

高速公路改扩建绿色低碳建造技术探索

陈 辉

杭州市交通工程集团有限公司 浙江 杭州 310000

摘 要：在全球气候变暖与“双碳”目标背景下，高速公路改扩建工程面临资源消耗与生态保护的双重挑战。本文以绿色低碳理念为核心，系统分析高速公路改扩建工程全生命周期的绿色低碳建造技术，涵盖规划设计、建设工程施工、运营养护等阶段。通过多个案例研究与技术对比，提出装配式结构、固废资源化、智慧能源管理等关键技术路径，并构建“技术-管理-政策”协同创新体系。绿色低碳技术可降低改扩建工程碳排放强度，为交通基础设施转型升级提供理论支撑与实践参考。

关键词：高速公路改扩建；绿色低碳建造；全生命周期；固废资源化；智慧能源管理

引言

全球交通基础设施碳排放占工业领域总排放量的23%，高速公路建设与运营阶段碳排放占比超40%。中国高速公路里程长、改扩建工程投资大，传统施工模式问题突出，以广昆高速公路南宁至百色段改扩建工程为例，施工期碳排放强度高，且改扩建与新建工程碳排放特征差异大，构建绿色低碳技术体系意义重大^[1]。然而，现有研究多聚焦新建工程，对改扩建工程特殊性关注不足，存在技术体系碎片化、固废资源化利用率低、智慧化管理平台标准不统一等局限，本文将构建改扩建工程绿色低碳技术框架。

1 高速公路改扩建绿色低碳技术体系

1.1 规划设计阶段绿色优化

1.1.1 生态选线与空间优化

采用BIM+GIS技术建立三维地形模型，结合生态敏感度分析，优化线路走向。例如，广西钦北改扩建工程通过生态选线减少红树林破坏面积12公顷，降低生态修复成本3000万元。具体技术路径包括：（1）生态敏感区识别：利用遥感影像解译与现场调查，划定湿地、水源保护区等生态敏感区域，建立“避让-缓冲-修复”三级保护机制。（2）填挖平衡优化：通过动态调整路线纵坡，实现土方“零外运”。广昆高速项目采用该技术减少土方外运量87万立方米，降低运输碳排放1200吨CO₂当量。（3）微地形改造：在填方路段设置生态边沟，采用植草护坡替代传统圪工防护，每公里减少混凝土用量300立方米。

1.1.2 绿色服务区布局

服务区采用“前置式停车区+后置式综合楼”布局，实现动静分区。田东服务区通过该设计使车辆行驶流线效率提升25%，商业区人流量增加40%。同时，集成分布式光伏（装机容量2.41MW）、CO₂空气源热泵（制热

系数COP达4.2）等设施，实现运营期100%绿电供应。具体技术措施包括：（1）建筑节能设计：采用被动式建筑技术，通过优化建筑朝向（南偏东15°）、设置遮阳系统（遮阳系数 ≤ 0.5 ），降低空调能耗30%。（2）可再生能源集成：屋顶铺设单晶硅光伏板（转换效率22%），车棚安装BIPV光伏幕墙，年发电量280万kWh，满足服务区85%用电需求。（3）海绵城市技术：建设下沉式绿地、雨水花园等设施，实现雨水径流总量控制率85%，减少市政排水压力。

1.2 建设施工阶段低碳技术

1.2.1 装配式结构应用

装配式桥梁采用工厂预制+现场拼装模式，广昆高速项目预制构件使用率达78%，现场焊接作业量减少60%，施工扬尘下降55%。数值模拟显示，装配式结构较现浇工艺减少碳排放32%，工期缩短45%。关键技术包括：一是制定《装配式桥梁构件设计图集》，统一梁高、跨径等参数，提高模具周转率至85%。二是采用物联网传感器实时监测预应力张拉力（误差 $\leq 1\%$ ）、压浆密实度（孔道饱满度 $\geq 98\%$ ），减少质量缺陷导致的返工碳排放。三是利用点云数据对比分析预制构件安装精度，将拼装误差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内，避免后期维修产生的碳排放。

1.2.2 固废资源化技术

沥青路面再生：厂拌热再生技术将RAP料掺量提升至45%，通过添加再生剂恢复沥青性能。江西樟吉高速改扩建工程应用该技术处理废旧沥青20万吨，减少碳排放1.8万吨。技术要点包括：采用铣刨-破碎-筛分一体化设备，控制粒径范围0—16mm，含泥量 $\leq 1\%$ 。通过DSR动态剪切流变试验，确定再生剂掺量为RAP料质量的5%—8%，使再生沥青PG分级达到原样沥青标准^[2]。添加Sasobit温拌剂降低拌和温度30℃，单吨混合料燃料消耗

减少12公斤,施工期碳排放降低19%。

工业固废利用:云南地区利用磷渣、电石渣等固废制备无机胶结料,替代30%水泥用量。试验段28天抗压强度达42.3MPa,碳减排效果显著。具体技术路径:通过机械粉磨(比表面积 $\geq 450\text{m}^2/\text{kg}$)与化学激发(添加1% Na_2SO_4),提高固废水化活性。将磷渣(40%)、电石渣(30%)、矿渣(20%)、水泥(10%)按比例复合,制备低碳胶凝材料。掺入0.5%聚丙烯纤维,将抗裂指数提高至1.2,延长结构使用寿命。

建筑垃圾再生:广昆高速项目采用移动式破碎筛分设备,将废旧混凝土破碎为再生骨料,用于路基填筑和预制构件生产,再生利用率达92%。技术要点包括:采用风选-磁选-水洗联合工艺,去除再生骨料中木材、塑料、钢筋等杂质,纯净度 $\geq 95\%$ 。通过正交试验确定再生骨料级配范围(粗骨料4.75—19mm,细骨料0—4.75mm),满足C30混凝土配制要求。掺入10%粉煤灰与2%硅灰,将再生混凝土28天抗压强度提升至45MPa,碳化深度降低至3mm。

1.2.3 低碳施工工艺

温拌沥青技术:通过添加有机添加剂降低拌和温度30℃,广昆高速项目单吨混合料燃料消耗减少12公斤,施工期碳排放降低19%。技术参数包括:选用Sasobit(饱和烃类)或Evotherm(化学表面活性剂),掺量为沥青质量的1.5%—3%。基质沥青加热温度140—150℃,集料加热温度160—170℃,拌和温度150—160℃。初压温度 $\geq 130^\circ\text{C}$,终压温度 $\geq 90^\circ\text{C}$,确保压实度 $\geq 98\%$ 。

智能喷淋养护:混凝土养护采用智能喷淋系统,较传统人工养护节水40%,强度达标率提升至98%。系统组成包括:湿度传感器布置于混凝土表面,实时监测湿度变化(精度 $\pm 2\%\text{RH}$)^[3]。变频控制器根据湿度数据自动调节喷淋频率(0.5—2次/小时)与时长(5—15秒/次)。设置地下蓄水池(容积50 m^3),收集雨水用于喷淋,水资源循环利用率达85%。

三联生态边坡:采用物理防护(三维植被网)+抗蚀防护(聚丙烯纤维土)+植被修复(香根草)的复合技术,每10万 m^3 边坡减少圬工防护3.27万 m^3 ,年固碳量增加34.76吨。施工要点包括:在红黏土中掺入20%腐殖质与5%聚丙烯纤维,提高土壤抗冲刷能力(侵蚀模数 $\leq 2000\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$)。选择香根草(根系深度 $\geq 3\text{m}$)、狗牙根(覆盖度 $\geq 95\%$)等深根型植物,形成立体防护网络。在边坡设置台阶式种植槽(宽度1.5m,坡度1:0.75),提高植被存活率至92%。

1.3 运营养护阶段智慧管理

1.3.1 智慧能源管理系统

济南东服务区部署AcrelEMS3.0平台,集成光伏发电监测、储能调度、充电桩管理等功能。系统通过AI算法优化“光-储-充-用”协同策略,实现峰谷套利年收益500万元,绿电自给率100%。系统架构包括:一是数据采集层:安装智能电表(精度0.5S级)、气象站(监测辐照度、温度等参数)、充电桩控制器等设备,实现全要素数据采集。二是云平台层:基于阿里云构建能源管理平台,支持百万级数据点实时处理,响应时间 $\leq 500\text{ms}$ 。三是应用层:开发负荷预测(误差 $\leq 5\%$)、储能优化(SOC波动范围 $\pm 5\%$)、设备调度(优先级排序算法)等模块,提升能源利用效率。

1.3.2 低碳养护技术

深层病害无损修复:采用高分子聚合物注浆技术处理基层空洞,较传统铣刨重铺减少废料产生90%,修复后路面使用寿命延长5—8年。技术流程包括:利用探地雷达(中心频率400MHz)与落锤式弯沉仪(FWD)检测基层脱空位置(深度误差 $\leq 5\text{cm}$)。选用双组分聚氨酯(A组分:多异氰酸酯;B组分:聚醚多元醇),按体积比1:1混合,30分钟内完成固化^[4]。采用分级加压工艺(初始压力0.5MPa,终压1.5MPa),确保浆液填充密实度 $\geq 95\%$ 。

温拌再生养护:就地热再生设备加热软化旧路面,掺入15%新沥青和再生剂,实现快速开放交通。杭绍甬高速试验段显示,该技术较传统工艺减少碳排放28%。关键参数包括:采用红外线加热板(功率200 kW/m^2),将路面温度升至160—180℃,避免沥青老化。设置耙松齿间距10cm,深度4—6cm,确保新旧沥青充分混合。采用双钢轮振动压路机(激振力300kN)与轮胎压路机(轮胎充气压力0.6MPa)联合压实,空隙率控制在3%—5%。

1.3.3 路域碳汇提升

眉县服务区通过“乔木+灌木+地被”立体绿化模式,种植银杏、竹子等高碳汇植物,绿化覆盖率提升至45%,年固碳量达1200吨。同时,采用生物炭改良土壤,使土壤有机碳含量提高18%。具体措施包括:选择固碳能力强的树种(银杏:28 $\text{kgCO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 、竹子:22 $\text{kgCO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{a})$),构建复层植被结构。以玉米秸秆为原料,在450℃限氧条件下热解制备生物炭(比表面积300 m^2/g),按5%比例掺入土壤,提高保水保肥能力。通过绿化降温(夏季服务区内部温度较外部低3—5℃)、增湿(相对湿度提高10%—15%),减少空调能耗20%。

2 绿色低碳技术实施保障体系

2.1 组织管理机制

建立“项目公司+设计单位+施工单位+监理单位”四级管理体系。广昆高速项目公司制定《绿色建造考核办法》，将碳排放指标纳入参建单位绩效评价，对超额完成减排目标的单位给予合同价款2%的奖励。具体措施包括：成立由项目经理牵头的绿色建造领导小组，每周召开专题会议协调技术难题。要求各参建单位配备专职碳排放核算员，按月上报能源消耗与碳排放数据。委托中国船级社等权威机构开展年度碳排放核查，确保数据真实可靠。

2.2 标准化建设

交通运输部发布《近零碳交通设施技术要求第2部分：高速公路服务区》（JT/T1537.2-2025），明确服务区碳排放核算边界和减排技术路径。广西出台《高等级公路近零碳服务区设计与施工技术规程》，规定光伏装机容量不低于2MW、储能系统容量不低于2MWh等量化指标。标准体系包括：制定《装配式桥梁预制构件生产技术规范》《温拌沥青路面施工技术指南》等12项地方标准。发布《绿色建造项目管理体系实施指南》《碳排放监测与核算管理办法》等8项管理文件。建立《高速公路改扩建工程绿色低碳评价标准》，设置资源节约、环境友好、经济可行等3个一级指标、15个二级指标。

2.3 政策激励机制

国家层面将绿色施工技术应用率纳入项目招投标评分体系，对采用装配式结构、温拌沥青等技术的项目给予10%—15%的财政补贴。山东省推行“碳积分”制度，企业每减少1吨碳排放可兑换0.5分，优先参与后续项目投标。政策工具包括：对购买电动施工机械的企业给予

30%购置补贴，对建设分布式光伏的项目提供0.3元/Wh的发电补贴。对使用再生材料的企业减免增值税（税率从13%降至9%），对开展碳捕集利用的企业给予所得税减免（按15%税率征收）。鼓励银行开发“碳减排专项贷款”，对符合条件的项目提供低息贷款（利率下浮10%—20%）。

3 结语

高速公路改扩建绿色低碳技术体系经全生命周期协同优化可显著降低碳排放强度，关键技术有装配式结构工业化生产等，政策标准与组织管理协同是保障；未来技术创新方向包括研发新型建材等，政策完善建议涵盖制定碳配额分配机制等，产业协同路径有构建一体化联盟等。

参考文献

- [1]周盛,苗乾.高速公路改扩建绿色低碳建造技术探索[J].交通节能与环保,2025,21(02):161-165.
- [2]屠轶飞.绿色公路设计理念在高速公路改扩建工程中的应用[J].绿色中国,2025,(10):148-150.
- [3]孙伟民,王红,王祎旻,等.基于绿色公路理念的高速公路改扩建模式决策[J].工程与建设,2023,37(05):1612-1615+1623.
- [4]付凯敏,黄智华,曹林辉.绿色理念在昌九高速公路改扩建工程中的应用实践[C]//中国公路学会,世界交通运输大会执委会,西安市人民政府,陕西省科学技术协会.世界交通运输工程技术论坛(WTC2021)论文集(上).江西赣粤高速公路股份有限公司;江西省交通投资集团有限责任公司,2021:631-635.