

基于 LCA 方法的半盖挖地铁车站 物化阶段碳排放分析

朱金波

(中铁十八局集团第二工程有限公司 唐山 064099)

摘要: 当前我国的轨道交通行业正处在高速发展阶段,在“双碳”背景下,高速发展带来的减排压力也与日俱增。基于生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)方法,将某半盖挖地铁车站的物化阶段进行单元分解,界定碳排放系统边界,构建出物化阶段的3个碳排放计算模型,定量分析了其物化阶段的碳排放特征及规律。研究发现:半盖挖地铁车站建筑材料生产阶段的碳排放占比为86.29%,建筑材料运输阶段占比为1.84%,施工阶段占比为11.87%。整个物化阶段,车站主体结构碳排放强度总额为 $3.51 \text{ tCO}_2/\text{m}^2$,附属结构碳排放强度总额为 $1.83 \text{ tCO}_2/\text{m}^2$ 。根据计算结果,从建筑材料生产、运输方式、施工机械和能源使用方面提出了针对性的节能减排措施。

关键词: 生命周期评价;物化阶段;半盖挖地铁车站;碳排放计算模型

中图分类号: U231.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9889(2023)02-0080-05

Analysis of Carbon Emission at Materialization Stage of Semi-covered Excavation Subway Station Based on LCA Method

ZHU Jinbo

(China Railway 18 Bureau Group Second Engineering Co., Ltd., Tangshan 064099, China)

Abstract: At present, China's rail transit industry is at a stage of rapid development. Under the background of "carbon peak and carbon neutralization", it is also facing increasing pressure to reduce emissions. Based on Life Cycle Assessment method, this paper decomposes the materialization stage of a semi covered metro station into units, defines the boundary of carbon emission system, constructs three carbon emission calculation models in the materialization stage, and quantitatively analyzes the characteristics and laws of carbon emissions in the materialization stage. It is found that the carbon emission of the construction materials production stage of the semi covered metro station accounts for 86.29%, the construction materials transportation stage accounts for 1.84%, and the construction stage accounts for 11.87%. Carbon emission intensity of main structure is $3.51 \text{ t CO}_2/\text{m}^2$, and carbon emission intensity of auxiliary structure is $1.83 \text{ t CO}_2/\text{m}^2$. According to the calculation results, targeted energy conservation and emission reduction measures are proposed from the aspects of building materials production, transportation mode, construction machinery and energy use.

Key words: life cycle assessment; materialization stage; semi-covered subway station; carbon emission calculation model

随着我国现代化建设和工业化进程的加快,温室气体的排放量增大,减排成为城市建设中的重要任务^[1]。城市轨道交通是我国重要的大容量交通基础设施,也是能源消耗和城市碳排放的主体,当前我国轨道交通行业处于持续增长的高速发展阶段,故其所面临的减排压力也与日俱增^[2]。

大量学者针对不同地区轨道交通的结构形式

和材料等进行了碳排放计算与环境影响分析。同建筑行业全生命周期碳排放比较,秦鹭等^[3]得出地铁车站建筑在物化阶段产生的碳排放比常规建筑多,且车站使用年限越短,物化阶段的碳排放在全生命周期中的占比越大。在探究地铁车站施工阶段的减排方法方面,侯敬峰等^[4]借助 BIM(Building Information Model, 建筑信息模型)技术,采用工程量

采用日期: 2022-11-11

第一作者: 朱金波(1984—),男,本科,工程师,主要研究领域为铁路工程和房屋建筑工程施工技术。

清单计碳方法计算碳排放,并提出基坑支护与车站地下结构装配式一体化建造技术,与传统施工方法相比,可减少约 1/3 的碳排放量。在地铁碳减排效益系统评估方面,陈坤阳等^[5]采用生命周期评价定量分析方法,对轨道交通的碳排放强度与碳减排水平进行了分析,并提出了地铁的低碳、近零碳排放路径与策略。Li 等^[6]评估得出上海某地铁建设全生命周期产生的碳排放量主要受运维阶段影响,其次为建筑材料生产阶段。虽然建筑物化阶段与运维阶段相比时间短、耗能少,但从年平均能耗来看,建筑物化阶段对环境的影响要比运维阶段高^[7]。

目前,针对半盖挖地铁车站土建工程物化阶段碳排放的定量研究不多,且很少考虑周转材料摊销耗能产生的碳排放,因此本文基于 LCA 方法,将某半盖挖地铁车站进行分项、分部工程分解,建立建筑材料生产、建筑材料运输和土建工程施工的碳排放计算模型,并对碳排放计算结果产生的环境影响进行分析,以期为发展绿色城轨提供理论支持。

1 生命周期评价方法

生命周期评价目前被普遍应用于产品及其生产活动的环境影响评价^[8]。按照评价深度和范围的不同,将 LCA 评价分成两部分,分别为对 midpoint 破坏和 endpoint 破坏的环境影响的评价。例如,排放温室气体、臭氧层破坏视为 midpoint 破坏,而对全人类产生的危害视为 endpoint 破坏^[9],基本元素流 - midpoint 破坏 - endpoint 破坏的环境机制如图 1 所示。

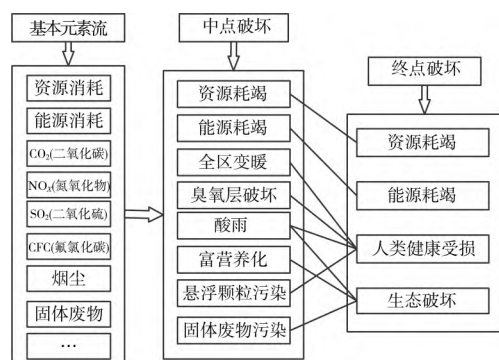


图1 基本元素流 - 中点破坏 - 终点破坏的环境机制

根据《环境管理 生命周期评价 原则与框架》(GB/T 24040—2008)对 LCA 的定义,生命周期评价分为目标范围确定、清单分析、影响评价和解释 4 个部分,每个部分之间相互联系、相互作用、相互影响、相互渗透,从而使研究结果具备客观性和全面性^[10-11]。生命周期评价框架如图 2 所示。

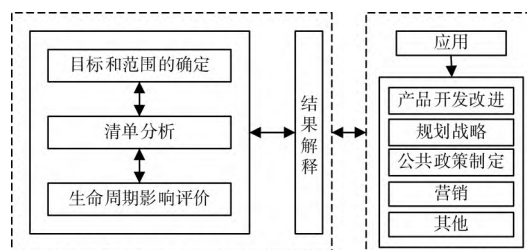


图2 生命周期评价框架

2 基于 LCA 方法的半盖挖地铁车站物化阶段碳排放计算模型

2.1 模型边界

1) 碳排放计量对象

参考《城市轨道交通工程预算定额》(GCG103—2008)^[12]中的规定,将半盖挖地铁车站土建工程划分成主体工程和附属工程(包括出入口、风亭等),其中分部工程划分成主体结构、围护结构、土石方工程和防排水工程等^[13]。

2) 计量范围

根据《联合国气候变化框架公约》^[14]的定义,温室气体主要包括 CO₂、CH₄(甲烷)、N₂O(一氧化二氮)、HFCs(氢氟烃)、PFCs(全氟化合物)、SF₆(六氟化硫)等,其中 CO₂对环境的影响最典型,国际上将其他温室气体碳排放用 CO₂当量来表示,因此本文主要将 CO₂作为碳排放研究对象。

3) 生命周期界定

本次研究的范围为物化阶段,即地铁车站在运营前的所有土建工程生产活动,包括以下 3 部分:建筑材料生产阶段的 CO₂排放、建筑材料运输阶段的 CO₂排放和施工阶段的 CO₂排放。

4) 系统边界

将组成半盖挖地铁车站土建工程的一切结构和构件等视为物质系统边界,本次计算的能源包括一次能源和二次能源。因地铁车站施工规模大、时间长、人员多,故劳动力产生的碳排放也有必要进行考虑。

2.2 物化阶段碳排放模型构建

本次研究选用 IPCC(联合国政府间气候变化专门委员会)提供的数据作为化石能源的排放因子,结合地铁车站碳排放相关研究成果,并以《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)和《全国统一施工机械台班费用定额》分别作为建筑材料碳排放因子和施工机械碳排放因子的计算依据。

半盖挖地铁车站土建工程物化阶段的 CO₂排放

总量 = 建筑材料生产阶段的 CO₂排放 + 建筑材料运输阶段的 CO₂排放量 + 施工阶段的 CO₂排放,其数学式为

$$E = E_p + E_t + E_c \quad (1)$$

式中 E 为 CO₂排放总量 tCO₂; E_p 为建筑材料生产阶段的 CO₂排放量 tCO₂; E_t 为建筑材料运输阶段的 CO₂排放量 tCO₂; E_c 为施工阶段的 CO₂排放量 tCO₂。

1) 建筑材料生产阶段

本阶段包括半盖挖地铁车站土建工程所需的全部建筑材料(包括预制构件)从原材料开采、原材料运输至加工厂和原材料加工生产的完整过程。预制构件是土建工程建筑材料的重要组成部分,故将生产阶段的预制构件原料获取视为建筑材料原料获取,预制构件的运输生产加工也等同为建筑材料的运输生产加工,其间产生的 CO₂排放量计算式为

$$E_p = \sum_{i=1}^n Q_i (1 + u_i) F_i \quad (2)$$

式中 Q_i 为建筑材料工程量; u_i 为建筑材料损耗率; F_i 为建筑材料碳排放因子 kgCO₂/单位; n 为建筑材料种类数。

建筑材料生产阶段的 CO₂排放清单如表 1 所示。

表 1 建筑材料生产阶段的 CO₂排放清单

排放过程	影响因素	排放来源
原材料开采	全部建筑材料(包括预制构件)种类	电力消耗
原材料运输至加工厂	全部建筑材料(包括预制构件)加工技术水平	化石能源消耗
原材料加工生产	全部建筑材料(包括预制构件)损耗量	全部建筑材料(包括预制构件)加工过程

2) 建筑材料运输阶段

本阶段包括半盖挖地铁车站土建工程所有建筑材料出厂运输的全过程,建筑材料运输阶段的 CO₂排放清单如表 2 所示。建筑材料的用量、运输方法和运输距离均是影响环境排放的重要因素,运输期间的 CO₂排放计算公式为

$$E_t = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k Q_i (1 + u_i) \rho_i \frac{D_{ij}}{100} F_j \quad (3)$$

式中 ρ_i 为建筑材料密度 t; D_{ij} 为第 i 种建筑材料采用第 j 种方法运输的距离 km; F_j 为第 j 种方法的碳排放因子 kgCO₂/100(t·km)。

本研究中各类建筑材料的运输方式均视为公路运输,车辆类型均采用重型汽油货车。

表 2 建筑材料运输阶段的 CO₂排放清单

排放过程	影响因素	排放来源
建筑材料出厂运输	建筑材料用量	化石能源消耗
	建筑材料密度	
	运输距离 运输方法	电力消耗

3) 施工阶段

本阶段包含半盖挖地铁车站土建工程施工现场所有的耗能过程,包括化石能源消耗、电力消耗、人工作业、水资源消耗和周转材料使用摊销等过程的 CO₂排放,施工阶段的 CO₂排放清单如表 3 所示。

表 3 施工阶段的 CO₂排放清单

碳排放过程	影响因素	排放来源
施工机具作业	工程体量规模与施工难度	化石能源消耗
劳动力作业	施工机具台班及类型	电力消耗
作业现场用水	劳动力用量	人工作业
	能源结构	水资源消耗
周转材料使用与回收	周转材料摊销用量	周转材料使用摊销
	周转材料再生率	—

将化石能源消耗和电力消耗换算为施工机械耗能,则施工阶段耗能分为 4 个部分,该阶段 CO₂排放的计算式见式(4),其中施工机械耗能 CO₂排放的计算式见式(5),人工 CO₂排放的计算式见式(6),水资源 CO₂排放的计算式见式(7),周转材料使用产生的 CO₂排放的计算式见式(8)。

$$E_c = E_{c1} + E_{c2} + E_{c3} + E_{c4} \quad (4)$$

式中 E_c 为施工阶段的 CO₂排放 tCO₂; E_{c1} 为施工机械耗能产生的 CO₂排放 tCO₂; E_{c2} 为人工产生的碳排放 tCO₂; E_{c3} 为用水产生的碳排放 tCO₂; E_{c4} 为周转材料摊销使用产生的 CO₂排放 tCO₂。

$$E_{c1} = \sum_{j=1}^n M_j F_j = \sum_{j=1}^m R_j F_{Rj} \quad (5)$$

式中 M_j 为第 j 种施工机械台班数; F_j 为第 j 种机械台班 CO₂排放因子 kgCO₂/台班; R_j 为第 j 种能源消耗量 kg; F_{Rj} 为第 j 种能源 CO₂排放因子 kgCO₂/kg; n 为不同种类机械数量; m 为不同种类能源数量。

$$E_{c2} = PTF_T \quad (6)$$

式中 P 为工作人数; T 为工作日总数; F_T 为人均每日 CO₂排放因子 kgCO₂/工日。

$$E_{c3} = R_w F_w \quad (7)$$

式中 R_w 为总用水量 m³; F_w 为水 CO₂排放因子,

kgCO_2/m^3 。

$$E_{C4} = \sum_{i=1}^x W_i t_i F_i'' = \sum_{i=1}^x W_i t_i [(1 - \alpha_i) F_i + \alpha_i F_i'] \quad (8)$$

式中, W_i 为周转材料工程量; t_i 为摊销消耗率; F_i'' 为再生周转材料生产耗能的 CO_2 排放因子 kgCO_2/m^3 ; α_i 为再生率; F_i 为原生周转材料生产耗能的 CO_2 排放因子 kgCO_2/m^3 ; F_i' 为全再生周转材料生产耗能的 CO_2 排放因子 kgCO_2/m^3 ; x 为不同种类周转材料的数量。

3 物化阶段碳排放计算及结果分析

3.1 工程概况

成都地铁某车站全长为 244 m, 标准断面宽度为 21.3 m, 轨面埋深约为 22.3 m; 该车站为地下 2 层 12 m 岛式站台, 主体建筑面积为 11 700 m^2 , 附属建筑面积为 6 400 m^2 , 共设 5 个出入口和两个安全出口; 该车站施工方法为半盖挖法, 支护结构为钻孔灌注混凝土 + 钢支撑体系, 第 1 道、第 3 道和第 4 道采用 $\Phi 609 \times 16$ 的钢管支撑, 第 2 道采用 800×800 mm 的混凝土支撑。

3.2 环境排放计算分析

3.2.1 建筑材料生产阶段

1) 主体结构建筑材料生产阶段

整理工程清单, 提取出半盖挖地铁车站建设的主要建筑材料(包括钢材、混凝土、水泥、砂浆和防水板等)作为耗能分析对象, 并根据式(2)计算出半盖挖地铁车站的主体结构建筑材料生产阶段的 CO_2 排放量为 35 735.46 tCO_2 , CO_2 排放强度为 3.05 tCO_2/m^2 , 主体结构各建筑材料在生产阶段耗能产生的 CO_2 排放及占比如图 3 所示。

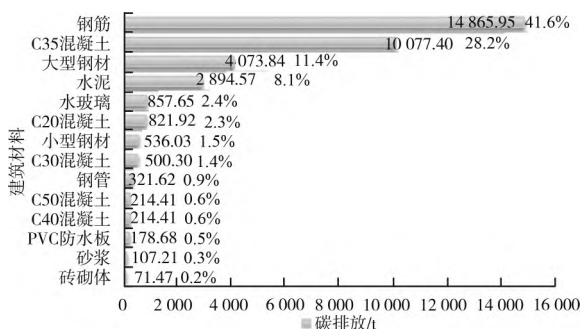


图3 主体结构各建筑材料在生产阶段产生的 CO_2 排放及占比

2) 附属结构建筑材料生产阶段

由式(2)计算出半盖挖地铁车站附属工程材料生产阶段的 CO_2 排放总量为 10 246.62 tCO_2 , CO_2 排

放强度为 1.60 tCO_2/m^2 。附属结构各建筑材料在生产阶段耗能产生的 CO_2 排放及占比如图 4 所示。

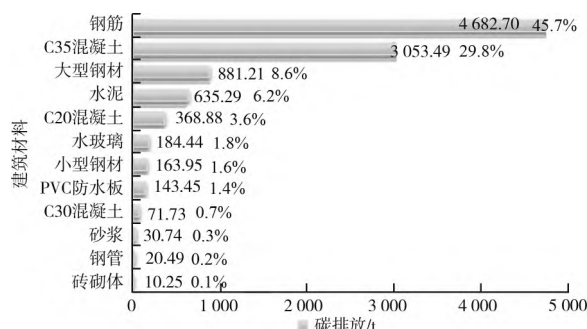


图4 附属结构各建筑材料在生产阶段耗能产生的 CO_2 排放及占比

3.2.2 建筑材料运输阶段

城市地铁车站建筑材料的主要运输方式为公路运输, 参考《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019) 中建筑材料默认的运输距离, 平均运输距离取 176 km, 且选用的燃料为汽油和柴油, 各类汽油货车和柴油货车在运输中的燃油消耗量取 0.152 $\text{kg}/(\text{t} \cdot \text{km})$ 。根据式(3)计算出建筑材料运输阶段车站主体结构的碳排放总量为 697.23 tCO_2 , 附属结构的碳排放总量为 285.56 tCO_2 , 总计 982.79 tCO_2 。

运输阶段各建筑材料的碳排放占比如图 5 所示, 其中: 主体结构约有 48.1% 的 CO_2 排放来自商用混凝土运输, 36.9% 来自钢材运输; 附属结构约有 44.1% 的 CO_2 排放来自商用混凝土运输, 33.4% 来自钢材运输。

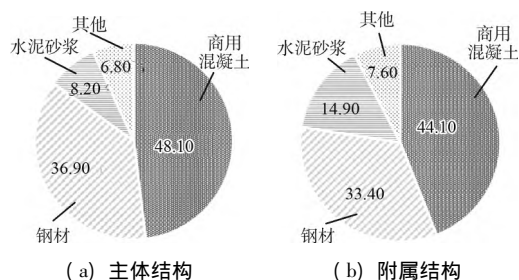


图5 运输阶段各建筑材料的碳排放占比(单位: %)

3.2.3 施工阶段

1) 施工机械碳排放

将地铁车站土建施工用到的机械设备分为以下 6 类: 降水井施工机械设备、旋挖桩施工机械设备、基坑开挖机械设备、桩间网喷机械设备、混凝土支撑施工设备和钢支撑施工设备。

各类施工机械运作中主体结构施工阶段的 CO_2 排放总量为 4 640.92 tCO_2 , 附属结构施工阶段的 CO_2 排放总量为 1 123.45 tCO_2 , 总计 5 764.37 tCO_2 ;

其中,基坑开挖机械设备运作耗能产生的 CO_2 排放最多,占比达 40% ~ 50%,其次为旋挖桩施工机械设备,占比约为 20%。

2) 水资源耗能碳排放

本工程用水量为 $65\,118\text{ m}^3$,碳排放因子为 $0.910\text{ kgCO}_2/\text{m}^3$,水资源消耗碳排放量为 59.25 tCO_2 。

3) 人工作业碳排放

本工程施工总工期为 1 211 d,平均每天工作人员为 115 位,碳排放因子为 $0.460\text{ kgCO}_2/\text{d}$,人工碳排放总计为 64.06 tCO_2 。

4) 材料周转摊销碳排放

本工程周转材料包括钢支撑、竹胶板、钢便桥、钢围檩、木模板等,周转材料摊销额通过查询定额获得。钢材周转量为 282 t,钢材周转材料摊销 CO_2 排放因子为 $1\,368.29\text{ kgCO}_2/\text{t}$,钢材周转 CO_2 排放为 385.86 tCO_2 ,木材周转量为 400 m^3 ,木材周转材料摊销碳排放因子为 $125.37\text{ kgCO}_2/\text{m}^3$,碳排放为 50.42 tCO_2 , CO_2 排放总量为 436.28 tCO_2 。

3.3 结果分析

半盖挖地铁车站土建工程物化过程 CO_2 排放总量为 $53\,288.8\text{ tCO}_2$,地铁车站物化阶段碳排放占比如图 6 所示,建筑材料生产阶段 CO_2 排放占比最大,约为 86.29%;其次是施工阶段,约为 11.87%;建筑材料运输阶段占比最少,约为 1.84%。

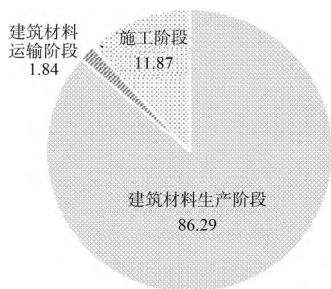


图6 地铁车站物化阶段碳排放占比(单位: %)

针对计算结果,对于该类半盖挖地铁车站物化阶段碳排放控制问题,可采取以下措施:

(1) 建筑材料生产阶段的 CO_2 排放主要来自钢材和混凝土,这类建筑材料的生产工艺、生产数量和原材料运输距离是影响 CO_2 排放的关键因素,通过改进建筑材料的生产工艺、选用先进设备、提高管理水平、加强对钢材和混凝土的碳排放评价工作,可有效减少环境排放影响。

(2) 建筑材料的种类、数量、运输方式和运输距离都会影响碳排放结果,因此应尽量就地取材,选择当地企业生产的材料,并采用运输量大、能耗

低、污染少的环保车辆进行运输。

(3) 施工阶段的 CO_2 排放主要来自施工机械耗能,在满足施工进度和成本要求的前提下,建议选择使用可再生能源的施工机械。此外,还可以从强化施工现场技术管理、增强施工人员的环保意识等角度出发,制订绿色施工方案,满足绿色施工要求。

4 结论

本文基于 LCA 方法,建立了半盖挖地铁车站的碳排放计算模型,并应用于实际工程中,得到以下研究成果:

(1) 将地铁车站土建工程分为主体结构和附属结构,并按照分部分项工程拆解至单元层面,采用 LCA 方法,结合物化阶段的施工数据库建立了碳排放计算模型,与常规计算模型相比较,在施工阶段引入了周转材料摊销碳排放计算,使碳排放结果更为准确。

(2) 通过定量计算半盖挖地铁车站的碳排放,得到案例车站物化过程的 CO_2 排放总量为 $532\,88.8\text{ tCO}_2$,车站主体结构碳排放强度总额为 $3.51\text{ tCO}_2/\text{m}^2$,附属结构碳排放强度总额为 $1.83\text{ tCO}_2/\text{m}^2$ 。其中,建筑材料生产阶段碳排放占比为 86.29%,建筑材料运输阶段占比为 1.84%,施工阶段占比为 11.87%。

(3) 根据试验结果提出以下减排建议:物化阶段减排重点为建筑材料生产阶段,应推广使用绿色低碳建筑材料,并改进钢材、混凝土的生产效率及施工工艺;在建筑材料运输阶段,使用以清洁能源为主要能源的大运量货车运输建筑材料,并尽量就地取材,减小运距;在施工阶段,提高管理组织水平,侧重机械的优化使用。

参考文献

- [1] 中国城市轨道交通协会. 中国城市轨道交通绿色城轨发展行动方案[J]. 城市轨道交通, 2022(8): 20-35.
- [2] 施仲衡,丁树奎. 城市轨道交通绿色低碳发展策略[J]. 都市轨道交通, 2022(9): 14-17.
- [3] 秦鹭,袁艳平,蒋福建. 地铁站建筑全生命周期碳排放研究——以成都三号线某站为例[J]. 建筑经济, 2020, 41(S1): 329-334.
- [4] 侯敬峰,解佳媛. 地铁车站工程装配式建造技术碳减排研究[J]. 建筑经济, 2022, 43(S1): 579-584.
- [5] 陈坤阳,周鼎,栗月欢,等. 城市轨道交通生命周期碳排放强度与碳减排潜力研究[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(5): 1-7.

(下转第 89 页)

施工方向以及最终质量,因此在制订施工方案时需要十分严谨和系统。经试验验证,与传统的施工技术相比,大孔径钻孔桩技术限制较少,可有效提高施工的规范性,确保最终工程质量的稳定和可靠,符合交通运输行业发展的实际需求。

参考文献

- [1] 曲村,韩海燕,赵青.市域铁路长大桥上无砟无缝线路荷载组合研究[J].现代交通技术,2022,19(1):69-74.
- [2] 姜华侨.铁路工程施工中软土地基处理技术研究[J].绿色环保建材,2019(3):162,164.
- [3] 王立策.基于软土地区铁路施工中的大孔径钻孔桩技术[J].建材与装饰,2019(5):285-286.
- [4] 李艾兵.铁路工程施工中的软土地基处理技术研究[J].工程技术研究,2021,6(15):102-103.
- [5] 董超月,成警万.高原铁路软土地基处理施工技术及质量控制分析[J].运输经理世界,2021(26):16-18.
- [6] 杨东鹏.铁路工程施工中软土地基处理技术探究[J].中小企业管理与科技(下旬刊),2021(4):170-171.
- [7] 蒋和平.地震区大孔径超深灌注桩施工技术[J].工程技术研究,2020,5(24):84-86.
- [8] 叶德.软土地基(海涂)钻孔灌注桩质量控制研究[J].住宅产业,2022(1):70-73.
- [9] 潘肇敏.基于桥梁桩基钻孔成桩反循环清孔技术分析[J].科学技术创新,2021(19):140-141.
- [10] 欧阳继平,黄学龙.超厚砂层超深埋深大孔径钻孔灌注桩施工技术研究[J].新型工业化,2019,9(3):98-102.
- [11] 徐勇.气举反循环二次清孔在旋挖钻孔灌注桩施工中的应用[J].低碳世界,2021,11(9):76-77.
- [12] 董延伟.铁路施工中软土地区大孔径钻孔桩技术探析[J].价值工程,2019,38(17):124-126.
- (责任编辑 林景怡 桂佑熙)
- (上接第84页)
- [6] LI Y, HE Q, LUO X, et al. Calculation of life-cycle greenhouse gas emissions of urban rail transit systems: a case study of Shanghai Metro [J]. Resources, conservation and recycling, 2018, 128(12): 451-457.
- [7] 钱生泽.基于LCA的轨道交通车站碳排放分析[J].都市快轨交通,2022,35(5):16-21,42.
- [8] DODOO A, GUSTAVSSON L, SATHRE R. Carbon implications of end-of-life management of building materials [J]. Resources, conservation and recycling, 2009, 53(5): 276-286.
- [9] 杜喜军.基于CEC与CCE指标的某绿色建筑节能性能评价[J].铁道建筑技术,2021(6):50-54.
- [10] 贺晓彤.城市轨道交通明挖车站建设碳排放计算及主要影响因素分析[D].北京:北京交通大学,2015.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.环境管理 生命周期评价 原则与框架:GB/T 24040—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市轨道交通预算定额:GCG103—2008[S].北京:中国计划出版社,2009.
- [13] 黄旭辉.地铁土建工程物化阶段碳排放计量与减排分析[D].广州:华南理工大学,2019.
- [14] 边际.联合国气候变化框架公约[J].国土绿化,2017(2):53.
- (责任编辑 林景怡 桂佑熙)