

# 基于全寿命周期的环氧再生路面碳排放研究

刘士南, 王厚植, 张磊, 陈辉民, 杨军<sup>✉</sup>

东南大学交通学院, 南京 211189

沥青路面由于其优异的路用性能在我国被广泛运用于道路建设中。但在沥青路面建设及服役的全过程中,要消耗大量的筑路材料及能源,期间还要排放大量的温室气体和污染性气体,甚至导致能源浪费、碳排放超标以及环境污染。在“碳中和”与“碳达峰”的“双碳”背景下,许多交通行业的国际和国内组织都开展了对道路节能减排技术的研究。环氧沥青再生混合料不但可以有效利用废旧沥青混合料掺量远超普通再生路面的废旧沥青混合料,而且具有较普通再生沥青混合料更好的物理性能和力学性能,其使用年限较普通再生路面更长,从全寿命周期的角度来看,环氧再生路面的碳排放更少。本工作对环氧再生路面进行研究分析,基于全寿命周期碳排放分析方法对其整体建设、服役和养护维修过程进行量化分析。结果表明,掺60%、80%、100%RAP的环氧再生路面较新建路面分别减碳52.82%、54.17%、55.50%,较普通再生路面分别减碳53.79%、55.12%、56.42%。

关键词 全寿命周期评价 碳排放 环氧再生路面

中图分类号: U416.2; X734 文献标识码: A

## Study on Carbon Emission of Epoxy Recycled Pavement Based on LCA

LIU Shinan, WANG Houzhi, ZHANG Lei, CHEN Huimin, YANG Jun<sup>✉</sup>

School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China

Asphalt pavement is widely used in road construction at home due to its excellent road performance. However, in the whole process of asphalt pavement construction and service, a large amount of road construction materials and energy are consumed, and a large amount of greenhouse gases and polluting gases are also emitted during the period, which even leads to energy waste, excessive carbon emissions and environmental pollution. Under the background of ‘carbon neutrality’ and ‘peak carbon dioxide emissions’, many international and domestic organizations in the transportation industry have carried out research on road energy conservation and emission reduction technologies. Epoxy asphalt recycled mixture can not only effectively utilize waste asphalt mixture whose content is much higher than that of ordinary recycled pavement, but also has better physical and mechanical properties than ordinary recycled asphalt mixture, and its service life is longer than ordinary recycled pavement. From a life cycle perspective, epoxy recycled pavement has less carbon emission. This work studied and analyzed the epoxy recycled pavement, and quantitatively analyzed its overall construction, service and maintenance process based on the carbon emission analysis method of the whole life cycle. The results show that the epoxy recycled pavement with 60%, 80% and 100% RAP content reduces carbon by 52.82%, 54.17% and 55.50% respectively compared with the new pavement, and reduces carbon by 53.79%, 55.12% and 56.42% respectively compared with the recycled pavement.

Key words life cycle assessment (LCA), carbon emission, epoxy recycled pavement

## 0 引言

国家主席习近平2020年9月22日在第七十五届联合国大会一般性辩论上提出了应对气候变化新的国家自主贡献目标和长期愿景,中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取在2060年前实现碳中和。2021年10月24日国务院印发了2030年前碳达峰行动方案(简称《行动方案》),节能减排、产业调整等是我国实现双碳目标的有效途径。根据国际能源署的统计<sup>[1]</sup>,交通运输行业年碳排放增速排名第二,仅次于发电行业。在我国,交通运输行业能源消耗总量仅次于工业(包括电力、制造业和采矿业)<sup>[2]</sup>。据统计,我国交通运输行业的CO<sub>2</sub>排放量到2030年将达到1.108 Gt<sup>[3]</sup>,其中道路交通是交通领域的主要碳排放来源。

生命周期评价(Life cycle assessment, LCA)是一种分析数据和信息的工具,可以准确、一致且可重复地衡量各种活动或是产品的资源消耗对环境的影响<sup>[4]</sup>。LCA强调的是贯穿产品从原料获取、生产、使用、生命末期处理、循环使用和最终处置全过程(即从摇篮到坟墓)的环境因素和潜在环境

影响<sup>[5]</sup>。根据ISO 14044《环境管理 生命周期评价 要求与指南》<sup>[5]</sup>规定,一般LCA包含目的和范围确定、清单分析、影响评价和解释四个阶段。其中生命周期清单分析(Life cycle inventory, LCI)是第二个阶段,它是对输入输出数据建立清单的过程,同时也包括满足目的的数据收集过程。在某些情况下,仅对数据清单进行分析就能满足LCA目的。道路LCA中, Santero等<sup>[6-7]</sup>将道路LCA分析分为五个阶段,分别是原材料和生产(Raw materials and production)、建设(Construction)、使用(Use)、维修养护(Repair and maintenance, R&M)、生命终止(End-of-life, EOL)。如图1所示,每个阶段里面都有不同的过程,每个过程都会对环境产生影响。生命周期评价评估系统的整个生命周期,然后给出表征系统环境影响的数值结果。在道路工程中,通常会考虑五个生命周期阶段<sup>[7]</sup>,主要包括材料获取和生产阶段、施工阶段、R&M阶段、使用阶段和EOL阶段。一般而言,生命周期评价有三种主要类型:投入产出(Input-output LCA, IO-LCA)和基于过程的生命周期评价(Process-based LCA, P-LCA),以及兼具两者优点的混合生命周期评价(Hybrid LCA, H-LCA)。IO-LCA用于上游过程,P-LCA用于主要用于系统过程。LCA分析的第一步

基金项目: 国家自然科学基金(51778140; 52078130)

This work was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (51778140, 52078130).

✉ yangjun@seu.edu.cn

22040396-1

是目标和范围定义,目标包括详细说明进行研究的原因,以及说明预期的应用和受众;描述研究的范围至关重要,该过程阐明研究中考虑的主要假设、边界、要求和定义。其中,范围定义要明确的一些主要项目包括功能单元、产品系统、系统边界、影响类别以及数据质量和收集。LCA 分析的第二步是清单分析,涉及数据收集和分析。由于 P-LCA 评价结果在很大程度上取决于数据的质量,数据的搜集和分析往往非常费时。清单数据的收集应该根据预设的 LCA 应用的目标和范围进行。此外,LCI 数据库必须完全透明,应该包括分配程序的描述和个别单位过程的系统边界。第三、第四步分别是生命周期影响评价和解释。

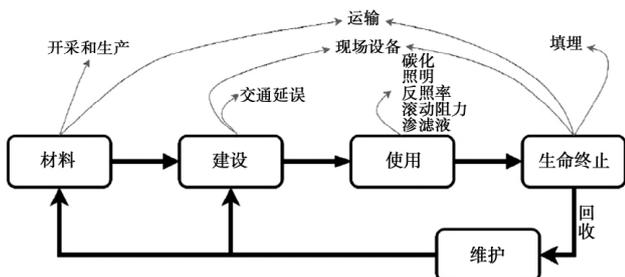


图 1 道路生命周期的阶段和组成 [7]  
Fig.1 Stages and components of the road life cycle [7]

在“低碳交通、绿色出行”指引下,公路建设运营过程中绿色循环低碳技术得以迅速推广,如橡胶沥青技术、温拌技术、再生技术等 [8-10],实现了废旧材料循环利用,达到节能减排的效果。国内外也有很多文献基于全寿命周期理论(LCA)对这些低碳技术进行碳排放评价 [11-14]。然而,现有的研究大多将路面碳排放的重点集中于建设或养护阶段,即从原材料生产到混合料运输再到路面施工这三个阶段,而 LCA 方法是对产品从生产、使用直至回收阶段全寿命周期内对环境的影响进行评估。因此,严格来说,对路面的全寿命周期碳排放评价应从建设阶段到运营阶段最后到拆除阶段全过程的碳排放评价,仅仅考虑建设阶段路面的碳排放是不严谨、不科学的,而应将路面质量和路面寿命纳入评价体系中重点考虑。以普通再生路面与新建路面为例,目前对再生路面全寿命周期碳排放的研究普遍认为,再生路面由于回收利用了再生沥青混合料(RAP),节省了部分原材料(沥青和集料),即节省了原材料生产的碳排放,其减碳效果随 RAP 掺量的增加而增加,因此普通再生路面较新建路面碳排放较少。而就目前再生路面的使用及运营情况来看,其质量和寿命远远低于新建路面,运营期间需要的养护及大修更多。同样地,对于温拌沥青混合料的研究认为较低的温度有利于减排,但温拌技术较热拌技术质量控制难度较大,路面质量不确定性较高,因此有可能需要更多的养护或维修。而由于路面质量较低引起的额外的路面养护或维修的碳排放也应计

表 1 能源碳排放因子

Table 1 Carbon emission factors for different fuels

能源类别	煤/kg	汽油/kg	柴油/kg	重油/kg	天然气/m <sup>3</sup>	电/(kW·h)
生产过程 CO <sub>2</sub> E <sub>q</sub> 排放/kg	0.031 7	0.48	0.37	0.28	0.17	0.93
使用过程热值/MJ	20.91	43.07	42.65	41.82	35.58(平均值)	3.6
使用过程 CO <sub>2</sub> E <sub>q</sub> 排放/kg	1.98	2.99	3.16	3.24	1.99	0
总 CO <sub>2</sub> E <sub>q</sub> 排放/kg	2.01	3.46	3.53	3.52	2.16	0.93

入道路全寿命周期碳排放。

环氧沥青材料是一种热固性材料,在拌和和养护过程中,环氧树脂与固化剂发生交联固化反应,可形成交联网络的空间网络体系。这种交联固化反应是一种不可逆的化学反应,这也造就了环氧树脂固化之后的热固性,赋予了环氧沥青材料强度高、刚度大、高温稳定性强、层间结合能力强、耐疲劳性能优良以及抗腐蚀性好等优异的物理、力学性能。事实上,环氧再生路面作为一项成熟的技术已有实地应用。在宁波杭州湾跨海大桥的试验路段的钻芯取样结果较好,路面粗糙度好且无明显病害 [15];湖北鄂东长江公路大桥 K2471+250-K2471+650 路段也铺筑了掺 100%RAP 料的再生沥青路面试验段。该项技术的运用,不但可以使单车道每公里养护资金节省 3.75 万元,减少道路封闭时间,同时可全面回收利用废旧铣刨料,促进绿色交通可持续发展,具有较大的社会效益。此外,环氧沥青材料独特的交联特性与目前提高废旧沥青混合料有效利用率的需求相适应。综上所述,使用环氧沥青材料制备环氧沥青再生混合料具有可行性以及一定的社会经济效益。

本工作将结合已有研究成果对环氧再生路面、普通再生路面和新建路面建设期和运营期进行基于 LCA 的能耗与排放研究,通过三者对比来证明环氧再生路面的减碳优势。具体研究内容如下:(1)结合已有文献成果对沥青路面全寿命各个阶段进行界定,将其划分为建设期和运营期两个阶段;(2)分析并整理合理且完善的碳排放清单;(3)根据建立的清单对沥青路面碳排放进行计算,并对结果进行解释和分析,给出合理的路面节能减排建议。

## 1 路面建设期碳排放计算模型

建立环氧再生沥青路面碳排放 LCA 模型以描述路面建设阶段(包括材料生产、运输、施工)碳排放的关键环节和影响因素。建立碳排放流程可为路面全寿命周期碳排放统计提供基础。

### 1.1 能源碳排放因子

基础能源能耗和排放清单参考 CLCD 中国生命周期基础数据库,煤、汽油、柴油、重油、天然气和电力等能源的能耗和排放清单包含生产过程和使用过程两部分,其中生产过程中的能耗和排放清单数据如表 1 所示,该清单已经考虑了资源从开采到出厂并运输至用户的全寿命周期数据。其中能源使用过程热值参考《中国能源年鉴 2020》,能源使用过程碳排放能源热值和排放因子计算,排放因子参考《IPCC 国家温室气体清单指南》,如表 2 所示。

### 1.2 原材料生产碳排放

路面结构涉及的主要原材料包括沥青类材料(含基质沥青、改性沥青等)、石料和其他少量改性添加剂;对于再生路

表2 能源温室气体排放因子

Table 2 Combustion carbon emission factors for different fuels

能源类别	煤 kg	汽油 kg	柴油 kg	重油 kg	天然气 m <sup>3</sup>	电 kW·h
缺省排放因子 mg/MJ	94 600	69 300	74 100	77 400	56 100	0

面,原材料还包括 RAP;对于环氧再生路面,原材料还包括环氧树脂。由于生产技术的进步和资源来源的变动等,各种原材料的单位生产能耗会发生动态变化。因此,需要详细地提供各种原材料单位生产能耗的计算方法和基础数据来源,以保证计算结果的透明性。

(1) 沥青碳排放因子

沥青上游过程包含原油开采、运输、精炼、储存等多项复

杂过程,出于商业秘密保护等因素加上过程距用户端较遥远,难以直接收集详细能源消耗资料。因此本工作通过查阅数据库和参考国内外文献确定沥青排放因子。参考国外数据库和文献时,需要注意由于不同国家的原油来源、生产工艺、技术水平等存在较大的差异,排放数据不适合直接用于本工作,因此尽量参考国内文献研究成果。需要指出的是,欧洲沥青协会(European Bitumen Association)针对道路铺装用沥青进行了较为全面的清单分析,研究的种类不仅包含了基质沥青、改性沥青和乳化沥青,此外沥青加工工艺涵盖了直馏、半氧化、丙烷脱等多种加工流程,数据来源更是涵盖了欧洲主要工业国。考虑到欧洲沥青协会的数据具有代表性,因此在本研究中具有较高的利用价值。除特殊备注外,表3数据均包含原油开采、运输、精炼、储存环节。

表3 沥青碳排放

Table 3 Carbon emission factors for asphalt

材料	数据来源/数据库	文献	IPCC 2013/(kg CO <sub>2</sub> Eq/t)	备注
基质沥青	Eurobitume 2020/ Ecoinvent 3.5	Eurobitume 2020 <sup>[16]</sup>	207.500	考虑基础设施
基质沥青	Eurobitume 2020/ Ecoinvent 3.5	Eurobitume 2020 <sup>[16]</sup>	149.600	不考虑基础设施
基质沥青	Eurobitume 2012/ Ecoinvent 2.2	Eurobitume 2012 <sup>[17]</sup> 李頔 <sup>[18]</sup>	174.240	考虑基础设施 仅计算二氧化碳排放量
基质沥青	国内工厂统计数据/ 综合能耗计算通则 2008	葡瑞玉 <sup>[19]</sup>	252.417	仅计算精炼环节碳排放
基质沥青	清洁生产标准-石油炼制业(沥青) 2008/综合能耗计算通则 2008	高放 <sup>[20]</sup>	439.806	仅计算精炼环节碳排放
基质沥青	Eurobitume 2012/ Ecoinvent 2.2/ 综合能耗计算通则 2008	沈艺奇 <sup>[21]</sup>	134.200	仅包含能源消耗影响
基质沥青	Ecoinvent 3.8 <sup>[22]</sup>	—	408.500	包括废水处理、淡水供应(来自自然)、炼油厂基础设施、炼油厂场地的原油和产品储存以及能源供应

为方便计算,排除 439.806 kg CO<sub>2</sub>Eq/t 和 408.500 kg CO<sub>2</sub>Eq/t 两个离散性较大的数据及仅计算精炼环节碳排放的 252.417 kg CO<sub>2</sub>Eq/t,其他数据取平均值得到本工作计算所用沥青碳排放因子 166.385 kg CO<sub>2</sub>Eq/t。

(2) 集料碳排放因子

路面建设中集料是用量最大的材料。集料排放因子计算需要考虑岩石爆破,爆破后的石料需要运输到破碎设备进行破碎和进一步筛分,最终成为集料产品。这个阶段不考虑爆破材料的生产。除特殊备注外,表4数据均包含原油开采、运输、精炼、储存环节。

3.44 kg CO<sub>2</sub>Eq/t,其他数据取平均值得到本工作计算所用集料碳排放因子 4.725 kg CO<sub>2</sub>Eq/t。

由于 RAP 是终端废弃物,只记入运输阶段的碳排放,生产阶段 CO<sub>2</sub> 排放量记为 0。通过工厂调研,国产环氧树脂碳排放因子为 1 910 kg CO<sub>2</sub>Eq/t。

道路建设过程中使用的道路原材料生产碳排放计算公式如下:

$$Q_{mp} = \sum_{i=1}^N Q_i \times M \times P_i$$

式中:Q<sub>mp</sub>为单位质量材料生产碳排放量,kg CO<sub>2</sub>Eq;N为所有原材料的数目;Q<sub>i</sub>为第i类原材料单位质量生产碳排放量,kg CO<sub>2</sub>Eq;M为原材料总质量,t;P<sub>i</sub>为第i类原材料在所有原材料中所占的质量分数。

表4 道路材料生产碳排放

Table 4 Carbon emission factors for aggregate

材料	数据来源/数据库	文献	IPCC 2013 kg CO <sub>2</sub> Eq/t	备注
集料	Ecoinvent 3.8 <sup>[22]</sup>	—	4.20	—
集料	Stripple <sup>[23]</sup> /欧洲 国家数据以及文献	—	1.43	—
集料	综合能耗	葡瑞玉 <sup>[19]</sup>	5.77	—
集料	文献调研/ILCD	邹晶晶 <sup>[24]</sup>	3.25	—
集料	文献数据平均值	孟祥晨 <sup>[25]</sup>	5.68	—
集料	文献调研/综合能耗	罗智星 <sup>[26]</sup>	6.02	不考虑运输环节
集料	综合能耗/设备功耗	高放 <sup>[20]</sup>	3.44	不考虑开采、 运输环节

为方便计算,排除 1.43 kg CO<sub>2</sub>Eq/t 和 6.02 kg CO<sub>2</sub>Eq/t 两个离散性较大的数据以及不考虑开采、运输环节碳排放的

1.3 沥青混合料拌合碳排放

沥青混合料拌合环节主要涉及生产混合料的厂拌设备对石料、RAP、沥青和环氧树脂材料的加热和混合料的拌合制备过程中的能源消耗。混合料拌合主要分为加热和搅拌两个过程,所需能源包括电能、燃油、天然气等,电能主要用于机械系统的运转,其他能源主要用于集料、沥青等原材料的加热烘干。一般来说,沥青混合料中集料的加热温度在 180℃左右,沥青加热温度在 150℃左右,改性沥青混合料生产温度相对提高 20~30℃左右。根据上述特点,清单分析中将沥青混合料拌合和设备的能耗分为耗电设备与加热设备两部分。

不同的加热温度和加热设备其能源效率基本保持不变,因此可以得出油耗的理论计算公式为:

$$F=K \cdot Q=K \cdot C \cdot M \cdot (t_2-t_1)$$

式中:  $Q$  为热量( J );  $C$  为物体的比热(  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$  );  $M$  为物体的质量( kg );  $t_2$  为物体加热后的温度(  $^\circ\text{C}$  );  $t_1$  为物体初始温度(  $^\circ\text{C}$  );  $F$  为加热能耗( J );  $K$  为热效率。

在进行量化分析时,外界环境温度取  $25^\circ\text{C}$ ,加热效率为 90%,热交换效率为 60%,液态沥青比热容取  $1.34 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ,水的比热容取  $4.2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ,集料比热容取  $0.92 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ,设原材料为常温  $25^\circ\text{C}$ ;以常用的普通热拌 70#沥青混合料的  $160^\circ\text{C}$  沥青加热温度作为标准温度,集料的加热温度一般高出沥青  $10 \sim 30^\circ\text{C}$ ,这里取  $20^\circ\text{C}$ ,即集料加热标准温度为  $180^\circ\text{C}$ ;计算过程中选定集料的含水量为 4%,水分蒸发所消耗的能量按  $130^\circ\text{C}$  时全部蒸发考虑;假定沥青混合料油石比为 5%。目前拌合楼加热过程原料为天然气。

根据上述假设及数据,可得出沥青混合料加热阶段的  $\text{CO}_2$  排放为  $11.06 \text{ kg/t}$ 。

本工作通过文献调研<sup>[27-28]</sup>汇总目前主流的拌合设备的能耗与排放系数,根据设备总功率换算,其电耗系数见表 5。根据电耗系数,计算出沥青混合料拌和阶段的  $\text{CO}_2$  排放为  $2.676 \text{ kg/t}$ 。

表 5 沥青混合料拌合设备的电耗系数

Table 5 Power consumption coefficient of asphalt mixture mixing equipment

型号	设备总功率/kW	生产能力/(t/h)	电耗系数/(kWh/t)
LQC240	645	240	2.687 5
LQC160	456	160	2.85
LQC800	268	80	3.35
LB2000	400	160	2.5
LB3000	720	240	3
均值			2.877 5

#### 1.4 运输碳排放

相对于新料、旧料和拌合料的运输,沥青和环氧树脂等胶结料的含量较少,其运输过程中的能源消耗相对于其他主要材料可忽略不计。因此,除旧料与新料运距不同,环氧再生路面、普通再生路面和新建路面在运输环节的碳排放基本相同。

载重货车的能耗与排放采用文献[29]的数据,分析所用的车型为黄河 JN1181,其载重  $10 \text{ t}$ ,总重  $17.5 \text{ t}$ ,平均运行速度  $23 \text{ km/h}$ ,油耗  $38.75 \text{ L}$ ,仅考虑车辆使用和燃油生产两个阶段。在来回一趟中,满载去空载回,空载能耗以满载的 70%计,根据柴油的能耗与排放清单,计算得到载重货车运输  $1 \text{ t}$  货物每公里的能耗与碳排放,本工作以重型汽油货车(载重  $10 \text{ t}$ )为运输工具,其碳排放因子为  $0.122 \text{ kg}(\text{CO}_2)/(\text{t} \cdot \text{km})$ 。则运输阶段碳排放计算公式如下:

$$Q_{tr}=Q_{th} \times [(D_1+D_2) \times 2/(1+R_1/100) \times (1-R_2/100) + D_3 \times 2/(1+R_1/100) \times (1-R_2/100) + D_4 \times 2] \quad (3)$$

式中:  $Q_{tr}$  为碾压环节单位质量混合料综合碳排放;  $Q_{th}$  为运输车辆基本碳排放量,  $\text{kgce}/(\text{t} \cdot \text{km})$ ;  $D_1$  为旧料至料场运距( km );  $D_2$  为料场至拌合站运距( km );  $D_3$  为新料至拌合站运距( km );  $D_4$  为混合料至施工现场运距( km );  $R_1$  为油石比( % ),设为 5%;  $R_2$  为旧料掺量( % )。

本工作采集了南京、镇江、扬州和徐州四个城市六个路

段共 15 项工程各类数据,为了反映工程技术本身的能耗属性,最大程度地消除因不同运距而产生的能耗差异,使不同养护技术具有可比性;同时为了使能耗碳排放具有一定的工程参考性,本工作设立了统一的运距作为计算运距。通过统计大量的工程样本,得到了平均合理运距作为计算运距,结果见表 6。

表 6 规定的计算运距

Table 6 Specified calculated transportation distance

	运距/km
旧料至料场运距	30
旧料料场至拌合厂运距	0 <sup>a</sup>
新料运至拌合厂运距	60
混合料运至施工现场运距	30 <sup>b</sup>

注:(a)因为旧料料场一般设在拌合楼附近,所以都规定为运距为 0;(b)旧料至料场(拌合楼)运距大致上和混合料至施工现场运距相等,都规定为  $30 \text{ km}$ ;(c)由于目前国家对石料开采的限制,新料多从外地运输至当地,而旧料往往从当地公路铣刨而来,新料运距远远大于旧料运距。

可通过以上数据算出不同旧料掺量下,每吨混合料运输阶段碳排放,如表 7 所示。由于旧料运距小于新料运距,随着旧料掺量的增加,运输阶段碳排放减少。因此,对于环氧再生来收,旧料掺量的增加也降低了运输阶段的碳排放。

表 7 不同旧料掺量的每吨混合料运输阶段碳排放

Table 7 Carbon emission per ton of mixed material during transportation with different RAP contents

旧料掺量/%	总运距/km	$\text{CO}_2$ 排放/( $\text{kg/t}$ 混合料)
0(新建路面)	231.43	28.23
30	180.00	21.96
40	162.86	19.87
60	128.57	15.69
80	94.29	11.50
100	60.00	7.32

#### 1.5 摊铺碾压碳排放

《公路工程预算定额》(JTG/T3832-2018)给出了拌和、运输、摊铺碾压等施工过程中各机械设备台班的定额,《公路工程机械台班费用定额》(JTG/T3833-2018)给出了各机械台班动力燃料的定额。根据以上数据,将机械台班定额乘以对应的台班动力燃料定额,便可以计算得到建设单位体积路面实体过程中拌和、运输、摊铺碾压等施工环节的能源消耗量。沥青混凝土混合料摊铺机械、碾压机械台班、柴油消耗量以及碳排放如表 8 所示。本工作中功能单位为  $1 \text{ t}$  沥青混合料,沥青混合料密度为  $2.4 \text{ t}/\text{m}^3$ ,故  $1 \text{ t}$  沥青混合料摊铺阶段碳排放为  $0.293 \text{ kg}$ 、碾压阶段碳排放为  $0.400 \text{ kg}$ 。

#### 1.6 路面建设期碳排放总计

统计环氧再生路面、普通再生路面和新建路面在建设阶段的碳排放,三种路面中各材料质量占比如表 9 所示。在环氧再生混合料中,由于环氧树脂的强固化作用,沥青胶结料的比例非常小。在环氧再生路面中,基质沥青与环氧树脂质量比为  $1:1.75$ 。

综上可得出环氧再生路面、普通再生路面和新建路面在建设阶段的碳排放清单,以生产建设单位质量( t )沥青混合料所产生的  $\text{CO}_2$  排放表示,如表 10 所示。由表 10 可得,在建设环氧再生路面时,由于环氧树脂的加入,其生产阶段碳排放高于其他两种路面。

表 8 1 000 m<sup>3</sup> 沥青混凝土混合料摊铺碾压碳排放

Table 8 Carbon emission for aggregate paving and rolling 1 000 m<sup>3</sup> asphalt mixture

设备名称		消耗台班	柴油消耗/(kg/台班)	柴油消耗量/kg	CO <sub>2</sub> 排放/kg
摊铺	12.5 m 以内沥青混合料摊铺机	1.46	136.41	199.158 6	703.03
	6~8 t 光轮压路机(初压)	2.87	19.33	55.477 1	195.83
碾压	16~20 t 轮胎压路机(复压)	0.84	50.29	42.243 6	149.12
	12~15 t 光轮压路机(终压)	4.31	40.46	174.382 6	615.57

表 9 三种路面各材料质量占比(%)

Table 9 The mass ratio (%) of each material of the three pavements

路面类型	基质沥青	集料	RAP	环氧树脂
环氧再生路面 (以 RAP 掺量 60% 为例)	1	37.25	60	1.75
新建路面	5	95	0	0
普通再生路面	3.5	66.5	30	0

表 10 三种路面建设期碳排放清单

Table 10 Three types of carbon emission inventories during road construction

路面类型	环氧再生路面			新建普通再生路面		
	RAP 掺量/%	60	80	100	0	30
原材料生产	基质沥青	1.66	1.66	1.66	8.32	5.82
	集料	1.76	0.82	0	4.49	3.14
	RAP	0	0	0	0	0
各环节 CO <sub>2</sub> 排放(kg/t)	环氧树脂	33.43	33.43	33.43	0	0
	拌合	13.74	13.74	13.74	13.74	13.74
	运输	15.69	11.50	7.32	28.23	21.96
	摊铺	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
	碾压	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
	总计	66.96	61.84	56.84	55.47	45.35

## 2 路面运营期碳排放计算模型

我国《公路沥青路面养护技术规范》<sup>[30]</sup> 中规定:公路在使用的过程中,必须要对沥青路面采取预防性、经常性以及周期性的养护,从而保证路面经常处于良好的技术状态。同时规定了沥青路面技术状况指数(PQI),对于 PQI 及其分项指标不满足规范的,应安排养护工程。根据全寿命周期路面碳排放评价理论,对于道路运营期的养护、维修等工程产生的碳排放也应计入其中。

通过建立道路养护寿命预测模型,确定路面运营期(即从建成到废弃)的养护和中大修工程次数,从而计算出路面运营期的碳排放,比较环氧再生路面、普通再生路面和新建路面全寿命周期碳排放。基于全寿命周期理论,取 30 年为路面碳排放计算周期。本节将重点讨论 30 年内三种道路的养护及大修所产生的碳排放。

### 2.1 沥青路面使用寿命评价

大部分寿命预测模型是通过室内试验测得相关指标,并将其通过力学模型与路面实际使用情况相关联从而进行寿命预测。但路面性能影响因素较多,仅仅通过室内试验预测的路面寿命缺乏普遍性。因此,本工作结合实际工程、文献调研和室内实验对环氧再生路面、普通再生路面和新建路面进行寿命预测。

需要说明的是,本工作区别于对路面寿命预测的研究类文章,论述重点集中在路面寿命对路面全寿命周期碳排放的

影响。因此,本工作对普通再生路面及新建路面寿命的确定主要来源于实际工程和文献调研;由于环氧再生路面目前仍在研发阶段,尚未有大规模的铺筑,因此,对环氧再生路面寿命的预测来源于通过实验研究、实验路段以及环氧路面和桥面铺装的表现对其性质的合理推测与假定。

#### 2.1.1 新建路面寿命

通过实地调研,采集了南京、镇江、扬州和徐州四个城市六个路段共 15 项工程的数据,根据实际工程和文献调研,目前沥青路面通常在通车 10 年后需要一次大修,所采用的大修方案多为铣刨重铺;同时文献<sup>[31]</sup>指出,铣刨重铺的预测寿命可达到 10~13 年。

不同道路的破坏程度不同,养护及大修所隔时间也不同,所采用的养护及大修方式不同。为便于计算,假定对于新建路面,在 30 年周期内,共需大修三次,方式为铣刨重铺,铣刨厚度为 8 cm;养护或小修四次,方式为加铺超薄罩面,罩面厚度为 1 cm。

#### 2.1.2 环氧再生路面寿命

环氧再生沥青混合料具有优异的路用性能。Yi 等<sup>[32]</sup>研究了使用环氧沥青回收含 100% RAP 混合物的可行性,对环氧沥青再生混合料和无 RAP 环氧沥青混合料的性能进行了评估和比较,发现环氧沥青再生混合料的抗车辙性能明显优于环氧沥青混合料,环氧沥青再生混合料的低温抗裂性和水稳定性与原始环氧沥青混合料接近。Alamri 等<sup>[33]</sup>研究了含有再生环氧沥青材料的热拌沥青(HMA)的性能,发现用环氧树脂 RAP 代替 HMA 中的高达 80% 的粗骨料不会对其马歇尔稳定性、拉伸强度和水稳定性产生负面影响。韩文生等<sup>[15]</sup>对含 100% 旧料的环氧再生沥青混合料进行测试,发现其综合性能非常好,甚至超过了新的改性沥青 SMA(Stone matrix asphalt)混合料。同时,对实际运行约一年半的环氧再生试验路段进行检测,未见任何病害,路用性能良好,证实环氧沥青再生混合料的性能优良。事实上早在 2001 年,环氧沥青就已用在长江二桥的桥面铺装上,直到现在,历经了 20 年的大交通量与极端高、低温气候环境的考验,其服役性能依旧良好。

基于室内试验数据和环氧沥青混合料与环氧再生混合料的实际使用现状,预测环氧再生路面寿命为 30 年。在 30 年内,环氧再生路面具有优异的路用性能,因此仅需要大修一次,方式为铣刨重铺,铣刨厚度为 4 cm;但需要养护或小修的次数应适当增加,环氧再生路面所需养护次数为五次,方式为加铺超薄罩面,罩面厚度为 1 cm。

#### 2.1.3 普通再生路面寿命

国外对再生沥青路面及再生沥青耐久性进行了研究,美国 NCAT(国家沥青技术中心)于 1997 年编写的《国家和地

方政府路面再生指南》指出,正确设计的再生沥青路面具有普通沥青路面(全部采用新材料)相当或在某些方面更好的路面性能。1997年澳洲 AUS-TROADS 在《沥青路面再生指南》中指出,利用 60%RAP 的沥青路面使用寿命与传统沥青路面相同,而其抗车辙能力却有所增强。日本道路协会的《厂拌再生沥青铺装技术指南》也认为,将热拌再生沥青混合料应用于条件苛刻的重交通道路(D 交通)的路面,如果对再生热拌沥青混合料进行恰当的质量控制与管理,铺装后的性能与只用新材料铺装的各种性能没有区别<sup>[34]</sup>。

上述结论是基于系统的研究和多年实践得出的,但在实际工程中,再生沥青混合料仍存在着低温性能、水稳定性较差等缺点,导致路面寿命的缩短。因此,本工作假定对于普通再生路面,在 30 年周期内,每 10 年进行一次大修,共需大修三次,方式为铣刨重铺,铣刨厚度为 8 cm;养护或小修六次,方式为加铺超薄罩面,罩面厚度为 1 cm。

## 2.2 路面运营期碳排放计算

### 2.2.1 铣刨重铺碳排放计算

对于铣刨重铺大修,其过程包括路面铣刨、原材料生产运输、混合料拌和、运输、摊铺、碾压,除路面铣刨,其他环节与新建路面基本相似。因此,本节重点计算铣刨单位质量沥青混合料所产生的碳排放,其他环节参照 1.6 节计算即可。

针对旧路面的铣刨过程,采用典型的宽度为 2 m 的铣刨机,根据调研,发动机满负荷油耗为 124 L/h,假设铣刨机效率为 80%,不同的铣刨深度铣刨速度也不同,其铣刨单位质量沥青混合料(t)的 CO<sub>2</sub> 排放如表 11 所示。柴油密度为 0.84 kg/L,柴油的热值为 42.652 MJ/kg,可计算出铣刨 1 t 沥青混合料的平均碳排放为 3.14kg。结合上文,除去铣刨环节,其他环节碳排放可参照新建路面计算,可得出铣刨重铺单位质量(t)沥青混合料所产生的碳排放,如表 12 所示。

表 11 铣刨阶段碳排放

Table 11 Carbon emissions during milling

铣刨深度/cm	铣刨速度/(m/min)	能耗/(MJ/t)	CO <sub>2</sub> 排放/(kg/t)
4	6	49.36	4.33
6	5	39.49	3.47
8	5	29.62	2.60
12	4	24.68	2.17

表 12 铣刨重铺碳排放清单

Table 12 Carbon emissions of milling and resurfacing

碳排放项目	CO <sub>2</sub> 排放/(kg/t)
原材料生产	8.32
基质沥青	4.49
集料	4.49
铣刨	3.14
拌合	13.74
运输	28.23
摊铺	0.29
碾压	0.40
总计	58.61

### 2.2.2 超薄罩面碳排放计算

对于加铺超薄罩面,其过程包括原材料生产运输、混合料拌和、摊铺、碾压,与新建路面基本相似,但对于养护工程,

体量较小,所用原材料数量与新建路面和铣刨重铺相比较少,因此运输阶段碳排放应适当减少。参照新建路面计算,可得出加铺超薄罩面时单位质量(t)沥青混合料所产生的碳排放,如表 13 所示。

表 13 超薄罩面碳排放清单

Table 13 Carbon emissions of ultra thin cover

碳排放项目	CO <sub>2</sub> 排放/(kg/t)
原材料生产	8.32
基质沥青	4.49
集料	4.49
拌合	13.86
运输	15.53
摊铺	0.29
碾压	0.40
总计	42.89

## 2.3 养护施工中交通延误碳排放计算

在公路的养护施工过程中,车辆无法按正常路况行驶,出现加减速、排队、拥堵等现象,进而出现交通延误,导致额外碳排放量的增加。因此,由于养护工程造成的道路拥堵所导致的额外的碳排放也应计入道路全寿命周期碳排放中。因此,本节将计算一次铣刨重铺和加铺罩面所导致的车辆额外碳排放,引用宋庄<sup>[35]</sup>《基于 LCA 的公路养护施工区交通延误碳排放研究》的计算模型,分别计算铣刨重铺和加铺罩面两种工况下单位面积的交通延误碳排放。

设养护施工封闭一个车道。参考《公路养护安全作业规程》(JTG H30-2015)的相关规定,实际路段控制区各长度取值均按规程中限定的最小长度设置,则养护施工区全长 3 120 m,限速 40 km/h。设交通量为 1 000 pcu/h,车辆百公里油耗为 5.3 L。根据计算模型,一天施工区总延误时间为 35 h,则延误距离为 1 400 km,总燃油消耗为 111.18 kg,碳排放量为 8 239.2 kg。对于铣刨重铺施工,假设工期为 10 天,则总碳排放量为 82 392 kg,单位面积(m<sup>2</sup>)碳排放量为 7.04 kg。对于加铺罩面施工,假设工期为一天,则总碳排放量为 8 239.2 kg,单位面积(m<sup>2</sup>)碳排放量为 0.704 kg。

## 3 分析与讨论

第 2、3 节分别计算了三种路面在生产环节和养护及大修环节的碳排放,本节将汇总以上数据,并计算 30 年全寿命周期内单位面积(m<sup>2</sup>)沥青路面的总碳排放。沥青混合料密度为 2.4 t/m<sup>3</sup>。为方便计算,假设新建路面与普通再生路面铣刨重铺时铣刨 8 cm 厚面层,环氧再生路面铣刨重铺时铣刨 4 cm 厚面层,加铺超薄罩面时沥青混合料厚度为 1 cm。建设期和运营期三种路面碳排放如表 14 所示。需要说明的是,表 14 计算的是单位面积不同阶段的碳排放,具体工程的总碳排放需要确定建设段、铣刨重铺段和加铺罩面段的具体面积后进行比较。

通过表 14 可以看出,环氧再生路面据有优异的减碳效果,60%、80%、100%RAP 掺量的环氧再生路面较新建路面分别减碳 52.82%、54.17%、55.50%,较普通再生路面分别减碳 53.79%、55.12%、56.42%。三种路面各阶段的碳排放如图 2 所示。

值得注意的是,30 年全寿命周期内普通再生路面的碳排

表 14 三种路面各阶段的碳排放 (kg/m<sup>2</sup>)

Table 14 Carbon emissions (kg/m<sup>2</sup>) of three types of road at all stages

RAP 掺量 / %	环氧再生路面			新建路面	普通再生路面
	60	80	100	0	30
建设期	12.92	11.93	10.98	10.71	8.77
铣刨重铺施工	5.63(1次)	5.63(1次)	5.63(1次)	33.76(3次)	33.76(3次)
铣刨重铺延误	7.04(1次)	7.04(1次)	7.04(1次)	21.12(3次)	21.12(3次)
加铺罩面施工	5.15(5次)	5.15(5次)	5.15(5次)	4.12(4次)	6.18(6次)
加铺罩面延误	3.52(5次)	3.52(5次)	3.52(5次)	2.82(4次)	4.22(6次)
总计	34.19	33.20	32.25	72.46	73.99

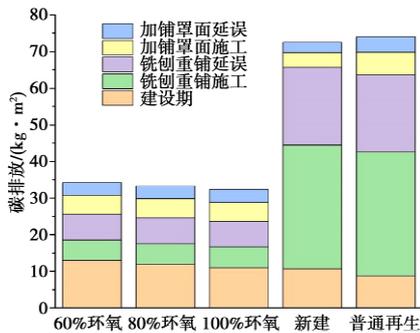


图 2 三种路面总碳排放 (电子版为彩图)

Fig.2 Total carbon emissions of three types of road

放略高于新建路面,这来源于本工作基于文献调研和实地工程所得出来的假设:普通再生路面需要更多的养护次数。由第 2 节可以看出,对于单位质量的沥青混合料,养护和大修工程也产生较多的碳排放,若出现再生路面路用性能较差致使需要更多的养护次数,可能会导致更多的碳排放。

如图 2 所示,环氧再生路面优异的减碳效果主要来源于两方面:优秀的路用性能和较高的 RAP 再利用率。优秀的路用性能主要使环氧再生路面降低了养护和大修工程的碳排放。这事实上是长寿命路面的一个共同特点:基于全寿命周期的研究方法,环氧再生路面有着优异的减碳效果,且所选取的周期越长,减碳效果越好。这也是当下道路工作者积极研究新技术的原因,虽然新技术在短期可能有较大的碳排放(环氧树脂、温拌剂等),但从长期来看,新技术的恰当使用有助于促成“低碳路面”这一目标的达成。而对于提高 RAP 再利用率来说,对大比例 RAP 的研究有助于降低集料的开采和运输阶段的碳排放和沥青生产阶段的碳排放。以江苏省为例,由于政府限制对石料的开采,很多本地路面建设的集料都是从东北运输而来的,产生了大量的碳排放。

#### 4 结论

(1) 本工作基于全寿命周期理论对比了环氧再生路面、普通再生路面和新建路面 30 年周期内的碳排放,结果表明环氧再生路面具有优异的减碳效果,60%、80%、100%RAP 掺量的环氧再生路面较新建路面分别减碳 52.82%、54.17%、55.50%,较普通再生路面分别减碳 53.79%、55.12%、56.42%。

(2) 基于全寿命周期理论,运营阶段的养护和大修工程的碳排放也为道路碳排放的一部分,且对于单位质量的沥青混合料,养护和大修工程也会产生较多的碳排放。因此,在道路建设期就应注重质量把控,减少后续的养护和维修次数,从而减少全寿命周期碳排放。

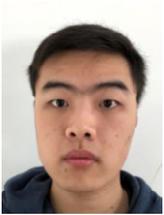
(3) 环氧树脂的生产中虽然有较高的碳排放,但其对道路质量的提高效果十分显著,大大减少了路面全寿命周期的碳排放。环氧沥青路面作为长寿命路面的代表,展示了长寿命路面的减碳效果。因此,对长寿命路面和道路减碳技术的研究与应用是十分重要的。

(4) 本工作构建的全寿命周期路面碳排放模型虽然基于大量的假设,但这些假设均来源于文献调研和实地工程。且本工作旨在提供碳排放研究思路及计算模型,并不限于某项技术或工程,在研究其他类型路面全寿命周期碳排放时,可改变本工作中的某些假设,得到相应的结论。因此,本研究内容具有普遍性。同时,本工作中有些假设与计算有些粗糙或理想化,下一阶段应进一步细化各环节,拓宽研究类型与范围。

#### 参考文献

- IEA (2017), *World Energy Outlook*, 2017.
- 中国统计局. *中国能源统计年鉴*, 中国统计出版社, 2011.
- 徐建闽. *城市观察*, 2010 (4), 13.
- Curran M A. *Life cycle assessment handbook: a guide for environmentally sustainable products*, John Wiley & Sons, 2012.
- International Organization for Standardization. ISO 14042, 2006.
- Santero N J, Nicholas J M, Eric H, et al. *Resources, Conservation and Recycling*, 2011, 55(9-10), 801.
- Santero N J. *Pavements and the environment: a life-cycle assessment approach*, University of California, Berkeley, 2009.
- 杨博. 沥青路面节能减排量化分析方法及评价体系研究. 博士学位论文. 长安大学, 2012.
- Chowdhury R, Apul D, Fry T. *Resources Conservation and Recycling*, 2010, 54(4), 250.
- Farina A, Zanetti M C, Santagata E, et al. *Resources Conservation and Recycling*, 2017, 117, 204.
- Aurangzeb Q, Al-Qadi I L, Ozer H, et al. *Resources Conservation and Recycling*, 2014, 83, 77.
- 李文瑛, 彭波, 吕文全. *交通节能与环保*, 2014, 10(3), 68.
- 李旭阳, 索智, 罗亮. *材料导报*, 2020, 34(Z1), 209.
- 张红波, 陈海涛, 徐升, 等. *公路工程*, 2021, 46(3), 154.
- 韩文生, 李寒, 宋冰泉, 等. *公路*, 2020, 65(8), 343.
- European Bitumen Association. *The eurobitume life-cycle inventory for bitumen*, Brussels, Belgium, 2020.
- European Bitumen Association. *The eurobitume life-cycle inventory for bitumen*, Brussels, Belgium, 2012.
- 李颀. 基于 LCA 的城市道路养护工程施工活动及交通影响碳排放研究. 硕士学位论文, 长安大学, 2019.
- 蔺瑞玉. 沥青路面建设过程温室气体排放评价体系研究. 硕士学位论文, 长安大学, 2014.
- 高放. 基于 LCA 的沥青路面建设期能耗和排放量化分析研究. 硕士学位论文, 重庆交通大学, 2016.
- 沈艺奇. 高速公路维修改造工程能耗及排放评价模型及方法. 硕士学位论文, 合肥工业大学, 2017.
- Ecoinvent 3.8. Zurich, Switzerland 2021.

- 23 Stripple, Håkan. Life cycle assessment of road. A pilot study for inventory analysis, 2001.
- 24 邹晶晶. 沥青混合料生产环境负荷数据库及绿色发展评价体系研究. 硕士学位论文, 哈尔滨工业大学, 2020.
- 25 孟祥晨. 沥青路面建设期能耗及碳排放量化研究. 硕士学位论文, 北京交通大学, 2020.
- 26 罗智星. 建筑生命周期二氧化碳排放计算方法与减排策略研究. 硕士学位论文, 西安建筑科技大学, 2016.
- 27 曾涓. 基于 LCA-LCC 的沥青路面结构优化设计. 硕士学位论文, 重庆交通大学.
- 28 高放. 基于 LCA 的沥青路面建设期能耗和排放量化分析研究. 硕士学位论文, 重庆交通大学.
- 29 马丽萍, 王志宏, 龚先政, 等. 2006 年材料科学与工程新进展——“2006 北京国际材料周”论文集, 2006, pp.17.
- 30 中华人民共和国交通部. 公路沥青路面养护技术规范 JTJ 073.2-2001, 人民交通出版社, 2001.
- 31 潘园园. 高速公路沥青路面养护技术的评价研究. 硕士学位论文, 东南大学, 2018.
- 32 Yi X, Chen H, Wang H, et al. *Construction and Building Materials*, 2022, 319, 126122.
- 33 Alamri m, Lu Q, Xin C F. *Sustainability*, 2020, 12( 9) , 3531.
- 34 黄建跃, 刘先森. *公路*, 2003( 8) , 102-7.
- 35 宋庄庄. 基于 LCA 的公路养护施工区交通延误碳排放研究. 硕士学位论文, 重庆交通大学, 2020.



刘士南, 2021 年在东南大学获得学士学位, 同年进入东南大学攻读硕士学位, 在杨军教授的指导下进行研究。目前主要研究领域为道路新材料、低碳道路。



杨军, 东南大学交通学院教授、博士研究生导师。1990 年河北工业大学土木工程系本科毕业, 1996 年东南大学交通学院道路与铁道工程系博士毕业后在东南大学大学工作至今。目前主要从事沥青及混合料等方面的研究工作。发表文章 144 篇, 出版专著 2 部。