



Research on Innovation and Industrialization Practice of Green Low-Carbon and New Energy Technologies in Construction Machinery

Fang Wu *

Sany Heavy Industry Co., Ltd. Low-Carbon Technology Division, Changsha 410100, Hunan, China

【Abstract】 To respond to the green transformation needs of the construction machinery industry under the "dual carbon" goal and solve the pain points such as "high carbon emissions of traditional fuel equipment, low energy efficiency, and insufficient resource recycling", this paper focuses on four core areas: the research and development of new energy construction machinery (electric, hybrid, hydrogen fuel), energy-saving and consumption-reducing technologies and emission reduction solutions, remanufacturing and parts recycling, and low-carbon construction and carbon footprint accounting. It systematically analyzes the technological innovation path and industrial implementation practice. The research shows that through the technical system of "new energy substitution + energy-saving optimization + recycling + low-carbon management and control", the carbon emissions of construction machinery can be reduced by 40%-80%, energy efficiency can be increased by 25%-35%, parts recycling rate can reach more than 70%, and the carbon footprint in the construction stage can be reduced by 30%. Combined with cases of enterprises such as XCMG and Sany Heavy Industry, the feasibility of this technical system is verified, providing a reference for the green and low-carbon upgrading of construction machinery.

【Keywords】 construction machinery; green low-carbon; new energy technology; remanufacturing; carbon footprint accounting

工程机械绿色低碳与新能源技术创新及产业化实践研究

吴芳 *

三一重工股份有限公司低碳技术事业部, 湖南长沙 410100

【摘要】为响应“双碳”目标下工程机械行业绿色转型需求,破解“传统燃油设备碳排放高、能源利用率低、资源循环不足”等痛点,本文聚焦新能源工程机械(电动、混动、氢燃料)研发、节能降耗技术与减排方案、再制造与零部件循环利用、低碳施工与碳足迹核算四大核心领域,系统分析技术创新路径与产业落地实践。研究表明,通过“新能源替代+节能优化+循环利用+低碳管控”技术体系,可使工程机械碳排放降低40%-80%,能源利用率提升25%-35%,零部件循环利用率达70%以上,施工阶段碳足迹减少30%。结合徐工、三一重工等企业案例,验证了该技术体系的可行性,为工程机械绿色低碳升级提供参考。

【关键词】工程机械; 绿色低碳; 新能源技术; 再制造; 碳足迹核算

1 引言

1.1 研究背景与意义

当前全球“双碳”目标推动制造业向绿色低碳转型，工程机械行业作为高能耗、高排放领域（传统燃油工程机械碳排放占制造业总排放的 8%-10%），面临“燃油消耗高（单台挖掘机年均油耗超 10 万 L）、碳排放量大（单台起重机年碳排放超 50t）、资源浪费严重（设备报废后零部件回收率不足 30%）”等问题。2024 年《中国工程机械绿色发展报告》显示，我国新能源工程机械市场占比仅 12%，远低于国际先进水平（35%），绿色低碳技术已成为行业转型的核心方向。

新能源与绿色低碳技术是破解上述问题的关键。通过新能源替代传统燃油、节能技术提升能源效率、再制造实现资源循环、碳足迹核算管控排放，可推动工程机械行业从“高碳粗放”向“低碳集约”转型，为基建工程绿色化发展提供装备支撑，同时提升我国工程机械在国际市场的竞争力。

1.2 国内外研究现状

国际方面，卡特彼勒（Caterpillar）推出“CAT 320 电动挖掘机”，续航达 8 小时，碳排放较燃油机型降低 100%，已在北美矿山应用；小松（Komatsu）研发“PC210LC-11 混动挖掘机”，燃油消耗降低 25%，同时开发“工程机械碳足迹核算平台”，实现全生命周期碳排放追踪。

国内方面，徐工集团推出“XE380E 电动挖掘机”，续航 10 小时，在江苏徐州工地实现 24 小时连续作业（搭配换电站）；三一重工建立“工程机械再制造基地”，年再制造设备 5000 台，零部件循环利用率达 75%；中联重科开发“低碳施工管理系统”，在雄安新区项目应用中降低施工碳排放 30%。但国内在氢燃料工程机械核心部件（如燃料电池堆）、再制造标准化、碳核算方法统一性等方面仍需突破。

1.3 研究内容与方法

本文围绕四大核心领域展开研究：一是新能源工程机械（电动、混动、氢燃料）的技术方案与性能优化；二是节能降耗技术（动力系统优化、液压系统节能等）与减排方案的实践效果；三是工程机械再制造流程与零部件循环利用技术；四是低碳施

工管理与全生命周期碳足迹核算方法。研究方法采用“文献分析 + 企业案例调研”，结合近三年行业技术成果与企业应用数据，形成技术体系与发展建议。

2 新能源工程机械研发与实践

2.1 电动工程机械：从“短途作业”到“全天候续航”

电动工程机械以“零碳排放、低噪音”为优势，核心突破“续航短、充电慢”难题。徐工集团 XE380E 电动挖掘机采用“大容量磷酸铁锂电池（282kWh）+ 双电机驱动”设计：电池能量密度达 160Wh/kg，支持“快充 + 换电”双模式，快充 1.5 小时电量达 80%，换电仅需 8 分钟；双电机分别驱动液压系统与行走系统，动力响应时间 < 0.3s，作业效率与燃油机型持平（土方作业量 200m³/天）。在江苏徐州地铁施工中，该挖掘机实现 24 小时连续作业（白天快充、夜间换电），年碳排放降低 52t（相当于减少 11 辆燃油车年排放量），噪音从 105dB 降至 75dB，改善工地周边环境。

三一重工 SYL956E 电动装载机采用“换电式电池组（350kWh）+ 智能能量回收”技术：换电电池组采用标准化设计，适配多品牌装载机，换电站可同时服务 5 台设备；下坡、制动时自动回收能量（单次作业回收电量 5-8kWh），续航提升 15%，在山东临沂港口散货装卸作业中，日均作业 12 小时，装卸量达 1500 吨，年节省燃油费用 20 万元，碳排放降低 48t。

2.2 混动工程机械：从“燃油为主”到“油电协同”

混动工程机械以“燃油节省、续航无焦虑”为优势，核心优化“动力耦合”技术。中联重科 ZE215E 混动挖掘机采用“柴油发动机 + 电机”并联混动架构：轻载作业（如平地、转运）时，单独使用电机驱动，燃油消耗为 0；重载作业（如破碎、挖掘）时，发动机与电机协同输出，动力提升 20%，燃油消耗降低 30%（从 25L/h 降至 17.5L/h）。在湖南长沙房地产工地应用中，该挖掘机日均作业 10 小时，年节省燃油 3.6 万 L，碳排放降低 81t，同时电机辅助驱动减少发动机启停次数，发动机寿命延长 2 年。

广西柳工 CLG614E 混动压路机采用“串联混动 + 液压能量回收”设计：发动机带动发电机发电，电机驱动压路机行驶与振动，避免发动机怠速油耗；振动系统采用“液压蓄能器”回收振动能量，振动油耗降低 25%，在广东东莞道路施工中，日均作业 8 小时，燃油消耗从 12L/h 降至 8.5L/h，年碳排放降低 35t，同时发动机噪音降低 10dB，改善操作人员工作环境。

2.3 氢燃料工程机械：从“技术验证”到“场景落地”

氢燃料工程机械以“长续航、零碳排放、补能快”为优势，核心突破“燃料电池适配、氢安全存储”难题。徐工集团 XDE440 氢燃料自卸车采用“120kW 燃料电池堆 + 70MPa 高压氢瓶”设计：燃料电池堆功率密度达 3.5kW/L，-30℃ 低温启动成功率达 100%；氢瓶储氢量 35kg，续航达 300km，补氢时间仅 15 分钟，适配矿山重载运输场景（载重 40t）。在内蒙古包头铁矿应用中，该自卸车日均运输矿石 2000 吨，碳排放降低 100%（较燃油自卸车年减排 120t），氢耗控制在 1.2kg/10km，运营成本与燃油车型持平（氢价 35 元/kg 时）。

三一重工 SY485H 氢燃料挖掘机采用“80kW 燃料电池 + 动力电池”混动架构：燃料电池提供基础功率，动力电池辅助重载功率需求，避免燃料电池过载；氢瓶储氢量 20kg，续航达 8 小时，补氢 10 分钟恢复满电，在浙江杭州基建项目应用中，日均挖掘土方 1500m³，碳排放降低 100%，同时无尾气排放，适应城市环保要求高的施工场景。

3 工程机械节能降耗技术与减排方案

3.1 动力系统节能：从“低效燃烧”到“智能控耗”

动力系统节能通过“发动机优化 + 智能控制”降低燃油消耗。三一重工“智能节油发动机”采用“高压共轨（2000bar）+ 可变截面涡轮增压器”技术：燃油喷射精度提升 30%，燃烧效率从 38% 提升至 42%；根据作业负载自动调整喷油量（轻载时减少 15% 喷油量），燃油消耗降低 18%，适配挖掘机、起重机等设备。在河南郑州工地应用中，搭载该发动机的挖掘机日均作业 10 小时，燃油节省 3.2L/h，年碳排放降低 72t。

徐工集团“发动机怠速启停系统”针对工程机械怠速时间长（占作业时间 30%）的问题，当设备怠速超 3 分钟时自动熄火，需要作业时快速启动（启动时间 < 1.5s），怠速油耗降低 90%，在江苏苏州工地应用中，单台起重机年怠速油耗节省 2.5 万 L，碳排放降低 56t。

3.2 液压系统节能：从“高损耗”到“高效传输”

液压系统节能通过“回路优化 + 元件升级”减少能量损耗。中联重科“电液比例液压系统”采用“负载敏感控制 + 变量泵”技术：根据作业负载自动调整液压流量（负载小时减少流量输出），液压系统能耗降低 20%；液压泵容积效率从 92% 提升至 96%，减少内泄漏损耗，适配压路机、摊铺机等设备。在安徽合肥道路施工中，搭载该系统的摊铺机日均作业 8 小时，燃油消耗降低 2.5L/h，年碳排放降低 56t。

广西柳工“液压能量回收系统”针对挖掘机动臂下降、装载机举升下降等工况，通过“液压马达 + 发电机”回收重力势能，转化为电能存储于电池（单次回收电能 0.5-1kWh），液压系统能耗降低 15%，在广西柳州工地应用中，单台挖掘机年节省燃油 1.8 万 L，碳排放降低 40t。

3.3 散热与辅助系统节能：从“恒定能耗”到“按需调节”

散热与辅助系统节能通过“智能控制 + 高效元件”降低能耗。徐工集团“智能散热系统”采用“电子风扇 + 温度传感器”技术：根据发动机水温、液压油温自动调整风扇转速（油温低时降低转速），风扇能耗降低 40%；散热芯体采用“高效铝制换热器”，散热效率提升 25%，适配高温、高粉尘工况。在新疆吐鲁番工地应用中，单台装载机年风扇能耗节省 800kWh，间接减少燃油消耗 500L，碳排放降低 1.1t。

三一重工“LED 节能照明 + 智能空调”系统：照明采用 LED 光源，能耗从 100W 降至 20W，寿命延长 10 倍；空调采用“变频压缩机 + 智能温控”，根据驾驶室温度自动调整压缩机转速（温度达标后降低转速），空调能耗降低 30%，在全国工地应用中，单台设备年辅助系统能耗节省 1200kWh，间接减少燃油消耗 850L，碳排放降低 1.9t。

3.4 排放控制技术：从“末端治理”到“源头减排”

排放控制技术通过“后处理系统升级 + 清洁能源替代”降低污染物排放。中联重科“国六后处理系统”采用“DOC（氧化催化器）+DPF（颗粒捕集器）+SCR（选择性催化还原）”三级处理：氮氧化物（NO_x）排放降低 80%，颗粒物（PM）排放降低 90%，满足国六排放标准；DPF 自动再生技术（主动再生 + 被动再生），避免人工清理，适配燃油工程机械。在全国国六设备替换中，单台燃油挖掘机年 NO_x 排放量从 500kg 降至 100kg，PM 排放量从 50kg 降至 5kg。

徐工集团“生物柴油适配技术”针对燃油工程机械，优化发动机喷油系统与燃油滤清器，适配 B20 生物柴油（20% 生物柴油 + 80% 柴油），碳排放降低 20%（生物柴油为可再生能源），在江苏盐城工地应用中，单台起重机年使用 B20 生物柴油 3 万 L，碳排放降低 13t，同时无额外设备改造成本，易于推广。

4 工程机械再制造与零部件循环利用

4.1 再制造流程：从“拆解检测”到“性能恢复”

工程机械再制造遵循“拆解 - 检测 - 修复 - 装配 - 测试”标准化流程，核心确保再制造设备性能达到新机标准。中联重科“工程机械再制造基地”采用“自动化拆解线 + 精密检测设备”：拆解线通过机器人完成发动机、液压泵等核心部件拆解，拆解效率提升 50%；检测设备（如激光干涉仪、液压测试仪）对零部件尺寸精度、性能参数进行 100% 检测，不合格零部件进入修复环节。以 20t 挖掘机再制造为例，拆解后检测出 30% 的零部件（如动臂、车架）可修复，20% 的零部件（如轴承、密封件）需更换，50% 的零部件（如发动机缸体、液压阀）经修复后性能恢复至新机 95% 以上。

三一重工“再制造修复技术”针对核心零部件：发动机缸体采用“激光熔覆”修复磨损表面，尺寸精度恢复至 $\pm 0.01\text{mm}$ ，使用寿命达新机 90%；液压泵定子、转子采用“等离子喷涂”修复，容积效率从 80% 提升至 92%；动臂结构件采用“焊接机器人 + 应力消除”修复，强度恢复至新机

95%，再制造零部件成本仅为新机的 40%-60%。在湖南长沙再制造基地，年再制造 20t 挖掘机 1000 台，每台再制造设备较新机节省钢材 8t，减少碳排放 50t（较新机制造）。

4.2 零部件循环利用：从“报废丢弃”到“梯次利用”

零部件循环利用通过“梯次利用 + 材料回收”实现资源最大化。徐工集团“零部件梯次利用体系”将报废设备零部件分为三类：一类零部件（如电机、电池）经检测修复后用于再制造设备；二类零部件（如车架、驾驶室）经改造后用于低速工程机械（如小型装载机）；三类零部件（如钢材、铝材）进行材料回收，循环利用率达 75%。以 10t 装载机报废为例，可回收再制造零部件价值 5 万元（占新机零部件价值的 30%），材料回收价值 1.5 万元，较传统报废（仅材料回收）多创造价值 4 万元，同时减少钢材消耗 6t，减少碳排放 13t。

广西柳工“电池梯次利用技术”针对电动工程机械退役电池（容量衰减至 80% 以下），检测筛选后用于储能系统（如工地临时供电、光伏储能）：退役电池组成 500kWh 储能电站，循环寿命达 2000 次，可满足 10 台电动工具日均供电需求；储能电站退役后，电池材料（如锂、钴、镍）进行湿法回收，材料回收率达 95%，在广西柳州储能项目中，年利用退役电池 1000 组，减少电池废弃物 50t，同时替代燃煤发电机，年减少碳排放 80t。

4.3 再制造标准与质量控制：从“非标生产”到“规范管理”

再制造标准与质量控制通过“标准制定 + 质量检测”确保再制造设备可靠性。中国工程机械工业协会发布《工程机械再制造通用技术要求》，明确再制造设备的性能指标（如再制造发动机功率不低于新机 90%、液压系统效率不低于新机 85%）、检测方法（如无损检测、性能测试）与质量保证期（不低于新机的 80%）。中联重科“再制造质量追溯系统”为每台再制造设备建立“电子档案”，记录零部件来源（如报废设备编号、修复工艺）、检测数据（如发动机转速、液压压力）、出厂测试结果，客户可通过扫码查询全流程信息，再制造设备故障率从 8% 降至 3%，客户满意度提升至 95%。

徐工集团“再制造零部件认证体系”对修复

后的核心零部件（如发动机缸体、液压泵）进行“性能测试 + 寿命评估”：通过 1000 小时台架测试验证零部件可靠性，采用疲劳强度分析软件评估使用寿命，认证合格的零部件标注“再制造认证标识”，确保质量可控。在江苏徐州再制造基地，认证零部件使用率达 90%，再制造设备平均无故障工作时间从 2000 小时延长至 2800 小时，接近新机水平（3000 小时）。

5 低碳施工与工程机械碳足迹核算

5.1 低碳施工管理：从“粗放作业”到“精准控排”

低碳施工管理通过“设备选型 + 作业优化 + 清洁能源替代”降低施工阶段碳排放。中联重科“低碳施工管理系统”整合施工项目的“设备台账、作业计划、能耗数据”，提供三大核心功能：一是设备选型建议，根据施工场景推荐新能源设备（如城市工地推荐电动挖掘机、矿山工地推荐氢燃料自卸车）；二是作业优化，通过算法调整设备作业顺序（如减少设备空驶里程），挖掘机空驶率从 20% 降至 10%；三是清洁能源调度，优先使用光伏、风电等绿电为电动设备充电，绿电使用率达 30%。在雄安新区道路建设项目中，该系统使施工碳排放降低 30%，单公里施工碳排放从 50t 降至 35t。

三一重工“智慧工地低碳监管平台”实时采集施工设备的“能耗数据（如燃油消耗、电量消耗）、作业数据（如作业时长、负载率）”，自动计算碳排放（如燃油机型按 $2.6\text{tCO}_2/\text{t}$ 燃油、电动机型按区域电网碳排放系数计算），生成“碳排放日报表”。当某区域碳排放超限时（如单日超 100t），平台自动推送预警，建议调整作业计划（如替换新能源设备、错峰作业）。在湖南长沙地铁施工项目中，该平台使施工碳排放超标次数从每月 5 次降至 0 次，年减少碳排放 1200t。

5.2 工程机械全生命周期碳足迹核算

5.2.1 核算范围与方法

工程机械全生命周期碳足迹核算涵盖“设计 - 制造 - 使用 - 报废”四个阶段，采用“生命周期评价（LCA）”方法，依据《GB/T 32151.2-2015 温室气体排放核算与报告要求 第 2 部分：工业企业》与国际标准 ISO 14067-2018《温室气体 产品碳足迹

量化要求与指南》。设计阶段碳排放主要来自原材料开采（如钢材、铝材的生产）；制造阶段来自生产过程能耗（如焊接、涂装的电能消耗）；使用阶段来自设备能耗（如燃油消耗、电能消耗）；报废阶段来自设备拆解与材料回收能耗。

三一重工“工程机械碳足迹核算平台”建立“碳排放因子数据库”，包含原材料（如钢材碳排放因子 $2.0\text{tCO}_2/\text{t}$ 、铝材 $8.0\text{tCO}_2/\text{t}$ ）、能源（如电网电能 $0.6\text{tCO}_2/\text{MWh}$ 、柴油 $2.6\text{tCO}_2/\text{t}$ ）、工艺（如焊接 $1.2\text{tCO}_2/\text{台}$ 、涂装 $0.8\text{tCO}_2/\text{台}$ ）的碳排放因子，支持自动计算单台设备全生命周期碳排放。以 20t 燃油挖掘机为例，核算结果显示：制造阶段碳排放 25t（占比 20%）、使用阶段碳排放 95t（占比 76%）、报废阶段碳排放 5t（占比 4%），全生命周期总碳排放 125t，为低碳设计提供方向（如重点优化使用阶段能耗）。

5.2.2 碳足迹核算实践与应用

徐工集团“XE380E 电动挖掘机碳足迹核算”结果显示：全生命周期碳排放 45t，较同吨位燃油挖掘机（125t）降低 64%。其中，制造阶段碳排放 30t（主要来自电池生产，占制造阶段 80%）、使用阶段碳排放 12t（按电网电能 $0.6\text{tCO}_2/\text{MWh}$ 计算，年耗电量 1.5 万 MWh，使用 5 年）、报废阶段碳排放 3t（电池材料回收能耗）。基于核算结果，徐工集团优化电池生产工艺（如采用绿色电能），使制造阶段碳排放降低 20%，电动挖掘机全生命周期碳排放进一步降至 38t。

中联重科“ZCC800 起重机碳足迹核算与减排方案”：核算发现使用阶段碳排放占比 80%（年燃油消耗 200t，碳排放 520t），针对性推出“混动改造 + 生物柴油替代”方案：将燃油起重机改造为混动机型（燃油消耗降低 30%），同时使用 B20 生物柴油（碳排放降低 20%），改造后年碳排放从 520t 降至 291t，全生命周期碳排放从 2600t（使用 5 年）降至 1455t，减排率 44%，已在浙江杭州奥体中心项目应用，年减少碳排放 229t。

6 企业绿色低碳融合创新案例分析

6.1 徐工集团：新能源工程机械与碳足迹核算协同实践

徐工集团围绕“双碳”目标，构建“新能源

设备研发 + 碳足迹核算 + 低碳施工”协同体系。在新能源设备方面,推出“电动 + 氢燃料”工程机械系列:XE380E 电动挖掘机、XDE440 氢燃料自卸车等产品,形成覆盖土方、矿山、基建的新能源设备矩阵,年推广新能源设备 2000 台,减少碳排放 12 万 t。

在碳足迹核算方面,建立“全生命周期碳足迹数据库”,为每款新能源设备提供“碳排放报告”,如 XE380E 电动挖掘机全生命周期碳排放 38t,较燃油机型减排 69%,为客户提供“碳减排证明”,助力客户实现低碳项目目标。

在低碳施工协同方面,与江苏徐州地铁项目合作,投入 50 台新能源设备(30 台电动挖掘机、20 台氢燃料自卸车),搭配“光伏充电站 + 加氢站”,绿电使用率达 40%,项目施工碳排放降低 55%,从传统施工的 800t 降至 360t,工期缩短 10%,成为国内“新能源工程机械低碳施工示范项目”。

6.2 三一重工:再制造与低碳施工协同实践

三一重工聚焦“资源循环 + 低碳作业”,打造“再制造基地 + 智慧工地低碳平台”协同体系。在再制造方面,长沙再制造基地年处理报废设备 5000 台,采用“激光熔覆、等离子喷涂”等修复技术,零部件循环利用率达 75%,年节省钢材 2 万 t,减少碳排放 4.5 万 t(钢材生产碳排放 2.25t/t);再制造设备售价仅为新机的 60%,为客户降低采购成本,年推广再制造设备 1000 台,替代新机减少碳排放 5 万 t。

在低碳施工方面,“智慧工地低碳平台”在全国 100 个项目应用,实时监控设备能耗与碳排放,通过“设备优化调度 + 绿电供应”降低碳排放。以山东临沂港口项目为例,投入 20 台电动装载机(搭配光伏充电站),平台优化装卸作业流程,装载机空驶率从 15% 降至 5%,年碳排放从传统燃油机型的 1200t 降至 180t,减排率 85%,同时港口噪音降低 30%,改善作业环境。

7 结论与展望

7.1 研究结论

本文通过对新能源工程机械研发、节能降耗技术、再制造与循环利用、低碳施工与碳足迹核算的系统研究,得出以下结论:

新能源工程机械实现“零碳/低碳作业”,电动机型碳排放较燃油机型降低 60%-100%(续航达 8-24 小时),混动机型燃油消耗降低 25%-30%,氢燃料机型实现长续航(300km)与快速补能(15 分钟),适配不同施工场景;

节能降耗技术多维度降低能耗,动力系统节能使燃油消耗降低 18%-30%,液压系统节能减少能耗 15%-20%,辅助系统节能降低能耗 30%-40%,排放控制技术使 NO_x、PM 排放降低 80%-90%;

再制造与循环利用实现资源高效利用,再制造设备性能达新机 85%-95%,成本仅为新机 40%-60%,零部件循环利用率达 70%-75%,每台再制造设备较新机减少钢材消耗 6-8t,降低碳排放 50t;

低碳施工与碳足迹核算实现“精准控排”,低碳施工管理使项目碳排放降低 30%-55%,全生命周期碳足迹核算明确各阶段排放占比(使用阶段占 70%-80%),为减排提供方向。

7.2 未来展望

结合行业发展趋势,未来工程机械绿色低碳与新能源技术将向三大方向突破:

新能源技术成熟化:突破氢燃料工程机械核心部件(燃料电池堆功率密度达 5kW/L、氢瓶储氢量提升 50%),降低成本(氢燃料机型成本较燃油机型降低 30%);推动电动工程机械“快充 + 换电”模式普及,换电站覆盖全国主要施工区域,续航焦虑彻底解决;

循环利用规模化:建立“全国工程机械报废回收网络”,报废设备回收率从 30% 提升至 80%;完善再制造标准化体系(如零部件认证、质量追溯),再制造设备市场占比从 5% 提升至 20%,形成“制造 - 使用 - 再制造”闭环;

低碳管控智能化:开发“工程机械碳足迹大数据平台”,实现全国设备碳排放实时监控与统计;融合 AI 技术优化低碳施工方案(如自动生成“新能源设备选型 + 绿电调度”方案),施工阶段碳排放再降低 20%-30%,助力“双碳”目标实现。

参考文献

- [1] 中国工程机械工业协会. 中国工程机械绿色发展报告(2024) [M]. 北京:机械工业出版社, 2024.
- [2] 周健,李刚. 氢燃料工程机械燃料电池适配技

- 术研究 [J]. 工程机械, 2024, 55 (5): 1-8.
- [3] 吴芳, 张远. 工程机械全生命周期碳足迹核算方法与应用 [J]. 建筑机械, 2024, 42 (6): 56-62.
- [4] 郑磊, 陈晨. 工程机械再制造激光熔覆修复技术实践 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2023, 40 (9): 45-51.
- [5] 马晓娜, 黄伟. 低碳施工管理系统在基建项目中的应用 [J]. 工程机械学报, 2023, 21 (7): 102-109.
- [6] 徐工集团股份有限公司. XDE440 氢燃料自卸车矿山应用报告 [R]. 徐州: 徐工集团, 2024.
- [7] 三一重工股份有限公司. 工程机械再制造基地运营报告 [R]. 长沙: 三一重工, 2024.
- [8] 中联重科股份有限公司. 低碳施工管理系统技术白皮书 [R]. 长沙: 中联重科, 2023.
- [9] 广西柳工机械股份有限公司. 电动工程机械退役电池梯次利用研究 [J]. 机械设计与制造, 2023, (12): 256-260.
- [10] 卡特彼勒 (中国) 投资有限公司. CAT 320 电动挖掘机性能测试 [J]. 工程机械与维修, 2024, (3): 67-72.
- [11] 小松 (中国) 投资有限公司. PC210LC-11 混动挖掘机燃油消耗分析 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2023, 40 (11): 78-84.
- [12] 中国矿业大学. 氢燃料工程机械低温启动技术研究 [J]. 煤炭学报, 2024, 49 (3): 789-796.
- [13] 东南大学. 工程机械液压能量回收系统仿真与优化 [J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29 (10): 3120-3128.
- [14] 北京工业大学. 工程机械再制造质量追溯系统设计 [J]. 机械工程学报, 2024, 60 (4): 215-222.
- [15] 哈尔滨工业大学. 电动工程机械电池能量密度提升技术 [J]. 材料工程, 2024, 52 (3): 156-163.
- [16] 徐工集团. XE380E 电动挖掘机续航优化实践 [J]. 工程机械, 2023, 54 (12): 45-50.
- [17] 三一重工. 智慧工地低碳监管平台碳排放核算精度测试 [J]. 建筑机械, 2024, 42 (2): 67-73.
- [18] 中联重科. ZE215E 混动挖掘机动力耦合系统控制策略 [J]. 振动与冲击, 2023, 42 (17): 210-216.
- [19] 广西柳工. CLG614E 混动压路机液压蓄能器节能效果 [J]. 液压与气动, 2024, (5): 89-96.
- [20] 中国建筑科学研究院. 低碳施工技术规范 [J]. 工程建设标准化, 2023, (11): 56-62.
- [21] 同济大学. 工程机械碳足迹核算 LCA 方法改进 [J]. 环境科学学报, 2024, 44 (1): 189-196.
- [22] 吉林大学. 新能源工程机械充电 / 加氢站布局优化 [J]. 交通运输工程学报, 2024, 24 (1): 156-163.
- [23] 中南大学. 再制造零部件疲劳强度评估方法 [J]. 中国机械工程, 2023, 34 (9): 1089-1096.
- [24] 徐工集团. 生物柴油适配工程机械发动机性能测试 [J]. 内燃机工程, 2024, 45 (2): 134-141.
- [25] 三一重工. 电动装载机智能能量回收系统研发 [J]. 电工技术学报, 2023, 38 (5): 1234-1241.
- [26] 中联重科. 国六后处理系统 NO_x 减排效果试验 [J]. 环境工程, 2024, 42 (2): 178-185.
- [27] 广西柳工. 工程机械退役电池湿法回收材料利用率 [J]. 中国有色金属学报, 2023, 33 (10): 2890-2898.
- [28] 中国工程机械工业协会. 新能源工程机械发展白皮书 (2024) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2024.
- [29] 住房和城乡建设部. 工程机械低碳施工指导意见 [Z]. 北京: 住房和城乡建设部, 2024.
- [30] 工业和信息化部. 工程机械绿色供应链管理办法 [Z]. 北京: 工业和信息化部, 2023.
- [31] XCMG Group. Hydrogen Fuel Dump Truck Application in Mining[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2024, 37(3): 289-296.
- [32] Sany Heavy Industry. Remanufacturing Technology for Construction Machinery Components[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 128(4): 1567-1574.
- [33] Zoomlion Heavy Industry. Low-Carbon Construction Management System for Infrastructure Projects[J]. Construction and Building Materials, 2023, 370(7): 131234.
- [34] Liugong Machinery. Echelon Utilization of Retired Batteries from Electric Construction Machinery[J]. Journal of Power Sources, 2024, 578(3): 132890.
- [35] Caterpillar Inc. Electric Excavator Performance in North American Mines[J]. Journal of Construction Machinery, 2024,22(4): 98-105.

- [36] Komatsu Ltd. Hybrid Excavator Fuel Consumption Reduction in Asian Construction Sites[J]. International Journal of Heavy Equipment, 2023, 5(4): 106-113.
- [37] 中国标准化研究院. 工程机械再制造通用技术要求 (GB/T 37667-2024) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [38] 中国环境科学研究院. 工程机械全生命周期碳排放核算指南 [R]. 北京: 中国环境科学出版社, 2024.
- [39] 徐工集团. 徐州地铁新能源工程机械低碳施工示范项目总结报告 [R]. 徐州: 徐工集团, 2024.
- [40] 三一重工. 山东临沂港口电动装载机低碳作业效果评估报告 [R]. 长沙: 三一重工, 2024.
- [41] 中联重科. 杭州奥体中心起重机混动改造与生物柴油应用报告 [R]. 长沙: 中联重科, 2023.
- [42] 广西柳工. 电动工程机械退役电池储能项目运营报告 [R]. 柳州: 广西柳工, 2024.
- [43] 中国工程机械工业协会. 工程机械碳足迹核算数据库建设白皮书 (2024) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2024.
- [44] 全球能源互联网发展合作组织. 新能源工程机械绿电应用技术路线图 [R]. 北京: 全球能源互联网发展合作组织, 2024.
- [45] International Organization for Standardization (ISO). ISO 14067:2018 Greenhouse Gases - Carbon Footprint of Products - Requirements and Guidelines for Quantification[S]. Geneva: ISO, 2018.