

不同材料组成对沥青混合料碳排放的影响分析

连 萍

(上海同济检测技术有限公司, 上海市 200441)

摘 要: 在绿色发展理念的引领下, 工程建设领域的降碳减排工作不断向纵深推进, 公路和城市道路建设过程中常使用沥青混合料作为道路面层, 一般由粗细集料、矿粉、沥青和添加剂等材料组成, 采用排放因子法对沥青混合料材料生产阶段和运输阶段的碳排放进行核算, 分析和总结不同材料组成和各自占比的变化对沥青混合料碳排放的影响, 为优化沥青混合料的配合比设计, 减少沥青混合料材料生产阶段和运输阶段的碳排放提供经验借鉴。不同类型沥青混合料和不同材料掺量沥青混合料, 碳排放也不同, 组成材料的掺量对碳排放的影响基本呈线性变化趋势, 其中碳排放与集料掺量成反比, 与沥青掺量和添加剂掺量成正比, 在 AC-13 中增加添加剂后的碳排放增加约 24.6%。

关键词: 沥青混凝土; 沥青混合料; 碳排放因子; 碳排放

中图分类号: U414; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)03-0121-05

Analysis on Impact of Different Material Compositions on Carbon Emissions of Asphalt Mixtures

LIAN Ping

(Shanghai Tongji Testing Technology Co., Ltd., Shanghai 200441, China)

Abstract: Under the guidance of the green development concept, the carbon reduction and emission reduction work in the field of engineering construction is constantly advancing. The asphalt mixture is often used as the road surface layer in the construction of highways and urban roads, generally composed of coarse and fine aggregates, mineral powder, asphalt and additives. The emission factor method is used to calculate the carbon emissions of asphalt mixture materials during the production and transportation stages, analyze and summarize the impact of different material compositions and their respective proportions on the carbon emissions of asphalt mixture, and provide experience and reference for optimizing the mix design of asphalt mixture and reducing the carbon emissions during the production and transportation stages of asphalt mixture materials. The carbon emissions of the different types of asphalt mixtures and the asphalt mixtures with different material dosages also vary. The impact of the dosage of constituent materials on carbon emissions basically shows a linear changing trend, among which the carbon emissions are inversely proportional to the dosage of aggregate and directly proportional to the asphalt content and additive content. After adding the additives to AC-13, the carbon emissions will increase by approximately 24.6%.

Keywords: asphalt concrete; asphalt mixture; carbon emission factor; carbon emission

0 引 言

面对全球日益严峻的气候变化问题^[1], 近年来我国着力推进绿色低碳发展^[2], 2020 年我国宣布提出“双碳”目标。五年来, 各行业在绿色发展理念的引领下, 在推动绿色转型上取得了重大成就。

公路和城市道路建设是我国各地区经济发展的重要基础保障。但工程建设行业同时也是高耗能行

业, 工程建设所用原材料中大量使用石油、砂石、铁矿石等非再生资源以及水泥、钢材等高耗能建筑材料。我国公路和城市道路工程建设中, 基于沥青混凝土路用性能好、行车舒适度高、路面噪声低^[3]、养护方便等特点, 已多年大规模使用沥青混凝土作为道路路面材料。

按照基于过程的产品全生命周期碳排放核算方法, 沥青混凝土的碳排放由材料准备、生产、施工、拆除处置等多阶段组成。其中沥青混合料材料准备阶段(材料生产和运输)的碳排放占比相对较高。研究表明, 沥青混合料中的不同材料组成对该阶段的碳

收稿日期: 2025-09-29

作者简介: 连萍(1975—), 女, 学士, 高级工程师, 从事道路材料研究和工程检测工作。

排放有着较大影响。因此,基于不同材料组成对沥青混合料准备阶段(材料生产和运输)碳排放的影响研究,有助于为今后工作中优化沥青混合料配合比设计,减少沥青混合料准备阶段(材料生产和运输)的碳排放,推动工程建设行业进一步降碳减排提供一定的经验借鉴。

1 碳排放核算方法

1.1 碳排放的定义和计量单位

碳排放是关于温室气体的一个统称或简称^[4],通常简单地将碳排放理解为“二氧化碳排放”^[5]。根据碳排放核算标准,碳排放计算以二氧化碳当量(CO₂e)来表示。

1.2 碳排放的计算界定

按《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019),建筑物碳排放的计算边界指与建筑物材料生产及运输、建造及拆除、运行等活动相关的温室气体排放的计算范围^[6]。

1.3 碳排放的核算方法

目前碳排放核算方法有实测法、投入产出法和排放因子法^[7]等,其中排放因子法因其简单、便捷,得到最为广泛的运用^[8],因此沥青混合料碳排放计算方法亦采用排放因子法^[9]。

排放因子法的碳核算基本方程是:温室气体排放=活动数据×排放因子^[10]。其中碳排放因子定义为在设定的系统边界范围内,为获得1个功能单位目标产品所获得的碳排放量^[10]。碳排放因子一般通过产品全生命周期碳排放核算得出,我国《省级温室气体清单编制指南(试行)》^[11]等文件给出了主要工业产品的直接碳排放因子推荐值,近年发布的碳排放计算相关标准文件也给出了部分化石能源、运输方式、材料等的碳排放因子取值,另外还可以通过一些权威机构和部门等公布的碳排放因子作为参考依据。

2 沥青混合料碳排放核算模型

2.1 沥青混合料的类型

公路和城市道路工程沥青混凝土面层宜选用SMA、AC-C和OGFC沥青混合料等^[12]。通过调研,本地区根据道路等级、交通荷载等情况,常选用的沥青混凝土面层有SMA-13、AC-13C、AC-20C、AC-25C、OGFC-13等类型。

2.2 沥青混合料的材料组成

组成沥青混合料的原材料主要有:不同规格的

粗集料、细集料、填充料(矿粉)、胶结料(沥青)^[13],另外还有改性添加剂等。

其中粗集料是沥青混合料的骨架结构^[14],本地区选用的粗集料多为石灰岩等。细集料主要作用是填充粗集料之间的空隙^[15],主要有石屑、天然砂、人工砂等。填充料的作用是用于改善混合料的性能,一般可采用磨细石粉、石灰石等矿粉材料^[16]。沥青是由不同分子量的碳氢化合物及其非金属衍生物组成的复杂混合物^[17]。改性添加剂主要用于增强混合料的特性和性能,如聚合物和木纤维素等。

2.3 沥青混合料的碳排放核算公式

为便于计算和对比,不同材料组成对沥青混合料碳排放影响分析以沥青混合料准备阶段(材料生产和运输)为计算边界,并以1吨沥青混合料为一个计算功能单位。沥青混合料准备阶段(材料生产和运输)总碳排放计算方程见式(1):

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

式中: C_{jc} 为沥青混合料材料生产阶段和运输阶段的碳排放,kgCO₂e; C_{sc} 为沥青混合料材料生产阶段的碳排放,kgCO₂e; C_{ys} 为沥青混合料材料运输阶段的碳排放,kgCO₂e。

其中,单位重量为1t的沥青混合料材料生产阶段的碳排放计算方程见式(2):

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

式中: M_i 为第*i*种主要材料的消耗量,t; F_i 第*i*种主要材料的碳排放因子,kgCO₂e。

单位重量为1t的沥青混合料材料运输阶段的碳排放计算方程见式(3):

$$C_{ys} = \sum_{i=1}^n M_i D_i T_i \quad (3)$$

式中: M_i 为第*i*种主要材料的消耗量,t; D_i 为第*i*种材料平均运输距离,km; T_i 为第*i*种材料的运输方式下,单位重量运输距离的碳排放因子,kg CO₂e/(t·km)。

3 不同材料组成的沥青混合料碳排放核算和对比分析

3.1 基于不同材料组成的AC-13沥青混合料碳排放核算

选取本地区某道路工程作为案例进行分析。该道路为城市支路,交通等级为轻交通,沥青路面中使用细粒式沥青混凝土上面层为AC-13型。按其沥青混合料材料组成和配合比设计为例,计算沥青混合料材料生产阶段和运输阶段的碳排放。AC-13沥青

混合料的材料组成和配合比设计如表1所示。

表1 AC-13材料组成和配合比设计			
材料组成		配合比设计	换算百分比
矿料	粗细集料	96%	91.25%
	矿粉	4%	3.80%
	小计	100%	95.06%
沥青	沥青	5.20%	4.94%
	小计	5.20%	4.94%
合计		105.2%	100.00%

表2 AC-13 材料生产阶段和运输阶段的碳排放						
序号	材料组成	消耗量/t	材料碳排放因子/(kgCO ₂ e·t ⁻¹)	运距 / km	运输碳排放因子/[kg CO ₂ e·(t·km) ⁻¹]	碳排放/(kg CO ₂ e)
1	沥青	0.049 4	248	200	0.078(陆运)	13.03
2	粗细集料	0.912 6	2.18	500	0.015(水运)	10.97
				30	0.078(陆运)	
3	矿粉	0.038 0	430	500	0.015(水运)	16.72
				30	0.078(陆运)	
合计						40.72

基于相同的油石比,即沥青占比、以及粗细集料和矿粉的总占比不变,但粗细集料和矿粉的分别占比不同的情况下,沥青混合料材料生产阶段和运输阶段的碳排放变化如图1所示。

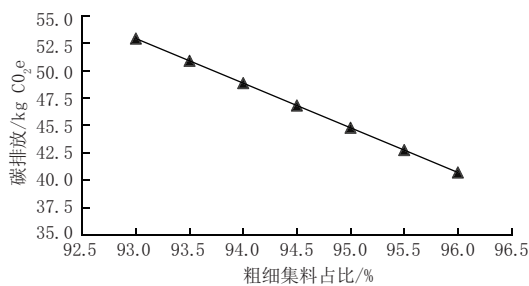


图1 AC-13不同集料和矿粉占比情况下的碳排放

基于不同的油石比,即在不同沥青掺量的情况下,沥青混合料材料生产阶段和运输阶段的碳排放变化如图2所示。

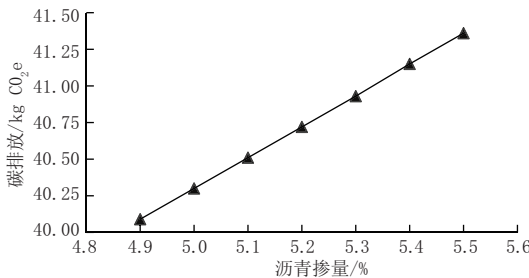


图2 AC-13不同沥青掺量情况下的碳排放

3.2 基于不同材料组成的AC-13(SBS改性)沥青混合料碳排放核算

选取前述工程案例分析中的细粒式沥青混凝土上面层AC-13,增加SBS改性添加剂,进一步计算沥青混合料材料生产阶段和运输阶段的碳排放。AC-

根据各组成材料不同的生产方式和运输方式,以1吨沥青混合料为一个计算功能单位,计算沥青混合料材料生产阶段和运输阶段的碳排放,结果如表2所示。其中材料的消耗量取自沥青混合料配合比设计值,材料和运输的碳排放因子通过查阅相关标准和文件取得,运输过程的运距则根据材料的产地和到厂运输方式确定。

13(SBS改性)沥青混合料的材料组成和配合比设计如表3所示。

表3 AC-13(SBS改性)材料组成和配合比设计			
材料组成		配合比设计	换算百分比
矿料	粗细集料	96%	91.25%
	矿粉	4%	3.80%
	小计	100%	95.06%
沥青(含添加剂)	沥青	4.784%	4.55%
	改性添加剂	0.416%	0.40%
	小计	5.20%	4.94%
合计		105.2%	100.00%

根据各组成材料不同的生产方式和运输方式,以1t沥青混合料为一个计算功能单位,计算沥青混合料材料生产阶段和运输阶段的碳排放,结果见表4。

基于相同的油石比,即沥青(含添加剂)占比、以及粗细集料和矿粉的总占比不变,但粗细集料和矿粉分别占比不同的情况下,沥青混合料材料生产阶段和运输阶段的碳排放变化如图3所示。

基于不同的油石比,即在不同沥青(含添加剂)掺量的情况下,沥青混合料材料生产阶段和运输阶段的碳排放变化如图4所示。

基于相同的油石比,即集料、矿粉和沥青(含添加剂)各自占比不变,但沥青中的改性添加剂掺量变化情况下,沥青混合料材料生产阶段和运输阶段的碳排放变化如图5所示。

3.3 影响和对比分析

对碳排放计算结果进行分析,以单位重量为1t的AC-13(其中沥青掺量为4.94%)和AC-13(SBS改

表 4 AC-13(SBS 改性)材料生产阶段和运输阶段的碳排放

序号	材料组成	消耗量/t	材料碳排放因子/(kg CO ₂ e·t ⁻¹)	运距 / km	运输碳排放因子/[kg CO ₂ e/(t·km) ⁻¹]	碳排放/(kg CO ₂ e)
1	沥青	0.045 5	248	200	0.078(陆运)	11.99
2	粗细集料	0.912 5	2.18	500	0.015(水运)	10.97
				30	0.078(陆运)	
3	矿粉	0.038 0	430	500	0.015((水))	16.72
				30	0.078(陆运)	
4	改性添加剂	0.004 0	2800	100	0.179(陆运)	11.14
合计						50.82

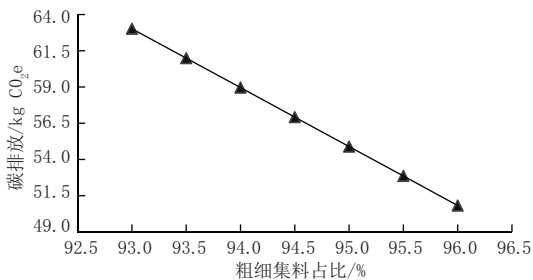


图 3 AC-13(SBS 改性)不同集料和矿粉占比情况下的碳排放

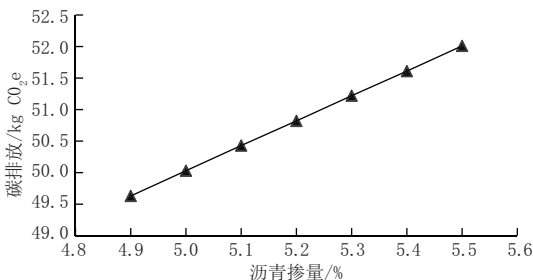


图 4 AC-13(SBS 改性)不同沥青掺量情况下的碳排放

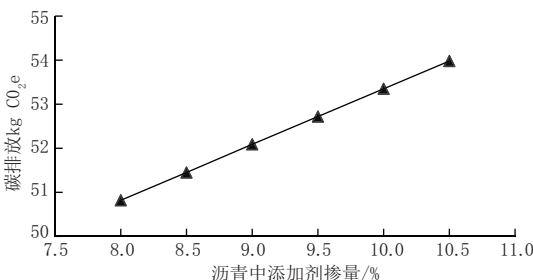


图 5 AC-13(SBS 改性)沥青中不同添加剂掺量情况下的碳排放

性)(其中沥青和添加剂合计掺量为 4.94%)的沥青混合料材料生产阶段和运输阶段的碳排放分别为 40.72 kgCO₂e 和 50.82 kgCO₂e,见表 5。因 AC-13(SBS 改性)中增加了改性添加剂,且改性添加剂是再加工聚合物类产品,其碳排放因子值较大,导致 AC-13(SBS 改性)的碳排放较 AC-13 的碳排放多 10.1 kgCO₂e,增加约 24.6%。

由图 1 至图 5 可以看出,沥青混合料各组成材料占比的变化对沥青混合料碳排放的变化影响基本呈线性变化趋势。

由图 1 和图 3 可以看出,基于油石比相同,即沥青占比、以及粗细集料和矿粉的总占比不变,但粗细

表 5 AC-13 和 AC-13(SBS 改性)的碳排放比较 单位:kg CO₂e

序号	材料组成	AC-13 碳排放	AC-13(SBS 改性)碳排放
1	沥青	13.03	11.99
2	粗细集料	10.97	10.97
3	矿粉	16.72	16.72
4	改性添加剂	—	11.14
合计		40.72	50.82

集料和矿粉分别占比不同的情况下,沥青混合料材料生产阶段和运输阶段的碳排放与粗细集料的占比成反比,即粗细集料占比增加(矿粉占比减小),碳排放相应减小。当粗细集料占比减小(矿粉占比增加)时,碳排放相应增加。主要原因是由于粗细集料和矿粉材料碳排放因子的差异造成。

由图 2 和图 4 可以看出,基于不同的油石比,在不同沥青(含添加剂)掺量的情况下,沥青混合料材料生产阶段和运输阶段的碳排放与沥青(含添加剂)占比成正比,即沥青(含添加剂)占比增加,碳排放相应增加。当沥青(含添加剂)占比减小时,碳排放相应减小。主要原因是由于沥青(含添加剂)材料的碳排放因子比集料的碳排放因子大所造成。

由图 5 可以看出,基于集料、矿粉和沥青(含改性添加剂)各自占比不变,但沥青中的添加剂比例变化情况下,沥青混合料材料生产阶段和运输阶段的碳排放与添加剂的占比成正比,即沥青中的添加剂占比增加,碳排放相应增加。当沥青中的添加剂占比减小时,碳排放相应减小。主要原因是由于添加剂的碳排放因子比沥青的碳排放因子大所造成。

另外,不同的材料运输方式也对沥青混合料碳排放有一定影响,其中主要是粗细集料和矿粉的运输。表 6 列出了 AC-13 中集料和矿粉材料长距离运输(500 km)、本地短距离运输(30 km)不同运输方式组合的碳排放。可以看出,采用长距离水路、短距离公路运输是一种较为低碳的组合运输方式。

表 6 集料和矿粉材料不同组合运输碳排放 单位: kg CO₂e

运输方式	运输碳排放	总碳排放	占比
长距离水路运输+短距离公路运输(载重 30 t)	9.35	40.72	23.0%
长距离水路运输+短距离公路运输(载重 18 t)	10.81	42.18	25.6%
全程公路运输(载重 30 t)	39.30	72.70	54.1%

3.4 不同沥青混合料碳排放计算分析

本地区高等级道路或中、重等交通道路常用沥青表面层类型还有 SMA-13(SBS 改性)、OGFC-13(SBS 改性),中下面层还有 AC-20C、AC-25C 等。选取本地区几种沥青混合料进行对比分析,沥青混合料的材料组成和配合比设计如表 7 所示。

表 7 不同沥青混合料材料组成和配合比设计

序号	材料组成	AC-20	SMA-13 (SBS 改性)	OGFC-13 (SBS 改性)
1	沥青	4.30%	5.90%	4.31%
2	粗细集料	91.87%	83.48%	88.92%
3	矿粉	3.83%	10.32%	6.18%
4	添加剂	0.00%	0.30%	0.59%

不同沥青混合料碳排放计算结果如表 8 所示。

表 8 不同沥青混合料碳排放 单位: kgCO₂e

序号	材料组成	AC-20 碳排放	SMA-13(SBS 改 性)碳排放	OGFC-13(SBS 改 性)碳排放
1	沥青	11.33	15.55	11.36
2	粗细集料	11.04	10.03	10.69
3	矿粉	16.85	45.39	27.18
4	添加剂	0.00	8.45	16.63
	合计	39.22	79.42	65.86

将 AC-13、AC-13(SBS 改性)、SMA-13(SBS 改性)、OGFC-13(SBS 改性)、AC-20C 的碳排放作对比,如图 6 所示。

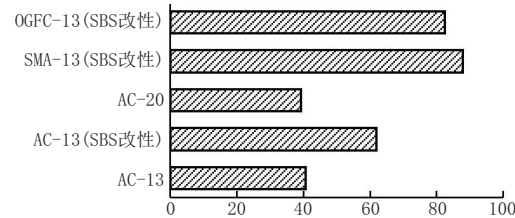


图 6 不同沥青混合料碳排放对比

由表 8 和图 6 可以看出,受不同材料组成和材料掺量的影响,几种沥青混合料碳排放也不同。其中, SMA-13(SBS 改性)矿粉掺量较高, OGFC-13(SBS 改性)矿粉和添加剂掺量较高,又由于矿粉和添加剂的碳排放因子较大,导致碳排放较大。因此,要实现降碳减排目标,应根据道路等级、交通等级选用合适的沥青混合料,同时在确保沥青混合料各项路用性能

的基础上,重视配合比设计。

4 结 语

研究表明,不同类型的沥青混合料、不同组成材料掺量的沥青混合料,碳排放都不相同。组成材料掺量对碳排放的影响基本呈线性变化趋势,一般情况下,沥青混合料材料生产阶段和运输阶段的碳排放与粗细集料占比成反比,即粗细集料占比增加(矿粉占比减小),则碳排放相应减小;碳排放与沥青(含添加剂)掺量成正比,即沥青(含添加剂)占比增加,则碳排放相应增加;碳排放与沥青中的添加剂掺量成正比,即沥青中的添加剂掺量增加,则碳排放相应增加。主要原因是由于各组成材料碳排放因子的差异所造成。

目前常用 SBS 等改性添加剂来提高沥青混合料的黏度和弹性模量,增加沥青混合料的抗剪强度和抗裂性能等路用性能。但由于改性添加剂聚合物一般主要成分为聚乙烯、聚丙烯、橡胶、树脂等材料,原材料在生产过程中的碳排放较高,因此在计算时所核定取用的碳排放因子也较大。

在工程建设实践中,可采取以下措施,以达到减少碳排放的目的:一是采取老路沥青面层铣刨废旧集料进行就地循环利用,减少新石料等自然资源的开采、加工和使用,同时减少石料长距离原材料运输所造成的碳排放;二是使用较低碳排放的环保型沥青改性添加剂,设计时将碳排放作为评价指标之一,合理确定混合料配合比,在满足沥青混凝土各项路用性能的基础上尽可能减少添加剂的使用,以降低碳排放;三是合理确定材料的运输方式,减少运输过程的碳排放。

参考文献:

[1] 曹翠珍.资源型企业绿色创新与竞争优势研究[D].太原:山西财经大学,2015.

[2] 孙冉冉.我国“双碳”战略目标提出两周年之际的回顾与展望[J].对外经贸,2023(2):62-65;135.

[3] 张兰峰,邓再桔,黄海翔.沥青搅拌站回收碱性废粉对沥青混合料水稳定性影响研究[J].广东交通职业技术学院学报,2020,19(2):1-5;16.

[4] 夏旭勇,李书阳,张永炜,等.建筑碳排放设计指南[M].北京:中国建筑工业出版社,2023.

[5] 汪慧颖.广西高速公路建设期碳排放计算及预测研究[D].南宁:广西大学,2022.

[6] GB/T 51366—2019 建筑碳排放计算标准[S].

[7] 王星紫,丁明智.鲁豫皖物流业碳排放测算及影响因素分析[J].绿色科技,2022(11):249-255.

(下转第 157 页)