



典型钢桥面铺装体系 生命周期碳足迹分析

钱振东 汤文杰 刘 阳 张煜恒 谢宇欣

(东南大学智能运输系统研究中心, 南京 211189)

摘要: 为了量化钢桥面铺装体系的碳排放量,应用基于过程的生命周期评价方法分析了钢桥面铺装体系的生命周期碳足迹.从材料生产、施工建造、运营管理、维修养护、废弃处置和运输 6 个过程构建了钢桥面铺装体系碳排放的生命周期清单数据库.采用国际平整度指数建立铺装层行驶质量衰减下的碳排放预估模型.利用 SMUO 仿真软件进行交通延误仿真获取相关参数以建立交通延误的碳排放模型.建立了相应的碳足迹量化框架和模型.同时对下层 EA(环氧)+上层 SMA(沥青玛蹄脂)典型铺装体系进行了实例分析.结果表明,维修养护和运营管理阶段贡献了碳排放总量的近 80%,交通延误导致的额外碳排放约达到了碳排放总量的 24%.固化剂、喷砂除锈等材料或施工工艺也分别贡献了碳排放总量的 8.11% 和 5.42%.

关键词: 钢桥面铺装体系; 生命周期评价; 碳足迹; 交通延误

中图分类号: U416.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0505(2024)02-0321-08

Analysis on the carbon footprint of life cycle for typical steel bridge deck pavement system

Qian Zhendong Tang Wenjie Liu Yang Zhang Yuheng Xie Yuxin

(Intelligent Transport System Research Center, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: To quantify the carbon emissions of steel bridge deck pavement system, a process-based life cycle assessment method was applied to analyze the life cycle carbon footprint of steel bridge deck pavement system. A life cycle inventory database of carbon emissions for steel bridge deck pavement system was constructed through six processes: material production, construction, operation, maintenance, waste disposal and transportation. The international roughness index was used to establish the carbon emission prediction model under the decay of traveling quality. SMUO simulation software for traffic delays simulation was used to establish the carbon emission model of traffic delays. A corresponding carbon footprint quantification framework and model was established, and a case study for typical bridge pavement system of lower EA (epoxy asphalt) + upper SMA (stone mastic asphalt) was implemented. The results show that the maintenance and operation phases contribute nearly 80% of the total carbon emissions, the additional carbon emissions caused by traffic delays amounts to about 24% of the total carbon emissions, while materials or construction processes such as curing agents and sandblasting rust removal contribute 8.11% and 5.42% of the total carbon emissions, respectively.

Key words: steel bridge deck pavement system; life cycle assessment (LCA); carbon footprint; traffic delays

随着国家碳达峰碳中和目标的提出,建设低碳节能的交通基础设施成为未来的发展趋势.目前针对交通基础设施全生命周期的环境影响研究主要集中于道路工程的路面工程,且一般聚焦于水泥路面和沥青路面的环境影响,而对于钢桥面铺装体系

的碳足迹研究却鲜有涉及. Yu 等^[1]运用生命周期评价(LCA)方法对水泥混凝土路面、热拌沥青路面和接缝混凝土路面的修复技术的环境影响进行了对比分析.结果表明沥青路面的环境负担较高.刘士南等^[2]进行了环氧再生沥青路面的碳排放研

收稿日期: 2023-05-30. 作者简介: 钱振东(1969—),女,博士,教授,博士生导师. qianzd@seu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(51878167).

引用本文: 钱振东, 汤文杰, 刘阳, 等. 典型钢桥面铺装体系生命周期碳足迹分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2024, 54(2): 321-328.

DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2024.02.009.

究,其全生命周期碳排放较普通再生路面可以减少 50% 以上。Bo 等^[3]在道路 LCA 研究的基础上,首次运用 LCA 理论对钢桥面铺装层开展了环境影响研究,并对下层 GA(浇筑) + 上层 SMA(沥青玛蹄脂)和双层 EA(环氧)两种铺装类型的环境影响进行了对比分析。

随着道路 LCA 研究的不断深入,较多研究开始关注运营管理阶段的车路作用、维修养护阶段的道路养护所引起的环境影响问题^[4-7]。对于运营管理阶段的车路作用,目前研究多认为路面国际平整度指数是影响车辆行驶滚动阻力和燃油经济性的主要因素^[8],如世界银行开发公路发展与管理系统的 HDM-4 模型以量化路面特性导致的额外燃油消耗^[9]。对于维修养护阶段的道路养护,目前研究多关注于养护技术的节能效益研究^[10]。Santos 等^[11]对薄层罩面、铣刨重铺和就地冷再生方法进行了比较。唐皓等^[12]研究了就地冷再生技术的节能效益。

尽管 LCA 在钢桥面铺装等道路工程的环境影响研究中得到诸多应用,但却更多集中于材料生产和施工技术等物化阶段的环境影响研究,对持续时间更长、排放贡献更大的运营管理和维修养护阶段的环境影响考虑尚且不足,不能够准确全面地反映生命周期全过程的环境影响情况。本文依托道路 LCA 理论基础,立足于分析典型钢桥面铺装体系的生命周期全过程的碳足迹,以促进钢桥面铺装体系的低碳化发展。采用基于过程的 LCA 方法,建立我国钢桥面铺装体系的生命周期清单数据库和碳足迹量化模型,并对下层 EA + 上层 SMA 典型铺装体系进行案例分析,同时对碳排放占比较大的材料或施工工艺提出碳减排建议。

1 研究方法

1.1 生命周期评价方法

LCA 通过考虑生命周期全过程中所有能源输入以及环境排放等相关输出来评价某产品或某技术的环境影响。相比于输入-输出 LCA 方法和混合 LCA 方法,基于过程的 LCA 方法更契合钢桥面铺装体系的生命周期特征,因此本文采用基于过程的 LCA 方法进行典型钢桥面铺装体系生命周期碳足迹的研究,并将其生命周期阶段划分为:材料生产、施工建造、运营管理、维修养护、废弃处置,其中各个阶段内部的运输环节将单独进行分析。

1.2 碳足迹系统边界和计算方法

1.2.1 系统边界

钢桥面铺装是直接铺筑在钢桥面板上的防护层,用以保护钢板和提供车辆行驶要求的路表功能。本文将以下层 EA + 上层 SMA 典型铺装体系方案为研究对象,分析并量化其 1 km 铺装长度的生命周期全过程的碳足迹。需要进一步说明的是,本文中涉及的环境影响为热拌环氧沥青。

对于钢桥面铺装体系,其生命周期全过程中涉及的个体数量繁多,包含原材料开采至废弃处置的各种工机料流程,理论上这些个体和流程的划分越详细,LCA 结果的可靠性越高,但也由此增加了清单分析的工作量,因此需要在系统边界的划定中说明相关取舍规则。

参考《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)^[13]规定的建筑建造过程中碳排放计算的取舍规则,确定钢桥面铺装体系生命周期碳足迹的系统边界,如图 1 所示。

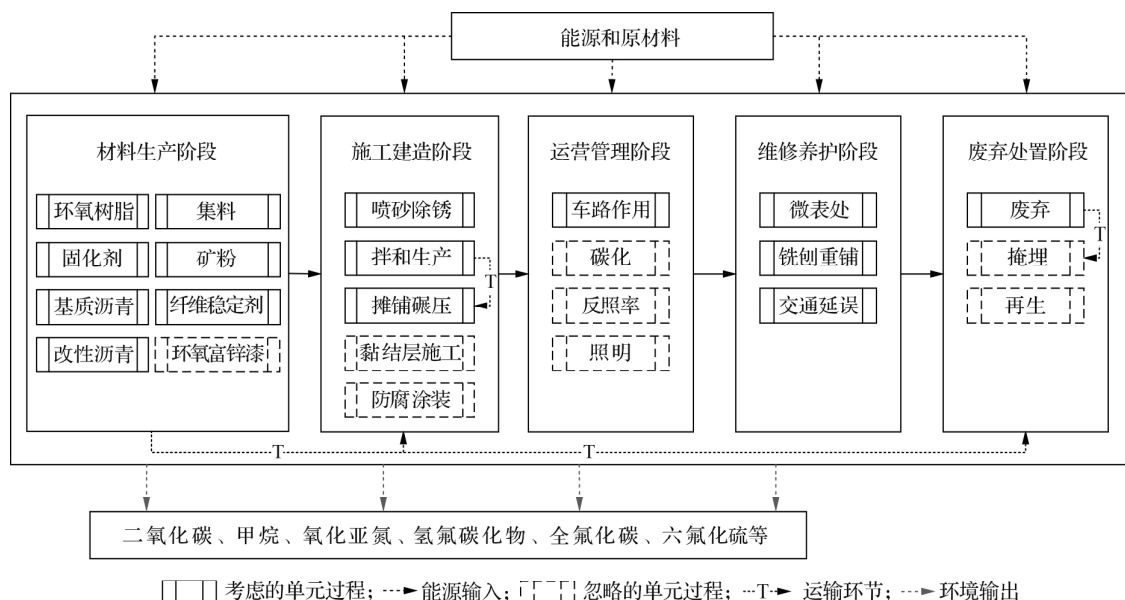


图 1 钢桥面铺装体系生命周期碳足迹系统边界

1.2.2 计算方法

碳足迹是指一个产品在其生产、使用直至废弃过程中所产生的温室气体排放。《联合国气候变化框架公约的京都议定书》中规定 6 种需要控制的温室气体为: 二氧化碳(CO₂)、氧化亚氮(N₂O)、甲烷(CH₄)、氢氟碳化合物、全氟碳化合物、六氟化硫。本文将 CO₂、N₂O、CH₄ 三种常见温室气体作为碳足迹核算气体。此外,为了精确计量钢桥面铺装体系生命周期的碳足迹,常将温室气体统一为可以累加的单一指标: 碳排放当量。本文中碳足迹的计算结果皆为碳排放当量,其计算公式如下:

$$Q_{m,CO_2e} = \sum_{m=1}^n (Q_m G_m) \tag{1}$$

式中,下标 $m = 1, 2, 3$ 分别表示 CO₂、N₂O、CH₄; Q_{m,CO_2e} 表示第 m 种温室气体的二氧化碳当量(CO₂eq), kgCO₂eq; Q_m 表示第 m 种温室气体的排放质量, kg; G_m 表示第 m 种温室气体的全球增温潜势(GWP)值,由于 CO₂ 在大气中留存时间较长,

一般计算二氧化碳当量采用 100 a 时间跨度的 GWP 值,其中 G_1 为 1, G_2 为 298, G_3 为 25。

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)提供的排放因子法是目前最为广泛的核算温室气体的方法,因此本文采用排放因子法进行碳足迹量化,其基本方程如下:

$$Q = A_D E_F \tag{2}$$

式中, Q 表示温室气体排放量; A_D 为活动数据,表示能源消耗量或材料用量; E_F 为排放因子,表示单位能源、材料消耗造成的温室气体排放量。

1.3 碳排放因子

钢桥面铺装体系生命周期碳足迹的计量,需要得到各种基础能源的碳排放因子数据。我国《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)^[13] 在 IPCC 的研究基础上,结合国内建材行业统计和文献资料,并参考中国生命周期基础数据库,公布了部分建筑行业所需的碳排放因子数据。本文将主要参考标准[13]中提供的碳排放因子数据,如表 1 所示。

表 1 能源碳排放因子

碳排放因子/(kgCO ₂ eq · kg ⁻¹)							华东区域电力碳排放因子/ (kgCO ₂ eq · (kW · h) ⁻¹)	水碳排放因子/ (kgCO ₂ eq · t ⁻¹)
原煤	标准煤	天然气	原油	柴油	汽油	重油		
1.900 3	2.461 8	2.756 7	3.024 0	3.099 8	2.928 7	3.015 7	0.703 5	0.168 0

2 生命周期清单分析

2.1 材料生产阶段

材料生产阶段碳排放的量化主要考虑环氧沥青混合料和改性 SMA 所需环氧树脂、固化剂、沥青、矿质集料等材料的生产过程。这些生产过程涵盖了从原材料提取、完成产品本身的生产加工、包装,到出厂的“从摇篮到大门”这一系列工艺流程。通过文献^[14-15]调研,获取生产 1 t 以上材料的碳排放数据如表 2 所示。需要指出的是,受时间、地域、生产技术、数据来源、数据样本等因素的影响,材料生产的碳排放数据往往表现出一定的差异性^[16-19]。在采用碳排放数据时,需要从以上 5 个方面进行数据质量可靠性的量化,数据质量可靠性越

高,碳排放计算结果的准确性越高^[20]。

2.2 施工建造阶段

对于施工建造阶段,主要包括从拌和站备料到最终摊铺、碾压、养护成型的全过程。本阶段碳排放的量化主要考虑钢板喷砂除锈、混凝土料生产、摊铺以及碾压等过程。本节采用能源消耗的定额法,依据《公路工程预算定额》(JTG/T 3832—2018)^[21]中提供的生产工艺和施工过程的能源消耗,再通过表 1 中碳排放因子数据确定施工建造阶段的碳排放清单数据如表 3 所示。

2.3 运营管理阶段

研究表明,路面行驶质量与车辆燃油消耗存在一定相关性^[9]。铺装层的行驶质量通常采用国际平整度指数(IRI)作为量化指标。Chatti 等^[22]通过现

表 2 材料生产阶段清单数据

单元 过程	能源消耗					温室气体排放量/kg					数据 来源
	m (原 煤)/kg	m (天然 气)/kg	m (原 油)/kg	m (柴 油)/kg	用电量/ (kW·h)	用水量/t	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	CO ₂ eq	
环氧树脂	600				180	12	1 268.83			1 268.83	企业
固化剂							3 960			3 960	企业
基质沥青	1.03	20.1	40.9			0.143	174.244		0.595	189.119	文献[14]
改性沥青	8.5	50	59.9			7.078	296.91		1.085	323.035	文献[14]
集料	1.469			0.671	3.369		5.72	1.65×10^{-4}	1.45×10^{-4}	5.77	文献[15]
矿粉	2.907				6.667		7.355	1.16×10^{-4}	0.79×10^{-4}	7.392	文献[15]

表 3 施工建造阶段清单数据

单元过程	能源消耗				碳排放量 /kgCO ₂ eq	
	<i>m</i> (标准煤) /kg	<i>m</i> (重油) /kg	<i>m</i> (柴油) /kg	用电量/(kW · h)		用水量/t
1 000 m ² 钢板喷砂除锈	566.988			1 952.82	10	2 771.300
1 000 m ³ 热拌 EA 生产		16 958.18	364.03	15 295.94		63 029.897
1 000 m ³ 改性 SMA 生产		16 958.18	416.69	6 335.94		56 889.773
1 000 m ³ EA 层摊铺碾压			985.52			3 054.915
1 000 m ³ SMA 层摊铺碾压			891.49			2 763.441

场试验,在 5 种车辆类型和 3 种速度下校准了世界银行的 HDM-4 模型,并提供了离散速度下 IRI 增加时车辆额外燃料消耗的调整因子.本文参考 Chatti 等^[22]利用 HDM-4 模型得到的油耗变化数据,计算可得对应车型和基准速度下每增加一单位 IRI 的燃油消耗变化率值 C_i .5 种车型分别为小客车、SUV、小货车、中货车、大货车,每 100 km 对应基础油耗分别为 10.785、12.896、14.049、18.018、44.731 L; C_i 值分别为 2.4%、1.0%、2.0%、1.0%、1.6%.

因此通过铺装层运营时间 t 、国际平整度指数 IRI、车辆油耗 F 间存在的传递关系,得到钢桥面铺装体系运营管理阶段的碳排放预估模型为

$$Q_{\text{IRI}} = \sum_{i=1}^z (365 A_{\text{ADT}} p_i (1 + \gamma)^t \Delta I(t) C_i F_{B_i} L \rho_i E_{F_i}) \quad (3)$$

式中 Q_{IRI} 表示因铺装层 IRI 变化导致的额外碳排放量,kgCO₂eq; A_{ADT} 表示年平均日交通量; p_i 表示第 i 种车辆类型的比例; γ 表示交通量年平均增长

率,%; $\Delta I(t)$ 表示相对于上一年的铺装层 IRI 变化值,m/km; F_{B_i} 表示第 i 种车辆类型每 100 km 的基础油耗,L; L 表示铺装路段长度,km; ρ_i 表示第 i 种车辆对应燃料类型的密度.本文汽油取 0.73 kg/L,柴油取 0.84 kg/L; E_{F_i} 表示第 i 种车辆对应燃油的碳排放因子,kgCO₂eq/kg.

2.4 维修养护阶段

维修养护阶段的碳排放主要考虑 2 个部分:

① 施工时维修养护的材料消耗和机械设备使用的能源消耗所带来的碳排放;② 施工活动占用车道,导致过往车辆通行受阻,进而造成交通延误而带来的额外碳排放.

2.4.1 施工活动

从养护策略的角度,钢桥面沥青铺装层养护措施可分为 3 种:预防性养护、矫正性养护和铺装层重建.本文仅考虑预防性养护中的微表处和铺装层重建的铣刨重铺措施.参考《预算定额》,可得微表处和铣刨层重铺的碳排放清单数据(见表 4).

表 4 维修养护阶段清单数据

单元过程	能源消耗					碳排放量/kgCO ₂ eq	数据来源
	<i>m</i> (柴油) /kg	<i>m</i> (汽油) /kg	<i>m</i> (集料) /t	<i>m</i> (矿粉) /t	<i>m</i> (乳化沥青) /t		
1 000 m ² 微表处		11.655	6.814	0.318	1.56	418.605	文献[18]
1 000 m ³ 铺装层铣刨	1 459.24					4 523.352	规范[21]

2.4.2 维修养护策略

本文参考某桥面铺装层使用性能的 Logistic 模型,以指导钢桥面铺装体系养护策略的制定.模型函数关系式如下:

$$\text{IRI}(t) = 0.864 + \frac{3.500}{1 + e^{-0.612t + 3.171}} \quad R^2 = 0.892 \quad (4)$$

IRI 反映了路面平整度变化对车辆振动的影响,可与公路技术状况中的路面行驶质量指数(RQI)进行相互转换.国内研究者认为我国规范相对于 AASHTO 规范较为宽松,故结合国内常见路面病害和京沪高速实测数据对公路技术状况等级划分进行校准,将公路技术状况等级为优时的 IRI 值调整到 1.34 m/km^[23].

得到 IRI 衰变函数后,便可通过时间触发法或路况法,确定钢桥面铺装层的养护时机.预防性养护

针对铺装层正常使用状态下的部分功能性缺失,因此采用路况法较为科学准确.铺装层铣刨重铺针对铺装层结构遭到破坏时,难以满足正常使用,通常在一定年限内对铺装层进行一次大修,因此采用时间触发法较为准确.假设钢桥面铺装层在服役年限内保持优秀的路面性能,采用路况法进行预防性养护决策,选定养护时机触发阈值 IRI = 1.34 m/km,所采用的养护方案为微表处.采用时间触发法进行大修决策,选定大修时间为 10 a,所采用的大修方案为铣刨重铺.需要说明的是,这里维修养护措施的养护效力是使钢桥面铺装层使用性能恢复至初始状态(IRI 为 1.0 m/km),即预防性养护和铺装层铣刨重铺的养护效力目标是一致的.

假定钢桥面铺装体系的设计使用寿命为 20 a,可得铺装体系生命周期内的 IRI 变化如图 2 所示.

因此,铺装层预防性养护的时机分别为第3、6、9、13、16、19年,共6次;大修时机为第10年,共1次。

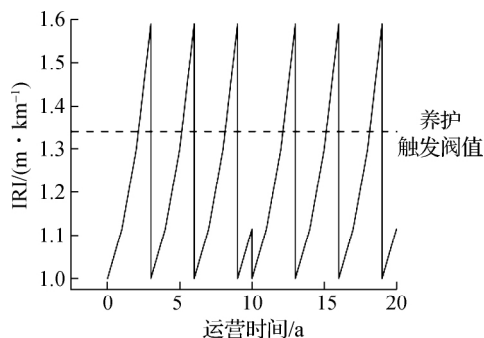


图2 钢桥面铺装体系生命周期 IRI 变化曲线

2.4.3 交通延误

在维修养护施工作业中,往往需要封闭若干条车道,这会造成多条车道的车流汇入未封闭车道,导致车流量迅速增大,道路通行能力也会相应地降低,进而出现加减速、排队、拥堵等现象,由此导致车辆额外油耗的增加。本文采用微观交通仿真软件SUMO来展开相关交通延误仿真工作,微表处的交通组织方式为双向四车道封闭单车道,铣刨重铺的交通组织方式为双向四车道单向全封闭。

根据《公路养护安全作业规程》(JTG H30—2015)^[24]规定,设置减速区(J_0J_1)、缓冲过渡区(J_1J_2)、施工区(J_2J_3)、过渡区(J_3J_4)、加速区(J_4J_5)。图3为仿真路段设置,仿真施工区限速值为60 km/h,通过期望车速决策点来实现,上游自由流车辆期望车速设置为小客车120 km/h,货车90 km/h,加速度设定为 2.5 m/s^2 。输入不同交通量(V/C 为0.1~1.5, V 表示交通量, C 表示设计通行能力),仿真运行时间设定为9 000 s,前3 600 s设置既定交通量(标准车当量数165~2 475 pcu/(h·ln)),保证所有车辆全部通过施工区路段。对各路段添加检测器,通过仿真得到车辆平均延误时间和平均通行速度的仿真结果(见图4)。

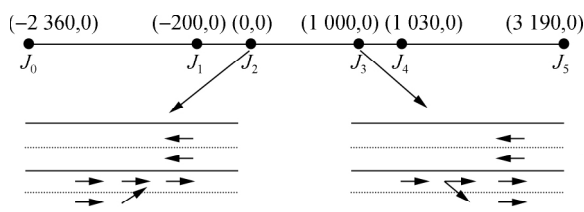


图3 仿真路段设置

2.4.4 交通延误碳排放量化模型

通过以上交通延误参数和维修养护策略,便可得交通延误导致的碳排放量化模型如下:

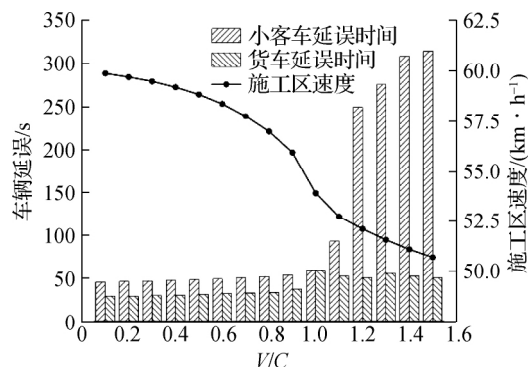


图4 交通延误仿真结果

$$Q_d = \sum_{i=1}^z \sum_{t=1}^t \frac{1}{24} A_{ADT} P_i (1 + \gamma)^t T_{d_i} v_{d_i} T_{w_i} F_{B_i} \cdot L n_i \rho_i E_{F_i} \quad (5)$$

式中, Q_d 为因交通延误导致的额外碳排放量, kgCO_2eq ; T_{d_i} 为第*i*种车型车辆的平均延误时间, h/辆 ; v_{d_i} 为第*i*种车型车辆平均通行速度, km/h ; T_{w_i} 为维修养护施工的总时间,本文参考张倩等^[25]的养护作业总时间计算模型,取微表处施工时间为34.5 h,铣刨重铺为160 h; n_i 为单次维修养护措施对应的交通组织次数,微表处为2,铣刨重铺为1, $t=3, 6, 9, 10, 13, 16, 19 \text{ a}$ 。

2.5 废弃处置阶段与运输环节

废弃处置阶段考虑的碳排放包括铺装层铣刨、废料外运这2个过程,其中铺装层铣刨过程详见表4。运输环节存在于钢桥面铺装体系生命周期各个阶段和内部之间,其碳排放主要考虑材料运输过程中运输工具的燃油消耗所产生的碳排放,通常包括材料运输、沥青混合料运输和铣刨废料运输这3个部分,如图5所示,图中 d_{AM} 为A地到M地的距离,其他类同。本文选取平均合理运输距离作为计算运距,确定 d_{AM} 、 d_{BM} 、 d_{CM} 、 d_{DM} 、 d_{MS} 、 d_{SL} 分别为60、200、200、200、30、60 km。

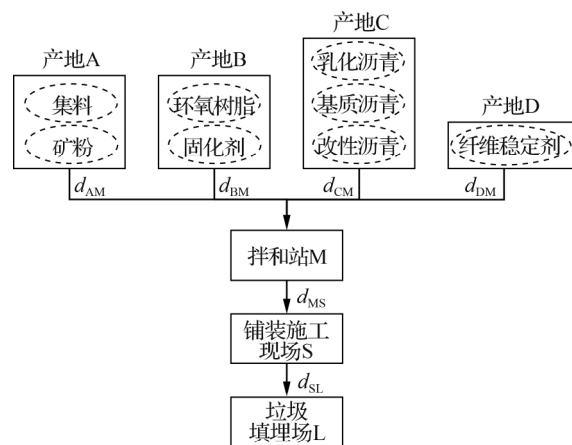


图5 运输环节示意图

关于材料运输过程中的油耗,本文参考高放^[26]针对公路运输货物的数据,计算可得货车的碳排放因子为 $0.171\ 6\ \text{kgCO}_2\text{eq}/(\text{t} \cdot \text{km})$. 沥青混合料和铣刨废料的运输皆可参考预算定额中的相关燃油消耗,如表 5 所示.

表 5 沥青混合料和铣刨废料运输过程碳排放情况

运输距离	沥青混合料运输 15 t 以内自卸汽车		铣刨废料运输 15 t 以内自卸汽车	
	$m(\text{柴油})/\text{kg}$	碳排放量/ kgCO_2eq	$m(\text{柴油})/\text{kg}$	碳排放量/ kgCO_2eq
第一个 1 km	469.120	1 454.178	340.129	1 054.332
每增运 0.5 km	39.376	122.058	39.376	122.058

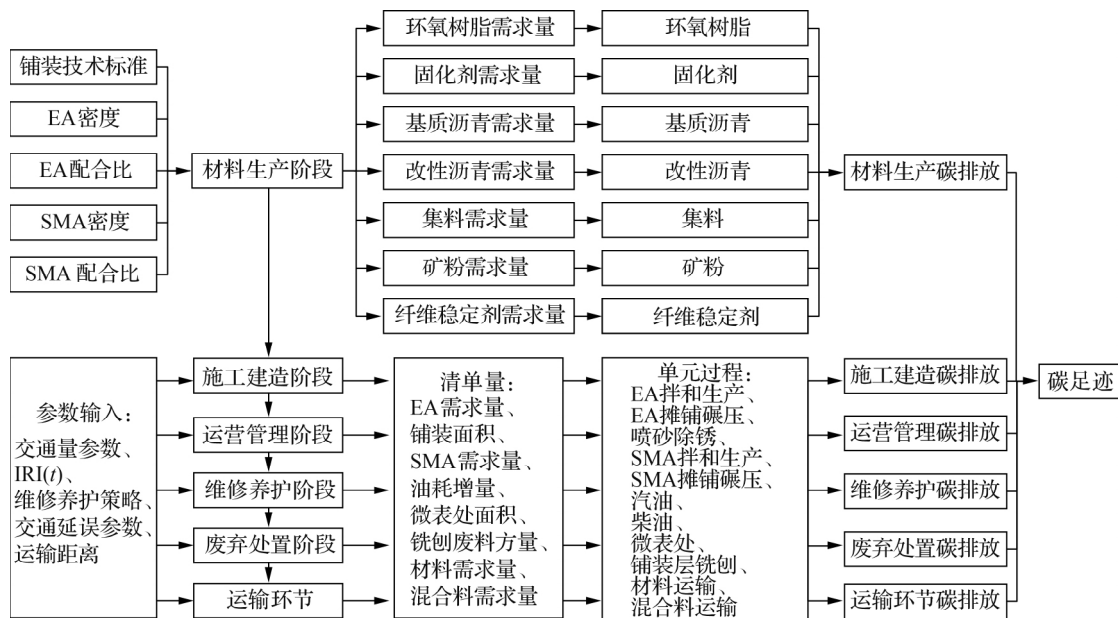


图 6 碳足迹量化框架

量化模型如下:

$$Q_{\text{total}} = \sum \left(L_{qj} \frac{Q_{uj}}{U_{1j}} \right) + Q_{\text{IRI}} + Q_d \quad (6)$$

式中 Q_{total} 表示碳排放总量; L_{qj} 表示第 j 个单元过程的清单量; Q_{uj} 表示第 j 个单元过程的碳排放量; U_{1j} 表示第 j 个单元过程或单位功能的清单量.

3.2 实例分析

3.2.1 实例背景

本文选定新建双向四车道钢桥面铺装体系的半幅桥面行车道作为分析对象,并参照目前国内已建成的钢桥面铺装体系,选定下层 EA + 上层 SMA 典型铺装体系的厚度组合为 3 cm EA + 3 cm SMA. 公路等级为高速公路,设计速度 120 km/h,设计使用年限 20 a,铺装长度 1 km,行车道宽度 3.75 m.

参考某钢桥面铺装项目,选定 SMA-10 密度为 $2.365\ \text{t}/\text{m}^3$,改性沥青、集料、矿粉的配合比为

3 碳足迹量化分析

3.1 碳足迹量化模型

上文已建立钢桥面铺装体系生命周期各个阶段基于单元过程的生命周期清单,如何将这单元过程联系起来形成完整的碳足迹模型,需要搭建一个流程化的框架来指导碳足迹的量化过程.通过功能单元参数 - 清单量 - 单元过程 - 碳排放量的传递关系,可以很好地构建钢桥面铺装体系碳足迹的量化框架,然后按阶段逐一量化碳足迹,见图 6.

因此,基于以上碳足迹量化框架,得到碳足迹

145.276:2 004.740:207.640; EA-10 密度为 $2.365\ \text{t}/\text{m}^3$,环氧树脂、固化剂、基质沥青、集料、矿粉的配合比为 56:44:100:2 727.245:303.058. 选定初始年平均日交通量(AADT)为 15 000 pcu/d,并设定交通量年平均增长率为 5.30%,小客车、SUV、小货车、中货车、大货车的车型比例分别为 53.8%、15.7%、13.1%、3.6%、13.8%.

3.2.2 碳足迹量化结果

根据上文碳足迹量化框架和量化模型,将下层 EA + 上层 SMA 典型铺装体系的实例参数输入,得到生命周期各阶段的碳足迹量化结果如表 6 和图 7 所示.由图可知,碳排放占比最多的 2 个阶段是维修养护阶段和运营管理阶段,分别达到总排放量的 40.28% 和 38.47%,占到了总量的近 80%,是碳减排需要重点关注的阶段.接下来是材料生产、施工建造、运输环节和废弃处置,分别占到了碳排放总量的 8.37%、6.40%、6.33% 和 0.15%.

表 6 下层 EA + 上层 SMA 铺装体系生命周期碳足迹量化结果

阶段	碳排放量 /kgCO ₂ e/q	排放占比 /%
材料生产	64 117.078	8.37
施工建造	49 075.806	6.40
运营管理	294 808.878	38.47
维修养护	308 684.419	40.28
废弃处置	1 187.380	0.15
运输环节	48 535.424	6.33
总量	766 408.984	100

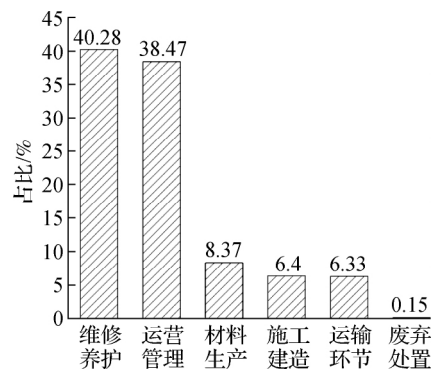


图 7 碳排放阶段占比

表 7 碳排放单元过程占比情况

						%
汽油	交通延误	柴油	固化剂	喷砂除锈	EA 拌和生产	材料运输
39.76	24.12	22.83	8.11	5.42	3.70	3.52
SMA 拌和生产	环氧树脂	改性沥青	废料运输	集料	微表处	混合料运输
3.34	3.31	2.76	1.82	1.44	1.23	1.00
基质沥青	铺装层铣刨	乳化沥青	矿粉	EA 摊铺碾压	SMA 摊铺碾压	
0.88	0.31	0.26	0.20	0.18	0.16	

4 结论

1) 采用基于过程的 LCA 方法 ,对钢桥面铺装体系生命周期各个阶段的材料和施工工艺的碳排放进行清单分析 ,建立了适应于我国钢桥面铺装体系碳排放特征的生命周期清单数据库. 同时在生命周期清单分析的基础上 ,通过功能单元参数 - 清单量 - 单元过程 - 碳排放量的传递关系 ,建立了碳足迹量化框架和量化模型.

2) 应用碳排放量化模型对下层 EA + 上层 SMA 典型铺装体系进行了案例分析 ,结果表明 ,维修养护和运营管理阶段贡献了碳排放总量的近 80% ,交通延误导致的额外碳排放约达到了碳排放总量的 24% ,固化剂、喷砂除锈等材料或施工工艺也分别贡献了碳排放总量的 8.11% 和 5.42% ,应加大对以上阶段、材料或施工工艺的碳减排力度.

3) 本文旨在提供碳排放研究思路 and 量化模型 ,并不局限于某项特定的工程或技术 ,在研究其他类型钢桥面铺装体系的碳足迹时 ,可依据本文的碳足迹量化模型得到相应的结论 ,因此本文的研究内容具有普适性. 但本文的生命周期清单数据库是

将所有单元过程的清单数据进行总体碳排放占比分析 ,从中寻找出对碳排放贡献度较大的单元过程 ,以便提供更有针对性的碳减排建议. 如表 7 所示 ,固化剂、喷砂除锈、EA 拌和生产、材料运输、SMA 拌和生产、环氧树脂等材料或施工工艺也发挥了不小的作用 ,分别达到碳排放总量的 8.11%、5.42%、3.70%、3.52%、3.34%、3.31%. 因此 ,应加大对维修养护阶段、运营使用阶段以及固化剂等材料或施工工艺的碳减排力度.

交通延误引起的车辆额外碳排放约占到了整个生命周期总量的 24% ,除了多次开展维修养护这一原因 ,单次维修养护进行的长时间交通管制也是造成占比较大的另一重要原因. 因此在保障维修养护质量的前提下 ,开发工期短、开放交通快的维修养护工艺和材料是降低交通延误碳排放占比的有效措施.

基于大量文献资料和行业规范的基础上构建的 ,这与实际情况存在一定的差别 ,因此可进一步开展实地调研 ,对清单数据库进行补充和更新.

参考文献 (References)

[1] Yu B ,Lu Q. Life cycle assessment of pavement: Methodology and case study [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 2012 ,17(5) : 380 - 388. DOI: 10. 1016/j. trd. 2012. 03. 004.

[2] 刘士南 ,王厚植 ,张磊 ,等. 基于全寿命周期的环氧再生路面碳排放研究 [J]. *材料导报* ,2022 ,36(S2) : 121 - 128.

Liu S N ,Wang H Z ,Zhang L ,et al. Study on carbon emission of epoxy recycled pavement based on LCA [J]. *Materials Reports* ,2022 ,36(S2) : 121 - 128. (in Chinese)

[3] Bo W ,Ren H S ,Geng W ,et al. Investigation of the environmental impacts of steel deck pavement based on life cycle assessment [J]. *Journal of Southeast University (English Edition)* ,2020 ,36(3) : 334 - 340. DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-7985. 2020. 03. 012.

[4] Sleep S ,Dadashi Z ,Chen Y L ,et al. Improving robustness of LCA results through stakeholder engagement: A case study of emerging oil sands technologies [J]. *Journal of Cleaner Production* 2021 ,281: 125277. DOI: 10. http: //journal. seu. edu. cn

- 1016/j.jclepro. 2020. 125277.
- [5] Chen X D ,Wang H. Life cycle assessment of asphalt pavement recycling for greenhouse gas emission with temporal aspect [J]. *Journal of Cleaner Production* 2018 , **187**: 148 – 157. DOI: 10. 1016/j. jclepro. 2018. 03. 207.
- [6] 张金喜 孔祥杰 韩丁丁 等. 不同养护模式下的高速公路沥青路面状况指数预测模型 [J]. 北京工业大学学报, 2016 42(1) : 74 – 80. DOI: 10. 11936/bjtxb2015020034.
- Zhang J X ,Kong X J ,Han D D ,et al. Prediction model of asphalt pavement PCI of expressway under different maintenance conditions [J]. *Journal of Beijing University of Technology* 2016 **42**(1) : 74 – 80. DOI: 10. 11936/bjtxb2015020034. (in Chinese)
- [7] Navarro I J ,Martí J V ,Yepes V. Reliability-based maintenance optimization of corrosion preventive designs under a life cycle perspective [J]. *Environmental Impact Assessment Review* 2019 **74**: 23 – 34. DOI: 10. 1016/j. eiar. 2018. 10. 001.
- [8] Ziyadi M ,Ozer H ,Kang S ,et al. Vehicle energy consumption and an environmental impact calculation model for the transportation infrastructure systems [J]. *Journal of Cleaner Production* 2018 **174**: 424 – 436. DOI: 10. 1016/j. jclepro. 2017. 10. 292.
- [9] Kim R E ,Kang S ,Spencer B F ,et al. New stochastic approach of vehicle energy dissipation on nondeformable rough pavements [J]. *Journal of Engineering Mechanics* 2016 **143**(4) : 4016118. DOI: 10. 1061/(ASCE) EM. 1943-7889. 0001192.
- [10] Cao R J ,Leng Z ,Hsu S C. Comparative eco-efficiency analysis on asphalt pavement rehabilitation alternatives: Hot in-place recycling and milling-and-filling [J]. *Journal of Cleaner Production* 2019 **210**: 1385 – 1395. DOI: 10. 1016/j. jclepro. 2018. 11. 122.
- [11] Santos J ,Bryce J ,Flintsch G ,et al. A comprehensive life cycle costs analysis of in-place recycling and conventional pavement construction and maintenance practices [J]. *Journal of Turbulence* 2017 **18**(8) : 727 – 743. DOI: 10. 1080/10298436. 2015. 1122190.
- [12] 唐皓 蒯海东 黄晓明. 基于生命周期分析法的公路养护能耗模型 [J]. 东南大学学报(自然科学版) , 2016 46(3) : 629 – 634. DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-0505. 2016. 03. 029.
- Tang H ,Kuai H D ,Huang X M. Energy consumption model for highway maintenance based on life cycle assessment [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)* 2016 **46**(3) : 629 – 634. DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-0505. 2016. 03. 029. (in Chinese)
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑碳排放计算标准: GB/T 51366—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社 2019.
- [14] Eurobitume. The eurobitume life-cycle inventory for bitumen ,Version 2 [R]. Brussels ,Belgium: European Bitumen Association 2012.
- [15] 蔺瑞玉. 沥青路面建设过程温室气体排放评价体系研究 [D]. 西安: 长安大学 2014.
- Lin R Y. *Research on greenhouse gas emission evaluation system for asphalt pavement construction* [D]. Xi'an: Chang'an University 2014. (in Chinese)
- [16] Yu B ,Liu Q ,Gu X Y. Data quality and uncertainty assessment methodology for pavement LCA [J]. *International Journal of Pavement Engineering* 2018 **19**(6) : 519 – 525. DOI: 10. 1080/10298436. 2016. 1176166.
- [17] Yu B ,Wang S Y ,Gu X Y. Estimation and uncertainty analysis of energy consumption and CO₂ emission of asphalt pavement maintenance [J]. *Journal of Cleaner Production* 2018 **189**: 326 – 333. DOI: 10. 1016/j. jclepro. 2018. 04. 068.
- [18] Dai T ,Fleischer A S ,Lee R ,et al. Life cycle inventory regionalization and uncertainty characterization: A multilevel modeling approach [J]. *Journal of Cleaner Production* 2020 **242**: 118459. DOI: 10. 1016/j. jclepro. 2019. 118459.
- [19] Cao R J ,Leng Z ,Yu H ,et al. Comparative life cycle assessment of warm mix technologies in asphalt rubber pavements with uncertainty analysis [J]. *Resources , Conservation and Recycling* 2019 **147**: 137 – 144. DOI: 10. 1016/j. resconrec. 2019. 04. 031.
- [20] 黄娜 王洪涛 范辞冬 等. 基于不确定度和敏感度分析的 LCA 数据质量评估与控制方法 [J]. 环境科学学报 2012 **32**(6) : 1529 – 1536. DOI: 10. 13671/j. hjkxxb. 2012. 06. 034.
- Huang N ,Wang H T ,Fan C D ,et al. LCA data quality assessment and control based on uncertainty and sensitivity analysis [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* , 2012 **32**(6) : 1529 – 1536. DOI: 10. 13671/j. hjkxxb. 2012. 06. 034. (in Chinese)
- [21] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程预算定额: JTG/T 3832—2018 [S]. 北京: 人民交通出版社 2018.
- [22] Chatti K ,Zaabar I. *Estimating the effects of pavement condition on vehicle operating costs* [M]. Washington DC ,USA: Transportation Research Record 2012: 55 – 56.
- [23] Zhou L ,Ni F ,Leng Z. Development of an asphalt pavement distress evaluation method for freeways in China [J]. *International Journal of Pavement Research and Technology* 2014 **7**: 159 – 167. DOI: 10. 6135/IJPR. ORG. TW /2014. 7(2) . 159.
- [24] 中华人民共和国交通运输部. 公路养护安全作业规程: JTG H30—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社 2015.
- [25] 张倩 张金喜. 基于仿真分析的城市道路养护工程方案评价方法研究 [J]. 交通运输研究 2015 **1**(1) : 27 – 32. DOI: 10. 16503/j. cnki. 2095-9931. 2015. 01. 005.
- Zhang Q ,Zhang J X. Evaluation method of road maintenance project program based on traffic simulation [J]. *Transport Research* 2015 **1**(1) : 27 – 32. DOI: 10. 16503/j. cnki. 2095-9931. 2015. 01. 005. (in Chinese)
- [26] 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.
- Gao F. *Study on the quantitative analysis of energy consumption and emissions during the period of asphalt pavement construction based on LCA* [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University 2016. (in Chinese)