

沥青路面结构类型对建设期碳排放影响分析

闫强¹, 易可良², 李平², 彭卓祥², 张明月², 徐锐²

(1. 广西交投科技有限公司, 广西南宁 530001; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院)

摘要:为研究沥青路面结构类型对建设期碳排放的影响,该文基于碳排放因子法,结合路面工程相关定额,建立沥青路面碳排放二级评价模型,选定3种典型路面结构方案,分析各路面结构中原材料生产、原材料运输、路面施工3个阶段建设期整体的碳排放情况。结果表明:沥青路面结构对各阶段建设期整体碳排放有显著影响,其中原材料生产阶段是建设期碳排放主体,原材料生产与运输碳排放与路面结构层厚度呈正相关,沥青层厚度是路面施工阶段碳排放的主要影响因素。建设期3个阶段中,主要碳排放过程分别为水泥生产、集料运输、混合料拌和。

关键词:沥青路面;评价模型;碳排放;施工;影响分析

1 前言

温室气体排放导致全球平均气温上升,引发冰盖融化、极端天气、干旱和海平面上升,这种全球性影响将会危及人类生命和生活。全球变暖已成为制约人类经济社会可持续发展的重要障碍,控制污染物和温室气体排放已引起全世界的高度重视。而碳排放是关于温室气体排放的一个总称。2015年12月,《联合国气候变化框架公约》近200个缔约方在巴黎气候变化大会上达成《巴黎协定》。这份开启全球气候治理新阶段历史性协定,事关2020年后全球应对气候变化行动安排,它的生效,将是全球应对气候变化的关键一步。只有全球尽快实现温室气体排放达到峰值,21世纪下半叶实现温室气体净零排放,才能降低气候变化给地球带来的生态风险以及给人类带来的生存危机。

沥青路面具有行驶舒适、建养便捷、易再生利用、行车安全性高等优势,是中国高等级公路的主要路面形式。沥青路面建养过程中,需要使用大量集料、沥青、改性剂等加工材料,同时需要将集料、沥青等加热到160℃左右,这都将产生大量的碳排放。因而在沥青路面建养过程中,可以通过材料优选、结构调整、工

艺改进等方式探讨减排措施,为推进中国绿色社会的发展添砖加瓦。

UMMroueh开发道路生命周期影响评估程序,并评价粉煤灰、破碎混凝土废渣、高炉矿渣作为道路原材料在路面结构中的应用情况;潘美萍基于可持续发展 and 生命周期评价(LCA)理论,对路面寿命周期碳排放量评价方法、技术框架及软件开发思路进行探讨,界定了路面寿命周期碳排放的核算范围,明确了各阶段清单分析的具体内容;崔璨按照生命周期评价方法,建立道路能耗模型,根据中国各类规范计算能源数据清单,求出能耗及碳排放,并开发中国道路生命周期评价软件;宋会采用信息熵、灰色理论、物元理论相结合的方法建立全寿命周期公路碳排放模型,并使用该模型对公路全寿命周期碳排放量进行定量计算,分析各阶段对公路碳排放量的影响。

现有研究多针对路面生命周期的总体或路面建设期某一阶段建立碳排放计算模型,而对完整的建设期碳排放模型建立尚不全面;另一方面,对于沥青路面结构对建设期碳排放的影响研究有待深化。该文建立沥青路面建设期碳排放二级阶段评价模型,选定典型路面结构方案,将厂拌沥青路面建设期分为原材料生产、原材料运输及路面施工3个阶段,分别量化计算各阶

收稿日期:2020-03-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51878075);广西交通科技项目(编号:桂交科2013-100-28);湖南省研究生科研创新项目(编号:CX2018B541);长沙理工大学研究生“实践创新与创业能力提升计划”项目(编与:SJCX201906)

作者简介:闫强,男,博士,教授级高工, E-mail:1157991006@qq.com

段碳排放,并分析各阶段碳排放主要影响因素,以期为今后沥青路面结构设计及减排技术推广及应用提供理论依据。

2 碳排放计算方法

基于沥青路面建设过程理论分析,确定模型边界和模型结构,提出评价指标,并依据公路工程相关定额及规范,结合碳排放因子法,确定各指标取值依据,从而形成路面建设期碳排放计算模型,以量化建设期各阶段碳排放。

2.1 模型结构与碳排放因子取值

2.1.1 模型结构

沥青路面建设是一项内容繁杂的系统工程,工程涉及到的材料、工艺等繁多,故应先对评价模型的边界进行界定,以排除一些对计算结果影响不大的环节,从而提高计算的效率和可行性。据此该将沥青路面建设期分为原材料生产、原材料运输及路面施工 3 个阶段,碳排放主要包括原材料生产过程中产生的碳排放、施工机械消耗化石能源和二次能源产生的碳排放。其中原材料生产阶段与原材料运输阶段碳排放计量起点为上一级成品,施工阶段的评价模型边界控制在路面施工阶段各施工过程引起的碳排放范围(图 1)。

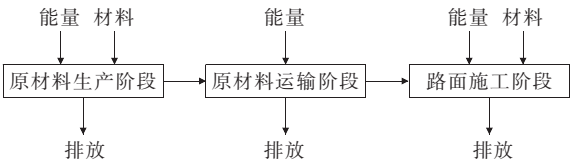


图 1 沥青路面建设期碳排放量化评价模型边界图

该文所建立沥青路面碳排放评价模型采用二级结构,从上至下为总量模型和阶段模型(图 2),其中阶段模型计算结果基于相应的模型参数确定,而总量模型为阶段模型计算结果的总和。

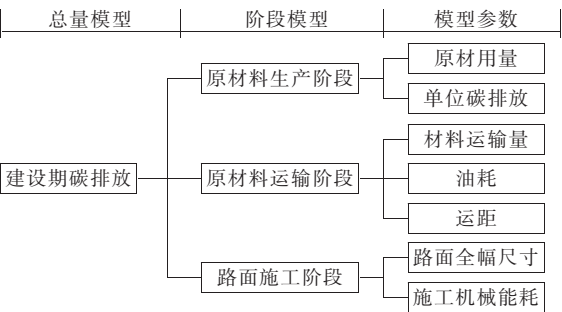


图 2 沥青路面建设期碳排放评价模型结构图

2.1.2 碳排放因子取值

(1) 原材料生产

原材料生产碳排放计算包括生产过程中的化学反应排放、化石能源燃烧直接排放和二次能源(电能)消耗间接排放,单位原材料生产碳排放以当量二氧化碳排放值表示,原材料生产总碳排放为各原材料质量生产的当量二氧化碳排放值之和,相关数据主要依靠查阅国内外相关文献数据(表 1)。

表 1 原材料生产碳排放因子

原材料类型	碳排放因子/ ($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)	原材料类型	碳排放因子/ ($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)
集料	3.45	石油沥青	189.12
水泥	870.50	乳化沥青	142.69
矿粉	7.36	SBS 改性沥青	323.04

(2) 原材料运输

路面原材料常见的运输方式包括铁路运输、水路运输和公路运输,各运输方式单位周转量碳排放量见表 2

表 2 交通运输业单位换算周转量碳排放量

交通运输方式		单位周转量碳排放量/ [$\text{kgCO}_2\text{e} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$]
铁路运输	内燃机车	0.007 7
	电力机车	0.008 7
公路运输	汽油货车	0.151 7
	柴油货车	0.155 3
水路运输	小型机动船	0.036 8
	大型船舶	0.007 2

注:CO₂e 为二氧化碳当量。

(3) 路面施工

政府间气候变化委员会(IPCC)报告中指出在公路工程建设中温室气体排放量主要包括二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)等。不同温室气体对全球气候系统产生的变暖影响(辐射强迫)不同,统计排放温室气体一般采用二氧化碳当量(CO₂e)换算。CO₂e 可由该气体排放量乘以全球变暖潜力值(GWP)确定,GWP 参照 D. Wuebbles 的成果确定(表 3)。

路面施工中主要涉及到的化石能源包括原油、燃料煤、重油、柴油以及汽油。该文参考政府间气候变化专门委员会(IPCC)EFDB 数据库所提供的温室气体排放系数,并依照《中国能源统计年鉴 2017》以及《能

源统计工作手册》的相关数据换算为适合中国国情的建议碳排放因子值,结果见表 4。

(4) 二次能源(电能)排放因子

该文所采用二次能源(电能)排放因子参考国家气候战略中心 2012 年发布的中国区域电网平均二氧化碳排放因子(表 5)。

表 3 主要排放温室气体全球变暖潜力值

温室气体类型	全球变暖潜力值(GWP)
CO ₂	1
CH ₄	21
N ₂ O	310

表 4 各类化石能源二氧化碳当量排放因子

化石能源种类	①:CO ₂ 排放因子/ (kgCO ₂ · kg ⁻¹)	②:CH ₄ 排放因子/ (kgCH ₄ · kg ⁻¹)	③:N ₂ O 排放因子/ (kgN ₂ O · kg ⁻¹)	CO ₂ e 排放因子 (①+②×21+③×310)/ (kgCO ₂ e · kg ⁻¹)
原油	3.00	1.26×10 ⁻⁴	2.51×10 ⁻⁵	3.01
重油	3.18	1.26×10 ⁻⁴	2.51×10 ⁻⁵	3.19
柴油(固定源)	3.09	1.29×10 ⁻⁴	2.56×10 ⁻⁵	3.10
柴油(移动源)	3.09	1.66×10 ⁻⁴	1.66×10 ⁻⁴	3.14
汽油	2.92	1.08×10 ⁻⁴	3.45×10 ⁻⁴	3.05
燃料煤	2.36	2.64×10 ⁻⁴	3.96×10 ⁻⁵	2.37

表 5 中国区域电网平均二氧化碳排放因子

电网名称	覆盖地区范围	二氧化碳排放因子/ [kgCO ₂ e · (kW · h) ⁻¹]
华北电网	北京市、天津市、山西省、河北省、山东省、蒙西 (除赤峰、通辽、呼伦贝尔、兴安盟内内蒙古自治区其他地区)	0.884 3
东北电网	黑龙江省、吉林省、辽宁省、蒙东(赤峰、通辽、呼伦贝尔、兴安盟)	0.776 9
华东电网	上海市、浙江省、江苏省、福建省、安徽省	0.703 5
华中电网	河南省、湖北省、湖南省、江西省、四川省、重庆市	0.525 7
西北电网	陕西省、甘肃省、宁夏自治区、新疆自治区、青海省	0.667 1
南方电网	广东省、广西自治区、海南省、云南省、贵州省	0.527 1

施工阶段下的施工过程种类多且工艺较为复杂,主要过程包括混合料拌和、混合料运输、路面摊铺、路面碾压。水稳类基层材料养生过程主要采用洒水车洒水养生,养生过程碳排放较少故忽略不计。施工阶段使用机械如下:沥青混合料拌和站选用实际工程常见型号 LB4000,生产能力为 320 t/h。并配有 ZL50C 型轮胎装载机,载斗容量为 3 m³。水泥碎石和结构类型无级配碎石拌和站型号均采用 WBC300,生产能力为 300 t/h,并配有 ZL50C 型轮胎装载机,载斗容量为 3 m³。沥青混合料及水稳碎石混合料运输车辆采用 15 t 自卸卡车。沥青混合料摊铺选用 12.5 m 沥青混合料摊铺机,水泥稳定碎石摊铺机选用 90 kW 自动找平机。路面施工碳排放各过程机械设备台班计算参考 JTG/T 3832—2018《公路工程预算定额》,各类机械设备单位台班能源消耗量参考 JTG/T 3833—2018《公

路工程机械台班费用定额》。

2.2 计算公式

取 1 km 全幅沥青路面作为 1 个基本单元,路面碳排放计算结果以 kgCO₂e/基本单元为计量单位。该文采用碳排放因子法进行计算,其又称碳排放系数法,主要思路为根据不同能源的燃烧碳排放系数计算产品过程中的碳排放量。碳排放因子法的核心计算模式[式(1)],各阶段的评价模型本质上均为该公式的详细展开式。

$$G_i = Q_i \times EF_i \tag{1}$$

式中:Q_i 为活动强度值(kg、kW · h 等);EF_i 为碳排放因子[kgCO₂e/t、kgCO₂e/kg、kgCO₂e/(kW · h)]等。

碳排放总量是沥青路面建设期碳排放评价模型的主要计算结果,碳排放总量模型为各阶段碳排放量的数值累加[式(2)]。而各阶段碳排放量又可划分为多

个过程的碳排放量。

$$G = G_1 + G_2 + G_3 \quad (2)$$

式中: G 为沥青路面建设期碳排放总量(kgCO_2e); G_1 为原材料生产阶段碳排放量(kgCO_2e); G_2 为原材料运输阶段碳排放量(kgCO_2e); G_3 为路面施工阶段碳排放量(kgCO_2e)。

原材料生产碳排放计算公式如下:

$$G_1 = \sum_i^n \frac{a+b}{2} \times h \times \rho \times l \times \omega_i \times EF_i \quad (3)$$

式中: G_1 为原材料生产阶段二氧化碳当量排放量(kgCO_2e); a 为路面顶层宽度(m); b 为路面底层宽度(m); h 为结构层高(m); ρ 为路面平均密度(kg/m^3); l 为路线全长(km); ω_i 为第 i 种材料所占质量分数(%); EF_{ij} 为第 i 种原材料单位质量生产碳排放因子($\text{kgCO}_2\text{e/t}$)。

原材料运输阶段碳排放公式如下:

$$G_2 = \sum_{ij}^n \frac{a+b}{2} \times h \times \rho \times l \times \omega_i \times EF_{ij} \times x_{ij} \quad (4)$$

式中: EF_{ij} 为第 i 种原材料第 j 种运输方式单位周转碳排放量[$\text{kgCO}_2\text{e}/(\text{t} \cdot \text{km})$]; x_{ij} 为第 i 种材料的第 j 种运输方式运距(km); 其他参数意义同前。

路面施工阶段碳排放公式如下:

$$G_{31} = \sum_i^n \frac{a+b}{2} \times h \times l \times T_i \times (mEF_i + eEF'_i) \quad (5)$$

$$G_{32} = \sum_i^n \frac{a+b}{2} \times h \times l \times m' \times$$

$$[T_{i1}(x \leq 1)$$

$$EF_i \{T_{i1} + (x-1)T_{i5} (1 < x \leq 5) \quad (6)$$

$$[T_{i1} + 4T_{i5} + (x-5)T_{i10} (5 < x \leq 10)$$

$$G_3 = G_{31} + G_{32} \quad (7)$$

式中: G_{31} 为沥青混合料拌和(或摊铺或压路)过程碳排放(kgCO_2e); G_{32} 为沥青混合料从拌和站运输至施工现场过程产生的碳排放(kgCO_2e); T_i 为拌和(或摊铺或碾压)1 000 m^3 第 i 层沥青层所需的拌和站台班(台班/1 000 m^3); m 为拌和站(或摊铺机或压路机)单位台班消耗的化石能源质量($\text{kg}/\text{台班}$); EF_i 为消耗单位质量相应化石能源当量碳排放因子($\text{kgCO}_2\text{e}/\text{kg}$); e 为拌和站(或摊铺机或压路机)单位台班消耗的电能[$\text{kgCO}_2\text{e}/(\text{kW} \cdot \text{h})$]; EF'_i 为拌和站(或摊铺机或压路机)对应区域电网电力碳排放因子[$\text{kgCO}_2\text{e}/(\text{kW} \cdot \text{h})$]; m' 为运输机械单位台班消耗的化石能源质量($\text{kg}/\text{台班}$); T_{i1} 、 T_{i5} 、 T_{i10} 分别为第 i 层沥青层运距不足 1、5、5~10 km 时的运输台班(台班); G_3 为沥青路面施工阶段碳排放(kgCO_2e)。

3 碳排放量化分析

假定全幅路面面层宽度为 29.5 m, 基层宽度为 30.5 m, 底基层宽度为 31.5 m, 选定 3 种路面结构方案。方案 1 为典型半刚性基层沥青路面, 方案 2、3 为针对半刚性基层沥青路面改进的复合式基层沥青路面方案(图 3)。

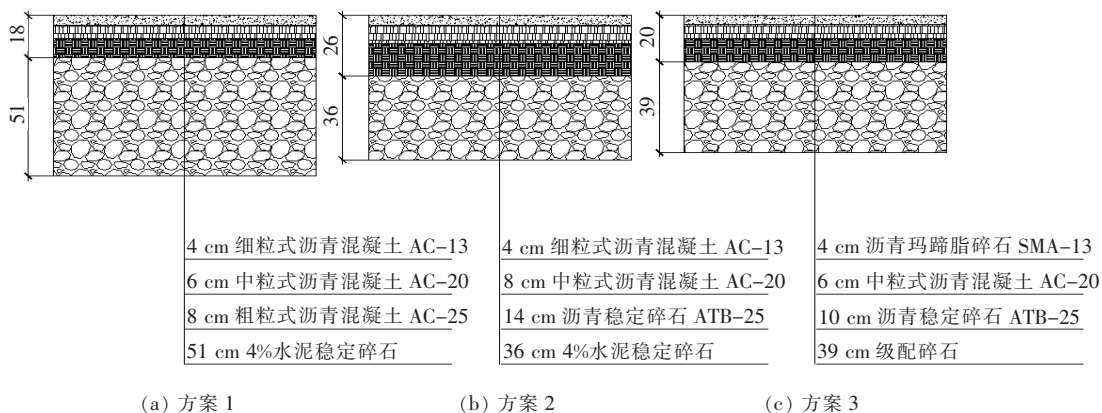


图 3 拟定路面结构方案(单位:cm)

根据原材料运输过程评价模型,假设各方案每种原材料的运输距离和运输工具一致。运输距离参数设

定如下:沥青混合料拌和站与水泥稳定碎石拌和站相距较近(仅涉及运输距离时统称拌和站),拌和站与施

工现场的距离为 5 km;石料厂、石油厂、矿粉厂、水泥厂及拌和站距施工现场均为 10 km,各原材料采用公路运输方式中的汽油货车运输。

3.1 原材料生产及运输阶段碳排放量化分析

据路面结构设计参数与原材料运距设定,计算原材料生产与运输阶段碳排放清单,结果如表 6 所示。

表 6 原材料生产与运输阶段碳排放清单

方案	原材料种类	用量/ t	生产碳排放因子/ (kgCO ₂ e · t ⁻¹)	生产碳排放/ (kgCO ₂ e)	运输碳排放/ (kgCO ₂ e)
方案 1	石油沥青	293.14	189.12	55 439.18	444.70
	改性沥青	295.02	323.04	95 304.67	447.55
	水泥	1 555.42	870.50	1 353 991.98	2 359.57
	集料	45 869.02	3.45	158 018.79	69 583.31
	矿粉	358.69	7.36	2 638.17	544.13
	合计	48 371.29	—	1 675 392.78	73 379.26
方案 2	石油沥青	399.51	189.12	75 555.15	606.06
	改性沥青	350.35	323.04	113 178.16	531.49
	水泥	1 032.85	870.50	899 093.49	1 566.83
	集料	41 382.32	3.45	142 562.10	62 776.98
	矿粉	511.36	7.36	3 761.06	775.73
	合计	43 676.39	—	1 234 149.95	66 257.09
方案 3	石油沥青	285.36	189.12	53 967.96	432.90
	改性沥青	314.68	323.04	101 654.02	477.37
	水泥	0	870.50	0	0
	集料	40 277.29	3.45	134 770.16	59 345.81
	矿粉	392.90	7.36	2 889.76	596.03
	合计	41 270.23	—	293 281.89	60 852.11

(1) 总体而言,原材料生产阶段碳排放占比由大到小排序为水泥、沥青(基质沥青与改性沥青之和)、集料、矿粉,其中水泥占据了绝对主体。该文涉及的两种半刚性路面结构中,水泥生产碳排放占比均在 72% 以上,沥青与集料生产碳排放均在 10% 左右,而矿粉碳排放占比不足 0.5%(图 4)。原材料生产碳排放为材料用量与碳排放因子的乘积,故沥青、集料与矿粉对原材料生产阶段碳排放的影响均小于水泥(表 6)。而柔性基层沥青路面中,基层材料为级配碎石,碳排放因子

远小于水泥,其余材料碳排放因子相差不大,碳排放占比与材料用量成正比。

(2) 沥青路面结构对原材料生产阶段碳排放有显著影响,该文涉及的 3 种路面结构中,碳排放总量从大到小排列依次为:方案 1>方案 2>方案 3。这主要是由于 3 种路面结构使用原材料组成的区别造成的,尤其是水泥使用量,方案 1 水泥碳排放较方案 2、3 分别高 454 898.49、1 353 991.98 kgCO₂e,而其他原材料碳排放差异较小。

(3) 总体而言,原材料运输阶段碳排放比例由大到小排序为集料、水泥、沥青、矿粉,其中集料运输为该阶段碳排放主要来源。3 种路面结构中,集料的运输碳排放占比均在 94% 以上(图 5)。原材料运输碳排放与原材料用量、运输方式及运输距离三者相关,而各原材料运输方式及运距相同,故 3 种方案碳排放量仅与原材料用量有关,从而产生各结构方案中原材料运输碳排放差异。

(4) 沥青路面结构对原材料运输阶段碳排放有显

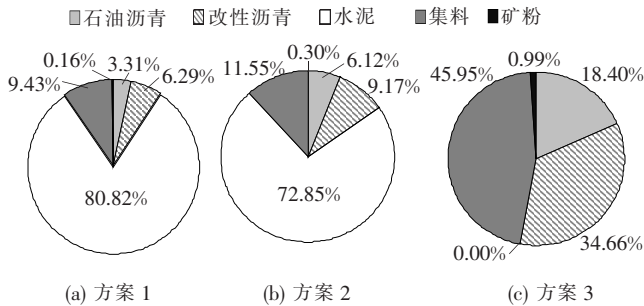


图 4 3 种路面结构方案原材料生产碳排放占比

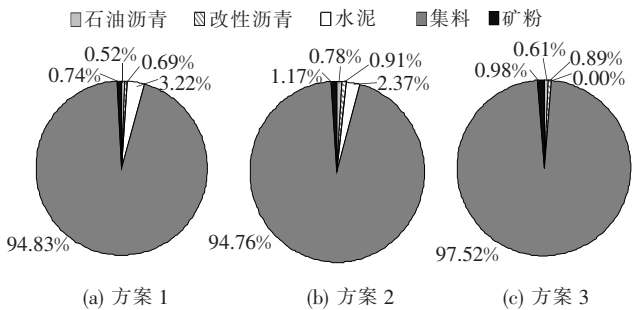


图 5 3 种路面结构方案原材料运输碳排放占比

放从方案 1~3 呈阶梯状递减。这主要是由于 3 种路面结构使用原材料用量的区别造成的,其中集料运输碳排放量差异最为突出。

3.2 路面施工阶段碳排放量化分析

为适应目前高等级路面施工现状,拟选厂拌法施工工艺。施工阶段碳排放仅考虑施工机械能耗带来的碳排放,混合料自身高温排放属于该阶段次要排放源,不予考虑。各过程机械设备台班计算均以 JTG/T B06—02—2007《公路工程预算定额》为参考依据。路面施工阶段碳排放量计算结果见表 7。

著影响,该文涉及的 3 种路面结构中,原材料运输碳排

表 7 基本单元路面施工阶段碳排放量

方案	结构层	厚度/cm	碳排放量/(kgCO ₂ e)				
			混合料拌和	混合料运输	混合料摊铺	混合料压实	合计 ¹
方案 1	沥青层	18	164 741.04	36 938.76	10 120.58	18 749.36	230 549.75
	水稳层	49	4 197.15	84 413.19	23 596.77	15 540.71	127 747.82
	合计 ²	69	168 938.19	121 351.95	33 717.35	34 290.08	358 297.57
方案 2	沥青层	26	233 621.04	52 383.26	19 124.36	33 109.50	338 238.16
	水稳层	36	2 962.69	59 585.78	15 731.18	10 360.48	88 640.13
	合计 ²	62	236 583.74	111 969.04	34 855.54	43 469.98	426 878.29
方案 3	沥青层	20	179 938.24	40 346.33	11 912.61	23 472.57	255 669.74
	碎石层	39	3 209.59	64 551.26	15 731.18	10 360.48	93 852.50
	合计 ²	59	183 147.82	104 897.59	27 643.79	33 833.04	349 522.25

注:合计 1、2 分别为按结构层分类碳排放合计和按施工过程分类碳排放合计。

(1) 路面施工阶段碳排放占比由大到小排序为混合料拌和、运输、碾压、摊铺,其中混合料拌和及混合料运输为路面施工阶段主要排放过程(图 6)。该文涉及的 3 种路面结构中,混合料拌和碳排放占比均在 47% 以上。混合料拌和过程中消耗大量能源,特别是沥青层的拌和,沥青层厚度排序从小到大为方案 2、3、1,因此拌和过程碳排放也呈现此种排序。混合料运输过程碳排放占比在 26% 以上。在采用同种运输方式的情况下,混合料运输过程碳排放仅与混合料用量有关,故结构层最厚的方案 1 在 3 种结构方案中混合料运输占比最高,但方案 2 拌和过程碳排放比例很高,导致结构层比方案 3 更厚的方案 2 运输碳排放占比反而较低。3 种路面结构方案中,混合料摊铺与碾压碳排放占比差异不明显,均为 9% 左右,导致这种结果的根本原因是摊铺与碾压机械单位台班碳排放因子并不高,在 3 种方案结构层总厚度差别不大的情况下,三者碳排放占比差异不大。

(2) 沥青路面结构对路面施工阶段碳排放有显著影响,该文涉及的 3 种路面结构中,方案 2 的路面施工

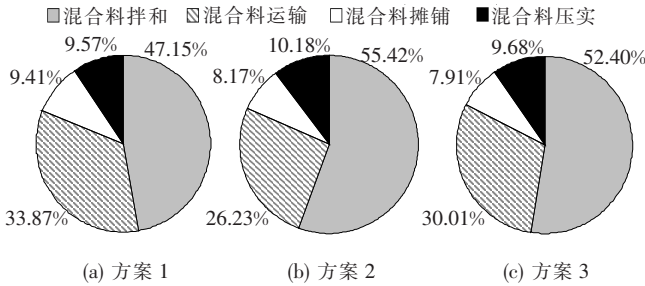


图 6 3 种路面结构方案施工阶段碳排放占比

阶段碳排放量显著大于其他两种结构,而方案 1、3 的碳排放相近。这主要是由于 3 种路面结构沥青层与水泥稳定碎石基层厚度区别造成的,尤其是沥青层厚度,方案 2 沥青层较方案 1、3 分别高 8 cm 和 6 cm,而路面施工阶段主要碳排放过程为混合料拌和过程,故沥青层越厚,所需混合料拌和量越大,碳排放越多。

3.3 建设期碳排放总量对比分析

根据上文中计算结果,汇总得 3 种路面结构方案建设期碳排放总量表(表 8)。

(1) 路面建设期碳排放占比由大到小排序为原材

料生产阶段、路面施工阶段、原材料运输阶段,其中原材料生产阶段为碳排放主体。该文涉及的 3 种路面结构中,原材料生产阶段碳排放占比均在 71%以上,路面建设工程中原材料用量十分巨大,导致原材料生产阶段碳排放占主导,同时由于各路面结构方案差异,导

致其原材料占比各有差异;3 种路面结构方案中,路面施工阶段碳排放占比在 17%以上。3 种路面结构方案的原材料运输阶段碳排放相差不大,均处于 4%以内,这主要是原材料总量和建设期其他两阶段占比综合影响下的结果。

表 8 3 种路面结构方案建设期碳排放

方案	原材料生产阶段		原材料运输阶段		路面施工阶段		建设期总排放/ (kgCO ₂ e)
	碳排放量/ (kgCO ₂ e)	占比/%	碳排放量/ (kgCO ₂ e)	占比/%	碳排放量/ (kgCO ₂ e)	占比/%	
1	1 665 392.78	79.42	73 379.26	3.50	358 297.57	17.09	2 097 069.61
2	1 234 149.95	71.45	66 257.09	3.84	426 878.29	24.71	1 727 285.33
3	1 251 638.40	75.23	62 608.00	3.76	349 522.25	21.01	1 663 768.65

(2) 沥青路面结构对建设期碳排放有显著影响,该文涉及的 3 种路面结构中,方案 1 的建设期碳排放量显著大于其他两种结构,而该两种结构的碳排放相近。这主要是由于 3 种路面结构中原材料用量总和不同造成的,而建设期主要碳排放阶段为原材料生产阶段,故原材料总用量越大,碳排放越多。

4 结论

(1) 沥青路面结构对建设期碳排放有显著影响。该文涉及的 3 种路面结构中,方案 1 的建设期碳排放量显著大于其他两种结构,而其他两种结构的碳排放相近。路面建设期中原材料生产阶段为碳排放主体。

(2) 沥青路面结构对原材料生产阶段碳排放有显著影响,3 种路面结构中,方案 1 的原材料生产阶段碳排放量显著大于其他两种结构,而其他两种结构的碳排放相近。总体而言,水泥生产是原材料生产阶段碳排放主要来源,在满足路面设计及施工要求的前提下,减小水泥用量是该阶段的主要减排措施。

(3) 沥青路面结构对原材料运输阶段碳排放有显著影响,3 种路面结构中,原材料运输碳排放从方案 1~3 呈阶梯状递减。总体而言,原材料运输阶段中集料运输为该阶段碳排放主体,可采用较薄的结构层厚度以减小集料用量,从而减小原材料运输碳排放。

(4) 沥青路面结构对路面施工阶段碳排放有显著影响,3 种路面结构中,方案 2 的路面施工阶段碳排放量显著大于其他两种结构,而其他两种结构的碳排放相近。总体而言,路面施工阶段碳排放占比由大到小排序为混合料拌和、运输、摊铺、碾压,其中混合料拌和及混合料运输为路面施工阶段主要碳排放过程。因

此,采用较薄的沥青层能够显著减少路面施工阶段碳排放。

参考文献:

[1] Mroueh U, Eskola P, Laine—Ylijoki J. Life—Cycle Impacts of the Use of Industrial by—Products in Road and Earth Construction[J]. Waste Management, 2001, 21(3).

[2] 潘美萍. 基于 LCA 的高速公路能耗与碳排放计算方法研究及应用[D]. 华南理工大学硕士学位论文, 2011.

[3] 崔璨. 基于生命周期道路能耗评价模型的建立及应用[D]. 郑州大学硕士学位论文, 2014.

[4] 宋会. 全寿命周期公路碳评价系统研究及应用[D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2014.

[5] Alliance A P. Carbon Footprint: How does Asphalt Stack up? [J]. Euractiv, 2010.

[6] Chowdhury R, Apul D, Fry T. A Life Cycle Based Environmental Impacts Assessment of Construction Materials Used in Road Construction[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2009, 54(4).

[7] Aurangzeb Q, Al—Qadi I L, Ozer H, et al. Hybrid Life Cycle Assessment for Asphalt Mixtures with High RAP Content[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2014: 83—86.

[8] 宋静静. 不同拌和类型沥青混合料能耗排放研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2015.

[9] 陈珺, 吕正龙, 刘开琼. 基于 LCA 的橡胶沥青再生路面节能减排效果研究[J]. 公路, 2016(5).

[10] 毛睿昌. 基于 LCA 的城市交通基础设施环境影响分析研究[D]. 深圳大学硕士学位论文, 2017.

[11] 齐小飞. 重庆市国省干线沥青路面结构力学响应及环境效益分析[D]. 重庆交通大学硕士学位论文, 2018.

[12] 李婵. 高速公路沥青面层施工期碳排放测算研究[D]. 长