

屠怡倩, 刘洪波, 李润山. 大口径排水管道非开挖修复技术的碳足迹核算方法构建与应用[J]. 净水技术, 2026, 45(6): 157-162.

Tu Y J, Liu H B, Li R S. Construction and application of carbon footprint calculation method in trenchless rehabilitation technology for large-diameter drainage pipelines[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(6): 157-162.

大口径排水管道非开挖修复技术的碳足迹核算方法构建与应用

屠怡倩¹, 刘洪波^{2,*}, 李润山²

(1. 上海市城市建设设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200125; 2. 上海理工大学环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要 【目的】 节能降碳、实现“双碳”目标是环境领域关注的重点问题, 其中, 排水管道修复工程作为城乡基础设施的一部分, 在节能降碳方面有着巨大潜力, 因此探究管道修复工程的碳足迹核算方法尤为关键。本文旨在探究大口径城市排水主管非开挖修复工程的碳足迹核算方法, 可为工程项目减少碳排放提供参考。【方法】 本文针对大口径排水管道修复过程中的高碳排放问题, 构建了覆盖制造、运输、施工、运营四阶段的全生命周期碳足迹模型, 量化了华东某大口径排水主管不锈钢管片内衬修复工程的环境负荷。【结果】 通过能耗、物料消耗数据间接计算得出修复长度为 1 019 m 的 DN3500 大口径排水管道的全生命周期碳排放量为 1.62×10^7 kg CO₂-e, 仅为明挖法的 33%, 主要的碳排放来源是钢材生产阶段和全过程的电能消耗。钢材生产环节是最大的环境压力来源, 在人类健康、气候变化、资源消耗和生态系统质量 4 大方面均占主导地位。进一步探究发现, 钢材生产的环境影响主要集中在有毒物质排放、资源消耗和温室气体排放 3 类。【结论】 大口径排水管道修复工程, 相比明挖法, 非开挖修复方案具有环境友好的优势, 可以有效实现节能降碳, 影响大口径排水管道非开挖修复碳排放的关键因素是材料生产和电能消耗。提出减排建议如下: 因地制宜地采用环境友好型修复材料; 加强施工过程管理, 合理分配电力使用; 供应链方面, 采用绿色认证供应商, 减少材料运输半径, 使用新能源运输车辆。

关键词 排水管道; 非开挖修复技术; 碳足迹; 全生命周期; 节能降碳

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)06-0157-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.06.018

Construction and Application of Carbon Footprint Calculation Method in Trenchless Rehabilitation Technology for Large-Diameter Drainage Pipelines

Tu Yiqian¹, Liu Hongbo^{2,*}, Li Runshan²

(1. Shanghai Urban Construction Design and Research Institute <Group> Co., Ltd., Shanghai 200125, China;

2. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract [Objective] Energy conservation and carbon reduction, as well as achieving the goal of “dual carbon” are the key issues in environmental field. Among them, the drainage pipeline repair project, as a part of the basic construction facilities in urban and rural areas, has great potential in energy conservation and carbon reduction. Therefore, it is particularly crucial to explore the carbon footprint accounting method for pipeline repair projects. This paper aims to explore the carbon footprint accounting method for large-diameter urban drainage main pipe trenchless rehabilitation projects, which can provide a reference for reducing carbon emissions in engineering projects. [Methods] This paper aimed at addressing the high carbon emission issue during the repair process of large-diameter drainage pipes. A full life cycle carbon footprint model covering the manufacturing, transportation, construction and operation stages was established. The environmental load of a certain large-diameter drainage main pipe with stainless steel lining repair project in east China was quantified. [Results] The carbon emissions throughout the entire life cycle of the DN3500 large-diameter drainage pipeline with a repair length of 1 019 m were calculated indirectly based on energy consumption and material consumption data,

[收稿日期] 2025-07-24

[作者简介] 屠怡倩(1981—), 女, 高级工程师, 主要从事给排水工程等工作, E-mail: 68739524@qq.com。

[通信作者] 刘洪波(1979—), 男, 教授, 研究方向为水污染控制理论与技术, E-mail: Liuhb@usst.edu.cn。

amounting to 1.62×10^7 kg CO₂-e, which was only 33% of that of the open-cut method. The main sources of carbon emission were the steel production stage and the overall electricity consumption throughout the process. The steel production stage was the primary source of environmental pressure, dominating in four aspects: human health, climate change, resource consumption, and ecosystem quality. Further investigation revealed that the environmental impact of steel production mainly concentrated on three categories: toxic substance emissions, resource consumption, and greenhouse gas emission. [**Conclusion**] Large-diameter drainage pipeline repair projects, compared with the open-cut method, the non-intrusive repair solution has the advantage of being environmentally friendly, and can effectively achieve energy conservation and carbon reduction. The key factors affecting the carbon emissions of trenchless rehabilitation of large-diameter drainage pipelines are material production and electricity consumption. The following emission reduction suggestions are proposed: adopt environmentally friendly repair materials based on local conditions; strengthen construction process management and reasonably allocate power usage; purchase green-certified suppliers, reduce the material transportation radius, and use new energy transportation vehicles in the supply chain.

Keywords drainage pipeline; trenchless rehabilitation technology; carbon footprint; full life cycle; energy conservation and carbon reduction

随着经济的增长,全球碳排放量显著增加,导致全球气候变暖持续加剧、极端天气频发。为应对这些问题,我国提出了节能降碳的中国方案。《城乡建设领域碳达峰实施方案》中提出:2030年前需实现城乡建设领域碳排放总量达峰。在此进程中,管道修复施工作为城乡基础设施更新的关键工序,因其涉及材料循环利用、能耗控制等核心环节,成为城市更新中不可替代的节能减排重点领域^[1]。大口径排水管道作为城市市政工程的核心组成部分,地下综合管廊系统通过能源流、水流、信息流的协同传输,承担着维持城市系统韧性运行、防范公共安全风险、提升居民生活质量的多重功能。然而,伴随管道使用年限的增长,由腐蚀、老化、破损等问题引发的结构劣化,叠加内外压力作用,使得管道事故呈现多发趋势。为实现事故预防目标,需建立常态化检查维护制度,及时开展修复工作^[2]。管道修复过程中的材料生产、运输、施工和使用维护会产生大量碳排放^[3],为贯彻落实国家碳达峰战略部署,亟需构建市政管道全生命周期管理体系,通过推广低碳化修复技术体系,系统性降低管网更新过程的碳排放强度,为城市绿色低碳发展提供基础设施支撑。

关于管道修复项目碳足迹的文献研究对象往往集中在公称直径小于 1 000 mm 的小口径排水管道^[4-7],对大于 3 000 mm 的大口径排水管道修复过程涉及较少,因此,本文以大口径排水管道全生命周期为研究对象,构建了基于各阶段能耗活动分析的碳足迹核算模型。在此基础上,基于实际的施工过程,本文对非开挖修复中的不锈钢管片内衬修复技术进行了量化碳足迹分析,重点探讨修复技术的环

保性,以及排水管道修复工程实现节能降碳的具体措施。

1 模型构建

1.1 生命周期阶段划分与系统边界

本文构建了大口径排水管道碳足迹核算体系,将全生命周期解构为原料、物流、施工和运维 4 个模块^[8-9]。材料模块主要为钢材、混凝土、玻璃纤维纱、石英砂等修复材料的原料开采、加工制造及初级运输过程。物流模块覆盖原材料从供应商至施工现场的二次运输,平均运输半径为 150 km。施工模块主要是施工设备如挖掘机、水泵等柴油消耗、电力消耗,以及施工废料处置。

1.2 碳排放计算模型

大口径排水管道的碳排放计算模型基于全生命周期评价方法,其生命周期解构为原料、物流、施工和运维 4 个模块。通过统计每个模块化石燃料、电能等消耗,得到具体数据,结合相应的碳排放因子,可以计算得出碳排放量。大口径排水管道全生命周期碳排放计算模型如式(1)。

$$T_E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 \quad (1)$$

其中: T_E ——全生命周期碳排放总量,kg CO₂-e;
 E_1 ——原材料制造阶段碳排放量,kg CO₂-e;
 E_2 ——物流运输阶段碳排放量,kg CO₂-e;
 E_3 ——施工阶段碳排放量,kg CO₂-e;
 E_4 ——运营维护阶段碳排放量,kg CO₂-e。

1.2.1 原料模块

原料模块主要的碳排放计算包括管道的生产过

程以及矿石等的开采和加工,其计算如式(2)。

$$E_1 = \sum_{i=1}^n m_i F_i \quad (2)$$

其中: F_i ——管道材料*i*的排放因子,kg CO₂-e/kg;

m_i ——管道材料*i*的质量,kg。

1.2.2 物流模块

物流模块的碳排放计算,主要考虑运输过程中化石燃料的消耗,利用碳排放因子结合式(3)直接计算得出。车辆的运输状态常常是波动的^[10],需要引入根据式(4)计算得到的修正因子来调整计算结果。

$$E_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \eta_{ij} m_j l_{ij} n_{ij} e_j F \quad (3)$$

其中: η_{ij} ——运输物品*i*通过运输方式*j*的修正因子;

l_{ij} ——运输物品*i*通过运输方式*j*的运输距离,km;

n_{ij} ——运输物品*i*通过运输方式*j*的运输次数;

m_j ——运输方式*j*的满载质量,t;

e_j ——隐含能量系数,MJ/(t·km),通常认为柴油卡车的隐含能量系数取值为2.432 MJ/(t·km);

F ——能源排放因子,kg/MJ。

$$\eta_{ij} = \frac{m_l + m_j}{m_j + m_{we}} \quad (4)$$

其中: m_l ——车辆*l*实际载重,t;

m_j ——运输方式*j*的满载重量,t;

m_{we} ——车辆整备重量,t。

1.2.3 施工模块

此模块的碳排放量主要由施工设备使用、回填材料生产和运输等碳正活动组成,施工模块的计算如式(5)。

$$E_3 = E_{31} + E_{32} + E_{33} \quad (5)$$

其中: E_{31} ——现场设备使用过程产生的碳排放,kg CO₂-e;

E_{32} ——回填材料运输过程产生的碳排放,kg CO₂-e;

E_{33} ——回填材料生产过程产生的碳排放,kg CO₂-e。

施工设备使用过程中产生的碳排放需要统计设备使用所需的能源种类和数量,通过式(6)间接计算得出。

$$E_{31} = \sum_{k=1}^l l_n t_n e_n F \quad (6)$$

其中: l_n ——设备*n*的负载系数;

t_n ——设备*n*总使用时长,h;

e_n ——设备*n*的单位能耗系数,kW·g/(kW·h)。

1.2.4 运营维护阶段

管道运营维护阶段的碳排放主要由泵送能耗、维护活动构成。本模型主要针对大口径的重力流排水管道,重力流排水管道输送污水所需的能耗远小于其他模块,为方便计算,在本模型中可以忽略不计。根据该市管道维护人员经验,对城市主干的大口径管道,每年进行2次高压清洗,持续时间约为0.5 d,产生的碳排放量远小于其他模块,为方便计算,在本模型中可以忽略不计。

1.3 数据来源

数据库采用 Ecoinvent3.8 数据库,匹配我国本土碳排放因子,具体参数选择如表1所示。

表1 相关参数选择

Tab. 1 Selection of Relevant Parameters

项目	参数
电力消耗	0.583 kg CO ₂ -e/(kW·h)
钢材生产	2 240 kg CO ₂ -e/t
碳酸钙煅烧	0.44 kg/kg
高温熔融	13.5 MJ/kg
施工机械柴油消耗	0.6 L/m ³

1.4 环境影响分配方法

采用过程层级分割法,将复合材料的碳排放按质量比例分配至各组分。例如,钢材生产的碳排放中,矿石开采贡献62%、熔融能耗占比为35%、运输占比为3%,该方法通过 SimaPro9.5 软件内嵌模型实现,并利用 IPCC2021GWP100 模型完成特征化计算,确保与全球碳核算标准兼容。

2 管道碳足迹核算

2.1 管道修复过程碳足迹

本次研究对象为华东某大口径排水主干管道,管

径为 DN3500,壁厚为 30 mm,修复长度为 1 019 m,平均埋深为 15 m,主要工艺为不锈钢管片内衬修复。对管道拆除阶段的碳排放计算高度依赖最终处置方式,混凝土、钢材等回收产生碳抵扣可以冲抵管道生命周期末期拆除阶段使用设备的碳排放量,从而实现基础设施低碳拆除。根据具体施工数据统计(表 2),采用表 1 数据,利用 Simapro9.5 软件计算管道修复过程从原材料生产到管道修复完成的各个阶段的碳排放量如图 1 所示,总碳排放量为 1.62×10^7 kg CO₂-e。根据 Lu 等^[11]获得的明挖法修复工艺碳排放数据推算,不锈钢管片内衬修复的碳排放量约为明挖法修复工艺的 33%,在管道施工技术方面,明挖法的碳排放显著高于非开挖技术。修复过程主要的碳排放源包括电力消耗(1.63×10^6 kg CO₂-e)、低合金钢生产(1.53×10^6 kg CO₂-e)和混凝土生产(2.21×10^5 kg CO₂-e)。在低合金钢生产过程中,原材料生产和电炉生产分别产生了 1.03×10^6 kg CO₂-e 和 2.34×10^5 kg CO₂-e 的碳排放量。原料生产中,镍铁合金和生铁的生产分别产生了 2.18×10^5 kg CO₂-e 和 8.19×10^5 kg CO₂-e 的碳排放量,生铁的生产贡献了 2.17×10^5 kg CO₂-e 的碳排放量。

表 2 施工过程数据清单

数据清单	数值
316L 不锈钢板材质量	9.31×10^5 kg
日平均建材运输距离	160 km
电力总消耗	2×10^7 kW·h
高强度混凝土体积	600 m ³

2.2 环境影响贡献分析

采用 IMPACT 2002+方法对管道修复项目的生命周期评估结果如图 2 所示,4 类环境压力源中,高压电、高强度混凝土、低合金钢和货运卡车对人类健康的贡献总和最高,其次为自然资源消耗和气候变化,而对生态系统的影响相对较小;其中低合金钢生产在 4 个关键损害类别中均为主要影响因素,对人类健康冲击最显著,在管道修复项目的生命周期评估中,钢材生产是最主要的环境影响来源,其影响贯穿整个修复过程,这与文献报道^[11]的一致。

如图 3 所示,钢材生产在总环境影响中占比高达 76.5%,在 4 个关键损害类别中均占据主导地位:对人体健康的影响占 87.70%,主要来自炼钢过程

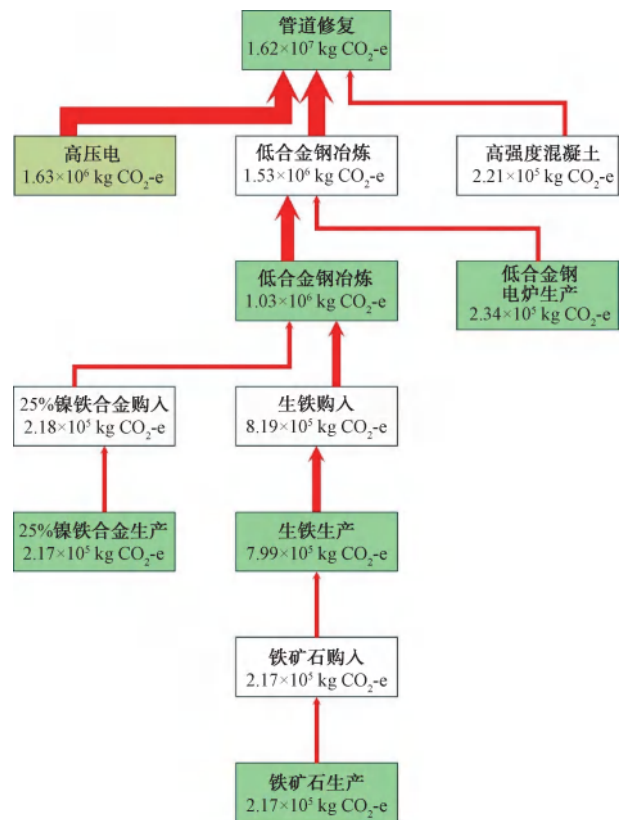


图 1 碳足迹流程图

Fig. 1 Flowchart of Carbon Footprint

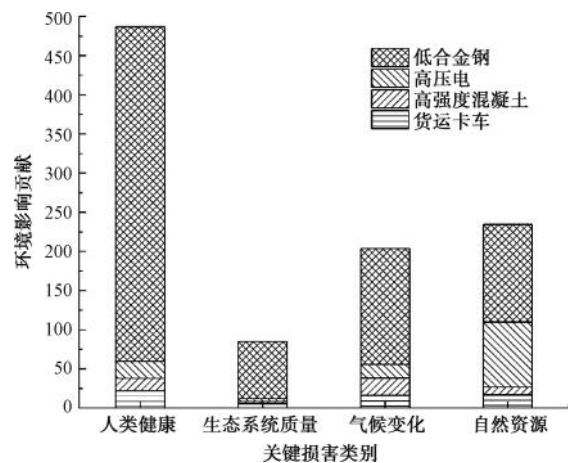


图 2 环境影响贡献图

Fig. 2 Chart of Environmental Impact Contribution

中排放的颗粒物和有毒气体;对气候变化的贡献达 72.60%,主要由高炉炼钢的二氧化碳排放导致;在资源消耗方面占 53.20%,主要涉及铁矿石和焦煤的开采;对生态系统质量的影响占 85.80%。

计算结果显示,该修复过程的总环境影响为 1.009 8 kPt,其中低合金钢材生产贡献最大

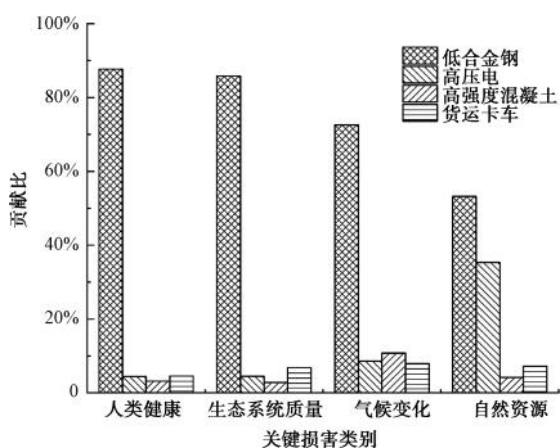


图3 贡献因素分析图

Fig. 3 Analysis Diagram of Contribution Factors

(0.772 5 kPt, 占比为 76.5%)。从损害类别来看, 人体健康影响最为显著(0.486 8 kPt, 占比为 48.2%), 主要受钢材生产(87.8%)影响; 气候变化影响为0.203 6 kPt(占比为 20.2%), 钢材(占比为 72.6%)和混凝土(占比为 10.9%)是主要贡献源; 资源消耗影响达0.234 4 kPt(占比为 23.2%), 钢材(占比为 53.2%)和电力(占比为 35.4%)占主导; 生态系统质量影响相对较小(0.085 0 kPt, 占比为 8.4%), 但仍以钢材生产(占比为 85.7%)为主。钢材生产的环境影响主要集中在3个关键环节, 首先是原料开采阶段, 铁矿石和焦煤的露天开采造成土地破坏和生物多样性丧失表现为土壤酸化和富营养化效应; 其次是炼铁环节, 传统高炉工艺产生大量温室气体和空气污染物; 最后是轧制加工过程, 需要消耗大量能源。值得注意的是, 若采用电炉炼钢工艺并配合清洁电力, 可显著降低环境影响。

2.3 环境影响类别分析与溯源

对管道修复项目进行环境影响类别分析与溯源, 共选取包括全球变暖、淡水富营养化等18种环境影响类别, 结果如图4、图5所示。钢材生产是最大的环境影响贡献者, 在多个损害类别中均占据主导地位。钢材生产表现出跨类别的主导性: 其对全球变暖(>72.94%, 1.55×10^6 kg CO₂-e)、陆地生态毒性[84.93%, 1.14×10^7 kg (1,4-DCB 当量)]和人类致癌毒性[98.37%, 1.25×10^6 kg (1,4-DCB 当量)]的贡献尤为突出。这些毒性影响可能源于炼钢炉渣中六价铬的浸出及冶炼过程的镍排放。电力子系统对臭氧减少[38.71%, 0.35 kg (CFC-11 当量)]和电离辐射[89.50%, 5.72×10^5 kBq (Co-60 当量)]的影响具有显著区域性特征, 反映了我国以煤电为主的能源结构(2023年化石能源占比为63%), 燃煤发电释放的铀/钍系列放射性核素强度为0.3~1.2 Bq/(kW·h)。

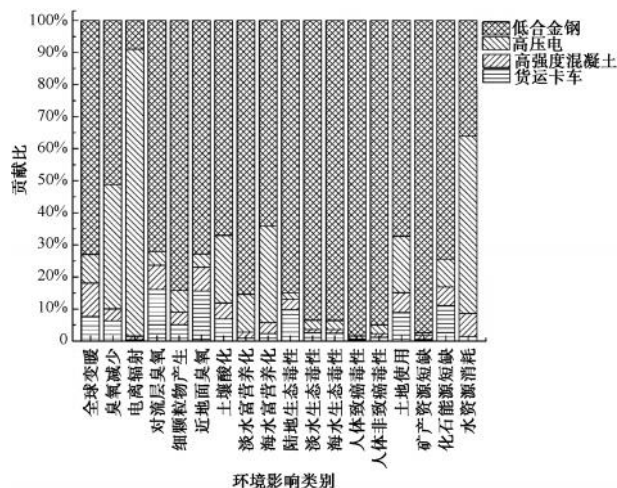


图4 各阶段对不同环境影响类别的贡献比

Fig. 4 Contribution Ratios of Each Stage to Different Categories of Environmental Impacts

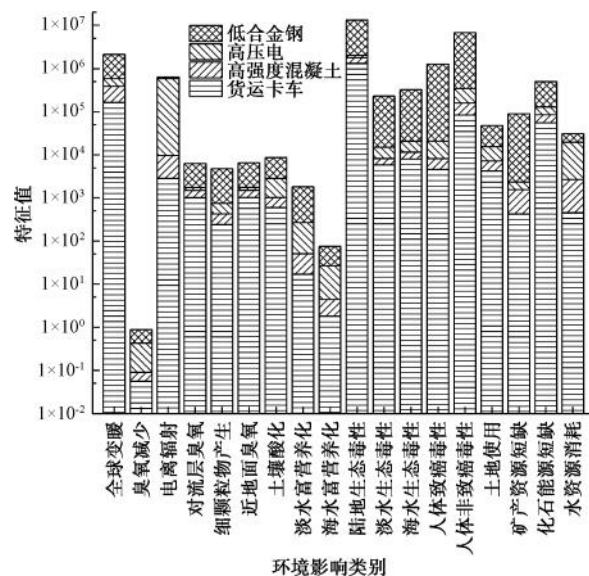


图5 环境影响类别特征化因子

Fig. 5 Characterization Factors for Environmental Impact Categories

分析管道修复项目生命周期中各阶段对不同环境影响类别的贡献比例, 钢材生产在大多数环境影响类别中占据主导地位, 尤其在陆地生态毒性和人体健康影响方面几乎贡献了全部影响。电力消耗在全球变暖和在水资源消耗中具有显著影响, 仅次于钢

材生产。玻纤纱生产和运输在细颗粒物形成和臭氧生成等类别中也有重要贡献。其他因素如混凝土生产和施工废料填埋在某些类别中也有一定影响,但总体较小。总体而言,钢材生产、电力消耗是降低项目环境足迹的关键环节。电力系统对水资源消耗的55.29%贡献($3.09 \times 10^4 \text{ m}^3$)凸显了热电联产冷却需求——燃煤电厂蒸汽循环的耗水强度为 $1.8 \sim 2.3 \text{ L}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。运输环节虽总体占比较低,但对全球变暖(7.68%, $1.63 \times 10^5 \text{ kg CO}_2\text{-e}$)和陆地臭氧生成(15.70%, $1.02 \times 10^3 \text{ kg NO}_x\text{-e}$)有中等影响,这与货车的排放因子[$0.35 \sim 0.42 \text{ kg CO}_2\text{-e}/(\text{t} \cdot \text{km})$]密切相关。

通过特征化与标准化结果的交叉分析,识别出3大环境热点:(1)冶金过程:钢材生产主导15/18个影响类别,在毒性、资源消耗及气候影响中贡献66.99%~98.37%。生命周期清单分析表明,焦化(38%)、烧结(27%)和高炉运行(22%)是主要排放源;(2)能源基础设施:电力系统贡献89.50%的电离辐射和55.29%的水耗,可再生能源的使用可使这些影响降低16%;(3)运输过程优化具有很强的碳减排潜力,加强材料采购管理、选择运输半径小的供应商、采用新能源运输车辆,可使温室气体排放减少40%~60%。

3 结论与展望

本文通过生命周期评价(LCA)方法量化了排水管道修复项目的碳足迹,碳足迹计算结果为 $1.62 \times 10^7 \text{ kg CO}_2\text{-e}$,约为明挖法修复的33%。其中钢材生产和电力消耗是主要碳排放源,分别贡献了72.94%的全球变暖潜力(GWP)和38.71%的臭氧减少风险。建议加强材料选择,优先使用高强度钢和再生钢,可大量减少碳排放;加强施工过程管理,节约电能和化石能源;在供应链管理上,选择绿色认证供应商并优化物流体系。这些措施的实施将有效降低管道修复项目的整体环境足迹,同时建议未来研究可进一步探讨非金属替代材料的应用潜力,以实现更可持续的基础设施维护方案,以推动管道修复技术向低碳化和可持续发展。

参考文献

[1] 中国建筑节能协会建筑能耗与碳排放数据专委会. 中国城乡建设领域碳排放研究报告(2024年版)[R]. 北京: 中国建

筑节能协会, 2024.

The Building Energy Consumption and Carbon Emission Data Committee of the China Building Energy Conservation Association. China's urban and rural construction sector carbon emission research report (2024) [R]. Beijing: China Association of Building Energy Efficiency, 2024.

- [2] Xi D M, Lu H F, Zou X, et al. Development of trenchless rehabilitation for underground pipelines from an academic perspective[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 2024, 144: 105515. DOI: 10.1016/j.tust.2023.105515.
- [3] Fuselli F, Huber S, Mambretti S. Environmental aspects of trenchless pipe rehabilitation methods[J]. *Urban Water Journal*, 2022, 19(8): 879-887.
- [4] Pericault Y, Viklander M, Hedström A. Modelling the long-term sustainability impacts of coordination policies for urban infrastructure rehabilitation[J]. *Water Research*, 2023, 236: 119912. DOI: 10.1016/j.watres.2023.119912.
- [5] Yu X, Hu X D, Xie W, et al. Carbon emission modeling of excavation and non-excavation techniques in overall repair of drainage pipelines[J]. *Systems and Soft Computing*, 2025, 7: 200213. DOI: 10.1016/j.sasc.2025.200213.
- [6] Chorazy T, Hlavínek P, Raček J, et al. Comparison of trenchless and excavation technologies in the restoration of a sewage network and their carbon footprints [J]. *Resources*, 2024, 13(1): 12. DOI: 10.3390/resources13010012.
- [7] Cui J Q, Broere W, Lin D. Underground space utilisation for urban renewal [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 2021, 108: 103726. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103726.
- [8] Udisi B, Gorgolewski M. A systematic review of consequential life cycle assessment in whole building life cycle assessment[J]. *Environmental Research Communications*, 2025, 7: 2. DOI: 10.1088/2515-7620/adb669.
- [9] Natalia L, Anastasia P, Sofia P, et al. A methodology for carbon footprint estimations of research project activities—A scenarios analysis for reducing carbon footprint[J]. *Atmosphere*, 2022, 14(1): 6-22.
- [10] Yu B Y, Tan J X, Zhang S T. Uncertainties in the technological pathway towards low-carbon freight transport under carbon neutral target in China[J]. *Applied Energy*, 2024, 365: 123272. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.123272.
- [11] Lu H F, Matthews J, Iseley T. How does trenchless technology make pipeline construction greener? A comprehensive carbon footprint and energy consumption analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 261: 121215. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121215.