

doi:10.3969/j.issn.1673-6478.2022.06.005

基于 LCA 的特大桥梁全寿命碳排放特征分析

何江陵¹, 陈勇强², 董欣², 黄飞扬³, 刘备³, 王元庆³

(1.广东省高速公路有限公司, 广东 广州 510623; 2.广东省葛洲坝肇明高速公路有限公司, 广东 肇庆 526070;
3.长安大学运输工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要: 深水区特大桥梁防护工程复杂, 工程施工周期长, 其全寿命碳排放特征对于控碳减碳至关重要。本文采用 LCA 分析方法, 对肇明高速西江特大桥梁进行了分析。结果发现材料的碳排在桥梁建设总碳排放中占比最大, 为 95.7%, 分项工艺中的碳排放热点为集中加工悬浇箱梁焊接钢筋, 材料的碳排放热点为 HRB400 钢筋, 机械的碳排放热点为 $\Phi 2\ 500\ \text{mm}$ 以内回旋钻机。施工方可以通过优化设计方案, 使用低碳排放材料和清洁能源等方式减少桥梁建设阶段在分项工艺、材料和机械方面的碳排放, 其中材料的碳排放应该作为施工方的减排重点。

关键词: 交通碳排放; 施工建设碳排放; 生命周期评价; 桥梁工程; 特大桥梁

中图分类号: U445

文献标识码: A

文章编号: 1673-6478 (2022) 06-0025-06

Analysis of Lifetime Carbon Emission Characteristics of Extremely Large Bridges Based on LCA

HE Jiangling¹, CHEN Yongqiang², DONG Xin², HUANG Feiyang³, LIU Bei³, WANG Yuanqing³

(1. Guangdong Expressway Co., Ltd, Guangzhou Guangdong 510623, China;

2. Guangdong Gezhouba Zhaoming Expressway Co., Ltd, Zhaoqing Guangdong 526070, China;

3. College of Transportation Engineering of Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710061, China)

Abstract: The protection works of extra-large Bridges in deep water are complicated and the construction period is long. The carbon emission characteristics of the Bridges in the whole life are very important for carbon control and carbon reduction. In this paper, LCA analysis method is used to analyze Xijiang bridge of Zhaoming Expressway. The results show that the carbon emission of materials accounts for the largest proportion of the total carbon emission of bridge construction, accounting for 95.7%. The carbon emission hotspot of the sub-process is concentrated processing of welded steel bars of hanging cast box girders, the carbon emission hotspot of materials is HRB400 steel bars, and the carbon emission hotspot of machinery is gyrodrill within 2 500 mm. The construction party can reduce the carbon emission of sub-process, material and machinery during the bridge construction stage by optimizing the design scheme and using low-carbon emission materials and clean energy, among which the carbon emission of materials should be the focus of the construction party.

Key words: carbon emissions of transportation; carbon emissions of construction; life cycle assessment; bridge engineering; extra large bridge

收稿日期: 2022-10-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51878062); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (52102390); 肇明高速绿色建造评估系统建立与应用研究 (ZMGS-HT-2021-29)

作者简介: 何江陵 (1972-), 男, 四川泸州人, 高级工程师, 研究方向为高速公路建设与管理。(HEJL0620@126.com)

0 引言

交通行业作为重要的人类社会生产活动之一,消耗了约 1/3 的全球能源,并排放出了大量的二氧化碳^[1]。我国的交通碳排放占比大且未来十几年内预计增速十分快,节能减排形势十分严峻^[2]。桥梁建设作为一种极其消耗资源和能源的工程,不仅会使用大量碳排放因子大的材料、能源,在其施工建设阶段中也会排出大量的二氧化碳。刘沐宇等^[3]从桥梁工程生命周期评估(Life Cycle Assessment, LCA)的角度,分析了在桥梁设计、原材料生产加工、现场施工、运营维护及废弃这 5 个阶段的碳排放,得出了各个施工过程中的碳排放占比情况。张天辰^[4]将桥梁的全生命周期划分为规划设计、施工建设、运营维护和废弃拆除四个阶段,在此基础上提出减排率的概念,以此作为桥梁碳排放定量评估的指标。Itoh 等^[5]从建材生产、施工、加固维修三个阶段对日本的桥梁碳排放进行了研究,得出建材生产阶段排放量最多的结论。Nathman^[6]和美国加州路面研究中心合作,以路面工程为研究对象,开发了基于道路生命周期的碳排放计算模型 Pa LATE,将生命周期划分为六个阶段。刘圆圆^[7]提出了基于归因全寿命周期评价(ALCA)的公路生命周期碳排放分析的理论框架和方法体系,将生命周期划分为建设、运营和养护三个阶段,并基于分单位、分部、分项分析单元的公路建设工程计量方法,复合碳排放因子(背景数据)、实际工程量(实景数据)与工程定额,构建了“分单位-分部-分项”结构化的公路建设阶段碳排放测算模型。

现有的大量文献都对交通行业碳排放进行了大量的探讨,然而对桥梁生命周期的碳排放研究还处于探索阶段,尚无成熟的计算方法。因此,有必要对桥梁生命周期碳排放进行系统分析并发展相应的定量计算方法。

1 西江特大桥工程概况

1.1 肇明高速项目基本概况

肇明高速公路是粤港澳大湾区建设的重点项目,主线+机场支线总里程约 120 km,主线起点至大湾互道路段设计速度 100 km/h、大湾互通至终点路段及机场支线设计速度为 120 km/h,按双向 6 车道高速公路标准建设,项目全段共有桥梁 115 座。机场支线是肇明高速与江肇高速的联络线,位于珠三角枢纽

(广州新)机场以北,连接多条高速通道,是新干线机场集疏运通道。

1.2 西江特大桥基础概况

肇明高速西江特大桥全长约 2 400 m,跨越 G321 和西江江面,桥面采用双向六车道设计,跨江段(2×16.6 m),其余位置为 2×16.5 m,设计速度 100 km/h。本桥起点接大山顶隧道,终点接杨梅隧道,均采用搭板与隧道共建,桥位处水面宽阔,约 700 m,桥梁轴线与流水流向基本正交,桥址处河宽约 680 m,最大水深 28.3 m,深槽位于河道中间偏左。主桥上部构造采用挂篮悬浇施工,下部构造采用钻孔灌注桩,左线第 5 孔(右线第 4 孔)上跨国道 321,交叉桩号 ZK43+036.27, G321 规划为六车道一级路,要求净空不低于 5.5 m;第 6~11 孔跨越西江,设计洪水位 17.86 m,最高通航水位 15.81 m,西江河道规划为内河 I 级航道,采用双孔单向通航;第 12 孔上跨乡道 Y391 及千亩堤围;13 号桥墩采用 160 型伸缩缝,6、10 号桥墩采用 400 型伸缩缝,其余分联墩台采用 80 型伸缩缝。

西江特大桥所在区域为西江水系,区内水系比较发育,河流纵横密布,汇水面积大,有西江、新兴江等河流。西江是珠江的主干流,平均年径流总量为 2 277 亿 m³,4~9 月为丰水期,12 月~来年 3 月为枯水期,现为 II 级航道,规划内河 I 级航道,路线经过区域属西江界首至肇庆段,规划通航 3 000 吨级船舶。区域年降雨量为 1 649 mm,在雨季(4~9 月)集中了 80%,年暴雨(≥50 mm)日数 5.3 天,雨季期间集中了 92%,一日最大降水量 216.3 mm,出现在台风季节的 9 月,降水是地下水的主要补给源。

桥梁跨江段左岸在 1.5~6.4 m 岸坡标高范围内,采用砼联锁式植草护坡,6.4 m 至坡顶标高范围内,采用空心砖植草防护,防护范围涵盖左右线桥梁外边缘上下游的 50 m 处;右岸在 1.5~7.75 m 岸坡标高范围内,采用砼联锁式植草护坡,7.75~11 m 标高范围内,采用空心砖植草防护,11 m 至坡顶标高范围内直接在原坡面采用植草防护,防护范围从上游加固设计处至下游左线桥梁外边缘 100 m 处。为了提高桥梁的排水能力,在桩号 K44+679.7~K44+739.7 范围内将排水管加密至 3 m。

项目建设过程中所用到的主要材料有:钢材、水泥、石料等,而项目沿线路网发达,交通运输便利,各料场点与高速公路、国省道、县道等公路相通,运输较方便,各种材料的运输和获取都十分便捷。石料可以从附近的长顺石场、磨刀坑石场等花

岗岩料场获取, 也可使用西江北岸石头窝、九源隧道等花岗岩隧道开挖后的石料; 项目用水可直接从西江获取, 同时沿线电网密布, 各地方电力供应充足, 工程用电的获取也十分方便; 钢材、水泥等则可依靠便捷的交通线网从当地市场购买。

2 基于LCA的桥梁工程全生命周期碳排放评价模型的理论及方法

2.1 生命周期评价 (LCA) 介绍

生命周期评价 (LCA) 起源于 20 世纪 60 年代, 国际标准化组织 (ISO) 将全寿命周期评价 (Life Cycle Assessment) 定义为“一种汇总和评估某一产品、活动、技术或服务系统在其整个生命周期过程中所有的投入和产出对环境造成的潜在影响的方法”^[8]。该定义常用来分析某一产品、工艺、活动或服务系统从原材料获取到产品的制造、使用、维护和回收报废的整个生命周期内有关环境变化, 通过对全过程中的能量和物质的消耗进行评估, 来考察一种产品、工艺、活动或服务系统对环境所造成的影响。虽然生命周期评价通常关注的是对环境造成的影响和变化, 不包含社会经济因素, 但是却可以结合有关的社会和经济评价工具方法, 对社会经济活动进行一个较完整的评价。

全寿命周期评价主要分为归因全寿命周期评价 (Attributional LCA, ALCA) 和归果全寿命周期评价 (Consequential LCA, CLCA) 两种^[9-10]。归因全寿命周期评价 (ALCA) 主要对生命周期内与环境相关的物质、能量流进行分析评价, 以时间为主要依据, 分析周期内各要素与环境之间的消耗与排放, 在清单分析时通常对总消耗和排放以及各项总消耗、各项总排放进行分析。本文主要分析的是桥梁工程建设阶段中的材料、机械和分项分工程的消耗与排放数据, 因此, 采用按时间进程排序和直接对环境影响进行评价的归因全寿命周期评价 (ALCA)。

2.2 桥梁生命周期的划分

ISO 指出生命周期评价包括 3 个步骤: 评价对象和范围的确定、清单分析、影响评价。目前国内学者^[3, 9]结合生命周期的相关文献和理论, 对公路的生命周期进行了许多的定义和阶段划分。大多数研究把项目工程的全生命周期分为规划设计阶段、材料生产阶段、材料运输阶段、物化阶段、运营维护阶段和报废回收阶段这六个阶段, 并经常把材料的运输阶段并入物化阶段或材料生产阶段, 其中绝大

部分碳排放来源于原材料、物化阶段^[3]。而由于桥梁的设计阶段很少有碳排放的产生, 且运营阶段过于复杂、时间跨度大, 桥梁的报废回收则远在“双碳”政策实现的时间节点之后, 所以本文主要研究桥梁生命周期中材料的开采、加工、运输和施工过程中的材料运输与使用的碳排放情况。并将桥梁生命周期按时间序列分为三个阶段: 物化阶段、桥梁使用阶段和拆除阶段。对于现有的其他研究中的材料生产和材料运输阶段, 将其作为物化阶段的一部分来进行分析, 并将建设阶段中的整体排放分为材料碳排放、机械碳排放和按工程分部分项分工艺的碳排放来进行数据分析。桥梁工程生命周期的阶段划分、建设阶段的范围划分和碳排放示意图如图 1 所示。

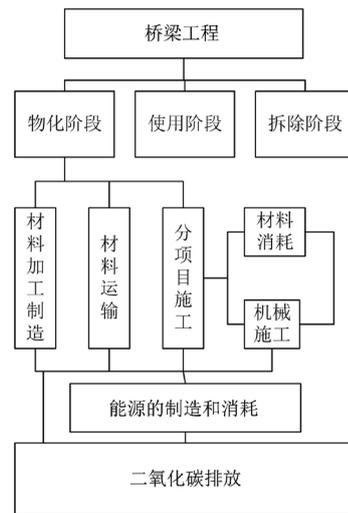


图 1 桥梁建设阶段范围划分
Fig.1 Bridge construction stage scope division

2.3 建设阶段碳排放的边界界定和核算方法

建设阶段的碳排放主要包括材料的生产 and 运输的碳排放, 施工中机械的使用所造成的碳排放和材料使用造成的碳排放, 这些排放都可以统合在施工工序的碳排放之中进行总体分析。

2.3.1 单位工程分部分项角度下的碳排放计算

桥梁工程物化阶段碳排放量化和工程计价具有相似性, 可以依据工程计价的分部分项方式对建设阶段中单项工艺的碳排放进行量化, 从而进行碳排放分析, 而受各处施工环境不同的影响, 每一个分项工程项目所在地的环境气候、地质、水文都不太一致, 桥梁工程建设单项工程的碳排放占比也有所不同。因此本研究引入工程计价分单位、分部、分项工程的划分标准实现桥梁工程建设阶段碳排放量计量结构化, 其中标准工艺部分的分类参照《公

路工程预算定额》，详细分类情况如下。

(1) 公路项目

本文中的公路项目指的是包含桥梁工程、路基工程和路面工程等全部组成部分的一整段或分段的建设项目。

(2) 桥梁工程

和路基工程、路面工程、临时工程等同为单位工程级别。

(3) 分部工程

分部工程是单位工程的组成部分，一般按单位工程中的主要结构和部位来划分。

(4) 分项工程

在分部工程的划分的基础上，按照施工方法、工程部位、材料、质量要求和施工难易程度划分。

(5) 标准工艺

在分项工程的基础上，按照《公路工程预算定额》的相关规范，细化到具体建设的操作部分。

按照《公路工程预算定额》的相关规范对单位工程进行项目划分之后，依据施工段的桥梁工程部分的数据，运用编程语言提取项目施工单项工程的各个项目施工量，然后对项目排放进行分析，得到排放最高的几类施工工艺。在这个过程中，单项项目的总排放已经包含了材料与机械的排放情况。具体计算见公式(1)。

$$E_{fm} = \sum_{i=1}^n V_i (\sum_{l=1}^n ef_l \times v_l) \quad (1)$$

式中， E_{fm} 为分项目工艺的碳排放总量； V_i 为单个项目 i 的施工总单位量； ef_l 为某一分项目工艺的单位施工量中，对应工艺所消耗掉的对应材料或机械的碳排放因子； v_l 为某一分项目工艺的单位施工量中，对应工艺所消耗的材料投入量或者机械的台班数。

2.3.2 材料碳排放的界定和核算

从 ALCA 的角度对桥梁工程建设阶段材料有关的碳排放进行分析和界定，主要包括从原材料的提取、生产、加工到运输至工地过程中所造成的碳排放。

近年来国际上对施工建设领域的碳排放核算方法众多，包括宏观分析和针对单项工艺的微观角度分析，主要包括物料平衡法、直接测算法和排放因子法。物料平衡法是根据质量守恒定律，对某系统整体碳的输入、输出和库存进行整体平衡计算的一种方法。排放因子法在计算上可看作物料平衡法的简化方法，二氧化碳排放量为二氧化碳排放活动数据与排放因子等系数的乘积。

本文采用碳排放因子法，从长安大学王元庆教授团队自主研发的排放因子库中进行查询，结合肇

明施工段中的桥梁工程施工部分数据，对使用的材料进行碳排放测算。具体计算见公式(2)。

$$E_1 = \sum_{i=1}^n M_i \times EF_i \quad (2)$$

式中， E_1 为建设阶段的材料碳排放（包括材料的制造及使用）； M_i 为第 i 类材料的使用量； EF_i 为第 i 类材料的碳排放因子（该碳排放因子可表征材料制造和使用过程中的全部碳排放）

2.3.3 建设阶段机械碳排放的界定和核算

机械的碳排放主要来自于燃料、能源与电力的生产和使用，按照 LCA，既包含使用阶段产生的碳排放，也包括获取时的碳排放。

在桥梁施工中，机械碳排放主要涉及机械台班消耗量和单位机械台班所消耗的能源量，机械台班消耗量可根据《公路工程预算定额》^[11] 和实际施工数据得到，单位机械台班所消耗的能源量可以查询《全国统一施工机械台班费用编制规则》^[12]。本阶段机械的碳排放核算也采用排放因子法来进行计算，查询自研数据库中能源的碳排放因子，利用施工段中的桥梁工程建设部分数据计算，如公式(3)所示。

$$E_2 = EF_1 \sum_{i=1}^n (N_1 \times T_{1i} \times C_{1i}) + EF_2 \sum_{i=1}^n (N_2 \times T_{2i} \times C_{2i}) + EF_3 \sum_{i=1}^n (N_3 \times T_{3i} \times C_{3i}) + EF_4 \sum_{i=1}^n (N_4 \times T_{4i} \times C_{4i}) + EF_5 \sum_{i=1}^n (N_5 \times T_{5i} \times C_{5i}) \quad (3)$$

式中， E_2 为建设阶段机械的总碳排放量； EF_i ($i=1, 2, 3, 4, 5$) 为机械使用过程中消耗的五种能源（柴油、汽油、电、重油、煤炭）的碳排放因子。（该碳排放因子表征了能源获取、运输和使用过程中的全部碳排放）； N_i ($i=1, 2, 3, 4, 5$) 为经定额换算下使用五种能源施工的机械所完成的定额工程量； T_{ji} ($j=1, 2, 3, 4, 5$) 为使用对应五种能源之一施工的机械完成单位定额工程量下的台班消耗量； C_{ji} ($j=1, 2, 3, 4, 5$) 为使用对应五种能源之一施工机械作业单位台班下对应的能源消耗量。

这部分数据中包含了材料运输至施工段时产生的碳排放，在最终计算时将与施工机械的碳排放同时计算，但分开统计。

3 西江特大桥施工建设实例分析

3.1 桥梁建设材料、机械和运输碳排放比例分析

肇明高速西江特大桥全长约 2 400 m，为双向 6 车道设计，桥面总面积约为八万平方米，总碳排放排放达 27.47 万吨。平均每车道建设碳排放为 4.58 万吨，桥梁建设每公里碳排放为 11.1 万吨，每平方

米桥面碳排放为 3.4 吨。

毛健人等^[13]认为在任何情况下, 事物的主要结果只取决于一小部分因素。这个思想也可以被用于分析桥梁建设阶段材料、机械和运输的碳排放占比情况。

分析材料、机械和运输在建设阶段中的碳排放数据, 可以得到碳排放占, 如图 2 所示。

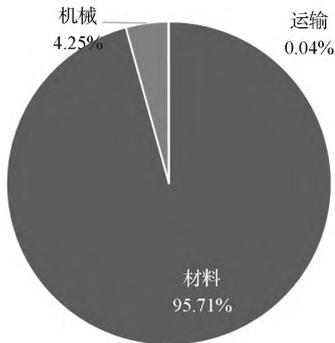


图 2 西江特大桥碳排放占比 Fig.2 Carbon emission ratio of Xijiang Bridge

3.2 分部分项工艺碳排放分析

从 LCA 的角度出发, 依据对《公路工程预算定额》的标准规范, 对总体项目进行分部分项分工艺的分类后, 可以按照单位项目的施工段位置进行总体和分工程的工艺碳排放分析。将肇明高速西江特大桥施工段中所有分项工艺的碳排放运用编程工具进行提取和计算后, 获得了所有不同工艺施工总量, 将其乘以对应的经过机械和材料消耗后的工艺碳排放因子, 即可获得对应的分项工艺碳排放情况。在获取所有的分项工艺碳排放数据后, 对数据进行排序累加, 选取占比较大的几类材料进行帕累托分析, 得到碳排放分析图如图 3 所示。

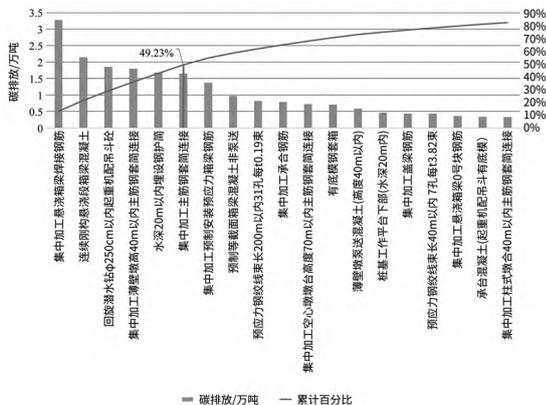


图 3 按工序划分碳排放分析图 Fig.3 Carbon emission analysis chart by process

数据分析的结果显示, 碳排放占比最高的工艺

为集中加工悬浇箱梁焊接钢筋, 为 13.0%, 从第六项工艺开始, 单工艺碳排放占比有一个较大的拐点, 拐点前的 6 项工艺占据了 117 个总工艺碳排放的 49.2%。这 6 个工艺依次为: 集中加工悬浇箱梁焊接钢筋、连续刚构悬浇段箱梁混凝土、回旋潜水钻 Φ250 cm 以内起重机配吊斗砼、集中加工薄壁墩高 40 m 以内主筋钢套筒连接、水深 20 m 以内埋设钢护筒、集中加工主筋钢套筒连接。以上工艺应纳入重点考察的碳排放热点, 可以考虑优化加工工艺或其他手段着重对其进行优化减排。

3.3 材料碳排放分析

将全工程中所有消耗的材料运用编程工具进行提取和计算后, 获得了所有不同材料的消耗量, 将其乘以碳排放因子后, 即可获得对应材料部分的全工程碳排放情况。在获取所有的材料碳排放数据后, 对数据进行排序累加, 选取占比较大的几类材料进行帕累托分析后, 得到碳排放图如图 4 所示。

数据分析的结果显示, 水泥类和钢筋类在所有材料的总碳排放中占比最大, 共占比 78.9%, 其中 HRB400 钢筋的占比最大, 达 45.7%。材料碳排放的累计百分比的第 2 个较大拐点在钢绞线处, 拐点前的 5 个材料占据了 63 个材料碳排放的 84.9%。这 5 个材料依次为: HRB400 钢筋、52.5 级水泥、32.5 级水泥、42.5 级水泥、钢绞线。这 5 类材料应纳入施工方和企业设计时的碳排放控制重点, 可以通过优化制造工艺及设计来减少使用或使用低排放的同类替换材料达到减碳控碳的目标。

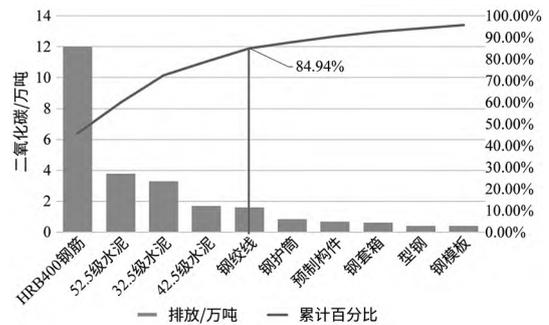


图 4 材料碳排放分析图 Fig.4 Material carbon emission analysis chart

3.4 机械碳排放分析

和材料的分析类似, 将全工程中所有机械的台班消耗运用编程工具进行提取和计算后, 获得了所有不同机械的台班的消耗量, 将其乘以对应能源消耗的碳排放因子后, 即可获得对应的机械部分的全工程碳排放情况。在获取所有的机械碳排放数据后,

对数据进行排序累加,进行碳排放分析,得到碳排放结果如图 5 所示。

数据分析结果显示,Φ2 500 mm 以内回旋钻机在所有机械的总碳排放中占比最大,达 24.8%,从第 11 个机械开始,机械碳排放累计百分比出现了 1 个较大的拐点,拐点前的 11 种机械占据了 50 种机械总碳排放的 78.4%。这 11 种机械依次为:Φ2 500 mm 以内回旋钻机、数控立式钢筋弯曲中心、32 kV·A 以内交流电弧焊机、Φ150 mm 以内电动多级水泵、25 t 以内汽车式起重机、6 m³ 以内混凝土搅拌运输车、50 kN 以内单筒慢动电动卷扬机、12 t 以内汽车式起重机、12 t 内 80 m 高塔式起重机、100 m³/h 以内混凝土搅拌船和 30 kN 以内单筒慢动电动卷扬机。这 11 种机械应纳入施工方和企业设计时的碳排放控制重点,其中,应重点对 Φ2 500 mm 碳排放情况进行监控和优化。

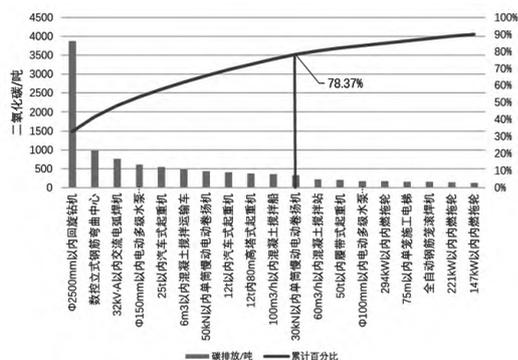


图 5 机械排放碳排放分析图

Fig.5 Mechanical emission carbon emission analysis chart

3.6 运输碳排放占比分析

进行机械碳排放分析的同时,分析机械运输材料时的排放数据,如图 6 所示。

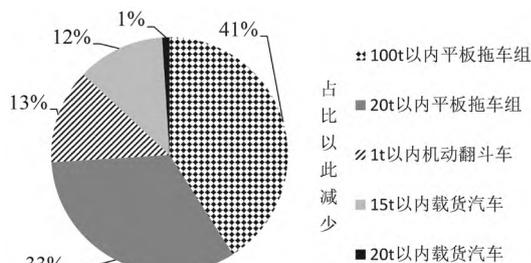


图 6 运输机械碳排放占比

Fig.6 Carbon emission ratio of transport machinery

数据分析的结果显示,100 t 以内和 20 t 以内平板拖车组在所有机械的总碳排放中占比最大,达 74%,1 t 以内机动翻斗车、15 t 以内载货汽车和 20 t 以内载

货汽车的占比则依次减少,分别为 13%、12% 和 1%。施工方和企业可以进一步优化机械的使用结构,使用清洁能源等方式对运输阶段的碳排放进行控制。

4 结语

本文以 LCA 方法为理论基础,以肇明高速西江特大桥施工段为例,对桥梁工程建设阶段中的碳排放进行了分析。全文分别从材料、机械和分项工艺三个角度对桥梁建设阶段的碳排放建立了计算模型,利用编程语言读取数据,然后作图进行碳排放分析,给出了各个项目、材料和机械的碳排放分布,得到了项目建设阶段中不同角度下的碳排放热点。

结合上述三个角度的分析,对桥梁工程建设阶段的减碳方向提出以下建议:

(1) 在分项工艺的排放中,排放热点共有六项分项工艺。企业和施工方在施工设计和实施过程中,可以针对这六项施工项目的实施过程、使用材料和机械使用等实际情况,针对性地进行优化,其中集中加工悬浇箱梁焊接钢筋这一工艺,占比最大,达 13.0%,可优化空间大,可以考虑在预加工时使用相关工艺,减少施工产生的碳排放。

(2) 在材料排放中,共有五类材料碳排放占比较大,占据了 63 个材料碳排放的 84.9%,其中水泥类材料和 HRB400 钢筋是碳排放的热点,应考虑对这几类材料的碳排放情况进行优化。可以通过优化施工设计方案,使设计流量尽量贴近实际情况,以减少这些材料的使用需求;或者使用同类的相对低排放的替代材料进行施工;也可以针对这几种材料优化上游生产流程(如增加排气口的碳拦截效率),减少单位材料的碳排放水平。

(3) 在机械排放中,排放热点共有十一类机械,占据了 50 种机械总碳排放的 78.4%,其中排放最多的机械为 Φ2500mm 以内回旋钻机(占比 24.8%),应重点对其碳排放情况进行监控和优化,可以考虑优化使用方案、使用更清洁的能源等方式进行碳排放的控制,达到减碳控碳的目的。

参考文献:

- [1] 周新军. 高速铁路助推中国低碳经济效应[J]. 中国科学院院刊, 2011, 26(04): 452-461.
- [2] 李振宇, 李超, 尹志芳. 德国和日本交通碳排放发展及对中国的启示[J]. 公路与汽运, 2014(01): 35-38.
- [3] 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 (下转第 37 页)

