

文章编号:1671-8879(2018)04-0010-11

路面全寿命周期能耗与 CO₂ 排放分析研究进展

何 亮^{1,2}, 李冠男¹, 张军辉³, 黄 跃⁴, 黄海林¹

(1. 重庆交通大学 山区桥梁结构与材料教育部工程研究中心, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 欧洲研究中心, 重庆 400074; 3. 长沙理工大学 公路养护技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410114; 4. 利兹大学 交通研究所, 西约克郡 利兹 LS2 9JT)

摘 要: 为了进一步促进路面全寿命周期分析在道路工程领域的研究与发展, 为低碳节能型路面材料应用、结构设计及养护管理提供理论依据, 综合国内外最新研究成果对路面全寿命周期能源消耗与 CO₂ 排放分析方法进行了全面分析。介绍路面全寿命周期分析的基本方法, 提出功能单元应具有的基本属性, 指出中国主要道路建筑材料物化清单需要统一的现状。系统梳理路面材料物化阶段、建设施工阶段、使用阶段、养护维修阶段与结构拆除阶段中所涉及的环境影响因素, 指出路面平整度、路面反射率、水泥混凝土碳化、沥青燃烧能、交通延误、养护维修方案等在路面全寿命分析中的重要性, 并对其能耗与 CO₂ 量化计算方法进行了分析, 对再循环材料的环境影响分配方法进行了列举说明, 指出数据质量与敏感性分析的必要性。综合分析表明: 基于路面长时间使用寿命, 应重视路面使用阶段与养护阶段中随时间积累的环境影响因素; 以循环理念为基础, 多层面的对路面全寿命周期内各阶段涉及到的影响因素进行综合分析, 完善路面全寿命分析模型, 使其能够科学、合理的计算出路面全寿命周期的能源消耗与 CO₂ 排放。

关键词: 道路工程; 路面; 全寿命周期; 能源消耗; CO₂ 排放

中图分类号: U411 **文献标志码:** A

Research progress on pavement life cycle energy consumption and carbon dioxide emission assessment

HE Liang^{1,2}, LI Guan-nan¹, ZHANG Jun-hui³, HUANG Yue⁴, HUANG HAI-lin¹

(1. Engineering Research Center of Bridge Structure and Material in the Mountainous Area, Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Centre for European Studies, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. National Engineering Laboratory of Highway Maintenance Technology, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China; 4. University of Leeds, Institute for Transport Studies, Leeds LS2 9JT, West Yorkshire, UK)

Abstract: To further promote the research and development of pavement life cycle assessment in the road engineering field and provide a theoretical basis for low-carbon and energy-saving pavement materials apply, structural design and maintenance management measures, the latest research results on pavement life cycle energy consumption and carbon dioxide emission assessment methods at home and abroad were comprehensively analyzed. A basic method for

收稿日期: 2017-12-30

基金项目: 英国皇家学会牛顿高级学者基金项目(IE150750); 国家自然科学基金项目(51611130189);

山区桥梁结构与材料教育部工程研究中心开放基金项目(QLGCZX-JJ2016-4); 湖南省自然科学基金项目(2018JJ1026)

作者简介: 何 亮(1983-), 男, 重庆市人, 副教授, 博士研究生导师, E-mail: heliangfl@163.com。

pavement life cycle assessment and the attributes that a functional unit should have were introduced, and the current status of the main road construction materials in China must be unified. The environmental impact factors of the pavement materials phase, construction phase, use phase, maintenance phase, and demolition phase were systematically reviewed. The importance of pavement roughness, pavement albedo, carbonation, asphalt feedstock energy, traffic delay, and maintenance programs in the pavement life cycle assessment was summarized. Methods for calculating the energy consumption and carbon dioxide emissions were also analyzed. The environmental impact distribution method for recycled materials was explained, and the necessity for data quality and sensitivity analysis was pointed out. According to a comprehensive analysis, based on the long service life of pavement, the environmental impact factor of use and maintenance phases should be emphasized, and the circulation concept should be applied to improve the pavement life cycle assessment model, and the factors affecting the various phases of the pavement life cycle should be analyzed at multiple levels, for achieving scientific, reasonable calculations of energy consumption and carbon dioxide emissions over the pavement life cycle. 2 tabs, 7 figs, 52 refs.

Key words: road engineering; pavement; life cycle; energy consumption; carbon dioxide emission

0 引 言

路面运输作为公路系统中不可或缺的一部分,是与人类接触最为广泛的交通土建构件,在全寿命周期内消耗了大量的能源,产生了大量的温室气体。尚春静等的研究表明,一个功能单元(每 km 四车道)高速公路在其 20 年设计周期内,共消耗 2512.89 t 标煤,排放 CO₂ 2197.83 t、SO₂ 52.25 t、NO_x 14.94 t^[1]。

中国在路面领域逐步推广温拌技术^[2]、废旧材料循环再利用技术^[3]、感应热自愈合技术^[4]等具有低碳环保特征的新技术、新工艺,既节约了资源,又减少了 CO₂ 排放,取得了很好的社会效益和经济效应。但是,仅靠低碳环保型路面技术还不能支撑起低碳环保型路面建设系统。全寿命周期分析(life cycle assessment, LCA)是一种科学全面的环境评价方法,可对分析对象全寿命周期各阶段的能耗与 CO₂ 排放进行量化分析,为积极响应中国可持续发展战略及环境管理和保护提供依据,具有巨大的社会与经济价值。然而,由于路面全寿命周期内涉及的影响因素众多,再加上数据来源的困难性,使基于过程的路面全寿命分析产生较大的截断误差,量化分析的准确度与可信度不高。如何完善路面全寿命能耗与 CO₂ 排放分析,已成为国内外研究急需突破的难题。

鉴于此,本文将路面全寿命分析各阶段展开多层次的分析,指出了国内外路面全寿命分析理论框架中存在的问题,综述了路面平整度、路面反

射率、水泥混凝土碳化、沥青燃烧能、交通延误、养护维修方案等在路面全寿命分析中的重要性及发展趋势,对再循环材料的环境影响分配方法进行了列举说明,强调了数据质量与敏感性分析的重要性,以期为国内外路面 LCA 进一步完善提供参考依据。

1 路面 LCA 方法介绍

国际化标准组织(ISO)将 LCA 定义为:对一个产品系统整个寿命周期的输入、输出及潜在环境影响的汇编和评价^[5]。将其分为 4 个不断交互循环的步骤:目的和范围确定、清单分析、影响评价、结果解释,如图 1 所示。

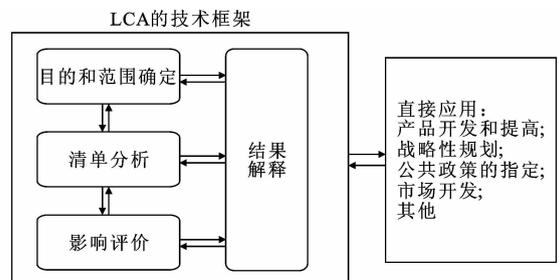


图 1 ISO 全寿命周期分析的技术框架

Fig. 1 Technical framework for ISO life cycle analysis

以典型的路面 LCA 为例,在目的和范围确定时一般将路面全寿命分为 5 个阶段:材料物化阶段、建设施工阶段、使用阶段、养护维修阶段,结构拆除阶段,如图 2 所示。图 2 中,虚线框内为本文重点综

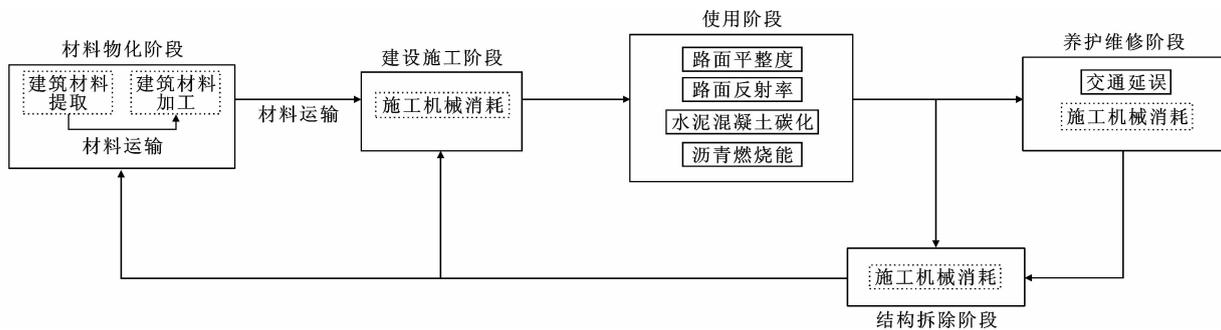


图2 路面 LCA 的系统边界

Fig. 2 System boundary in pavement LCA

述内容。确定出各阶段所有可能的影响因素,再以一个功能单元为基准进行清单分析,并对清单分析结果进行评价解释,指明其全寿命周期内能耗及 CO₂ 排放。

2 目的和范围确定中的影响因素

2.1 功能单元

功能单元需要对 LCA 研究对象进行整体概述,以充分表述路面结构的基本属性,便于对不同研究者的 LCA 分析结果进行对比。ISO 14040 中将功能单元定义为:用来作为基准单位量化的产品系统性能。

Loijos 等为得出美国各类水泥混凝土公路温室气体排放的普遍规律,采用 12 种功能单元概括了美国现有各类水泥路面,从而指出水泥路面材料物化阶段的排放在其全寿命周期内占比最大,为 43%~

56%(没有计入使用阶段的 CO₂ 排放量),其次为结构拆除阶段,为 6%~13%^[6-7]。

本文在表 1 中列举了 10 个国内外具有代表性的高速公路沥青路面与水泥路面 LCA 研究成果中对功能单元基本属性的概述。分析得出,功能单元多采用统一的“km-车道”为基准对特定路面结构的能耗与排放进行分析,但由于路面结构各参数的取值不同,各研究者的 LCA 计算结果基本无法进行相互比较。主要表现在以下 3 个方面:①由于各国路面设计规范不同,车道宽度、路肩宽度、路面厚度与设计使用年限存在一定差异;②部分研究者没有在路面全寿命期内对高速公路硬路肩进行分析,或仅对路肩宽度进行叙述;③部分研究者对路面基层进行了分析,没有对交通量及其变化情况进行准确叙述。

表 1 路面 LCA 功能单元的参数

Tab. 1 Function unit parameters in pavement LCAs

路面类型	引用文献	功能单元	车道宽度/m	路肩宽度/m	路面厚度/cm	分析寿命/年	是否对交通量进行描述
沥青路面	潘美萍(2011) ^[8]	1 km 双向 2 车道半幅路面	3.75	3.75	89,82	15	否
	杨博(2012) ^[9]	1 km 双向 4 车道路面	3.75	7.50	18.0	15	是
	徐剑等(2016) ^[10]	1 km 双向 4 车道半幅路面	3.75		78,76,39		否
	Hakkinen 等(1996) ^[11]	1 km 双向 2 车道全幅路面	3.75	1.00	24.0	50	是
	ZHANG 等(2012) ^[12]	1 km 双向 4 车道全幅路面	3.60	2.70	19.0	40	是
	Noshadravan 等(2013) ^[13]	1 条双向 6 车道全幅路面	3.60	3.60	95.3	50	是
	Santos 等(2014) ^[14-15]	5.89 km 单向 2 车道路面	3.60	3.0~3.9	30.0	50	是
水泥路面	尚春静等(2010) ^[1]	1 km 双向 4 车道全幅路面	3.75		74.0		否
	Chen 等(2015) ^[16]	1 km 单向 2 车道路面	3.60	3.90	17.8~30.8	40	是
	Loijos 等(2013) ^[6]	1 km 双向 4 车道半幅路面	3.60	3.00	36.8	40	是

功能单元应在保证整体性的同时突出所分析路面的特点。对功能单元的叙述中,应以“km-车道”为基准,对硬路肩宽度、路面基层进行叙述,其计算结果单独列举在路面 LCA 的计算结果中;对交通量及其变化情况进行准确描述,并换算成单车道日当量轴载次数以便于对平整度、交通延误等进行分

析;分析寿命应延长至设计使用年限的 1.2~1.5 倍,以充分计算使用阶段的能耗与排放^[7]。

2.2 材料物化阶段与建设施工阶段

材料物化阶段主要是针对道路建筑材料的开采、运输、提炼以及储存过程进行量化分析,一般均采用行业标准、规范所提供的数据。表 2 为笔者收

表 2 中国主要道路建筑材料物化清单

Tab. 2 Life cycle inventory of main road construction materials in China

文献来源	沥青		水泥		集料		钢材	
	E	T	E	T	E	T	E	T
潘美萍 ^[8]	4 900	285	3 227	870	30.0	2.50	24 969	7 522
杜丽 ^[19]			3 600	781		5.00		
徐剑等 ^[10]	6 000		6 700		53.0		24 969	
杨博 ^[9]	11 222	174			10.8			
李肖燕 ^[18]	4 900	285						
朱浩然等 ^[17]	2 830	189	3 430	900	31.8	2.43		

注: E 为能源消耗(MJ·t⁻¹); T 为非当量 CO₂ 排放(kg·t⁻¹)。

集的近几年中国路面 LCA 研究者采用的主要道路建筑材料物化清单。

从表 2 可以看出,在材料物化清单数据选择上同样存在较大差异。生产 1 t 沥青的能源消耗,杨博选用的是 11 222 MJ^[9],朱浩然等选用的是 2 830 MJ^[17],而且二者都是采用欧洲沥青协会发布的数据(潘美萍^[8]、李肖燕^[18]也采用该数据),但能源消耗却相差近 4 倍。杨博在计算 1 t 沥青的原油开采、运输、提炼以及储存过程时,考虑了 0.000 1 kg 铀的消耗,使生产 1 t 石油沥青的能耗多增加了 8 500 MJ,如果不考虑这部分能耗,其能耗应为 2 722 MJ,与朱浩然的数据相似。在路面 LCA 分析过程中,材料物化清单数据的准确性对计算结果影响较大,有必要对其进行详细界定。中国路面 LCA 的研究当务之急是确定一个统一的、符合中国国情的路面建设材料物化清单,明确指出生产各类建筑材料所需的能耗及 CO₂ 排放。

对于建设施工阶段,路面 LCA 的研究可以根据《工程量清单》、《公路工程预算定额》与《公路工程机械台班费用定额》等,采用定额法对路面建设施工阶段的车辆运输、施工机械等能源消耗与 CO₂ 排放进行全面分析。

2.3 使用阶段

由于路面具有长时间使用寿命这一特点,路面平整度、反射率的改变以及如何考虑水泥混凝土碳化(针对水泥路面)、沥青燃烧能(针对沥青路面)等均会对 LCA 的结果产生显著影响^[20]。

2.3.1 路面平整度

不平整的路表面会加大汽车行驶过程中轮胎的滚动阻力。根据车辆行驶速度的不同,汽车克服滚动阻力做功将会占到汽车燃油消耗量的 15%~50%。虽然,平整度改变导致滚动阻力增加,使得一辆车额外增加的油耗很少,但在交通量大的路面,汽车能耗与排放的累加也能对 LCA 的结果产生较大

影响^[21]。

Akbarian 等根据移动荷载在基于黏弹性基础上的欧拉-伯努利梁响应特性,并通过美国联邦公路局路面长期使用性能研究计划中的测试数据进行校准,建立了路车相互作用模型,开展全寿命周期内路面缺陷与车辆油耗关系的分析;研究指出,在交通量较大的情况下,路面缺陷造成的车辆燃油消耗甚至能超过路面全寿命周期内材料物化、建设施工及养护维修阶段的总和,并根据时间-温度叠加原理在路车相互作用模型中加入温度因素;指出车辆在水泥混凝土路面上的燃油消耗受周围温度和车速的影响较小,但在具有黏弹性性质的沥青路面,其影响不容忽视;同一条条件下,车辆在沥青路面周围温度为 30 °C 时的燃油消耗会比 10 °C 时多一倍,在车速为 20 km/h 时的燃油消耗比车速为 80 km/h 时多 4.6 L/100 km^[22-24]。

杨博根据文献^[25]中通过室内驾驶模拟试验得出的国际平整度指数(IRI)与车速间的关系曲线[见式(1)]与文献^[26]中基于长平高速回归的车速与油耗模型,采用参数传递法(图 3),建立了路面状况-车速-能耗与排放的量化分析模型^[9]。首先,根据实测数据或路面使用性能的标准衰变方程,建立 IRI 随路面使用时间变化的曲线;再代入式(1)计算出平均行驶速度与时间的变化关系,导入车速与油耗模型得出该行驶速度下车辆的百公里油耗,进行相应运算得出单个车辆在路面使用阶段额外油耗;最后对各类型车辆的油耗进行累加,将油耗转化为能源消耗与 CO₂ 排放,即路面使用阶段路面平整度变化导致的能耗与排放,即

$$V=116.555-22.631\ln(I_{IRI}) \quad (1)$$

式中: I_{IRI} 为 IRI 的计算参数。

李肖燕在其基础上,计算出沥青混凝土路面与连续配筋水泥混凝土路面因路面平整度变化增加的车辆行驶油耗(图 4),指出车辆行驶增加的油耗转换为能耗后均占到 2 种路面结构运营阶段的 90%

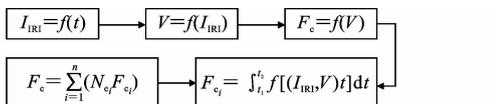


图3 参数传递示意

Fig. 3 Parameters transfer

(完全反射太阳辐射)。试验表明,反射率越高,沥青路面温度越低,旧路面反射率一般高于新铺装路面,所以新铺装路面的温度一般比旧路面高。路面温度升高以后,主要有3种方式散播热量:由路面向周围冷空气辐射,由路面与近地空气对流换热,由路表向深层传热。前2种方式都增加了路表附近的温度,加剧了城市热岛效应^[28]。

理想状态下,假如所有的城市表面采用凉爽路面和凉爽屋顶,将会使城市区域的反射率提高0.1,预计总共减少44 Gt的由于使用空调和其他制冷设备产生的CO₂排放量^[29]。Yu等在前人研究的基础上,以确定性和概率方法,开发了一个随时间变化的气候模型[见式(2)],来估算由路面反射率变化引起热岛效应所导致的CO₂排放量;并与Zhang等的研究成果进行比较,指出热拌沥青混凝土路面由反射率导致的当量CO₂排放占其全寿命周期阶段总排放的18.2%,而水泥混凝土由于放射率高于原地面结构却节省了相当于其全寿命周期总排放6.3%的当量CO₂^[30-31]。

$$C_{CO_2} = \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{0.01} \cdot \frac{-1.54 \times 220\,000 \times 1.087T}{0.217T - 44.78e^{-T/172.9} - 6.26e^{-T/18.51} - 0.22e^{-T/1.186} + 51.26} \quad (2)$$

注: C_{CO₂} 为 CO₂ 排放量; T 为分析时间跨度; α₀ 为路面初始反射率; α₁ 为路面最终反射率。

Santero等提出,LCA研究人员的目的是通过分析路面反射率的变化降低能源消耗与碳排放,所以在评价路面结构的时候,需要将反射率与当地气候联系,如在气温较低的地区采用反射率较低的路面结构,可以多吸收太阳辐射,降低制热设备的用电量,在气温较高的地区采用反射率较高的路面结构,多反射太阳辐射,降低制冷设备的用电量^[32]。

路面反射率也对路面照明产生的用电量有一定影响。1996年,Häkkinen和Mäkelä首次将路面照明的能量计入到路面LCA,在50年分析期内,相同路灯数量下,沥青玛蹄脂路面采用250 W路灯,水泥路面采用150 W路灯,计算出1 km的沥青玛蹄脂路面比普通水泥混凝土路面多需要2.6 GJ电量,相当于整个计算周期的10%~23%;同样充足照度的条件下,沥青路面比水泥路面多需要33%~50%的照明能量^[33]。但这种差异会在路面的使用过程中慢慢减小,因为沥青路面反射率会逐渐增加,而水泥路面会逐渐减小。

降低城市热岛效应的意义重大,提高路面反射

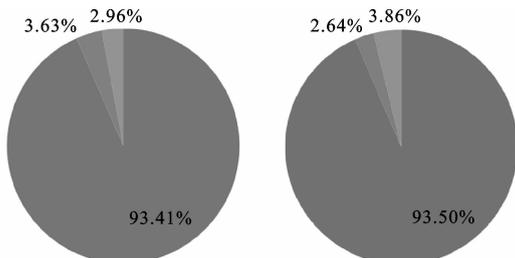


图4 路面运营阶段各部分能耗

Fig. 4 Energy consumption in pavement use and maintenance phase

以上^[18]。

上述研究表明,对路面使用阶段平整度变化导致的能源消耗和CO₂排放是不可忽略的,且理论分析可行,也可以在杨博研究的基础上^[9]结合交通量变化情况,建立如图5所示的路面平整度-车速-交通-能耗与排放的量化预估模型。在条件允许的情况下,可以根据路面所处的气候状况再加入温度因素进行全面分析^[27]。

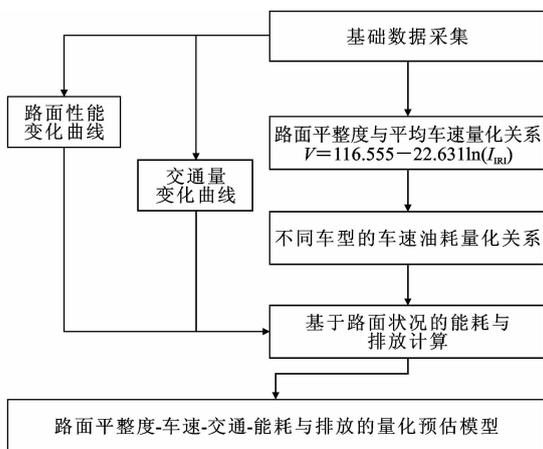


图5 路面平整度-车速-交通-能耗与排放模型参数传递流程

Fig. 5 IRI-speed-traffic-energy consumption and emission parameter delivery process

2.3.2 路面反射率

路面反射率与城市热岛效应密切相关。反射率是指物体对太阳辐射的反射通量密度与总入射通量密度的比值,反射率介于0(完全吸收太阳辐射)~1

率是一种切实可行的办法,其还可以降低对路面照明能源的需求。反射率变化导致能源消耗,以及CO₂排放受诸多因素的影响,如:电器用电效率,是否使用LED照明,天气状况(城市间不同的日照强度)等,这些都会对计算结果产生影响,而且不能仅简单考虑采用反射率较高的材料,还应对其路用性能进行研究,这些都会极大地增加其计算复杂度。建议把路面反射率作为一个参考因素,在不同类型路面能耗与CO₂排放的LCA分析结果相近的情况下,选用反射率较低的路面。

2.3.3 水泥混凝土碳化(针对水泥路面)

空气中CO₂渗透到混凝土内,与碱性物质起化学反应后生成碳酸盐和水,使混凝土碱度降低的过程称为混凝土碳化。碳化是一个随时间缓慢进行的过程,可以采用菲克第二定律对混凝土的碳化程度进行建模计算。混凝土碳化受到许多因素的影响,如周围环境的CO₂浓度,混凝土的孔隙率、水灰比、路面回收处理方式等^[34]。

水泥混凝土路面的碳化率与其最终回收处理方式有关,因为在其使用阶段,只有上面层的水泥混凝土能与空气接触发生碳化。Pade等研究发现,在水泥混凝土结构拆除阶段将其压碎并暴露在空气中2周至4个月,会使水泥混凝土碳化的总量上升20%~40%,如图6所示^[35]。理论上,生产水泥所排出的CO₂将会全部被水泥混凝土碳化吸收回来,但由于水泥混凝土最终的碳化率无法被试验确定(这一过程需要经过上百年的时间),所以预计碳化的上限为吸收的CO₂占生产排放CO₂的75%^[36-37]。

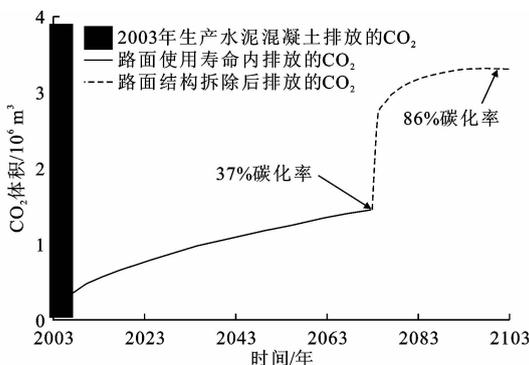


图6 丹麦水泥混凝土全寿命周期碳化率变化^[35]

Fig. 6 Carbonation percentage of concrete in Denmark during service life^[35]

随后,Rossick对9种不同的混凝土路面使用阶段和废除方案进行了分析,并估计水泥混凝土路面碳化过程吸收的CO₂可以占到由材料物化阶段产生CO₂的5%~30%^[38]。

路面在全寿命周期各阶段都会消耗能源并产生温室气体,水泥混凝土路面仅由于最后结构拆除阶段处理方式的不同就会对其吸收CO₂量产生显著影响,在全寿命分析中不应忽略掉这部分CO₂排放。但中国现阶段对水泥混凝土碳化的量化分析研究较少,建议在收集当地水泥混凝土路面碳化数据的基础上,对新建水泥混凝土路面将来使用过程中的碳化情况进行分析,对路面结构拆除方式进行预判,并对拆除阶段混凝土将会吸收的CO₂进行估算,估算的结果可以考虑从材料物化阶段中扣除。

2.3.4 沥青燃烧能(针对沥青路面)

沥青作为一种碳氢化合物,1t沥青大约蕴含着40.2MJ的燃烧能。由于沥青不是一种洁净的能源,现如今并没有把其考虑为可用能源,但也不应排出在未来能源资源极其紧缺的情况下,将其作为一种燃烧能源的可能性。假如把沥青作为一种燃料用在路面结构中,可以认为节省了其作为燃料排出的CO₂,同时也消耗了其作为燃料的能量。

Butt等指出如何考虑沥青的燃烧能,其应该是基于对沥青在路面结构中属性的认识:考虑到沥青将来可以被回收利用,所以把沥青当作一种被借用的自然资源,并在LCA的分析结果中显示,为将来可能的研究做准备;沥青混合料在路面结构的使用过程中会使沥青老化,并且考虑到其回收利用的形式只可能被用于路面结构中,在不断回收利用的过程中,沥青应该是作为一种消耗品,最终以废弃物形式被处理掉,所以沥青作为燃料的属性应该被去掉^[39]。

路面LCA研究人员对沥青的燃烧能处理方式大致有2种:一种认为沥青在将来并不会被当作燃料来提供能量,所以这部分能量应该被直接忽视了^[40];另一种是将沥青路面中沥青的燃烧能单独列举出来,以便将来使用,但并不计入到当前的LCA分析结果中^[41]。本文建议进行分析时,将对沥青燃烧能的处理方式表述出来,以便参考人员做出合理判断。

综上所述,对于路面使用阶段应从以下4个方面进行分析:①根据现阶段已有的研究成果,采用参数传递法对路面平整度变化所导致的车辆额外能耗与排放进行计算;②将路面反射率作为城市道路节能减排的一项重要决策因素;③对使用阶段的水泥混凝土碳化率进行估算,估算结果与材料物化阶段的计算结果进行整合;④对沥青燃烧能进行辩证分析。

2.4 养护维修阶段

2.4.1 交通延误

Huang 等首次采用 VISSIM 微观交通仿真模型,计算英国某公路的养护过程中造成的交通延误所产生的车辆额外排放,进行全寿命周期分析后,指出由于道路建成后快速投入使用(该道路提前 3 d 修复完成交付使用),CO 和颗粒物(PM)的节省量与修复道路产生的排放量相当,表明在修复期间减少对交通扰动的重要性^[42]。同时也有研究者提出,由于路面的长时间使用寿命这一特性,其全寿命周期内大部分的能源消耗与 CO₂ 排放是由使用车辆产生的^[43],这也与 Hakkinen 等^[11]、Inamura^[44] 的研究结果一致。

对道路进行养护维修,需要设置养护施工区,封闭部分车道会导致汽车燃料的额外消耗,增加交通拥堵和延误时间,造成的额外社会成本可能比施工作业本身还要高^[45]。目前中国主要有 3 种养护施工方式:全长半幅施工、分段半幅施工、全长分车道施工。张倩采用 VISSIM 模型对上述 3 种施工方式进行了分析,指出分段半幅施工方式造成的车辆额外油耗最低,由于晚上施工时交通量减少,使得车辆的平均延误时间减少,平均速度提高,车辆通过施工路段的运行时间也相对减少^[46]。这一结论也被 Galatioto 等采用 AIMSUN 微观仿真模型证实,该研究进一步指出,在交通量接近饱和的路段进行养护维修造成额外交通拥堵使 CO₂ 排放量呈现指数增长^[47]。

上述研究表明,在车流量较大的城市道路或者高等级公路,道路养护维修带来的交通延误对路面全寿命分析的结果同样不可忽略。如果是对将来的维修养护阶段造成的能源消耗及 CO₂ 排放进行估算,则依赖于准确的交通量预测,而且路线变化、施工工艺、交通管制等时间依赖性较强的因素也会对交通延误的评价结果产生显著的影响^[48]。

建议对所分析的路段在交通量预估的基础上,进行微观交通仿真分析,计算出道路养护过程中交通扰动造成的额外车辆延误,以此对交通延误的能耗与排放进行分析计算。

2.4.2 养护维修方案的制定

与路面建设施工阶段不同,路面养护维修方案的制定要在路面性能衰变模型建立的基础上才能得出最合适的方案,达到可持续发展的目的,主要有指数形^[49]、S 形^[50] 及多项式预测模型。

潘美萍在考虑路面养护维修时,建立了 S 形预

测模型,其考虑了 2 种情况:一种是路面行驶质量下降为差,分析结果显示,水泥混凝土路面因设计年限较长,在路面养护维修过程中消耗能源最多,在忽略混凝土碳化的基础上,其排放的 CO₂ 量也最多;另一种情况仅针对沥青混凝土路面,将只采取大修的养护维修方案与采取预防性养护方案对比分析,结果显示,采取预防性养护方案所产生的能耗与碳排放要低于仅采取大修养护维修方案^[8]。

2017 年,Santos 等采用了较全面的 LCA-LCC (全寿命周期环境评价与成本综合分析评价模型)对不同再生料掺量下的厂拌热再生、湿拌沥青、厂拌冷再生、预防性养护等,共 14 种养护维修方案进行了分析,结果显示,采用薄层罩面的预防性养护方案是最环保的方案,而含 30% 回收沥青路面材料(RAP)的热拌沥青混合料是综合效益最高的方案^[51]。

在 LCA 目的与范围确定时,需要对路面全寿命周期中的养护维修阶段采用的方案,进行预先判断。如是否采取预防性养护措施,路面大修时能够采取的方案,再选择合适的方案对其进行对比分析。

综上所述,针对路面养护维修阶段需要注意以下 2 点:第一,路面养护维修的施工过程会造成交通扰动,增加车辆在该路段的交通延误,因为交通量是随时间不断增长的,增长的交通量也会造成额外交通延误,所以,对这部分环境影响的计算要建立在交通量预测的基础上;第二,虽然路面养护维修会造成交通延误,但是也提高了路面的平整度,降低了车辆在该路段的燃油消耗,这部分环境影响从路面的长时间使用角度来看,也是不可忽略的,所以同样需要对其进行分析。在上述 2 点的基础上,首先建立路面性能衰变模型,然后进行微观交通仿真,计算交通延误,综合分析模型如图 7 所示,以保证对路面使用阶段与养护维修阶段的能耗与 CO₂ 排放进行准确计算。

2.5 结构拆除阶段

以沥青为例,沥青从石油中分馏出来作为主要路面材料时会消耗能源产生 CO₂,这部分环境影响并不能仅由所生产的路面结构完全承担,在路面结构拆除时,沥青混合料有可能会作为再生材料用于新的建筑结构中,如何在结构拆除阶段分配材料的能耗与排放也是一个需要讨论的问题。

2009 年,Nicholason 等将分配方法总结为 5 类:①Cut-off 方法,材料的环境影响由当前结构直接承担,不需要考虑其将来可能被回收利用;②Loss of quality 方法,材料在每次进行回收利用时,根据

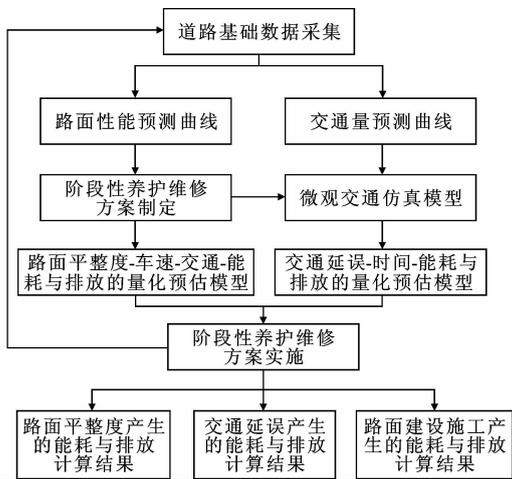


图7 路面平整度与交通延误综合量化预估计算流程

Fig. 7 Integrated quantitative forecasting calculation process of roughness and traffic delay

其性能损失的比例进行环境影响分配;③Close loop方法,根据材料循环利用的次数进行环境影响的平均分配;④50/50方法,初始材料生产与最终结构拆除造成的环境影响平均分配给初始和最终阶段,回收利用时的环境影响由生产阶段和利用阶段平均分配;⑤Substitution方法,材料生产和结构拆除的环境影响按材料回收利用的比例分配到每次的循环利用中,并减去节省掉材料的环境影响^[43]。

Huang等指出,在不保留材料固有属性的条件下,Cut-off方法也许是最适合的,但由于路面长时间的使用寿命对材料循环利用的数量和方法有一定的限制,考虑到材料的循环利用越来越受到重视的情况下,最合理的环境影响分配可以认为是Substitution方法^[42]。

笔者也倾向于Substitution方法,该方法是对材料循环利用解释较合理,当材料被循环利用时,从废弃物变成了可用物,发挥其价值的同时也节约了资源。

中国对结构拆除阶段环境影响的研究仅考虑到拆除施工机械的能源消耗与CO₂排放,并未对回收利用和废除方式进行量化分析。建议首先选择合适的路面结构拆除方法并对其进行量化分析,如在水泥混凝土结构拆除阶段将其压碎并暴露在空气中一段时间;然后,选择合适的方法对路面材料的环境影响进行量化分配。

3 数据质量与敏感性分析

数据质量的可靠度也是影响LCA结果准确性的一个重要因素,不同的国家有各自不同的数据库,

基于不同目的所采集的数据质量也会有差异,这增加了LCA结果的不确定性。Yu等针对这一问题,建立了材料的数据质量判断矩阵,收集数据得出能量强度的概率密度函数,并将沥青的能量强度设定为5.4~5.8 MJ/kg^[52]。

有效的方法可以控制一部分误差,但路面全寿命周期的评价结果是由众多因素决定的,如交通延误、路面平整度、反射率、水泥混凝土碳化、沥青燃烧能、养护维修方式以及一些尚未考虑到的因素,这些所产生的能耗与CO₂排放可能会由于当前计算方法的不完善或其他难以预测的因素(如日照强度,空气湿度,车流量的变化等),使其计算值产生波动。进行敏感性分析,并将这些波动计入到LCA结果中是有必要的,可增加LCA结果的可信度,并为将来路面LCA研究进一步发展提供数据支撑。

4 结语

(1)路面全寿命周期分析中,功能单元应在保证整体性的同时突出所分析路面的特点,以km-车道为基准对路肩宽度、路面厚度、分析寿命、交通量等属性进行解释说明。其次,中国路面材料物化清单应采用统一标准,明确指出生产各类建筑材料所需能耗及CO₂排放。

(2)对于路面使用阶段可以从以下4个方面进行分析:①根据现阶段已有的研究成果,采用参数传递法对路面平整度变化所导致的车辆额外能耗与排放进行计算;②将路面反射率作为城市道路节能减排的一项重要决策因素;③对使用阶段的水泥混凝土碳化率进行估算,估算结果与材料物化阶段的计算结果进行整合;④对沥青燃烧能进行辩证分析。

(3)本文对养护维修阶段的交通延误与养护维修方案造成的能耗与排放进行了综合分析。路面养护维修能使路面使用性能得到阶段性提高,本文在前人研究的基础上,结合微观交通仿真给出了路面平整度与交通延误综合量化预估计算流程,以便研究人员对其展开详细的分析评定,对结构拆除阶段现有的环境影响分配方法进行了解释说明,指出数据质量与敏感性分析可以增强路面LCA分析结果的可信度,并为将来路面LCA研究进一步发展提供数据支撑。

(4)路面LCA需要考虑的因素较多,需要辩证的进行分析。如道路改建扩宽,即使改建阶段会造成车辆拥堵、建材消耗等,从而产生额外的燃油消耗及CO₂排放,但考虑到改建扩宽后的道路在使用时

可能会为其他已存在拥堵的道路分流,降低其他路段拥堵带来的环境影响以及其自身交通延误,所以这一部分环境影响虽然从短期来看是不利的,但从长远来看是有利的。

(5)路面全寿命的能耗与 CO₂ 排放分析是一个时间跨度大、分析内容繁多的过程,许多影响因素都在随时间逐步积累,这其中相当一部分需要预测,但大部分研究考虑时间影响因素的 LCA 结果却未将路面产生的环境影响随时间变化表现出来,仅给出结果,增加了计算结果的不透明性,不便于准确理解问题。此外,仅从 CO₂ 排放数值来看,很难对其大小及产生的能耗与 CO₂ 排放形成直观概念。可以根据社会支付意愿,将 CO₂ 排放的环境影响转换成一定的货币值,或根据森林 CO₂ 年吸收量转换成一定量的森林面积进行表述。

(6)路面全寿命成本分析(LCCA)与路面管理系统(PMS)都是基于全寿命分析理念发展相对成熟的领域,与全寿命环境分析一脉相承。本文研究思路可以应用到 LCCA 与 PMS 之中,将 LCA 与上述 2 者结合也是今后的一个发展趋势。

参考文献:

References:

[1] 尚春静,张智慧,李小冬.高速公路生命周期能耗和大气排放研究[J].公路交通科技,2010,27(8):149-154.
SHANG Chun-jing, ZHANG Zhi-hui, LI Xiao-dong. Research on energy consumption and emission of life cycle of expressway [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (8):149-154.

[2] 刘至飞,吴少鹏,陈美祝,等.温拌沥青混合料现状及存在问题[J].武汉理工大学学报,2009,31(4):170-173.
LIU Zhi-fei, WU Shao-peng, CHEN Mei-zhu, et al. Status and problems of warm mix asphalt[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31 (4): 170-173.

[3] 耿九光.沥青老化机理及再生技术研究[D].西安:长安大学,2009.
GENG Jiu-guang. Asphalt aging mechanism and regeneration technology[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.

[4] 何亮,赵龙,凌天清,等.密实型沥青混合料裂缝感应热自愈合性能研究[J].中国公路学报,2017,30(1):17-24.

HE Liang, ZHAO Long, LING Tian-qing, et al. Research on induction heating activated self-healing of cracks in dense graded asphalt mixture [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30 (1): 17-24.

[5] GB/T 24040—2008,环境管理 生命周期评价原则与框架[S].
GB/T 24040—2008, Environmental management — Life cycle assessment — principle and frameworks [S].

[6] LOIJOS A, SANTERO N, OCHSENDORF J. Life cycle climate impacts of the US concrete pavement network [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2013, 72:76-83.

[7] HARVEY J, KENDALL A, LEE I S, et al. Pavement life cycle assessment workshop: Discussion summary and guidelines [R]. Davis: University of California Pavement Research Center, 2010.

[8] 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. The methodology research and application on energy consumption and carbon emissions of highway based on the life cycle assessment[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.

[9] 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 method and evaluation system of energy-saving and emission-reduction for asphalt pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.

[10] 徐剑,王随原,黄颂昌.公路全寿命周期能耗分析与节能策略[M].北京:人民交通出版社,2016.
XU Jian, WANG Sui-yuan, HUANG Song-chang. Life cycle energy consumption assessment and energy saving strategy of highway engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2016.

[11] HAKKINEN T, MAKELA K. Environmental impact of concrete and asphalt pavements in environmental adaptation of concrete [R]. Helsinki: Technical Research Center of Finland, 1996.

[12] ZHANG H, KEOLEIAN G A, LEPECH M D. An integrated life cycle assessment and life cycle analysis model for pavement overlay systems [C]//IALCCE. Proceedings of the 1st International Symposium on Life-cycle Civil Engineering. London: Taylor & Francis Group, 2008:907-915.

[13] NOSHADRAVAN A, WILDNAUER M, GREGORY J, et al. Comparative pavement life cycle assessment with parameter uncertainty [J]. Transportation Re-

- search Part D, 2013, 25: 131-138.
- [14] SANTOS J, BRYCE J, FLINTSCH G, et al. A life cycle assessment of in-place recycling and conventional pavement construction and maintenance practices[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2015, 11(9): 1199-1217.
- [15] DIEFENDERFER B K, APEAGYEI A K, GALLO A A, et al. In-place pavement recycling on I-81 in Virginia [J]. *Transportation Research Record*, 2012 (2306): 21-27.
- [16] CHEN F, ZHU H, YU B, et al. Environmental burdens of regular and long-term pavement designs: A life cycle view[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2016, 17(4): 300-313.
- [17] 朱浩然, 温肖博, 卢勇, 等. 路面寿命周期环境影响评价研究及软件开发[J]. *中外公路*, 2016, 36(5): 331-336.
ZHU Hao-ran, WEN Xiao-bo, LU Yong, et al. Research and software development on pavement life cycle environment impact assessment [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2016, 36(5): 331-336.
- [18] 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.
- [19] 杜丽. 基于生命周期评价方法半刚性基层施工过程中温室气体排放研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
DU Li. Based on LCA analysis the greenhouse gas emission for construction of the semi-rigid base[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [20] SANTERO N J, HORVATH A. Global warming potential of pavements[J]. *Environmental Research Letters*, 2009, 4(3): 034011.
- [21] BEUVING E, DE-JONGHE T, GOOS D, et al. Fuel efficiency of road pavements [C]//EURASPHALT. *Proceedings of Euroasphalt & Eurobitume Congress*. Berlin: Eurasphalt, 2004: 983-1075.
- [22] AKBARIAN M, MOEINI-ARDAKANI S, ULM F J, et al. Mechanistic approach to pavement-vehicle interaction and its impact on life-cycle assessment [J]. *Transportation Research Record*, 2012 (2306): 171-179.
- [23] LOUHGHALAM A, AKBARIAN M, ULM F J. Pavement infrastructures footprint: The impact of pavement properties on vehicle fuel consumption[J]. *Computational Modelling of Concrete Structures*, 2014, 2: 1051-1058.
- [24] LOUHGHALAM A, AKBARIAN M, ULM F J. Scaling relationships of dissipation-induced pavement-vehicle interactions [J]. *Transportation Research Record*, 2014 (2457): 95-104.
- [25] 张金喜, 苏蕊葳, 王锋. 路面平整度与驾驶速度关系的实验研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2011, 33(10): 59-63.
ZHANG Jin-xi, SU Rui-wei, WANG Feng. Study on the relationship between pavement roughness and the driving speed [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2011, 33(10): 59-63.
- [26] 贾洪飞, 隗志才, 张泉雄, 等. 高速公路后评价油耗指标的确定与对比[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2004, 34(2): 298-301.
JIA Hong-fei, JUAN Zhi-cai, ZHANG Xiao-xiong, et al. Determination and comparison of fuel consumption for expressway post-assessment [J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2004, 34(2): 298-301.
- [27] 张占军, 王笑风. 沥青路面使用性能的双参数修正预测模型[J]. *交通运输工程学报*, 2007, 7(5): 54-57.
ZHANG Zhan-jun, WANG Xiao-feng. Service performance prediction model of asphalt pavement with two corrected parameters [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2007, 7(5): 54-57.
- [28] POMERANTZ M, PON B, AKBARI H, et al. The effect of pavements' temperatures on air temperatures in large cities [M]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2004.
- [29] AKBARI H, MENON S, ROSENFELD A. Global cooling: Increasing world-wide urban albedos to offset CO₂ [J]. *Climatic Change*, 2009, 94(3/4): 275-286.
- [30] YU B, LU Q. Estimation of albedo effect in pavement life cycle assessment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 64(2): 306-309.
- [31] ZHANG H, LEPECH M D, KEOLEIAN G A, et al. Dynamic life-cycle modeling of pavement overlay systems: Capturing the impacts of users, construction, and roadway deterioration [J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2010, 16(4): 299-309.
- [32] SANTERO N J, MASANET E, HORVATH A. Life-cycle assessment of pavements Part II: Filling the research gaps [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2011, 55(9/10): 810-818.
- [33] AASHTO GL-6. *Roadway lighting design guide* [S].
- [34] LAGERBLAD B. *Carbon dioxide uptake during concrete life cycle-state of the art* [R]. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute CBI, 2006.
- [35] PADE C, GUIMARAES M. The CO₂ uptake of con-

- crete in a 100 year perspective[J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(9):1348-1356.
- [36] NIELSEN C V, GLAVIND M. Danish experiences with a decade of green concrete[J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2007, 5(1):3-12.
- [37] KJELLSSEN K O, GUIMARAES M, NILSSON A. The CO₂ balance of concrete in a life cycle perspective[M]. Høje-Taastrup Kommune: Danish Technological-DTI, 2005.
- [38] ROSSICK K M. The effect of carbonation after demolition on the life cycle assessment of pavements[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2014.
- [39] BUTT A A, MIRZADEH I, TOLLER S, et al. Life cycle assessment framework for asphalt pavements; Methods to calculate and allocate energy of binder and additives[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2014, 15(4):290-302.
- [40] EGGLESTON S, BUENDIA L, MIWA K. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories; Waste[M]. Kanagawa: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [41] WEILAND C, MUENCH S. Life-cycle assessment of reconstruction options for interstate highway pavement in Seattle, Washington[J]. *Transportation Research Record*, 2010(2170):18-27.
- [42] HUANG Y, SPRAY A, PARRY T. Sensitivity analysis of methodological choices in road pavement LCA[J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2013, 18(1):93-101.
- [43] NICHOLSON A L, OLIVETTI E A, GREGORY J R, et al. End-of-life LCA allocation methods: Open loop recycling impacts on robustness of material selection decisions[C]//IEEE. *IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology*. New York: IEEE, 2009:1-6.
- [44] INAMURA H. Life cycle inventory analysis of carbon dioxide for a highway construction project using input-output scheme; A case study of the Tohoku Expressway construction works case study [J]. Sendai: Tohoku University, 1999.
- [45] 朱永光. 高速公路施工区交通组织与作业段长度优化研究[D]. 西安:长安大学, 2010.
- ZHU Yong-guang. Optimization of traffic organization & work zone lengths in freeway[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [46] 张倩. 基于生命周期理论的沥青路面养护环境评价方法研究[D]. 北京:北京工业大学, 2015.
- ZHANG Qian. Study on environment assessment method of asphalt pavement maintenance[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015.
- [47] GALATIOTO F, HUANG Y, PARRY T, et al. Traffic modelling in system boundary expansion of road pavement life cycle assessment [J]. *Transportation Research Part D*, 2015, 36:65-75.
- [48] SANTERO N J, HARVEY J, HORVATH A. Environmental policy for long-life pavements[J]. *Transportation Research Part D*, 2011, 16(2):129-136.
- [49] 孙立军, 刘喜平. 路面使用性能的标准衰变方程[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 1995, 23(5):512-518.
- SUN Li-jun, LIU Xi-ping. General deterioration equation for pavement performance[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 1995, 23(5):512-518.
- [50] GEORGE K P. MDOT pavement management system; Prediction models and feedback system[R]. Jackson: Mississippi Department of Transportation, 2000.
- [51] SANTOS J, FLINTSCH G, FERREIRA A. Environmental and economic assessment of pavement construction and management practices for enhancing pavement sustainability[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 116:15-31.
- [52] YU B, LIU Q, GU X. Data quality and uncertainty assessment methodology for pavement LCA[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2018, 19(6):519-525.