

高速公路沥青路面能耗与碳排放评价

彭 波¹, 蔡春丽², 胡如安³

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 郑州华路兴公路科技有限公司, 河南 郑州 450016;
3. 云南省交通科学研究院, 云南 昆明 650000)

摘 要:根据沥青路面建设实地调查,将沥青路面施工划分为集料堆料、集料干燥、沥青加热、沥青混合料拌和、运输、摊铺和压实 7 个环节;通过高速公路沥青路面施工碳源调查,得到了施工各环节能源消耗清单;基于能源消耗清单,采用热值法提出了高速公路沥青路面碳排放量计算方法;根据高速公路沥青混合料能耗与碳排放现状调查,结合碳排放量计算方法,运用最大离差法计算了高速公路沥青路面建设各环节权重系数,提出碳排放关键环节,并建立了碳排放量评价模型,对碳排放进行分级评价;根据碳排放评价现状提出了以改变能源结构、改进加热方式、加强施工管理为主的低碳技术,以降低高速公路沥青路面建设中的碳排放量。研究表明:集料干燥、沥青加热环节的权重系数分别为 0.517 和 0.320,占总权重的 0.8 以上,定义为沥青路面施工碳排放关键环节;根据所提出的碳排放评价指标 E_{GI} ,将碳排放评价划分为优、良、一般、差 4 个等级;在关键环节低碳技术研究中,沥青加热环节将煤改换成天然气能够减少碳排放 44.68%,集料干燥中将重油改换成天然气能够降低 26.89%碳排放,减排效果显著。沥青路面施工碳排放评价分级和低碳技术研究为中国高速公路建设碳排放等级评定及可持续发展提供了技术可行、经济合理的减排措施。

关键词:道路工程;高速公路沥青路面;碳排放;最大离差法;权重系数;碳排放分级

中图分类号:U416

文献标志码:A

Energy consumption and carbon emission evaluation of expressway asphalt pavement

PENG Bo¹, CAI Chun-li², HU Ru-an³

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Zhengzhou Hualuxing Highway Technology Co. Ltd., Zhengzhou 450016, Henan, China; 3. Traffic Science Research Institute of Yunnan Province, Kunming 650000, Yunnan, China)

Abstract: Based on the field survey of asphalt pavement construction, the asphalt pavement construction was divided into seven parts-aggregate, aggregate heating, asphalt heating, asphalt mixture blending, transportation, paving and compaction etc. Then a mathematical formula was developed to describe the carbon emissions of highway asphalt pavement. According to energy consumption and carbon emissions survey, weighting coefficients of various aspects were calculated by the method of maximum deviation, and then the key links were proposed. The carbon emission evaluation model was established, and the quantitative classification was applied to evaluate the present situation of carbon emission in asphalt pavement. On the basis of the

收稿日期:2016-03-24

基金项目:甘肃省交通运输厅科技计划项目(201227);陕西省自然科学基金项目(2011JM7001);陕西省交通运输厅科技计划项目(15-08K);三门峡市科技发展计划项目(2014050406)

作者简介:彭 波(1970-),男,陕西西安人,教授,工学博士,E-mail:pengb8888@126.com。

carbon emissions evaluation, the low-carbon technologies were proposed to change the energy structure, improve heating mode, and strengthen construction management. The results show that the weighting coefficients of the aggregate drying and asphalt heating, which are defined as the key links, are 0.517 and 0.320 respectively, and account for more than 0.8 of the total weight. Based on the proposed index (E_{GI}), the carbon emission evaluation is divided into excellent, good, general and poor levels. According to the key links and low-carbon technology research, the carbon emission can reduce 44.68% if the energy in asphalt heating changes from coal into natural gas, and it can reduce 26.89% if the energy in aggregate drying switches from heavy oil to natural gas. The research on carbon emission evaluation classification and low-carbon technology of asphalt pavement construction has provided the technical feasible, economical and reasonable emission reduction measures for the construction of carbon emission grade evaluation and sustainable development of Chinese expressway. 6 tabs, 5 figs, 23 refs.

Key words: road engineering; expressway asphalt pavement; carbon emission; maximum deviation method; weight coefficient; carbon emission evaluation

0 引言

1990年,联合国气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)将温室气体确定为影响人类生活与健康的污染气体之一,并在1997年签署通过了《京都议定书》,制定了全球各国温室气体减排计划。道路交通行业是能耗与碳排放的重灾区,随着交通建设的迅速发展,公路交通基础设施建设所产生的碳排放也逐渐引起人们的重视。据IPCC 1970~2004年的统计数据显示,全球温室气体有13.1%来自于道路交通行业^[1]。2009年IEA(International Energy Agency)发布报告显示,交通行业CO₂排放量约占全球碳排放量的25%^[2]。有关数据显示,美国每年需要投入3.5亿吨原材料用于道路建设与养护,平均每公里消耗能源 7.0×10^6 MJ,约为240 t标准煤燃烧所产生的能量^[3];丹麦交通行业产生的CO₂约占排放总量的1/3,其中95%源于交通基础设施建设与运营^[4];中国交通运输排放的污染物和温室气体则占到全国排放总量的8%,预计到2030年将达到11.08亿吨^[5]。低碳与环保已成为社会关注的热点问题和技术难点,也是衡量一种应用技术成熟与否的关键性指标。

道路建设所引起的温室效应也越来越多地受到国内外学者的关注。目前,常用的碳排放计算方法是参考LCA的碳排放计算方法,评价方法主要包括比较评价法和综合指标评价法。Cass等采用LCA碳排放计算方法对美国1条州际干线公路大修工程中所涉及材料的生产、运输、施工机械等数据进行了收集,对能源消耗和排放量进行了比较,并建

立了基于LCA法的综合性生命周期分析模型^[6];Stripple采用生命周期评价方法分析了瑞典水泥路面和沥青路面的能源消耗与温室气体排放状况^[7];王小兵等对建筑物整个生命周期进行了初步分析,得出构件在加工过程中能源消耗最多的结论^[8];章毅等以中国高速公路为代表,对各结构层能源消耗进行了统计分析,并对再生技术、温拌技术、脱硫石膏水泥稳定碎石这3种低碳技术进行了低碳效果检验^[9];王春玲以能源、污染气体排放、技术、节能降排4个指标,通过专家打分法对沥青路面施工节能降排进行了评价^[10];赵联芳等以能源消耗、温室效应、光化学氧化、环境酸化等为指标,对道路水泥混凝土的环境影响进行了分析^[11]。

国内外对道路建设碳排放的计算有了一定的研究基础,但对于关键环节的研究尚属空白,碳排放评价主要采用比较法和专家打分法实现道路建设的碳排放评价,评价指标不确定,当施工现场资料提供不充分时,易导致评价误差的扩大,进而影响评价结果。此外,中国尚缺乏道路建设碳排放评价分级标准,导致低碳减排技术的减排效果无法有效评价,阻碍了低碳技术的推广应用,对道路建设碳排放控制非常不利。为此,本文对碳排放关键环节及评价分级展开研究,对沥青路面建设具有重要的指导意义,对节能减排工作的开展具有一定的推动作用。

1 沥青混合料建设碳排放来源

目前,中国沥青路面建设多采用热拌沥青混合料(HMA),主要由集料、沥青、矿粉等在拌和楼拌和而成。由于沥青路面建设包括原材料的开采、加工、沥青混合料的施工等,所涉及的施工工艺复杂,

影响因素较多,因此,在高速公路沥青路面碳排放评价分级研究中,首先要界定调查范围。为了提高碳排放评价的准确性,将碳源调查界定于沥青拌和站和施工现场在内的各个施工环节,不包括矿料的开采、沥青的加工生产。通过高速公路沥青路面施工现场碳源调查,可以将沥青路面施工划分为沥青混合料的生产和沥青混合料施工 2 个阶段。其中,沥青混合料生产包括集料堆料、集料干燥、沥青加热、混合料拌和 4 个环节;沥青混合料施工包括沥青混合料的运输、摊铺、碾压 3 个施工环节。

中国现行《沥青路面施工技术规范》(JTGF40—2004)明确规定,高速公路宜采用间歇强制式拌和设备拌和。拌和之前进行二次筛分,以便更好地保证沥青混合料质量。HMA 生产工艺及碳排放如图 1 所示。

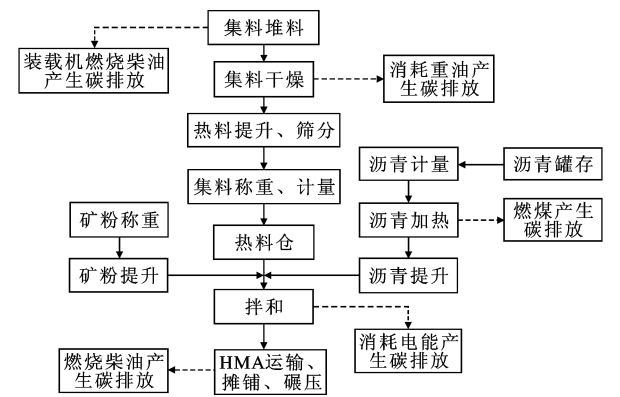


图 1 HMA 生产工艺流程
Fig. 1 HMA production process flow

HMA 生产过程中消耗大量能源,且各环节能源类型不同,在计算过程中,以生产、施工单位质量沥青混合料为横向对比指标,以有效反映各标段的碳排放水平。在能源消耗调查中,首先对拌和场地进行跟踪调查,调查时间为 15 d,调查内容为施工项目沥青混合料的生产能力、生产相应混合料所消耗的能源、集料的含水量、加热温度等,各环节调查数

据 15 组,并通过调查数据的标准差及变异系数分析,保证调查数据的可靠性,并选取调查数据的平均值作为代表值,用于所调查高速公路沥青路面碳排放计算的基础数据。在碳源调查中,选取陕西、河南、天津、甘肃等地的 7 条在建高速公路为依托,为了简化高速公路之间的比较,采用数字编码将所调查项目进行命名。所调查高速公路施工环节能源消耗清单见表 1。

2 碳排放量计算方法的建立

IPCC 2006 年的报告显示,造成大气层产生温室效应的气体主要包括 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 、 SF_6 、 HFC_s 等。而在化石燃料燃烧中,产生的温室气体主要为 CO_2 、 CH_4 、 N_2O ,其他温室气体排放量非常小^[12-13]。因此,在沥青路面碳排放计算及评价中,以 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 为研究对象开展沥青路面碳排放量的计算。

在碳排放计算模型研究中,温室气体的排放统一采用当量碳排放(CO_2e)表示,而各种温室气体的温室效应由全球变暖潜值(global warming potential, GWP)来体现,即温室气体产生温室效应的能力^[14-15]。1995 年,IPCC 首次提出了碳排放因子,用于计算不同能源所产生的碳排放^[16-19]。中国目前尚没有公路建设指定的碳排放因子,本文统一采用 IPCC 所提供的能源燃烧缺省因子作为公路建设的能源碳排放因子,见下页表 2。

根据能源燃烧特点及全球变暖潜值,结合热值法,得到沥青混合料碳排放量计算模型为

$$E_c = \sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^3 I_{\text{GWP}_j} F_{ij} m_i Q_i \tag{1}$$

式中: E_c 为碳排放量; i 为施工过程环节,依次为集料堆料、集料干燥、沥青加热、沥青混合料拌和、运输、摊铺、碾压; j 为温室气体类型,依次为 CO_2 、 CH_4 、 N_2O ; I_{GWP_j} 为第 j 种温室气体全球变暖潜值的

表 1 高速公路沥青路面能耗

Tab. 1 Energy consumption of highway asphalt pavement

类别	路段						
	高速公路 1	高速公路 2	高速公路 3	高速公路 4	高速公路 5	高速公路 6	高速公路 7
集料堆料柴油/kg	0.065	0.117	0.082	0.136	0.136	0.123	0.018
集料干燥重油/kg	6.435	6.188	6.999	6.062	6.874	6.665	6.358
沥青加热煤/kg	3.154	2.568	2.659	3.892	3.750	3.895	2.528
混合料拌和电力/(kW·h)	3.950	3.360	2.330	2.830	2.210	2.250	3.150
混合料运输柴油/kg	0.012	0.060	0.030	0.009	0.008	0.008	0.013
混合料摊铺柴油/kg	0.220	0.260	0.130	0.190	0.160	0.190	0.140
混合料压实柴油/kg	0.320	0.410	0.270	0.390	0.410	0.370	0.340

表 2 能源燃烧缺省碳排放因子
Tab. 2 Default carbon emission factors of energy combustion

燃料	CO ₂			CH ₄			N ₂ O		
	缺省排放因子	下限	上限	缺省排放因子	下限	上限	缺省排放因子	下限	上限
原油	73 300	71 000	75 500	3	1. 0	10	0. 6	0. 20	2. 0
柴油	74 100	72 600	74 800	3	1. 0	10	0. 6	0. 20	2. 0
汽油	74 100	72 600	74 800	3	1. 0	10	0. 6	0. 20	2. 0
煤油	71 900	70 800	73 700	3	1. 0	10	0. 6	0. 20	2. 0
重油	77 400	75 500	78 800	3	1. 0	10	0. 6	0. 20	2. 0
天然气	56 100	54 300	58 300	1	0. 3	3	0. 1	0. 03	0. 3
原煤	101 000	90 900	115 000	1	0. 3	3	1. 5	0. 50	5. 0
电力	82 700								

计算参数; F_{ij} 为*i*环节所用能源第*j*种温室气体的能源碳排放因子; m_i 为*i*环节能源消耗质量; Q_i 为*i*环节能源的单位发热量。

根据高速公路能源消耗清单,由式(1)计算调查的高速公路碳排放总量,如图 2 所示。

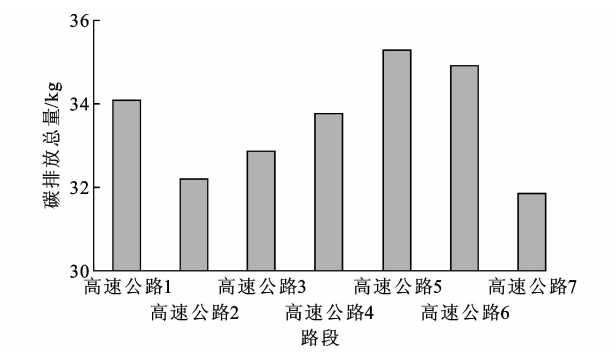


图 2 碳排放总量
Fig. 2 Carbon emissions

由图 2 可知,在单位质量沥青混合物为横向对比指标的情况下,每条高速公路碳排放总量有所不同,其中高速公路 5、高速公路 6 的碳排放量明显高于其他施工项目。在碳排放计算中发现,集料干燥环节所产生的碳排放量最大,是沥青路面建设碳排放的主要来源;沥青加热以煤为能源,是沥青路面建设碳排放的第 2 大来源。在碳源调查中发现,重油、煤的能源利用率是碳排放总量的一个主要影响因素。随着燃煤锅炉使用年限的增加,能源的利用率逐渐降低,能源消耗量逐渐增大,导致碳排放总量增加。

3 碳排放关键环节分析

沥青路面碳排放调查过程中,将施工划分了不同的环节,每个环节消耗的能源类型不同,对碳排放的影响程度不同,因此,需要对不同施工环节碳排放进行分析,以便能更好地确定碳排放来源。本文将

对沥青路面建设有较大影响的环节定义为关键环节,通过控制关键环节的碳排放实现沥青路面的低碳施工。

本文采用最大离差法计算沥青路面建设过程中的各环节权重系数^[20-21],通过施工环节碳排放的权重系数确定沥青路面建设过程的关键环节,具体步骤为:

- (1)根据环节划分及能源消耗属性,建立沥青路面施工碳排放决策矩阵 $\mathbf{A}(\mathbf{A}=(a_{ij})_{m \times n})$;
- (2)运用效益属性 $b_{ij} \left(b_{ij} = \frac{a_{ij} - a_j^{\min}}{a_j^{\max} - a_j^{\min}} \right)$,对决策矩阵 \mathbf{A} 进行量纲一处理,转换成规范化决策矩阵 $\mathbf{B}(\mathbf{B}=(b_{ij})_{m \times n})$;
- (3)对各环节的不同能源赋予不同的主、客观权重,其中主观权重 $\mathbf{U}=[u_1, u_2, \cdots, u_n]^T$,客观权重 $\mathbf{V}=[v_1, v_2, \cdots, v_n]^T$,构造最大离差方程为

$$Z_{\max} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (b_{ij} - b_{ej})^2 \omega_j = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (b_{ij} - b_{ej})^2 (\alpha u_j + \beta v_j) \tag{2}$$

其中 $\alpha^2 + \beta^2 = 1, \alpha, \beta \geq 0$

$$b_{ej} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m b_{ij} \tag{3}$$

(4)构造基于高速公路沥青路面建设的拉格朗日函数

$$L(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (b_{ij} - b_{ej})^2 (\alpha u_j + \beta v_j) + \lambda (\alpha^2 + \beta^2 - 1) \tag{4}$$

令 $\frac{\partial L}{\partial \alpha} = 0, \frac{\partial L}{\partial \beta} = 0$ 可得

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (b_{ij} - b_{ej})^2 u_j / \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (b_{ij} - b_{ej})^2 v_j}} \tag{5}$$

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (b_{ij} - b_{ej})^2 v_j / \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (b_{ij} - b_{ej})^2 u_j}}$$

(6)

计算得, $\alpha=0.722\ 3$, $\beta=0.691\ 5$ 。将计算结果代入拉格朗日函数中, 并进行归一化处理, 得到各环节碳排放权重系数, 如表 3 所示。

由表 3 和图 3 可知, 集料干燥所占比例最大, 为 0.517; 沥青加热次之, 权重为 0.320; 其他环节所占比例较小, 对碳排放量影响较小。

碳排放权重系数的计算, 确定了集料干燥和沥青加热为沥青路面建设的关键环节, 占总权重的 0.837, 是碳排放的主要来源。因此, 在节能减排措施中, 可以针对关键环节能源消耗采取相应措施, 为低碳减排技术提供研究依据。

表 3 沥青路面建设各环节碳排放权重系数

Tab. 3 Carbon emissions weight coefficients of asphalt pavement construction

建设环节	集料堆料	集料干燥	沥青加热	混合料拌和	混合料运输	混合料摊铺	混合料碾压
权重	0.029	0.517	0.320	0.054	0.025	0.019	0.036

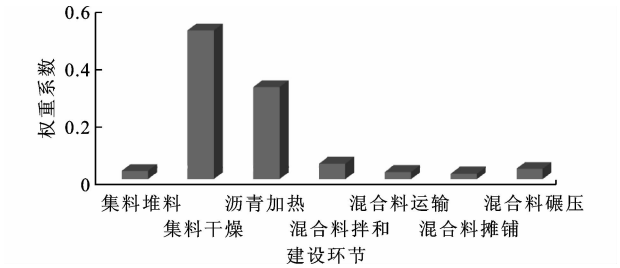


图 3 沥青路面建设各环节碳排放权重系数

Fig. 3 Carbon emissions weight coefficients of asphalt pavement construction

4 碳排放评价

碳排放评价模型可用于现有沥青路面建设碳排放状况的评价, 对现有碳排放状况进行定量描述, 为沥青路面建设由高碳排放模式向低碳排放模式的转变提供参考依据。碳排放评价指标的选取以碳排放调查和各阶段碳排放量计算为依托, 选取能够客观、真实地反映工程实际状况的指标。

在碳排放评价中可以采用标准煤消耗量和 CO₂ 当量作为碳排放评价指标。但评价指标的选取需要考虑众多影响因素, 为了降低不同影响因素对碳排放评价结果的影响, 选取加权碳排放量作为评价指标, 用以建立沥青路面建设碳排放评价模型。沥青路面建设加权碳排放量计算模型为

$$E_{c_w} = \sum_i E_{c_i} \omega_i$$

(7)

式中: E_{c_w} 为加权碳排放量; E_{c_i} 为 i 环节的碳排放量; ω_i 为 i 环节的碳排放权重系数。

根据碳排放量计算模型及加权碳排放量计算方法, 计算所调查高速公路的加权碳排放量, 如图 4 所示。

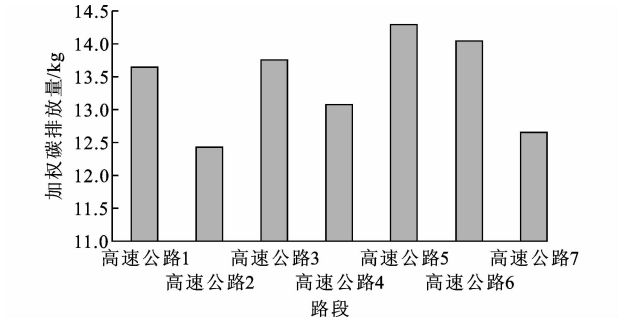


图 4 高速公路加权碳排放量

Fig. 4 Weighted values of expressway carbon emission

在所调查的高速公路加权碳排放量中, 高速公路 5 的加权碳排放量最大, 为 14.296 kg, 高速公路 2 的加权碳排放量最低, 为 12.419 kg。根据加权碳排放量, 将所调查高速公路的加权碳排放量进行分组, 并计算各组的频数、频率与累计频率。高速公路加权碳排放量频率分布见表 4。

表 4 高速公路加权碳排放频率分布

Tab. 4 Weighted carbon emissions frequency distribution of expressway

分组	组中值	频数	频率/%	累计频率/%
[12.0,12.5)	12.25	1	14.29	14.29
[12.5,13.0)	12.75	1	14.29	28.58
[13.0,13.5)	13.25	1	14.29	42.87
[13.5,14.0)	13.75	2	28.56	71.43
[14.0,14.5)	14.25	2	28.57	100.00

根据加权碳排放量组中值与累计频率的关系, 建立组中值与累计频率的线性关系, 拟合曲线方程为 $y=0.122\ 4x^2-2.814\ 3x+16.259$, 其中判定系数 $R^2=0.997\ 5>0.9$, 曲线拟合关系良好, 能够真实地反映加权碳排放量与累计频率之间的关系。加权碳排放量与累计频率关系如下页图 5 所示。

根据加权碳排放量与累计频率关系, 建立碳排放量评价模型为

$$E_{G1} = (1 - 0.122\ 4x^2 + 2.814\ 3x - 16.259) \times 100$$

(8)

将 E_{G1} 划分为 4 个阶段, 即 $E_{G1} \leq 0$ 、 $0 < E_{G1} \leq 60$ 、 $60 < E_{G1} \leq 80$ 和 $80 < E_{G1} \leq 100$ 。当 x 取 13.11 时, E_{G1} 为 60; 当 x 取 12.48 时, E_{G1} 为 80; 当 x 取 14.24 时, E_{G1} 为 0。令 $E_{G1} \leq 0$ 时, 碳排放水平为差; 当

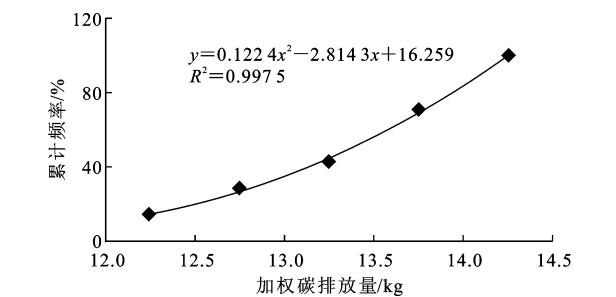


图 5 加权碳排放量与累计频率关系曲线

Fig. 5 Weighted carbon emissions and cumulative frequency curve

0<E_{GI}≤60 时,碳排放水平为一般;当 60<E_{GI}≤80 时,碳排放水平为良好;当 80<E_{GI}≤100 时,碳排放水平为优。已调查高速公路碳排放水平如表 5 所示。

表 5 碳排放水平

Tab. 5 Carbon emission level

路段	E _{GI}	碳排放水平
高速公路 1	35.09	一般
高速公路 2	81.39	优
高速公路 3	29.53	一般
高速公路 4	61.55	良好
高速公路 5	−4.16	差
高速公路 6	12.44	一般
高速公路 7	75.52	良好

在所调查的高速公路沥青路面建设碳排放中,碳排放量评价为差的为 14%,一般的占 43%,评价等级良好的为 29%,评价等级优的为 14%,碳排放水平良好及以上的为 43%,碳排放水平不容乐观,应采取较为有效的低碳减排措施来转变沥青路面建设的高污染、高排放模式。

5 低碳环保技术

在碳排放关键环节分析中,通过最大离差法确定了沥青路面建设各环节的权重系数,从而定义了关键环节,即集料干燥和沥青加热。关键环节是碳排放的主要来源,通过关键环节的节能减排技术研究,能够有效降低碳排放量,实现公路建设的低碳环保建设模式。

5.1 改变能源类型

在集料干燥环节,采用重油作为加热能源,在沥青加热环节,以煤为主要能源。煤是中国主要能源,但燃烧品质低,要达到相同的发热量,所需的质量是柴油的 2.04 倍,天然气的 1.34 倍。通过改变集料干燥、沥青加热环节的能源类型,采用清洁能源作为

加热能源,从根本上取代了高污染、高排放的能源类型,是清洁社会发展方向。以高速公路-能源消耗基础数据为代表,以生产 1 t 沥青混合料为计算量,关键环节通过改变能源类型的减排效果见表 6。

表 6 改变能源类型减排效果

Tab. 6 Carbon emission reduction effect of changing the energy type

环节		沥青加热			集料干燥
改变能源种类		煤改油	油改气	煤改气	油改气
碳排放量/kg	前	6.692	5.120	6.692	20.893
	后	5.120	3.702	3.702	15.116
能耗/kg	前	3.154	1.577	3.154	6.435
	后	1.577	1.855	1.855	7.571
减少碳排放量/%		23.49	27.69	44.68	26.890

在集料加热环节,用重油作为能源时,碳排放量为 16.238 kg;天然气为能源时,碳排放量为 13.154 kg,改变能源类型,减排幅度 17.89%;在沥青加热过程中,用煤作燃料时,碳排放量为 4.375 kg;天然气为能源时,碳排放量为 2.973 kg,降低排放 1.402 kg,改变能源类型,减排幅度 32.05%。将能源改为天然气碳排放减排效果最好,因此在节能减排中,应尽量采用天然气等清洁能源作为加热燃料。

5.2 改进加热技术

沥青加热环节是沥青路面建设的关键环节,通过控制沥青加热技术、同时推广新能源的应用,能够从根本上改变中国沥青路面建设高污染、高排放的现状。

红外线加热是替代化石燃料的一种有效途径^[22]。红外线加热不需要热传递介质,加热具有穿透力、热效率高、温度控制容易且升温迅速,并具有安全性、无二次污染等特点。红外线加热技术可以节约能源 50%~70%,与煤相比节约能源 17.87%,CO₂ 排放从 7.135 kg/t 降到约 5.86 kg/t,应用价值高。

太阳能加热是绿色加热发展新方向。太阳能加热技术利用真空管集热,最大限度地实现光热交换,将热量传递给导热油,导热油温度约达到 150 ℃~170 ℃。由于热量损失,沥青罐的温度约达到 120 ℃,并结合其他加热技术,将沥青加热到所需的温度。采用太阳能加热技术可以节约资源 70 309.4kJ/kg。据有关研究显示,采用太阳能加热技术可以节约 74.93% 的能源,CO₂ 排放量从 7.135 kg/t 降到 1.789 kg/t。通过太阳能零污染加热方式,能够有效降低化石能源的消耗量,发展前景广阔。

传统的沥青加热工艺热传递效率不足 30%,而

高温超导热管加热技术可以改善沥青加热工艺热传递效率低、环境污染大等问题,降低化石燃料的使用率,进一步推广了新能源的应用,是沥青加热工艺发展的新方向^[23]。

虽然红外线加热、高温超导热管和太阳能等加热方式在公路建设中的应用尚不成熟,但这些新技术为公路建设节能减排措施指明了一个新的发展方向,也为新能源的探索提供一定支撑。

5.3 增强拌和工艺和加强施工管理

国内外原材料、设备、工艺等存在差异,中国拌和设备主要采用间歇强制式,分批计量、分批搅拌的生产模式;国外多采用连续滚筒式拌和工艺,设备简单、能源消耗少、温室气体排放量少。根据数据对比显示:采用连续滚筒拌和工艺后,混合料拌和所需能源从 19 703.98 kJ/t 降到 12 807 kJ/t,节约资源 35%,碳排放从 1.465 kg/t 降到 0.952 kg/t,减排幅度约 35%。

施工管理在沥青混合料降低碳排放中起到了非常重要的作用。施工管理控制主要是选取合理运距,降低混合料、原材料等的运输所产生的 CO₂。加强施工工艺之间的有效衔接、合理配置施工机械、降低集料含水量等可以有效控制关键环节的碳排放量,从而有效控制整个过程的碳排放量。

6 结 语

(1)通过沥青混合料碳排放影响因素分析及碳排放源调查,将碳源划分为原材料生产、混合料生产和混合料施工 3 个阶段,根据每个阶段能源消耗形式的不同,进一步划分碳排放环节,即原材料生产包括集料堆料;混合料生产分为集料干燥、沥青加热、混合料的拌和;混合料的施工分为混合料的运输、摊铺、碾压。

(2)利用热值法建立了基于碳排放因子和全球变暖潜值的当量碳排放计算方法,用于沥青路面建设的碳排放定量计算。

(3)利用最大离差法构造了沥青路面施工碳排放最大离差方程及拉格朗日函数,得到沥青路面建设各环节的权重系数,其中,集料干燥的权重系数最大,为 0.517;沥青加热的权重系数次之,为 0.320,其他环节权重系数较小。将集料干燥、沥青加热环节界定为关键环节,是碳排放的主要来源。

(4)利用权重系数计算加权碳排放量,并建立组中值与累计频率之间的关系,从而建立沥青路面建设碳排放评价方程,对所调查高速公路进行评价。

(5)通过节能减排技术的研究,提出了以改变能源类型、改进加热技术、增强拌和工艺、加强施工管理等方面的节能减排措施,减少碳排放量,为中国沥青路面建设的绿色发展提供了技术可行的减排方案。

(6)为了提高沥青路面碳排放评价分级的准确性,在调查中应加大全国不同地域、不同施工工艺的调查,将碳排放影响因素进行全面考虑,提高调查数据的代表性。道路建设碳排放分级标准的建立是基于碳排放的评价,但经济发展与气候环境对沥青路面建设碳排放有较大影响,可以根据不同经济及气候分区的差异性,建立按不同区域划分的碳排放评价方法。

参考文献:

References:

- [1] LENZEN M. Primary energy and greenhouse gases embodied in Australian final consumption: an input-output analysis [J]. *Energy Policy*, 1998, 26 (6): 495-506.
- [2] HORVATH A, HENDRICKSON K. Comparison of environmental implications of asphalt and steel-reinforced concrete pavements [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1998(1626): 105-113.
- [3] LEE J, EDIL T B, BENSON G H, et al. Use of BE2ST in-highways for green highway construction rating in Wisconsin [C]//ASCE. *Proceedings of 2010 Green Streets and Highways Conference*. Denver: ASCE, 2010: 480-494.
- [4] SCHMIDT B, DYRE J C. CO₂ emission reduction by exploitation of rolling resistance modelling of pavements [J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2012, 48: 311-320.
- [5] HUANG Y, BIRD R, BELL M. A comparative study of the emissions by road maintenance works and the disrupted traffic using life cycle assessment and micro-simulation [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2009, 14(3): 197-204.
- [6] 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 operations [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2011, 137 (11): 1015-1025.
- [7] STRIPPLE H. Life cycle assessment of road: a pilot study for inventory analysis [R]. Ottawa: IVL Swed-

- ish Environment Research Institute, 2001.
- [8] 王小兵, 邓南圣, 孙旭军. 建筑物生命周期评价初步[J]. 环境科学与技术, 2002, 25(4): 18-20.
- WANG Xiao-bing, DENG Nan-sheng, SUN Xu-jun. A tentative approach to life cycle assessment for buildings[J]. Environmental Science and Technology, 2002, 25(4): 18-20. (in Chinese)
- [9] 章毅, 刘伟杰. 建设期沥青混凝土路面能耗与碳排放分析[J]. 公路, 2015(1): 100-107.
- ZHANG Yi, LIU Wei-jie. Analysis of energy consumption and CO₂ emission of asphalt pavement construction materials in construction period[J]. Highway, 2015(1): 100-107. (in Chinese)
- [10] 王春玲. 沥青面层节能降排评估指标体系研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- WANG Chun-ling. Research on energy conservation and emission reduction evaluation system for asphalt surface coat[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014. (in Chinese)
- [11] 赵联芳, 傅大放, 钱春香, 等. 道路水泥混凝土的环境影响评价[J]. 公路交通科技, 2004, 21(8): 138-141.
- ZHAO Lian-fang, FU Da-fang, QIAN Chun-xiang, et al. Environment impact assessment for pavement concrete[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(8): 138-141. (in Chinese)
- [12] 邓顺熙, 成平. 纵向通风隧道内空气污染物浓度及通风量的计算[J]. 中国公路学报, 2002, 15(1): 86-88.
- DENG Shun-xi, CHENG Ping. Calculation of contaminant concentrations and required air volume for roadway tunnel with longitudinal ventilation system[J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(1): 86-88. (in Chinese)
- [13] 王贺武, 刘浩学, 王生昌. 公路隧道环境对车用柴油机排放影响的研究[J]. 中国公路学报, 2003, 16(4): 98-100.
- WANG He-wu, LIU Hao-xue, WANG Sheng-chang. Research on effect of environment in highway tunnel on emission of diesel engine[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(4): 98-100. (in Chinese)
- [14] GSCHÖSSER F, WALLBAUM H, BOESCH M E. Hidden ecological potentials in the production of materials for Swiss road pavements[J]. Journal of Management in Engineering, 2012, 28(1): 13-21.
- [15] BERNSTEIN L, BOSCH P, CANZIANI O, et al. Climate change 2007: synthesis report[R]. Geneva: IPCC, 2008.
- [16] 王生昌, 李百川. 公路隧道汽车污染物基准排放量[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25(1): 77-81.
- WANG Sheng-chang, LI Bai-chuan. Criterion emission amount of automotive pollution in highway tunnel[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(1): 77-81. (in Chinese)
- [17] IPCC. Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. Geneva: IPCC, 1996.
- [18] HANSON C S, NOLAND R B, CAVALE K R. Life-cycle greenhouse gas emissions of materials used in road construction[J]. Transportation Research Record; Journal of the Transportation Research Board, 2012, 329(2287): 174-181.
- [19] EL-HAKIM M Y, TIGHE S L. Sustainability of perpetual pavement designs: Canadian perspective[J]. Transportation Research Record; Journal of the Transportation Research Board, 2012(2304): 10-16.
- [20] 郭法强, 杨昕馨, 姚鹏亮. TOPSIS模型的节水灌溉方案优选[J]. 水利与建筑工程学报, 2009, 7(3): 84-86.
- GUO Fa-qiang, YANG Xin-xin, YAO Peng-liang. Optimization for water-saving irrigation schemes based on TOPSIS model[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2009, 7(3): 84-86. (in Chinese)
- [21] 周新宇, 杨风暴, 吉琳娜. 一种新的地面目标多特征关联方法[J]. 通信技术, 2011, 44(9): 132-134.
- ZHOU Xin-yu, YANG Feng-bao, JI Lin-na. A new multi-feature association method on ground target[J]. Communications Technology, 2011, 44(9): 132-134. (in Chinese)
- [22] 甘鼎峰. 采用电阻远红外辐射加热取代高温导热油加热[J]. 电力需求侧管理, 2008, 10(5): 30-31.
- GAN Ding-feng. Resistance far-infrared radiation heating replaces the high temperature heating HTF[J]. Power Demand Side Management, 2008, 10(5): 30-31. (in Chinese)
- [23] 李学俊, 邓赞. 热超导技术在沥青加热罐中的应用探讨[J]. 建设机械技术与管理, 2010(10): 91-93.
- LI Xue-jun, DENG Yun. Apply the thermal superconducting technology to the bitumen heating tank[J]. Construction Machinery Technology & Management, 2010(10): 91-93. (in Chinese)