

DOI:10.13205/j.hjgc.202311011

马涛,郭跃华,王蔚蔚,等. 城镇排水管道原位固化修复工程碳排放计算与分析[J]. 环境工程,2023,41(11):54-58,63.

城镇排水管道原位固化修复工程碳排放计算与分析

马涛¹ 郭跃华² 王蔚蔚³ 曹井国^{1*}

(1.天津科技大学 化工与材料学院,天津 300457; 2.中交一航局生态工程有限公司,广东 深圳 518107;

3.中国城市建设研究院有限公司,北京 100120)

摘要:从可持续发展战略角度考虑,降低市政设施的碳排放量是生态文明发展的重要一步。非开挖管道修复方式节能环保、绿色低碳,是管道修复行业升级转型的大趋势。结合四川省射洪市管网修复案例,对修复管道材料生产阶段、材料与设备运输阶段、施工阶段进行了碳足迹追踪。结果表明:材料生产阶段碳排放量为 11263.14 kg CO₂e,运输阶段碳排放量为 134.78 kg CO₂e,施工阶段碳排放量为 539.12 kg CO₂e,分别约占总碳排放量的 94.35%、1.13%和 4.52%。材料生产阶段碳排放量最大,是控制翻转式原位固化修复碳排放量的关键。对施工过程中材料与能源进行敏感性分析,发现树脂的敏感性最强,其次是无纺布,优化这 2 种材料或控制其使用量,将对降低翻转式原位固化工程的碳排放有重要作用。

关键词:碳排放;管道原位固化;非开挖修复技术;生命周期;敏感性分析

CARBON EMISSION CALCULATION AND ANALYSIS FOR CURED-IN-PLACE REHABILITATION OF URBAN DRAINAGE PIPELINE

MA Tao¹, GUO Yuehua², WANG Weiwei³, CAO Jingguo^{1*}

(1.College of Chemical Engineering and Materials Science, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China;

2.CCCC-FHEC Ecological Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518107, China;

3.China Urban Construction Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100120, China)

Abstract: From a sustainable development perspective, reducing the carbon emissions of municipal facilities is an important step towards the development of ecological civilization. Trenchless pipeline rehabilitation, which is energy-saving, environmentally friendly, and low-carbon, represents a major trend in the pipeline repairing industry. In this paper, based on a case of pipeline network repairment in Shehong City, Sichuan Province, carbon footprint tracking of the pipeline repair material production stage, material and equipment transportation stage, and construction stage was conducted. The results showed that the carbon emissions during the production stage were 11263.14 kg CO₂e, while those during the transportation and construction stages were 134.78 kg CO₂e and 539.12 kg CO₂e, respectively, accounting for approximately 94.35%, 1.13%, and 4.52% of the total carbon emissions. Material production was found to be the largest carbon emissions stage, and thus it is the key to carbon emissions controlling in the CIPP process. Sensitivity analysis was conducted on the materials and energy used during the production. The resin was found to be the most sensitive, followed by non-woven fabric. Optimizing and controlling their usage will be important for reducing carbon emissions in cured-in-place rehabilitation of urban drainage pipeline.

Keywords: carbon emission; cured-in-place pipe rehabilitation; trenchless rehabilitation techniques; lifecycle; emotional analysis

收稿日期:2023-08-28

第一作者:马涛(1998-),男,硕士,主要研究方向为管道非开挖修复碳排放。271374417@qq.com

*通信作者:曹井国(1980-),男,教授,主要研究方向为管道非开挖修复技术及材料、水务标准化。c.jg@tust.edu.cn

0 引言

随着科技发展与社会进步,全球变暖问题成为世界高度关注的问题。我国作为世界上最大的发展中国家,也是碳排放大国,我国 2019 年碳排放量为 97.95 亿吨,是 1997 年碳排放量的 3 倍多^[1]。为应对全球变暖问题,我国提出了碳达峰与碳中和目标。《国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知》要求将碳达峰贯穿于经济社会发展全过程,重点实施能源绿色低碳转型行动、工业领域碳达峰行动等“碳达峰十大行动”^[2]。“双碳”目标的实现需要我国各领域的共同努力,其中,市政行业是碳排放主要行业之一,具有较大的减排潜力。

传统的管道修复普遍采用开挖方式,这会极大破坏交通、影响环境,特别是大中城市,交通繁忙,地下设施复杂,楼宇林立,不具备开挖条件。而管道非开挖修复技术不破坏路面,仅需在管井处施工,不开挖或微小开挖,修复速度快,环境影响小^[3],是解决“马路拉链”问题的有力手段。翻转式原位固化作为当今社会主流管道非开挖修复方法之一,其利用聚酯纤维非织造布软管为载体,浸渍树脂后,利用水压力将软管翻转后置入待修复管道内,通过锅炉对管道内的水进行循环加热并保持一定温度,树脂固化后紧密贴合在待修复管道内壁上^[4]。管道翻转式原位固化修

复适用范围广阔,可用于污水管道、给水管道、化学及其他工业管道和压力管道的修复。

管道修复过程中,材料生产、运输阶段、施工阶段都会消耗大量的资源和能源,排放大量温室气体,成为产生碳排放的主要环节^[5,6]。但当前国内外学者对于管道修复的碳排放研究较少。本研究基于工程数据清单和 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》,对四川省射洪市某管道修复工程进行了碳排放计算与分析,该工程采用翻转式原位固化技术进行修复。本研究可为现有管道非开挖修复技术的低碳优化及评价提供参考和借鉴。

1 城镇排水管道翻转式原位固化修复生命周期碳排放分析

1.1 生命周期阶段划分

为了便于分析管道修复的碳排放量,本研究将管道预处理阶段放入施工阶段中。管道修复主要分为 4 个阶段:材料生产阶段、材料和施工设备运输阶段、施工阶段、管道废弃阶段。绝大部分的碳排放主要来自前 3 个阶段,因此本研究忽略管道废弃阶段^[7]。

1.2 碳排放计算边界

管道修复碳排放是指在整个修复过程中向外界环境排放的温室气体量的总和^[8]。按时间顺序,翻转式原位固化修复过程碳排放的构成见表 1。

表 1 管道翻转式原位固化修复生命周期碳排放阶段划分

Table 1 Lifecycle carbon emission division table for rotary cured-in-place pipe rehabilitation

碳排放阶段	碳排放构成
材料生产	管道修复材料加工生产过程中消耗的能源、资源和人工作业所产生的碳排放
运输	管道修复材料和施工设备从厂家到施工地点运输过程中消耗的能源和人工作业所产生的碳排放
施工	管道预处理、临时调水、高压清洗、翻转施工、加热固化、循环冷却、后处理、人工作业等过程中消耗的能源等所产生的碳排放

计算边界包括修复材料的生产、材料和设备的运输、管道施工等,如图 1 所示。

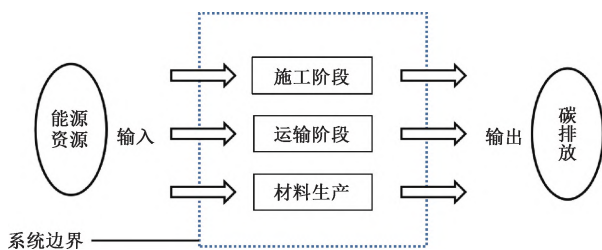


图 1 管道修复碳排放计算边界

Figure 1 Carbon emission calculation boundary for pipeline rehabilitation

2 碳排放计算模型

管道修复工程碳排放量为管道修复材料生产阶段、材料和设备运输阶段、施工阶段温室气体排放的

总和,以 CO₂ 当量表示,即 kg CO₂e。参考 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》,管道修复技术碳排放计算模型见式(1):

$$C = C_{sc} + C_{ys} + C_{jz} \quad (1)$$

式中:C 为管道原位固化修复的碳排放量,kg CO₂e; C_{sc} 为材料生产阶段碳排放量,kg CO₂e; C_{ys} 为材料和设备运输阶段碳排放量,kg CO₂e; C_{jz} 为施工阶段碳排放量,kg CO₂e。

2.1 材料生产阶段 CO₂ 排放

根据中国城镇供水排水协会团体标准 T/CUWA 6005X-2021《城镇排水管道原位固化修复用内衬软管》,修复材料包括聚酯纤维非织造布(无纺布)、功能膜和树脂^[9]。根据项目施工设计和工程清单估算出项目所需材料的总量,结合每一种材料的消耗量和

材料对应的碳排放因子,可求出材料生产阶段的碳排放量。其计算公式见式(2):

$$C_{sc} = \sum_{i=1}^n M_i F_i + C_{rg1} \quad (2)$$

式中: C_{sc} 为材料生产阶段碳排放量,kg CO₂e; M_i 为第*i*种材料的消耗量,kg; F_i 为第*i*种材料的碳排放因子,kg CO₂e/kg; C_{rg1} 为材料生产阶段人工作业碳排放量,kg CO₂e。

$$C_{rg1} = Q \times f \quad (3)$$

式中: C_{rg1} 为人工作业碳排放量,kg CO₂e; Q 为综合人工工日, d ; f 为综合人工工日碳排放因子,kg CO₂e/d。

2.2 运输阶段 CO₂ 排放

运输阶段的碳排放包括材料和施工设备运输到施工现场产生的碳排放。结合车辆的参数、材料和设备运输的距离、碳排放因子可计算运输阶段的碳排放量。其计算公式见式(4):

$$C_{ys} = \sum_{i=1}^n M_i D_i T_i + C_{rg2} \quad (4)$$

式中: C_{ys} 为运输阶段碳排放量,kg CO₂e; C_{rg2} 为运输阶段人工作业碳排放量,kg CO₂e; M_i 为第*i*种主要材料的消耗量,t; D_i 为第*i*种车辆运输的距离,km; T_i 为第*i*种建材的运输方式下,单位重量运输距离的碳排放因子,kg CO₂e/(t·km)。

2.3 施工阶段 CO₂ 排放

根据中国工程建设标准化协会工程标准 T-CECS 559—2018《给水排水管道原位固化法修复工程技术规程》,施工阶段的碳排放包括预处理阶段、施工过程和人工产生的碳排放。首先需确定工程中设备使用的台班数量,根据《全国施工机械台班费用定额》得出各类机械设备消耗的能源量,结合能源碳排放因子进行计算。其计算公式见式(5):

$$C_{jz} = \sum_{i=1}^n E_i F_i + C_{rg3} \quad (5)$$

式中: C_{jz} 为施工阶段碳排放量,kg CO₂e; C_{rg3} 为施工阶段人工作业的碳排放量,kg CO₂e; E_i 为第*i*类能源消耗量,kg/(kW·h); F_i 为第*i*类能源的碳排放因子,kg CO₂e/(kW·h)或 kg CO₂e/kg。

3 射洪市某翻转式原位固化修复工程碳足迹及碳排放计算

四川省射洪市某雨水管道因年久失修,老化严重,加上微生物腐蚀产生了结构性与功能性缺陷。原有管段管材为双壁波纹管,管深 1.5 m,管道长度 160 m,管径 DN400。该管段位于涪江岸边的堤坝之

下,不具备开挖修复的条件,因车辆无法进入堤坝,选用翻转式原位固化技术进行修复,修复材料设计厚度为 6 mm,见图 6。

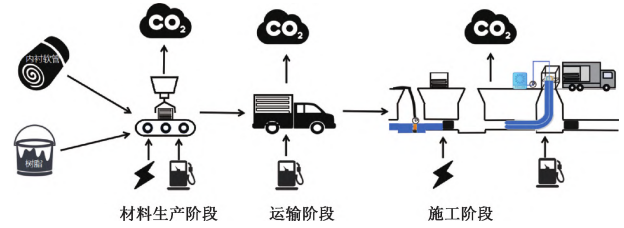


图2 翻转式原位固化修复施工碳足迹

Figure 2 Carbon footprint of rotary cured-in-place pipe rehabilitation construction

碳排放因子与设备单位台班能源消耗量主要来自《IPCC2006 年国家温室气体清单指南》、GB/T 51366—2019 和《全国施工机械台班费用定额》。根据《南方大型综合体建筑碳排放计算标准》,综合人工的碳排放因子为 12 kg CO₂e/d。

3.1 生产阶段碳排放

本次修复采用聚酯纤维非织造布内衬软管(俗称无纺布软管)。查阅该工程量的清单得到各种材料的消耗量 M_i ,结合修复材料的碳排放因子 F_i ,根据式(2)计算修复材料生产阶段的碳排放,具体结果见表 2^[10,11]。

表2 无纺布软管生产阶段所用材料碳排放明细

Table 2 Carbon emission details of materials used in the production stage of non-woven hose

管径	材料	材料质量/ kg	碳排放因子/ (kg CO ₂ e/kg)	CO ₂ 排放量/ kg
DN400	树脂	1050	5.91	6205.5
	涤纶(无纺布)	177.64	25.701	4565.52
	PE膜	125.33	2.869	359.57

生产无纺布软管过程中热风焊接和制管设备的过程中也产生了 CO₂,因在《全国施工机械台班费用定额》中未查到对应设备单位台班能源消耗量,本文按照 CECS 374:2014《建筑碳排放计量标准》中公式 4.2.6-2 对单位台班能源的消耗量进行计算,具体方法见式(6):

$$AD_{JXD} = \sum_{i=1}^n P_{di} T_{di} N_i \quad (6)$$

式中: AD_{JXD} 为施工机具的总耗电量,kW·h; P_{di} 为第*i*种施工机具的用电功率,kW; T_{di} 为第*i*种施工机具的运行小时数,h; N_i 为第*i*种施工机具的数量,台; i 为施工工具的种类代号。

由表 3 可知:生产阶段设备共消耗电能 21.6 kW·h。

根据生态环境部发布的《关于做好 2022 年企业温室气体排放报告管理相关重点工作的通知》(环办气候函[2022]111 号),全国电网碳排放因子为 0.581 kg CO₂e/kW·h。在材料生产阶段涉及人工 5 人,工日 2 d。根据表 2 与表 3 结合式(2)计算材料生产阶段的碳排放量: $C_{sc} = \sum_{i=1}^n M_i F_i + C_{rg1} = 1050 \times 5.91 + 177.64 \times 25.701 + 125.33 \times 2.869 + 21.6 \times 0.581 + 12 \times 5 \times 2 = 11263.14 \text{ kg CO}_2\text{e}$ 。

表 3 生产阶段主要设备能源消耗

Table 3 Energy consumption of main equipment in the production stage

设备	功率/ kW	能源 类型	单位台班能源用量/ (kW·h)	台班
加热装置	4	电能	32	0.4
风机	0.75	电能	6	0.4
电机	2	电能	16	0.4

综上所述,管道翻转式原位固化修复工程材料生产阶段总碳排放量为 11263.14 kg CO₂e,其中材料、设备运行和人工作业产生碳排放量分别为 11130.59 kg CO₂e,12.55 kg CO₂e 和 120 kg CO₂e。

3.2 运输阶段碳排放

运输阶段的碳排放包括两部分:管道修复材料运输和施工设备运输。在本工程中,查阅工程量清单,得到修复材料的质量和设备的重量 M_i 。查阅《建筑碳排放计算标准》得到各类运输方式的碳排放因子 T_i 。本工程修复材料运输距离为 218 km。运输方式为轻型汽油货车(载重 2 t), $T_i = 0.2882 \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{t}\cdot\text{km})$ 。设备车辆运输距离为 5 km,设备重量 2 t,运输方式为重型柴油货车(载重 10 t), $T_i = 0.1772 \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{t}\cdot\text{km})$ 。据式(3)计算运输阶段的碳排放量。具体信息见表 4。

表 4 翻转式原位固化修复工程运输阶段碳排放明细

Table 4 Carbon emission details during the transportation stage of the rotary cured-in-place pipe rehabilitation

车辆	行驶距离/ km	燃料类型	质量/ t	排放因子/ [kg CO ₂ e/(t·km)]	CO ₂ 排放量/ kg CO ₂ e
设备车	5	0 号柴油	2	0.1772	1.772
材料车	218	92 号汽油	1.353	0.2882	85

运输阶段涉及人工 4 人,工日 1 d。根据表 4 结合式(4)计算运输阶段的碳排放量: $C_{ys} = \sum_{i=1}^n M_i D_i T_i + C_{rg2} = 2 \times 0.1772 \times 5 + 218 \times 1.2912 \times 0.2882 + 1 \times 12 \times 4 = 134.78 \text{ kg CO}_2\text{e}$ 。

管道翻转式原位固化修复工程运输阶段碳排放量为 134.78 kg CO₂e。车辆运输和人工作业产生的碳排放量分别为 86.78 kg CO₂e 和 48 kg CO₂e。

3.3 施工阶段碳排放

在本工程中,预处理阶段气囊封堵后,因原有管道为雨水管道,施工时属于旱季,管中没有剩余积水,没有涉及临时调水,所以预处理的碳排放主要来自高压清洗车、封堵气囊、CCTV 检测^[12]。施工过程中的碳排放主要包括水泵消耗的电能、CCTV 消耗的电能和热水锅炉的能源消耗^[13]。因《全国施工机械台班费用定额》未查到 CCTV 设备的单位台班能源用量,由 CCTV 设备铭牌得其功率 300 W,单位台班为 8 h,根据式(6)进行计算,其单位台班能源用量为 2.4 kW·h/台班,具体信息见表 5。

表 5 翻转式原位固化修复施工设备能源消耗

Table 5 Energy consumption of construction equipment for rotary cured-in-place pipe rehabilitation

施工过程	设备	能源 类型	单位台班 能源用量	台班
清淤检测	CCTV	电能	2.4 kW·h	0.0125
	充气泵	电能	16.1 kW·h	0.0125
	高压清洗车	汽油	29.96 kg	0.375
翻转固化	水泵	电能	46 kW·h	0.625
	CCTV	电能	2.4 kW·h	0.0125
	热水锅炉	柴油	268.8 kg	0.3

根据《IPCC2006 年国家温室气体清单指南》汽油的碳排放因子为 2.254 kg CO₂e/kg,柴油的碳排放因子为 3.1863 kg CO₂e/kg。本次施工人员共 10 人,工日 2 d。结合表 5,根据式(5)计算施工阶段的碳排放量: $C_{jz} = \sum_{i=1}^n E_i F_i + C_{rg3} = 29.01125 \times 0.581 + 11.235 \times 2.254 + 80.64 \times 3.1863 + 10 \times 12 \times 2 = 539.12 \text{ kg CO}_2\text{e}$ 。

管道翻转式原位固化修复工程施工阶段碳排放量为 539.12 kg CO₂e,其中设备运行和人工作业产生的碳排放量分别为 299.12 kg CO₂e 和 240 kg CO₂e。

4 敏感性分析

结合式(1)对四川省射洪市翻转式原位固化修复工程碳排放量进行计算,其碳排放量为 11937.04 kg CO₂e,折合管道单位长度碳排放量为 74.6 kg CO₂e/m,单位质量修复材料产生的碳排放量为 8.82 kg CO₂e/kg。

从图 3 可以看出:本案例中管道翻转式原位固化修复工程碳排放量主要来自材料生产阶段,材料生产

阶段的碳排放量约占总碳排放量的 94.35%;运输阶段的碳排放量约占总碳排放量的 1.13%;施工阶段的碳排放量约占总碳排放量的 4.52%。在材料生产阶段,树脂和无纺织的碳排放量较高,达到整个生产过程碳排放的 95.63%。因此,减少材料生产阶段的碳排放,是降低翻转式原位固化修复工程碳排放量的有效措施。

为了找出影响 DN400 翻转式原位固化生命周期碳排放的敏感因素,对全过程碳排放涉及材料和能源进行敏感性分析,分别设其碳排放因子减少 10%、20%和碳排放因子增加 10%和 20%,计算整个生命周期碳排放,计算结果见表 6 和图 4^[14]。

由图 4 可以看出,树脂的碳排放因子减少 20%,整个工程的碳排放量减少 10.4%;无纺织的碳排放因子减少 20%,整个工程的碳排放量减少 7.6%;而其他材料与能源碳排放因子的变化对整个工程的影

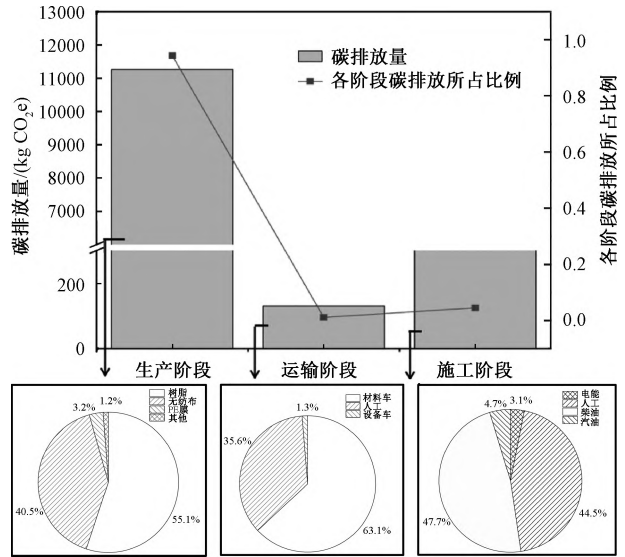


图3 翻转式原位固化修复不同阶段产生 CO₂ 的比例
Figure 3 Proportion of CO₂ emissions during different stages of rotary cured-in-place pipe rehabilitation

表 6 材料及能源碳排放因子敏感性分析

工法	研究对象	因子减少 20%	因子减少 10%	基值	因子增加 10%	因子增加 20%
DN400 翻转式原位固化	树脂	10695.94	11316.49	11937.04	12557.59	13178.14
	无纺布	11023.93	11480.49	11937.04	12393.59	12850.15
	PE膜	11865.13	11901.09	11937.04	11972.1	12008.95
	电能	11931.16	11934.1	11937.04	11939.98	11942.92
	汽油	11931.98	11934.51	11937.04	11939.57	11942.10
	柴油	11885.65	11911.35	11937.04	11962.73	11988.43

响较小。因此,树脂与无纺布是翻转式原位固化修复工程碳排放中重点控制的因素。

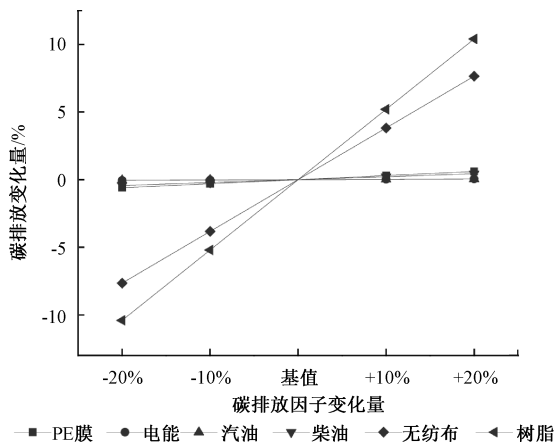


图4 翻转式原位固化修复工程敏感性分析

Figure 4 Sensitive analysis of the rotary cured-in-place pipe rehabilitation

通过对翻转式原位固化修复工程碳排放的计算和灵敏度分析,发现控制整个工程碳排放的关键是减少材料生产阶段的碳排放,其次是施工阶段和运输阶

段的碳排放。在材料生产阶段,树脂的敏感性最强,其次是无纺织材料,这 2 种材料是减少生产阶段碳排放的关键,应加大对其的绿色生产工艺研究,降低材料碳排放因子;在运输阶段,建议优化运输方案,最大限度地使用本地材料,利用新能源车辆运输,减少能源的消耗;在施工方面,建议施工前制定详细施工计划,优化施工过程中能源的使用,在确保施工质量的前提下,选择功率较低或能源效率更高的设备,提高机械化水平,降低人工碳排放量,从而降低整个工程的碳排放量。

5 结论

本文将生命周期理论运用于管道非开挖修复工程,对翻转式原位固化工程生命周期碳排放进行了分析,建立了碳排放计算模型。结果表明:四川省某工程的碳排放量为 11937.04 kg CO₂e,折合管道单位长度碳排放量为 74.6 kg CO₂e/m,单位质量修复材料产生的碳排放量为 8.82 kg CO₂e/kg,其中生产阶段

(下转第 63 页)

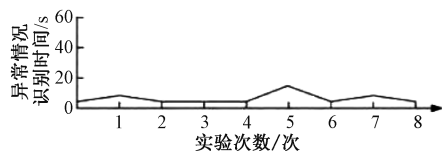


图 6 配电单元异常算法的异常情况识别时间

Figure 6 Recognition time of the abnormal situation by abnormal algorithm in the distribution unit

报警的作用,有助于保障供水管网设备及运维安全。

4 结 论

水务行业正处于向智慧水务转型阶段,水务行业的趋势是数字化、智能化、可持续化。智慧水务技术的不断创新,将为水资源的保护、利用和管理提供更多的工具和手段。

1) 分布式光纤传感技术在测量精度、响应时间和监测范围均满足城市供水管网监测的工程需求。视频 AI 技术作为对重点区间的双重保障,可及时判别异常风险事件,避免安全隐患升级。

2) 通过以光纤传感技术监测管网全线为主,以视频 AI 分析技术监测重点区域为辅的融合技术,可实现对地下管网的连续在线、多层次全面监测。在技术演进与需求升级的共同驱动下,先进传感技术与先进数据处理方法的融合将是水务智慧化发展中无人巡检模式的重要手段。

(上接第 58 页)

11263.14 kg CO₂e, 约占总碳排放量的 94.35%; 运输阶段 130.78 kg CO₂e, 约占总碳排放量的 1.13%; 施工阶段 539.12 kg CO₂e, 约占总碳排放量的 4.52%。材料生产阶段的碳排放量占比最大, 节能潜力巨大, 对材料与能源碳排放因子的敏感性分析表明树脂的敏感性最强, 其次是无纺布。因此, 加大对树脂与无纺布的研究, 尽快研制出更加绿色节能的材料, 对减少翻转式原位固化修复工程碳排放量有重要作用。

参考文献

[1] GUAN Y R, SHAN Y L, HUANG Q, et al. Assessment to China's recent emission pattern shifts[J]. *Earths Future*, 2021, 9(11).

[2] 国家发展改革委发布“碳达峰十大行动”进展报告[J]. *资源再生*, 2023(5): 60-71.

[3] 卫佳, 许怀奥, 方帅, 等. 非开挖修复技术用于大口径截污管道改造工程[J]. *中国给水排水*, 2023, 39(10): 126-132.

[4] 李旦罡, 逄仲森. 城市地下管线非开挖修复更新技术的探讨[J]. *城市勘测*, 2018(增刊 1): 247-250.

[5] KAUSHAL V, NAJAFI M, SERAJIANTEHRANI R. Environmental impacts of conventional open-cut pipeline installation and trenchless technology methods: state-of-the-art

参考文献

[1] 王爱杰, 许冬件, 钱志敏, 等. 我国智慧水务发展现状及趋势[J]. *环境工程*, 2023, 41(9): 46-53.

[2] 张岩, 张磊, 论智慧水务平台科研数据管理及人工智能技术的应用[J]. *智能建筑与智慧城市*, 2020(3): 90-91, 98.

[3] 章龙飞, 梁娟, 王沛丰, 等. 水务一体化背景下的智慧水务发展思考: 以杭州市水务集团为例[J]. *给水排水*, 2022, 58(增刊 1): 1068-1073.

[4] 白海龙. 城市综合管网发展趋势研究[J]. *中国市政工程*, 2015(6): 78-81, 95.

[5] 王军, 陈欣盛, 李少龙, 等. 城市地下综合管网建设及运营现状[J]. *土木工程与管理学报*, 2018, 35(2): 101-109.

[6] 罗家木, 陈雍君, 陈渝江, 等. 基于 5G 无线传感网络的智慧管网综合监控系统设计[J]. *电子测量技术*, 2017(4): 127-132.

[7] 温贤培. 基于液压静力水准仪的综合管廊沉降监测方法研究[J]. *自动化与仪器仪表*, 2021(4): 182-185.

[8] 王蕾, 徐云涛, 毛哲凯. 基于分布式光纤传感器的地下供水管道沉降监测研究[J]. *传感技术学报*, 2023, 36(5): 833-838.

[9] 顾建军, 吴留闯, 陈杰, 等. 基于分布式光纤传感器的电力综合管网沉降监测[J]. *自动化与仪器仪表*, 2022(6): 86-89.

[10] 宋牟平, 鲍翀, 裘超, 等. 结合布里渊光时域分析和光时域反射计的分布式光纤传感器[J]. *光学学报*, 2010, 30(3): 650-654.

[11] 刘征, 刘建福, 程慧艳. 智慧城市固体废物管理系统的构建方法研究[J]. *环境工程*, 2016, 34(3): 116-120.

review[J]. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2020, 11(2): 1-9.

[6] 曹俊, 崔熙, 刘利, 等. 非开挖管道修复技术的碳足迹分析[J]. *石油管材与仪器*, 2023, 9(1): 23-27.

[7] 刘沐宇, 欧阳丹. 桥梁工程生命周期碳排放计算方法[J]. *土木建筑与环境工程*, 2011, 33(增刊 1): 125-129.

[8] 赵苏苏, 朱建国, 王泽, 等. 基于 LCA 的建筑碳排放计算及减排策略研究: 以某住宅工程为例[J]. *建筑经济*, 2023, 44(增刊 1): 371-378.

[9] 田琪, 叶建州, 闻雪, 等. 《城镇排水管道原位固化修复用内衬软管》团标解读[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(8): 108-113.

[10] 赵年花, 周翔, 董锋. 涤纶纺织品的碳足迹评估[J]. *印染*, 2012, 38(14): 42-45.

[11] ALSADI A, MATTHEWS J C, MATTHEWS E. Environmental impact assessment of the fabrication of pipe rehabilitation materials[J]. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2020, 11(1): 1-7.

[12] 曹井国, 石东优, 张文宁, 等. 城镇排水管道原位固化修复材料工程示范[J]. *给水排水*, 2020, 56(1): 115-119.

[13] ALSADI A A, MATTHEWS J C. Evaluation of carbon footprint of pipeline materials during installation, operation, and disposal phases[J]. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2020, 11(2): 1-13.

[14] 陈进杰, 王兴举, 王祥琴, 等. 高速铁路全生命周期碳排放计算[J]. *铁道学报*, 2016, 38(12): 47-55.