

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2018.02.001

基于 LCA 的沥青路面设计参数对碳排放的影响

张海涛, 孟良, 吕丽华

(东北林业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: 公路设计与施工一般都以结构性能与经济指标作为主要标准。而公路建设过程中将产生大量的气体碳排放, 这一影响环境的指标却没有考虑。因此, 对公路建设中的碳排放进行量化与分析并以此作为一个设计指标考虑是很有必要的, 符合可持续发展战略的要求。本研究以国内高速公路的典型沥青路面结构为基础, 通过对3种沥青路面结构类型的全寿命周期评价(LCA)的碳排放评估, 分析不同沥青结构层设计参数对碳排放特征化结果的影响程度。研究内容包括: LCA的技术内容介绍, 沥青路面设计参数与LCA的碳排放评估参数的选定, 不同沥青路面结构的LCA碳排放评估, 不同沥青层设计参数对LCA的碳排放的特征化结果影响分析等。研究结果表明, 在沥青面层建设期中对温室效应的影响最为严重, 其占比达到了95%以上, 其中生产阶段的碳排放对温室效应影响的比重最大。改变沥青层的类型对碳排放的影响表现为大幅度地提高了沥青面层生产阶段的碳排放。而改变沥青层厚度对于碳排放的影响是对于各阶段的碳排放都有大致相同比例的影响。在目前的时代背景下, 建设绿色、低碳公路成为公路行业必然前进的方向, 建议在沥青路面建设中应将其全寿命周期内的碳排放考虑其中, 建议沥青路面建设应该大力推广使用新型能源以降低沥青路面的碳排放。

关键词: 道路工程; 设计参数; LCA; 碳排放; 沥青结构层

中图分类号: U416

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2018)02-0001-07

Influence of Asphalt Pavement Design Parameters on Carbon Emissions Based on LCA Technology

ZHANG Hai-tao, MENG Liang, LÜ Li-hua

(School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang 150040, China)

Abstract: The indexes of structure performance and economics are applied generally as the main criteria in highway design and construction. But it will produce a lot of carbon gas emissions during the process of road construction, and this environmental influencing index is not considered. Therefore, it is necessary to quantify and analyze the carbon emission in highway construction as a design index, which meets the requirements of the sustainable development strategy. Based on typical asphalt pavement structure of expressway in China, through LCA carbon emission assessment of 3 kinds of asphalt pavement structure types, the influence degree of design parameters of asphalt pavement layers on the carbon emission characteristics is analyzed. The research contents include: introduction of technology content of LCA, determination of asphalt pavement design parameters and LCA carbon emission assessment parameters, LCA carbon emission assessment of different asphalt pavement structures, analyzing influence of different design parameters on LCA carbon emission characteristics. The research result shows that (1) the influence of carbon emissions in asphalt pavement construction stage on the greenhouse effect is most serious, the proportion reached more than 95%, the proportion of the influence of carbon emissions in production stage on

收稿日期: 2017-02-26

基金项目: 黑龙江省交通运输厅重点项目

作者简介: 张海涛(1963-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 教授。(zht6781@163.com)

greenhouse effect is the largest; (2) the effect of changing the type of asphalt layer on the carbon emission has could greatly improve the carbon emission in the production stage of asphalt pavement, while the effect of changing the thickness of asphalt on carbon emission is to has almost the same proportion of carbon emission in each stage. In the present era background, building a green, low carbon road is the certain direction of highway industry. It is suggested that the whole life cycle of carbon emissions should be considered in asphalt pavement construction, and the use of new energy should be promoted in asphalt pavement construction to reduce the carbon emission of asphalt pavement.

Key words: road engineering; design parameter; LCA; carbon emission; asphalt structure layer

0 引言

随着社会与经济的发展,人们对生态环境的关注度越来越高,经济的迅速发展所暴露的一些环境问题(雾霾、酸雨、温室效应等)已经造成了一定的社会影响。公路建设作为基础设施中很重要的部分,需要大量的材料、人力、机械等,所以建设一条公路需要耗费大量的能源和碳排放大量的污染物,而目前我国公路建设过程中尚没有一个比较明确的指标来控制污染物^[1-2]。

目前公路行业引入了在产品行业中运用了多年的全寿命周期评价(Life - Cycle Assessment, LCA)来量化公路工程的气体碳排放量,利用LCA来明确碳排放的关键环节,量化碳排放量和评价工程项目的碳排放水平。因此,运用LCA可以对工程项目的碳排放水平有更清晰的认识,从而达到治理和解决的目的^[3-6]。

沥青路面设计主要考虑整个路面的结构性能与经济指标,往往忽略对环境的影响。本研究以国内高速公路的典型沥青路面结构为基础,通过改变沥青结构层的两个设计参数(沥青混合料的类型和厚度)而组成可对比的3种沥青路面结构类型。利用LCA对3种沥青路面结构类型的碳排放进行定量评估,分析不同沥青结构层设计参数对碳排放的特征化结果的影响程度。研究结果可以为沥青路面结构类型的科学选择及沥青路面的节能减排提供一定的技术支持,对沥青路面的设计、施工及养护具有一定的参考价值。

1 沥青路面 LCA 简介

1.1 LCA 技术内容

LCA 技术内容主要分为4个部分,包括目标与范围定义、清单分析、影响评价、结果解释^[7-10],其相关关系如图1所示。

(1) 目标与范围定义

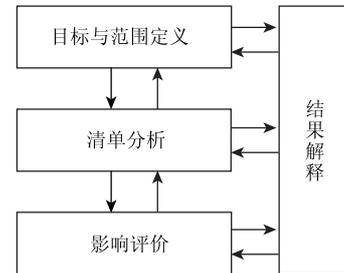


图1 LCA 的技术内容

Fig.1 Contents of LCA technology

该阶段为LCA分析的第一步,确定LCA分析的边界。任何物质与外界的联系可以无限扩大,所以选择合适的研究范围才能进行适当的分析与评价。合理的研究范围是LCA分析的前提,将直接影响最终的结果。

(2) 清单分析

清单分析是整个LCA中的核心,通过清单分析能够对研究的项目有更加清晰的了解与更好的归类,并得到最终的结论。对于沥青路面来说,清单分析主要包括:沥青路面中消耗的沥青与石料的能耗与碳排放,施工与运输中工程机械使用的汽油与柴油的能耗与碳排放等。通过清单分析可以较清晰地看到该沥青路面工程的能耗及碳排放对于环境的影响,从而做出评价与预估。

(3) 影响评价

影响评价是在清单分析的基础上对清单分析的结果进行进一步的整理与分析。分析其能耗与碳排放的组成结果,各阶段对于环境影响的占比,对比各阶段大小。通过影响评价可以更有深度地明确沥青路面工程能耗与碳排放对环境的影响。明确关键环节,找到关键方法,解决关键问题,从而从重要环节上降低沥青路面对环境的影响。

(4) 结果解释

结果解释是对于清单分析和影响评价的结果进行归类与总结,对于沥青路面工程给出评价结果并且给

出建议, 降低其在生命周期的能耗及对环境的影响。

2 基本参数的选择

2.1 沥青路面设计参数

采用国内典型的高速公路沥青路面结构为基础, 以双向四车道 1 km 为一个功能单元进行 LCA 碳排放评估, 路面宽度为 4×3.75 m, 路基宽度为 24.5 m。拟定的 3 种路面结构如表 1 所示, 其中, 结构 I 是我国高速公路典型的沥青路面结构类型; 结构 II 是在结构 I 的基础上将沥青上面层的沥青混合料改为 SMA-13; 结构 III 是在结构 I 的基础上将沥青下面层的厚度增加 2 cm。

表 1 路面结构类型

Tab. 1 Pavement structure types

路面结构	结构 I	结构 II	结构 III
上面层	4 cm AC-13	4 cm SMA-13	4 cm AC-13
中面层	6 cm AC-20	6 cm AC-20	6 cm AC-20
下面层	8 cm AC-25	8 cm AC-25	10 cm AC-25

2.2 LCA 碳排放评估参数

2.2.1 材料的参数

AC-13, AC-20, AC-25 其沥青为基质沥青, SMA-13 其沥青为改性沥青, 根据沥青混合料的配合比设计, 具体的技术参数如表 2 所示。

表 2 沥青混合料的技术参数

Tab. 2 Technical parameters of asphalt mixture

材料类型	沥青	集料级配	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)
	用量/%	(1#:2#:3#:4#:5#:矿粉:砂)	
AC-13	5	8:21:23:26:0:6:16	2.351
AC-20	4	9:0:12:54:0:6:19	2.358
AC-25	3.4	17:0:18:25:21:5:14	2.365
SMA-13	6	8:2:40:40:0:10:0	2.353

注: 1# (0 ~ 2.36 mm); 2# (2.36 ~ 4.75 mm); 3# (4.75 ~ 9.5 mm); 4# (9.5 ~ 16 mm); 5# (16 ~ 31.5 mm)

2.2.2 碳排放的基本参数

本研究选用排放因子法 (Emission-Factor-Approach) 计算沥青路面建设过程中的碳排放。排放因子法是 IPCC 提出的第一种计算碳足迹的污染物排放量的方法, 可以比较直观地计算对环境影响大的污染物质。结合我国沥青路面现状选用的各阶段的相应排放因子依据为: 沥青生产阶段采用的是欧洲沥青协会沥青生命周期清单分析的排放因子; 沥青混合料拌和阶段选用的是我国普遍使用燃油设备的现状采用的相应排放因子; 运输阶段选用的是 EEA 建立的车辆运输过程中重型柴油车的排放因子,

由于施工阶段施工机械主要以柴油为燃料, 因此选用了柴油燃烧的排放因子^[11-13]。各阶段排放因子汇总如下 (如表 3 所示)。

表 3 各阶段碳排放因子

Tab. 3 Carbon emission factor for each stage

排放物	排放因子/($g \cdot t^{-1}$)				
	沥青生产	改性沥青生产	拌和	运输	施工
CO ₂	174 244	295 910	18.5	3 140	74 100
CO	613	671	0.2	8	0
CH ₄	595	1 085	0.003 7		3
SO ₂	781	210.409 2	0.044		
NO _x	770	1 375	0.06	37	
N ₂ O				0.061	0.6
NH ₃				0.015	
NM VOC	331	331		1.6	
VOC			0.004 1		
TOC			0.007 5		
颗粒物	161.2	265	0.009 1	1.2	

通过排放因子我们可以得到相应的排放量, 本研究将采用特征化因子对于各个污染物进行特征化以表征污染物对环境的影响。选用的特征化因子^[4], 特征化对环境影响最主要的 4 种现象分别为: 温室效应 (全球变暖)、酸雨效应、健康危害、颗粒物 PM10。其特征化因子如下 (如表 4 所示)。

表 4 排放物特征化因子

Tab. 4 Characteristic factors of emission

影响类别	影响因子	特征化因子	影响类别	影响因子	特征化因子
全球变暖	CO ₂	1	健康危害	SO ₂	0.096
	CH ₄	25		NO _x	1.2
	N ₂ O	298		CO	2.4
酸化效应	SO ₂	1	颗粒物	VOC	0.64
	NO _x	0.7		TOC	0.64
	NH ₃	1.88		NM VOC	0.64
			PM10	1	
			PM2.5	1	

2.3 沥青路面建设期碳排放的计算模型

2.3.1 沥青路面建设期总碳排放的计算模型

沥青路面建设期包括沥青混合料生产阶段、沥青混合料运输阶段、沥青路面建设阶段, 所以总碳排放 G 等于各阶段的总和^[14-16], 如式 (1) 所示:

$$G = G_{pro} + G_{tran} + G_{cons}, \quad (1)$$

式中, G 为沥青路面建设期总碳排放; G_{pro} 为沥青混合料生产阶段碳排放; G_{tran} 为沥青路面运输阶段碳排放; G_{cons} 为沥青路面建设阶段碳排放。

2.3.2 沥青混合料生产阶段碳排放计算模型

沥青混合料生产阶段包括沥青生产阶段和沥青混合料拌和阶段,由于石料在生产过程中对于环境的碳排放过小,所以本文未将其加入进行计算。根据排放因子得到沥青生产阶段碳排放计算模型^[17-18],如式(2)所示:

$$\begin{cases} G_{\text{asph}} = M_{\text{asph}} \times P_{\text{asph}} \\ G_{\text{mix}} = T_{\text{mix}} \times P_{\text{mix}} \end{cases}, \quad (2)$$

式中, G_{asph} 为沥青生产碳排放; M_{asph} 为功能单元的沥青的质量; P_{asph} 为沥青的排放因子; G_{mix} 为沥青混合料拌和阶段碳排放; T_{mix} 为沥青混合料的质量; P_{mix} 为沥青混合料拌和阶段排放因子。

2.3.3 运输阶段和施工阶段碳排放计算模型

运输阶段与施工阶段的碳排放主要来自于其使用的施工机械与运输机械所使用的燃料所产生碳排放,本文选用基于公路工程预算定额和公路工程机械台班定额。得到如下计算模型,如式(3)所示:

$$\begin{cases} G_{\text{trans}} = T_{\text{trans}} \times L_{\text{trans}} \times Q_{\text{trans}} \times P_{\text{trans}} \\ G_{\text{cons}} = T_{\text{cons}} \times L_{\text{cons}} \times Q_{\text{cons}} \times P_{\text{cons}} \end{cases}, \quad (3)$$

表5 原材料清单

Tab.5 Raw material list

结构类型	沥青	改性沥青	矿粉	1#	2#	3#	4#	5#	砂
结构 I/t	242.11	—	340.27	757.72	282.12	1 047.89	2 137.37	576.38	986.91
结构 II/t	174.94	79.91	392.85	756.8	26.64	1 271.67	2 320.83	576.38	771.97

根据表3的排放因子、表4特征化因子和表5原材料清单,利用式(2)可以计算得到结构I和II生产阶段的4个影响类型的特征化结果(如表6、表7所示)。

表6 沥青生产阶段特征化结果(结构II与结构I)

Tab.6 Asphalt production stage characteristics (structure II and structure I)

影响类别	结构 I/g	结构 II/g
温室效应	45 787.60	58 898.20
酸雨效应	319.58	438.09
健康危害	649.34	759.16
颗粒物	39.03	49.38

表7 沥青混合料拌和阶段特征化结果(结构II与结构I)

Tab.7 Asphalt mixture mixing stage characteristics (structure II and structure I)

影响类别	结构 I/g	结构 II/g
温室效应	113 947.70	118 471.40
酸雨效应	527.07	547.99
健康危害	3 454.42	3 591.57
颗粒物	55.77	57.98

式中, G_{trans} 为沥青路面运输阶段的碳排放; T_{trans} 为沥青路面运输阶段施工机械的台班数; L_{trans} 为施工机械单位台班的油耗; Q_{trans} 为施工机械燃油的热值; P_{trans} 为沥青路面运输阶段的排放因子; G_{cons} 为沥青路面施工阶段碳排放; T_{cons} 为沥青路面施工阶段所学的施工机械台班数; L_{cons} 为施工机械单位台班的油耗; Q_{cons} 为施工机械燃油的热值; P_{cons} 为沥青路面施工阶段的排放因子。

3 不同沥青层设计参数对LCA碳排放的影响分析

3.1 沥青混合料类型对LCA碳排放的影响(结构II与结构I对比)

3.1.1 结构II的LCA碳排放评估

(1) 材料的生产阶段

与结构I相比,结构II的上面层采用SMA-13改性沥青混合料替代结构I的AC-13,沥青使用了改性沥青,其余不变。根据沥青混合料的密度和油石比可以计算得到结构I和II的沥青路面原材料清单(如表5所示)。

从表6可以看出,对温室效应(全球变暖)的影响依然占据着95%以上的比例。改变沥青层类型对4个环境影响类型都有不同程度的增加,温室效应(全球变暖)的影响增加了28.6%,酸雨效应增加了37%,健康危害增加了16.95%,颗粒物增加了26.5%。因此,改变沥青层类型对酸雨效应的影响较大,而对温室效应(全球变暖)与颗粒物质的影响大致相同,对健康危害的影响最小。

从表7可以看出,沥青层类型的改变在沥青混合料拌和阶段对4个环境类型的影响大致相同(皆为4%),可见,沥青层类型对于沥青混合料拌和阶段的碳排放的影响相对较小。

(2) 运输阶段

运输阶段的碳排放与运距及工程量密切相关,通过表3、表4的排放因子、特征化因子、表8的定额、燃油的热值为43.0 MJ/kg,根据式(3)计算得到结构II与结构I运输阶段的碳排放。因为结构II只是在结构I的基础上改变了沥青层类型,不改变工程量和运距,因此,结构II运输阶段的碳排放与

表8 沥青路面运输机械定额

Tab. 8 Quotas for asphalt pavement transport machinery

运输机械	油耗		
	台班	单位台班 油耗/kg	油耗/kg
结构 I 15 t 自卸汽车	38.03	67.89	2 581.86

结构 I 是相同的。

(3) 施工阶段

同运输阶段计算方法, 根据《公路工程机械台班定额》中的相关施工机械的单位台班油耗 (如表 9), 根据式 (3) 可以计算得到结构 I、II 的特征化结果 (如表 10 所示)。

表9 沥青路面施工机械定额

Tab. 9 Quota for asphalt pavement construction machinery

机械类型	单位台班油耗/kg	机械类型	单位台班油耗/kg
12.5 m 摊铺机	136.41	16~20 t 压路机	42.29
6~8 t 压路机	54.86	20~25 t 压路机	50.29
12~15 t 压路机	80.92	15 t 振动压路机	80.92

表10 施工阶段特征化结果 (结构 II 与结构 I)

Tab. 10 Construction stage characteristics (structure II and structure I)

影响类别	结构 I/g	结构 II/g
温室效应	7 576.80	8 323.31

从表 10 中可知, 沥青面层类型的改变使得施工阶段对温室效应 (全球变暖) 的影响增加了 8.7%。沥青面层类型的改变导致施工阶段的施工难度加大

表11 原材料清单 (结构 III)

Tab. 11 Raw material list (structure III)

结构类型	沥青	矿粉	1#	2#	3#	4#	5#	砂
结构 I/t	242.11	340.27	757.72	282.12	1 047.89	2 137.37	576.38	986.91
结构 III/t	269.41	374.38	873.67	282.12	1 170.69	2 307.92	719.65	1 232.22

同 3.1 方法, 可以计算得到结构 III 生产阶段的 4 个影响类型的特征化结果 (如表 12、表 13 所示)。

表12 沥青生产阶段特征化结果 (结构 III 与结构 I)

Tab. 12 Asphalt production stage characteristics (structure III and structure I)

影响类别	结构 I/g	结构 III/g
温室效应	45 787.60	50 950.55
酸雨效应	319.58	355.62
健康危害	649.34	722.56
颗粒物	39.03	43.43

从表 12 可以看出, 改变沥青层厚度, 生产阶段的 4 个影响类型都增加了约 11.3%。从表 13 可以看

及施工机械的台班油耗增加, 从而导致碳排放的增加, 但其碳排放增加的幅度不大。

3.1.2 LCA 碳排放分析

与结构 I 的对比结果如图 2 所示。对比结果表明, 改变沥青层类型对不同阶段的 LCA 碳排放影响大小依次为: 温室效应 (全球变暖) > 健康危害 > 酸化效应 > 颗粒物。

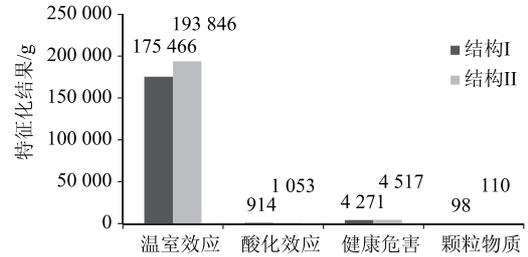


图2 三个阶段的碳排放特征化结果对比 (结构 II 与结构 I)

Fig. 2 Comparison of carbon emission characteristics in 3 stages (structure II and structure I)

3.2 沥青面层厚度对 LCA 碳排放的影响 (结构 III 与结构 I 对比)

3.2.1 结构 III 的 LCA 碳排放评估

(1) 材料的生产阶段

与结构 I 相比, 结构 III 改变了下面层厚度, 其余不变。根据沥青混合料的密度和油石比可以计算得到结构 III 的沥青路面原材料清单 (如表 11 所示)。可以看出, 下面层厚度的增加使相应的各级配的集料和沥青都有相应的增加。

表13 沥青混合料拌和阶段特征化结果 (结构 III 与结构 I)

Tab. 13 Asphalt mixture mixing stage characteristics (structure III and structure I)

影响类别	结构 I/g	结构 III/g
温室效应	113 947.70	131 640.50
酸雨效应	527.07	608.91
健康危害	3 454.42	3 990.79
颗粒物	55.77	64.43

出, 沥青层厚度的变化导致沥青混合料拌和阶段对 4 个影响类型的影响都相应增加了 15.5%。沥青层厚度的变化对沥青混合料拌和阶段的影响要大于沥青生产阶段。

(2) 运输阶段

运输阶段的碳排放与工程量及运距有关。结构Ⅲ增加了沥青层厚度,导致工程量与机械台班的增加,从而使碳排放增加。其油耗计算结果如表14所示。同表8计算方法,根据油耗计算得到结构Ⅲ的特征化结果(如表15所示)。

表14 运输阶段的油耗(结构Ⅲ与结构Ⅰ)

Tab. 14 Fuel consumption in transport stage (structure Ⅲ and structure Ⅰ)

	运输机械	油耗	
		台班	单位台班 油耗/kg
结构Ⅰ	15 t 自卸汽车	38.03	67.89
结构Ⅲ		42.30	
			油耗/kg
			2 581.86
			2 871.75

表15 运输阶段碳排放特征化结果(结构Ⅲ与结构Ⅰ)

Tab. 15 Carbon emission characteristics in transport stage (structure Ⅲ and structure Ⅰ)

影响类别	结构Ⅰ/g	结构Ⅲ/g
温室效应	8 153.97	9 069.50
酸雨效应	66.94	74.46
健康危害	166.85	185.58
颗粒物	3.09	3.45

从表15可知,沥青层厚度的改变使运输阶段的4个影响类型的特征化结果都增加了约11.2%。

(3) 施工阶段

同结构Ⅰ的施工阶段油耗计算方法,计算得到结构Ⅲ的油耗为2 593.25 kg。根据油耗量数据可以计算得到结构Ⅲ的特征化结果(如表16所示)。

表16 施工阶段特征化结果(结构Ⅲ与结构Ⅰ)

Tab. 16 Construction stage characteristics (structure Ⅲ and structure Ⅰ)

影响类别	结构Ⅰ/g	结构Ⅲ/g
温室效应	7 576.80	8 291.19

从表16可知,沥青层厚度的变化导致温室效应(全球变暖)增加了9.4%。施工阶段的碳排放特征化结果增加主要是因为工程量的增加导致施工机械台班的增加,相应增加了碳排放。

3.2.2 LCA 碳排放分析

与结构Ⅰ的对比结果如图3所示。对比结果表明,改变沥青层厚度对不同阶段的LCA碳排放影响大小依次为:

健康危害 > 酸化效应 > 颗粒物 >
温室效应(全球变暖)。

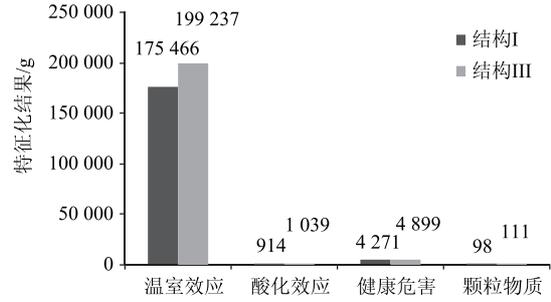


图3 三个阶段的碳排放特征化结果对比(结构Ⅲ与结构Ⅰ)

Fig. 3 Comparison of carbon emission characteristics in 3 stages (structure Ⅲ and structure Ⅰ)

4 结论

以国内高速公路沥青路面的典型路面结构为基础,通过改变沥青结构层类型与厚度两个设计参数对LCA碳排放的影响分析,得到以下的结论。

(1) 沥青路面建设的3个阶段对温室效应(全球变暖)的影响最为明显,之后为健康危害、颗粒物、酸化效应,所以说基于LCA沥青路面的建设降低温室效应(全球变暖)的影响应该成为重中之重。

(2) 因沥青路面建设中原材料的生产由厂家完成,仅从施工企业完成的过程来考虑,拌和阶段的碳排放占据了很大的比例,由于沥青面层类型的变化,拌和的温度会相应有所提高,会引起大约4%碳排放的提高;而沥青面层厚度的变化仅仅为量的变化,却导致大约15.5%碳排放的提高,从施工企业降低碳排放的角度,在保证路面结构强度的前提下,可以选择改变沥青路面类型。

(3) 改变沥青层类型(上面层SMA-13替代AC-13)对各阶段的碳排放影响程度为生产阶段 > 施工阶段 > 拌和阶段 > 运输阶段,改变沥青层厚度(下面层AC-25增加2cm)对不同阶段的碳排放都有大致相同程度的增加。从总量上看,以温室效应(全球变暖)为主要依据指标,改变沥青层厚度相对改变沥青层类型对碳排放的影响要小一些,因此,在路面设计中,通常采用高性能沥青混合料或增加路面厚度等方案来保证沥青路面结构强度,如果以碳排放为标准,在保证路面结构强度的前提下,应该优先选择改变沥青层厚度。

参考文献:

References:

- [1] 牛文元. 2015世界可持续发展年度报告[M]. 北京: 科学出版社, 2015.

- NIU Wen-yuan. Report of World Sustainable Development 2015 [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [2] JTG/T B06-02—2007, 公路工程预算定额 [S].
JTG/T B06-02—2007. Highway Engineering Budget Quota [S].
- [3] 李肖燕. 基于LCA的水泥路面与沥青路面环境影响评价 [D]. 南京: 东南大学, 2015.
LI Xiao-yan. Environmental Impact Assessment of Concrete Pavement and Asphalt Pavement Based on LCA [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [4] 杨博. 沥青路面节能减排量化分析方法及评价体系研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.
YANG Bo. Quantitative Analysis Method of Energy Saving and Emission Reduction of Asphalt Pavement and Research of Evaluation System [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [5] 杨博, 张争奇, 张慧鲜. 沥青路面生命周期分析类型的合理选择 [J]. 中外公路, 2013 (6): 357-362.
YANG Bo, ZHANG Zheng-qi, ZHANG Hui-xian. Reasonable Selection of Life Cycle Analysis Types of Asphalt Pavement [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2013 (6): 357-362.
- [6] YU B, LU Q. Life Cycle Assessment of Pavement: Methodology and Case Study [J]. Transportation Research Part D: Transport & Environment, 2012, 17 (5): 380-388.
- [7] WILLIS J R. Effect of Recycled Materials on Pavement Life-cycle Assessment: A Case Study [C] // Transportation Research Board 94th Annual Meeting. Washington, D. C.: Transportation Research Board, 2015.
- [8] BUTT A A, BIRGISSON B. Assessment of the Attributes Based Life Cycle Assessment Framework for Road Projects [J]. Structure & Infrastructure Engineering, 2016, 12 (9): 1177-1184.
- [9] HUANG Y, BIRD R, HEIDRICH O. Development of a Life Cycle Assessment Tool for Construction and Maintenance of Asphalt Pavements [J]. Journal of Cleaner Production, 2009, 17 (2): 283-296.
- [10] 吴爽. 基于LCA的热拌与温拌沥青路面环境影响研究 [D]. 南京: 东南大学, 2015.
WU Shuang. Study on Impact of Hot and Warm Mix Asphalt Pavements on Environment Based on LCA [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [11] 翟佳. 沥青路面再生利用的技术经济效益分析研究 [D]. 西安: 长安大学, 2013.
ZHAI Jia. Analysis on Economic Benefit of Asphalt Pavement Recycling Technology [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [12] JTG D50—2017, 公路沥青路面设计规范 [S].
JTG D50—2017, Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement [S].
- [13] 高莉, 朱浩然, 蔡海泉. 沥青路面再生技术环境效益定量评价 [J]. 中外公路, 2016 (4): 23-27.
GAO Li, ZHU Hao-ran, CAI Hai-quan. Quantitative Evaluation of Regeneration Technology Environment Benefit of Asphalt Pavement [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2016 (4): 23-27.
- [14] 石小武, 朱浩然, 卢勇, 等. 沥青路面结构与材料的寿命周期决策方法 [J]. 公路, 2016 (3): 28-32.
SHI Xiao-wu, ZHU Hao-ran, LU Yong, et al. Life Cycle Decision Methodology for Asphalt Pavement Structures and Material [J]. Highway, 2016 (3): 28-32.
- [15] 李海洋. 基于LCA温拌沥青路面建设期节能减排效果及经济性评价 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
LI Hai-yang. Effect of Energy Conservation and Emission Reduction in Construction of Warm Mix Asphalt Pavement Based on LCA [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.
- [16] 朱浩然, 蔡海泉, 卢勇, 等. 基于LCA的沥青路面养护能耗测算及软件开发 [J]. 交通建设与管理, 2014 (22): 293-298.
ZHU Hao-ran, CAI Hai-quan, LU Yong, et al. Asphalt Pavement Maintenance Energy Consumption Measurement and Software Development Based on LCA [J]. Transportation Construction and Management, 2014 (22): 293-298.
- [17] 田钟维. 基于LCA-LCC的再生混凝土环境经济性能评估研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
TIAN Zhong-wei. Evaluation on Economic Performance of Regenerative Concrete Environment Based on LCA-LCC [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [18] 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]. 广州: 华南理工大学, 2011.
PAN Mei-ping. Research and Application of Calculation Method of Expressway Energy Consumption and Carbon Emission Based on LCA [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.