

基于 LCA 的沥青路面施工期碳排放模型及特征研究

张兴宇, 朱晓东, 左贵强, 牛 凯

(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津市 300074)

摘 要: 沥青路面建设产生大量的温室气体,是交通领域节能减排的重点。通过分析沥青路面施工期碳排放来源,结合 IPCC 及 CLCD 数据库等提供的碳排放因子资料,采用 LCA 法构建沥青路面施工期碳排放计量模型,基于典型路面结构方案得出原材料生产、场外拌和、运输和现场施工阶段碳排放量及特征规律。结果表明:沥青面层施工过程中,原材料生产阶段碳排放量最高,占总排放量的 47.52%;混合料拌和阶段次之,占总排放量的 44.71%,节能减排措施以采用清洁燃料、提高施工机具生产效率为主;水稳基层/底基层铺筑同样为原材料生产阶段,碳排放量占比最高,高达总量的 90%,节能减排措施以选用低碳水泥为主。

关键词: LCA; 沥青路面; 碳排放; 计量模型; 节能减排

中图分类号: U416.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)01-0013-05

0 引 言

落实碳达峰、碳中和目标已成为我国重大战略决策。交通作为 CO₂ 排放的主要来源之一,占全球与能源活动相关的 CO₂ 排放总量的 27%^[1],是实现节能减排的重点领域。在交通行业减排过程中,往往更加重视汽车尾气所产生的碳排放,而忽略交通基础设施建设过程中的碳排放影响。事实上,道路建设消耗大量水泥、沥青等高碳密度建筑材料,使用柴油、汽油、电力驱动的施工机械,产生大量的温室气体。据统计,该部分碳排放量约为交通运输碳排放总量的 10%~20%^[2],不可小觑。

目前,国内外采用生命周期评价(Life Cycle Assessment,以下简称 LCA)方法开展的道路设计、施工、运营全过程能耗与碳排放量化分析的研究成果较多。例如:Nisbet 等^[3-5]利用 LCA 法对沥青及水泥路面建设、维护阶段的碳排放及能耗进行量化分析;类似的,张海涛等^[6-7]采用公路工程定额,对沥青路面建设过程进行碳排放量化评估,剖析了半刚性基层、复合式基层等不同路面结构类型对碳排放结果的影响水平;张红波等^[8]对橡胶改性沥青路面建设期能耗和碳排放进行分析,发现橡胶沥青节能减排效果优于 SBS 改性沥青。

现有研究多针对某一阶段的(如材料物化、现场施工)碳排放计算模型构建,对完整的建设期碳排放

模型构建研究尚不完善,且对于后续的影响评价分析有待深化。本文通过追溯沥青路面铺筑碳排放源头,搜集相关碳排放活动因子,采用 LCA 法构建沥青路面建设阶段碳排放计量模型,并以典型路面结构方案为例,对其原材料生产、场外拌和、运输和现场施工阶段碳排放量进行量化分析,得出不同阶段、不同建筑材料的碳排放特征规律。研究可为沥青路面结构设计、铺筑过程的低碳减排提供一定的理论依据。

1 沥青路面 LCA 概述

LCA 是指评估某一建设活动从原料开采到产品加工生产、使用、维护至废弃整个生命周期过程中所有投入和产出对环境造成影响的方法^[9]。其分析过程包括目标定义与边界划分、生命周期清单分析、生命周期影响评估、生命周期结果解译 4 个部分。

1.1 目标定义与边界划分

该阶段是开展生命周期分析的首要步骤,需要确定评价对象、评价目的、系统边界,即框选出合理的研究范围。本文以沥青路面施工期碳排放为评价对象,研究范围包括沥青、石料、外掺剂等原料的生产,场外拌和,材料运输,以及现场施工 4 个过程。系统边界如图 1 所示,不包括基础设施的建设、施工设备生产、燃料生产及路面的维修养护等过程。此外,对分析结果影响较小的施工环节及原料生产环节可以忽略不计。

1.2 生命周期清单分析

该阶段是整个 LCA 的核心环节,是对沥青路面生命周期内碳排放进行量化的过程,包含碳排放因子

收稿日期: 2022-05-17

基金项目: 2022 年度天津市交通运输科技发展项目(2022-29)

作者简介: 张兴宇(1992—),女,硕士,工程师,从事道路工程设计研究工作。

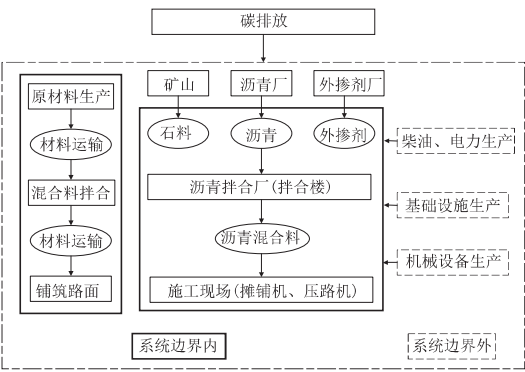


图 1 沥青路面施工期碳排放计量系统边界

收集和碳排放量计算两个部分。通过清单分析可量化沥青路面施工过程产生的碳排放量对环境的负荷影响,从而做出评估与预测^[6]。

1.3 生命周期影响评估

影响评估是在碳排放量化结果的基础上深度分析沥青路面建设碳排放的特征,从不同颗粒度上评价其对环境影响的程度。该步骤有利于分析出沥青路面建设碳排放的关键因素,从而为建设者提供如何减碳的决策支持。

1.4 生命周期结果解译

生命周期结果解译就是综合上述 3 个环节的分析结果,形成总结与建议的阶段。对于沥青路面建设施工阶段的碳排放来说,就是识别出排放热点、敏感性因素等,给出评价结果,并提出相应的改进措施以降低其对环境的影响。

2 碳排放测算方法

为研究沥青路面施工期碳排放情况,本文采用 LCA 法将其划分为原材料生产、场外拌和、材料运输和现场施工 4 个阶段,结合排放因子法,构建路面施工期碳排放计算模型,量化分析路面工程施工期的碳排放情况。

2.1 碳排放来源

沥青路面施工期的碳排放主要源自于每个阶段的施工工序和多种机械设备。通过梳理沥青路面整个施工过程,得出各阶段碳排放来源及其类别^[10](见表 1)。

表 1 沥青路面施工期碳排放来源及类别表

生产阶段		排放源	主要能源类型	排放气体
原材料生产阶段	集料	喂料机、推土机、破碎机、铲运机、筛分机等	柴油、电能	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、SF ₆
	沥青	热交换机、脱水器、减压塔、氧化塔、改性或乳化沥青生产设备等	电能、燃料、原油发挥	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、SF ₆
	矿粉	粉磨机	电能	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、SF ₆
	水泥	钻孔机、堆料机、破碎机、粉磨机、碳酸钙分解、碳酸镁分解	电能、燃料、化学反应	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、SF ₆
拌和阶段	沥青混合料	电气及控制系统、燃烧器、沥青导热油提升系统、热料筛分仓、计量器等	电能、柴油、天然气、化学反应	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、SF ₆ 、HFCs
	混合料(基层/垫层材料)	装载机、配料机、拌和设备	电能、柴油、天然气	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、SF ₆ 、HFCs
运输阶段	原材料	公路(汽车)、铁路(机车)、水运(船舶)	电能、柴油	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、SF ₆
	混合料	公路(汽车)	柴油	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O
施工阶段	摊铺	摊铺机、洒水车	柴油、天然气、化学反应	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O
	碾压	压路机	柴油、化学反应	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O
	养生	洒水车	柴油	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O

2.2 碳排放因子取值

(1)原材料生产

沥青路面施工筑路材料一般包含沥青、水泥、矿粉、碎石等。原材料生产阶段碳排放因子数据参照欧洲沥青协会数据库(Eurobitumen 2011)、中国本地化 CLCD 数据库及相关文献^[11]取值(见表 2)。为统一衡量温室效应的结果,本文碳排放以当量 CO₂ 排放值表示,通过全球变暖潜在值(GWP)对排放气体进行换算。

(2)材料运输

表 2 原材料生产碳排放因子

原材料类型	碳排放因子/(kg·t ⁻¹)	原材料类型	碳排放因子/(kg·t ⁻¹)
普通沥青	189.12	碎石	2.43
改性沥青	323.04	矿粉	7.36
乳化沥青	219.75	集料	3.45
水泥	870.50	木质素纤维	178.43

材料运输阶段因运输方式、运距不同而产生不同的碳排放量,来源主要涉及筑路原材料运输到拌和厂、拌和加工后运输到施工现场两类。一般原材料的运输手段主要有公路、铁路、水路 3 类;加工后

的混合料则以公路运输为主,采用不同型号的货车、自卸车等。不同运输方式的碳排放因子见表 3。

表 3 不同运输方式单位周转量碳排放因子^[8]

运输方式	碳排放因子/(kg·t·km ⁻¹)
公路	汽油货车
	柴油货车
水路	小型机动船
	大型船舶
铁路	内燃机车
	电力机车

(3)场外拌和及现场施工

混合料场外拌和及现场施工的碳排放来源主要是拌合设备、摊铺机、压路机以及洒水车等施工机具及车辆的运作,涉及汽油、重油、柴油、天然气以及电能等能源。该部分碳排放因子参照《IPCC 国家温室气体清单指南》、《中国能源统计年鉴》以及 CLCD 数据库取值(见表 4)。

表 4 能源材料碳排放因子

能源类型	CO ₂ 当量/kg
精煤	2.19
重油	3.06
柴油	3.69
汽油	3.57
燃料油	3.61
天然气	2.82
电	1.07

2.3 碳排放计算模型

沥青路面施工期涉及原材料生产、场外拌和、材料运输以及现场施工 4 个阶段,总碳排放量 E 为其总和,测算模型为:

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 \tag{1}$$

式中: E 为沥青路面施工期碳排放总量,kg; E_1 为原材料生产阶段碳排放量,kg; E_2 为场外拌和阶段碳排放量,kg; E_3 为材料运输阶段碳排放量,kg; E_4 为路面现场施工阶段碳排放量,kg。

其中原材料生产阶段碳排放计量模型:

$$E_1 = \sum_{i=1}^n M_i \times f_m^i \tag{2}$$

式中: M_i 为第 i 种材料的消耗量; f_m^i 为第 i 种原材料单位质量生产碳排放因子。

场外拌和阶段碳排放计量模型:

$$E_2 = \sum_{ij} T_i \times Q_{ij} f_l^j \tag{3}$$

式中: T_i 为第 i 种场外加工机具的总台班数,个; Q_{ij} 为第 i 种场外加工机械设备单位台班内第 j 种能源的

消耗量; f_l^j 为第 j 种能源碳排放因子。

材料运输阶段碳排放计量模型:

$$E_3 = \sum_{ij} M_i \times S_{ij} \times f_s^j \tag{4}$$

式中: M_i 为第 i 种材料的消耗量; S_{ij} 为第 i 种材料第 j 种运输方式运距; f_s^j 为第 i 种材料第 j 种运输方式单位周转碳排放量。

路面现场施工阶段碳排放计量模型:

$$E_4 = \sum_{ij} T_i \times Q_{ij} \times f_l^j \tag{5}$$

式中: T_i 为第 i 种现场施工机具的总台班数,个; Q_{ij} 为第 i 种现场施工机具单位台班内第 j 种能源的消耗量; f_l^j 为第 j 种能源碳排放因子。

3 典型沥青路面结构碳排放分析

以典型高速公路沥青路面结构为例进行碳排放影响评价。某高速公路工程项目设计时速 120 km/h,路基宽度 37.5 m,双向 6 车道,行车道宽度 3.75 m,设计使用年限为 15 a。路面结构为:4 cm SBS 改性沥青玛蹄脂碎石上面层(SMA-13)+6 cm 中粒式沥青混凝土中面层(AC-20)+10 cm 沥青稳定碎石下面层(ATB-25)+21 cm 水泥稳定碎石基层(水泥掺量 5%)+22 cm 水泥稳定碎石底基层(水泥掺量 5%)+20 cm 级配碎石垫层。

为简化计算量,以每公里该项目的半幅路面作为 1 个计算单元,其原材料消耗清单见表 5。根据项目工程量清单、材料运距,结合《2018 公路工程预算定额》、《2018 公路工程机械台班费用定额》得到施工过程对应的机械种类、台班数及每台班燃料消耗量(部分数据见表 6)。经计算,1 个计算单元的沥青路面建设期碳排放量见表 7。

对表 7 中的路面上、中、下面层各阶段的碳排放量进行汇总及占比统计,可以发现在沥青面层铺筑过程中:原材料生产阶段碳排放量最高,占总排放量的 47.52%;混合料拌和阶段次之,占总排放的 44.71%(见图 2、图 3)。因此,选择优化沥青等能源密集型材料的生产工艺,提高拌和设备的生产效率,可以有效降低碳排放量,实现节能减排。

对表 7 中路面基层/底基层各阶段的碳排放量进行汇总及占比统计,发现水泥稳定碎石基层/底基层在铺筑过程中,原材料生产阶段碳排放量占绝对主体地位,约占总排放量的 89.53%(见图 4、图 5)。因此,设计选用水泥类半刚性基层或底基层时,应倡导采用环保型低排放水泥产品,可有效降低碳排放量。

表 5 计算单元沥青路面结构原材料消耗量

主要类别	改性沥青 /t	普通沥青 /t	矿粉 /t	石屑 /m³	碎石 /m³	砂 /m³	纤维 /t	水泥 /m³
消耗量	64.94	195.68	298.61	603.38	11 695.99	650.57	3.31	540.35

表 6 计算单元沥青路面拌和及现场施工燃料消耗量(以 4 cm SMA-13 为例)

结构	机械名称	台班消耗数量 / 个	燃料类型			
			柴油 /kg	汽油 /kg	重油 /kg	电 /(kW·h)
4 cm SMA-13	320 t/h 以内沥青拌和设备	0.71	—	—	9 788.86	3 657.33
	12.5 m 以内沥青混合料摊铺机	0.22	29.97	—	—	—
	6~8 t 光轮压路机	1.97	37.82	—	—	—
	12~15 t 光轮压路机	2.37	94.80	—	—	—
	15 t 以内振动压路机(双钢轮)	1.95	157.56	—	—	—

表 7 计算单元沥青路面施工期碳排放量(CO₂ 当量)

单位:kg

阶段	上面层(SMA-13)	中面层(AC-20)	下面层(ATB-25)	基层(水泥稳定碎石)	底基层(水泥稳定碎石)	垫层(级配碎石)
原材料生产	46 085.07	42 888.44	65 677.46	273 415.10	286 435.70	10 834.74
拌和	33 700.53	43 145.26	68 688.98	4 851.18	5 120.69	—
运输	—	10 857.47	—	13 028.96	13 028.96	6 514.48
摊铺	110.99	496.05	815.43	11 290.94	11 290.94	2 079.75
碾压	10 777.14	906.52	1 325.47	2 245.43	2 245.43	1 943.10
养生	—	—	—	546.03	546.03	775.01
合计	90 673.73	87 436.27	147 364.81	305 377.64	318 667.75	22 147.08

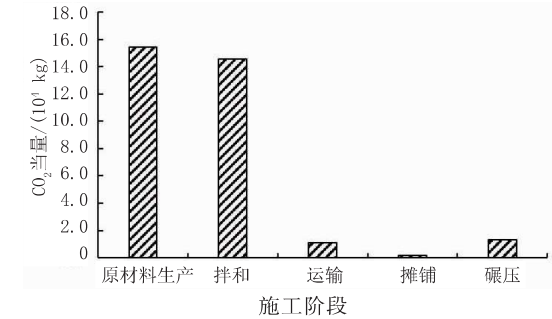


图 2 沥青面层施工各阶段碳排放量

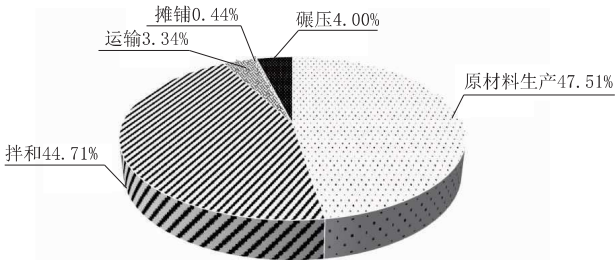


图 3 沥青面层施工各阶段碳排放量百分比

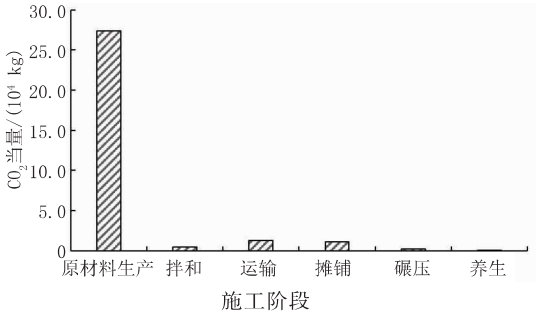


图 4 水稳基层 / 底基层施工各阶段碳排放量

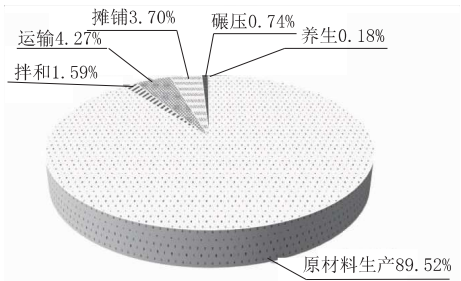


图 5 水稳基层 / 底基层施工各阶段碳排放量百分比

对表 7 中路面垫层各阶段的碳排放量进行汇总及占比统计,发现级配碎石垫层在铺筑过程中,其排放量最高值同样在原材料生产阶段,占比为 48.92%(见图 6、图 7)。

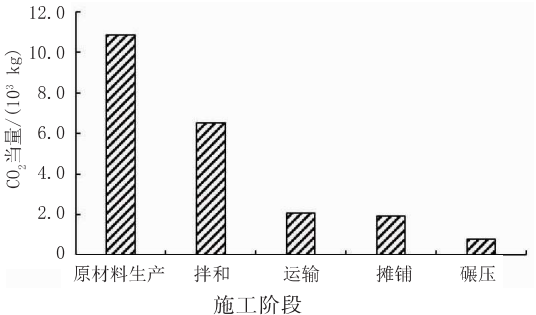


图 6 级配碎石垫层施工各阶段碳排放量

此外,通过横向对比沥青路面各单位结构层的碳排放量(见图 8)发现:

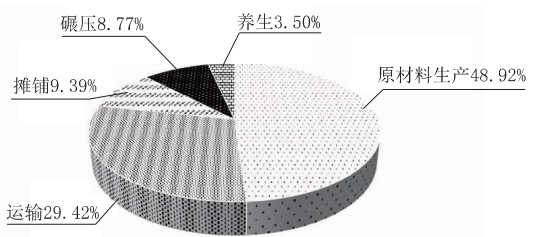


图 7 级配碎石垫层施工各阶段碳排放量百分比

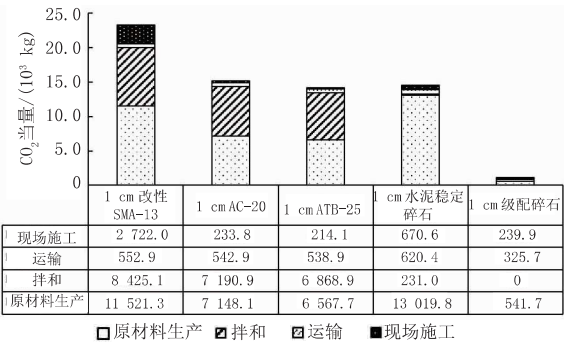


图 8 沥青路面各单位结构层碳排放量对比

(1)在原材料生产阶段,碳排放量排序为:水泥稳定碎石>沥青混合料>级配碎石。

(2)在拌和及现场施工阶段,以机具排放为主,碳排放量排序为:沥青混合料>水泥稳定碎石>级配碎石,且沥青混合料的碳排放量是水泥稳定碎石、级配碎石的 10 倍以上。

(3)由于级配碎石为无机结合料,因此在几种路面结构层中碳排放量最小。

因此,在施工过程中,沥青面层以控制拌和设备、摊铺机等机具的碳排放为主,建议:一是采用天然气拌和站、变频技术施工设备,并合理优化施工工序,提高机械利用效率与满载率;二是半刚性基层/底基层以筑路材料控制为主,选用环保低碳水泥产品,或降低水泥掺量;三是在满足路面设计要求的前提下,可以适当增加级配碎石层的厚度,减少半刚性基层的厚度,或采用级配碎石替代半刚性材料基层。

4 结 论

(1)根据 LCA 法将沥青路面施工期划分成原材料生产、场外拌和,材料运输以及现场施工 4 个阶段,梳理碳排放来源,搭建沥青路面施工期碳排放计量模型。

(2)量化典型沥青路面结构碳排放量,结果表明:在沥青面层、水稳基层/底基层、级配碎石垫层铺筑各阶段中,原材料生产阶段的碳排放量均最大,为排

放主体,其中沥青面层与级配碎石垫层铺筑阶段分别约占总量的 1/2,水稳基层/底基层铺筑阶段约占总量的 9/10。

(3)横向对比各单位结构层的碳排放量发现:原材料生产阶段,碳排放量排序为水泥稳定碎石>沥青混合料>级配碎石;拌合及现场施工阶段,碳排放量排序为沥青混合料>水泥稳定碎石>级配碎石,且沥青混合料的碳排放量是水泥稳定碎石、级配碎石的 10 倍以上。

(4)通过对沥青路面施工碳排放特征进行分析,提出了使用清洁燃料、采用高效节能机械设备、提升拌和设备生产效率以及采用环保低碳水泥产品等减排措施,提升道路建设过程降碳减排的能力,减少对生态环境的破坏。

参考文献:

[1] 刘圆圆. 基于 ALCA 的公路生命周期二氧化碳计量理论与方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.

[2] 刘杰, 高嘉蔚. 交通基础设施碳排放核算关键问题及对策探索[J]. 交通节能与环保, 2021, 17(5): 4-9.

[3] NISBET M, VANGEEM M G, GAJDA J. Environmental Life Cycle Inventory of Portland Cement Concrete [C] //ACS Symposium. Washington: ACS, 2000: 83-87.

[4] CASS D, MUKHERJEE A. Calculation of greenhouse gas emissions for highway construction operations by using a hybrid life-cycle assessment approach: case study for pavement[J]. Journal of Construction Engineering Management, 2011, 137(11): 1015-1025.

[5] QAZI Aurangzeb, IMAD L. Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content. Resources[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2014(83): 77-86.

[6] 张海涛, 孟良, 吕丽华. 基于 LCA 的沥青路面设计参数对碳排放的影响[J]. 公路交通科技, 2018, 35(2): 1-7.

[7] 闫强, 易可良, 李平, 等. 沥青路面结构类型对建设期碳排放影响分析[J]. 中外公路, 2021, 41(2): 41-48.

[8] 张红波, 陈海涛, 徐升, 等. 橡胶改性沥青混合料路面建设能耗与碳排放评价[J]. 公路工程, 2021, 46(3): 154-164.

[9] FINKBEINER M, INABA A, TAN R, et al. The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2006, 11(2): 80-85.

[10] 蔺瑞玉, 沙爱民, 杨发林, 等. 沥青路面温室气体排放评价方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2014, 34(6): 19-26.

[11] 高放. 基于 LCA 的沥青路面建设期能耗和排放量化分析研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.