

2.2 体系重构的基本逻辑与目标设定

技术体系重构不是将绿色元素“嵌入”旧体系,而是以低碳目标为主导逻辑重新组织技术要素。基本逻辑可概括为“三阶递进”:第一阶是“替代”,即用低碳材料替代高碳材料、用清洁能源替代化石能源、用高效工艺替代低效工艺,这是最直接的减碳手段。第二阶是“整合”,即打破传统施工工序之间的壁垒,通过工序合并、交叉作业和资源循环利用实现系统性的能耗降低,如将废旧路面材料就地再生利用,既减少了新材料消耗又消除了运输环节^[2]。第三阶是“优化”,即在替代和整合的基础上,运用数字化技术对施工参数、资源配置和时序安排进行精准优化,以最小的碳排放代价实现工程目标。重构的总体目标应设定为单位公路工程量的碳排放强度较现行水平下降一定幅度,同时不降低工

程质量和安全标准。

2.3 四大支柱的协同关系

重构后的技术体系以材料循环化、工艺精密化、能源清洁化和管控数字化为四大技术支柱。这四者并非并列独立,而是形成“基础—手段—动力”的协同结构。材料循环化是减碳的物质基础,没有材料端的变革,后续环节的减排空间十分有限。工艺精密化和能源清洁化是减碳的技术手段,前者通过提高施工精度减少返工和材料浪费,后者通过能源结构优化降低直接排放。管控数字化则是贯穿全局的赋能力,它提供碳排放的量化感知、过程分析和动态调控能力,使其他三大支柱的效果可衡量、可追溯和可优化。四大支柱的协同效应意味着体系重构的整体收益大于各单项变革的收益之和。

3 基于重构框架的技术路径设计

3.1 材料循环化:绿色材料替代与再生集成技术

材料端的重构路径聚焦于降低原生建材的碳足迹。具体方向包括:第一,推广应用低碳胶凝材料,如在高性能混凝土中大幅提高粉煤灰、矿渣粉等工业废渣的掺量,减少水泥熟料用量,同时研发使用煅烧粘土等新型低碳胶凝材料。第二,大力发展路面再生技术,包括沥青路面冷再生、热再生和全深式再生,以及水泥混凝土路面的碎石化再生利用,使废旧路面材料从“废弃物”转变为“再生资源”。第三,推广工业固废和建筑垃圾在路基填筑和附属工程中的应用,如钢渣碎石用于基层、废旧混凝土破碎料用于台背回填^[3]。第四,推动生物基和低碳合成材料在路面工程中的试点应用,如生物基沥青改性剂和植物油基养护材料。材料循环化的技术路线应遵循“高值化利用”原则——不是简单地把废弃物填进路基,而是根据不同材料的性能特征进行分级利用,优质材料用于面层或重要结构,较低品质材料用于基层或非承重部位,实现物尽其用。

3.2 工艺精密化:低碳施工工艺与装备升级

工艺和装备的重构路径关注施工过程的节能降碳。在工艺层面,应推动从“粗放式施工”向“精密化施工”转变,通过精确控制材料用量、拌和温度、压实参数等手段减少不必要的能耗和返工。具体包括:温拌沥青技术将混合料拌和温度较热拌降低 30℃以上,显著减少燃料消耗和有害气体排放;冷拌冷铺技术在常温下完成路面摊铺,几乎不消耗热能;智能压实系统通过实时监测压实度避免过压和欠压,既保证了质量又减少了机械往复。在装备层面,重点是推进施工机械的电动化、混合动力化和智能化更新,特别是拌和楼、挖掘机、装

载机、压路机等高能耗机械,应优先引入新能源动力系统。同时,升级拌和设备的燃烧器和保温系统,提高热效率;在摊铺机、压路机等移动机械上安装怠速停机装置,消除空转能耗。装备升级需要平衡前期投入和全周期效益,宜采取分阶段、分批次更新的策略。

3.3 能源清洁化:施工过程的能源结构转型

能源端的重构要求改变施工现场的能源供给结构。核心策略包括:一是提高电力在施工用能中的占比,将大量固定式设备(如拌和楼、碎石机、输送带)从柴油驱动改为电力驱动,并为移动式机械配套快充设施或电池更换系统。二是在有条件的大型施工场站部署分布式光伏发电系统,为办公生活区、照明和部分小型设备提供清洁电力,同时利用储能设备调节用电峰谷^[4]。三是探索氢燃料和生物燃料在重型施工机械中的应用试点,氢燃料动力在载重卡车和大型工程机械中具有较好的应用前景,但目前受制于成本和基础设施,宜先行在固定路线运输车辆中示范。四是推广施工场地“微电网”管理模式,整合光伏、储能和柴油备用电源,优化电力调度,最大限度利用清洁能源。能源转型是一个渐进过程,应结合当地电网清洁化程度、可再生能源资源禀赋和项目规模制定分步实施计划。

3.4 管控数字化:全生命周期碳排放的动态调控

数字化管控是确保其他重构路径落地的关键保障机制。其技术核心是建立“碳排放监测—核算—分析—调控”的闭环系统。在监测层,通过在主要耗能设备和施工机械上安装智能电表和油耗传感器,实时采集能耗数据,利用物联网技术传输至数据中心。在核算层,依据碳排放因子法将各类能耗数据和材料消耗量折算为碳排放当量,按施工分项和工序进行分解,形成碳排放的“时空热力图”,精确识别高碳环节和减碳潜力点。在分析层,利用统计方法和预测模型,将实际碳排放与定额基准值和目标值进行对比,评估各低碳技术措施的实际减碳效果,发现偏差并分析原因。在调控层,根据分析结果对后续施工方案、机械调配和作业时序进行优化

调整,实现“边施工、边核算、边优化”的动态管控。数字化管控平台的另一个重要功能是积累碳排放数据资产,为后续项目的碳定额制定、低碳技术比选和碳交易参与提供基础数据支撑。

4 结语

公路施工技术体系的绿色低碳重构,不是技术要素的简单增减,而是一场涉及目标定位、技术逻辑、标准规范和行业生态的系统性变革。本文提出的以“材料循环化、工艺精密化、能源清洁化、管控数字化”为核心的四支柱重构框架,回应了现行体系在低碳要求下的结构性缺陷,并从技术路径和保障机制两个层面论述了重构的实现策略。核心观点在于:低碳目标与技术体系之间不应是“外加约束”的对抗关系,而应通过体系重构转化为“内生动力”,使绿色低碳成为技术创新的方向引领和施工优化的约束条件。重构之路不可能一蹴而就。材料替代需要供应体系的培育,装备升级需要资本投入和时间周期,标准修订需要多方协调和试点验证。但方向已经明确——公路施工必须从“高碳锁定的路径依赖”中走出,向低碳高效的新型技术体系演进。未来研究可进一步关注低碳施工技术的成本效益量化分析、不同地域条件下的差异化重构策略,以及数字化技术(如数字孪生、人工智能)在施工碳排放智能优化中的更深层应用。唯有在技术创新与制度创新的双轮驱动下,公路施工技术体系才能真正实现绿色低碳的重构目标,为交通行业的碳达峰碳中和作出应有贡献。

参考文献

- [1] 王晓东,张宏,李明.公路建设碳排放核算方法及低碳技术路径研究[J].中国公路学报,2022,35(7):1-15.
- [2] 刘朝晖,李盛,杨文.沥青路面再生技术应用现状及低碳效益评价[J].公路交通科技,2023,40(3):56-65.
- [3] 陈志刚,王磊,周伟.温拌沥青混合料施工关键技术参数优化研究[J].建筑材料学报,2021,24(5):1002-1009.
- [4] 赵万华,孙斌,吴晓.施工机械电动化转型的碳减排潜力与制约因素[J].工程机械,2024,55(2):78-85.