

材料导报

Materials Reports

ISSN 1005-023X, CN 50-1078/TB

## 《材料导报》网络首发论文

题目： 基于 LCA 的不同设计寿命沥青路面能耗排放分析  
作者： 张磊，王鹏，杨永志，邢超，谭忆秋  
网络首发日期： 2023-11-23  
引用格式： 张磊，王鹏，杨永志，邢超，谭忆秋. 基于 LCA 的不同设计寿命沥青路面能耗排放分析[J/OL]. 材料导报.  
<https://link.cnki.net/urlid/50.1078.TB.20231122.1709.002>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

## 基于 LCA 的不同设计寿命沥青路面能耗排放分析

张磊<sup>1</sup>, 王鹏<sup>1</sup>, 杨永志<sup>1</sup>, 邢超<sup>1</sup>, 谭忆秋<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090

为研究不同设计寿命沥青路面的能耗排放特征, 建立生命周期评价体系, 量化分析柔性基层沥青路面、典型半刚性基层沥青路面、高掺量胶粉沥青路面的能耗排放。通过灵敏度分析确定主要能耗排放环节, 并分析水泥类型、温拌技术、再生技术及运输效率对三种沥青路面能耗排放的影响规律。研究表明, 典型半刚性基层沥青路面的能耗强度分别比柔性基层沥青路面及高掺量胶粉沥青路面能耗强度高 25.29%、153.03%, 全球变暖潜值总量比两种长寿命沥青路面分别高 106.97%、107.99%; 水泥生产、沥青生产、加热及运输环节为主要能耗排放环节; 适用于水稳基层的通用水泥中, 矿渣硅酸盐水泥能耗排放最低, 替换掉普通硅酸盐水泥后典型半刚性基层沥青路面及高掺量胶粉沥青路面碳排放量分别下降了 13.17%、12.43%; 采用温拌技术后, 柔性基层沥青路面碳排放量下降幅度最大, 降低了 2.41%, 高掺量胶粉沥青路面能耗强度下降最大, 降低了 3.71%; 当 RAP 掺量达到 30% 时, 三类沥青路面能耗强度分别下降 20.64%、18.56%、15.26%, 碳排放量分别下降 6.92%、3.92%、4.39%; 运输效率提升幅度与沥青路面的能耗排放减少率呈正相关, 运输效率每提升 10%, 三类沥青路面能耗强度分别下降 1.55%、1.63%、2.10%, 碳排放量分别下降 4.03%、3.26%、3.07%。

**关键词** 道路工程 沥青路面 生命周期评价 能耗 碳排放 设计寿命

**通信作者:** 张磊, hit.andy@foxmail.com

**中图分类号:** U41 **文献标识码:** A

**引用格式:** 张磊, 王鹏, 杨永志, 邢超, 谭忆秋, 基于 LCA 的不同设计寿命沥青路面能耗排放分析[J]. 材料导报, 2024, 38(20): 23080071

## Energy Consumption and Emission Analysis of Asphalt Pavement with Different Design Working Years Based on LCA

ZHANG Lei<sup>1</sup>, WANG Peng<sup>1</sup>, YANG YongZhi<sup>1</sup>, XING Chao<sup>1</sup>, TAN YiQiu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Transport Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China

In order to study the energy consumption and carbon emission characteristics of asphalt pavement with different design life, the life cycle evaluation system was established. The energy consumption and carbon emission of flexible base asphalt pavement, typical semi rigid base asphalt concrete pavement and high content rubber modified asphalt pavement were quantitatively analyzed. By analyzing the sensitivity, this paper identified the main links of energy consumption and carbon emission, by analyzing the sensitivity. And the influence of cement type, warm mixing technology, recycling technology and transport efficiency on the energy consumption and carbon emission

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究任务(2021QZKK0205); 黑龙江省自然科学基金项目(YQ2021E032); 国家自然科学基金项目(52278447; U20A20315)

This work was financially supported by the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (STEP) (Grant No. 2021QZKK0205), the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (YQ2021E032), the National Natural Science Foundation of China(52278447; U20A20315).

of three kinds of asphalt pavement were analyzed. According to the research results, the energy consumption intensity of typical semi rigid base asphalt concrete pavement is 25.29% and 153.03% higher than that of flexible base asphalt pavement and high content rubber modified asphalt pavement, the global warming potential value is 106.97% and 107.99% higher than that of the two long-life asphalt pavement, respectively. Cement production, asphalt production, heating and transportation are the main energy consumption and emission links. Among the general-purpose cements used in cement stabilized gravel bases, Portland blast-furnace slag cement (PS) has the lowest energy consumption and carbon emissions. After replacing ordinary Portland cement (PO) by PS, the carbon emissions of typical semi rigid base asphalt concrete pavement and high content rubber modified asphalt pavement dropped by 13.17% and 12.43%. After using the warm mixing technology, the carbon emission of flexible base asphalt pavement decreased the most, by 2.41% and the energy consumption intensity of high content rubber modified asphalt pavement decreased the most, by 3.71%. The reduction rate of energy consumption and carbon emission of typical semi-rigid asphalt pavement after using the warm mixing technology is relatively small. When the RAP content is 30%, three types of asphalt pavement decreases by 20.64%, 18.56% and 15.26% respectively, and the carbon emission decreases by 6.92%、3.92% and 4.39% respectively. There is a positive correlation between the improvement rate of transport efficiency and the reduction rate of energy consumption and carbon emission of asphalt pavement. When the transportation efficiency is increased by 10%, three types of asphalt pavement will decrease by 1.55%, 1.63%, 2.10% respectively, and the carbon emissions will decrease by 4.03%, 3.26%, 3.07% respectively.

**Keywords:** pavement engineering, asphalt pavement, life cycle assessment, energy consumption, carbon emission, design working years

## 0 引言

沥青路面作为我国主要的高等级路面, 具有工程量大、能耗排放高的工程特点。在“碳中和”“碳达峰”的政策背景下, 探索环境友好型路面, 降低沥青路面工程能耗排放的任务尤为紧迫。不同设计寿命下, 沥青路面的工程投资量差异较大, 造成的环境影响亦有所不同, 因此有必要研究长寿命路面和普通路面的环境效益, 为绿色公路发展提供指导。

长寿命沥青路面服役期间不会产生结构性损伤, 仅需针对表面层损坏进行周期性修复<sup>[1]</sup>, 是一种设计年限较长且承载较力高的路面。对于其设计寿命, 国内外尚无统一标准, 各国对长寿命路面使用年限的期望值从 30 年到 50 年不等<sup>[2]</sup>。相比于我国的普通半刚性基层沥青路面, 其初期建设投入较高。目前主流的长寿命沥青路面以西方国家的柔性基层沥青路面为主, 因其沥青层厚度较大, 服役寿命大多超过 35 年而无结构性损坏<sup>[3]</sup>, 研究显示相比于我国的普通半刚性基层沥青路面, 其寿命周期经济效益更加显著<sup>[4]</sup>。除采用厚沥青层结构外, 通过调整材料强度及结构组合, 半刚性基层沥青路面同样可以满足长寿命设计标准<sup>[5]</sup>。

生命周期评价 (Life Cycle Assessment, LCA) 是一种全面量化产品生命周期内环境影响的方法, 与寿命周期成本理念类似但统计周期更加全面。LCA 理念萌芽于上世纪 60 年代, 最初的道路工程 LCA 研究多聚焦于水泥路面和沥青路面之间的环境影响差异, 研究结果表明, 沥青路面在碳排放方面更加具有优势<sup>[6, 7]</sup>, 而在能耗水平方面, 则呈现出另一种结果, 即水泥混凝土路面产生的能耗更低<sup>[7, 8]</sup>; 随着绿色环保技术的发

展,温拌、再生等领域的 LCA 研究也逐渐开展,Zaumanis 等<sup>[9]</sup>调查了温拌技术对沥青路面能源消耗的影响,研究表明温拌技术比热拌技术具有更强的节能优势;Wang 等<sup>[10]</sup>利用生命周期评价理论研究了沥青路面的自愈合技术、钢渣废料循环利用技术以及温拌技术的环境影响,结果表明,对于沥青路面表面层而言,1km 自愈层路面造成的环境影响最大,可排放 238.74Mt 当量 CO<sub>2</sub>,消耗 3.59TJ 的能源,废旧钢渣沥青路面的环境影响最低,仅占自愈合路面的 60%左右,而从沥青层整体来看,温拌技术环保优势最强。Vega-Araujo 等<sup>[11]</sup>研究发现,相比于传统的热拌技术,再生混凝土废料作为温拌沥青路面的骨料替代物会导致路面对环境的影响加剧。吴爽等<sup>[12, 13]</sup>从全生命周期角度分析了我国的温拌沥青路面和热拌沥青路面的环境影响,结果表明温拌技术更具有环保优势。Pantini 等<sup>[14]</sup>针对再生技术展开研究,发现由于冷再生过程需要添加外加剂,其环保性能比热再生要差。Garraín 等<sup>[15]</sup>发现适当使用一定比例的再生沥青可减少沥青路面的环境影响。Alessandra 等<sup>[16]</sup>发现废钢渣和 RAP 的使用减少了基质沥青和原始集料的投入,使得沥青路面生命周期碳排放量降低。Lin 等<sup>[17]</sup>研究了聚氨酯路面的生命周期环境影响,结果显示虽然聚氨酯路面的环保指标比沥青路面低,但是其路用性能更加优越,在同样的环境影响下,其使用寿命更长,更符合环保要求。Qi<sup>[18]</sup>以普通沥青路面及电磁诱导愈合沥青路面为研究对象,分析电磁诱导愈合养护技术与传统养护技术的环境影响,研究结果表明普通沥青路面的全生命周期能源消耗及温室气体排放量分别约为电磁诱导愈合路面的 2.5 倍和 2 倍。

LCA 理论不仅有助于设计时期路面设计方案的抉择和建成后的评估,还可以为维修养护提供决策方案, Ma 等<sup>[19]</sup>研究了我国冷再生、热再生、微表处、雾封层等十六项沥青路面维护技术的温室气体排放量,并确定了温室气体排放量最低的技术组合,结果表明微表处和雾封层技术的温室气体排放量最低,增加预防性养护的频率可以减少修复养护的发生,路面生命周期总碳排放可降低 30%-45%。Zheng 等<sup>[20]</sup>的研究结果同样表明微表处具有较低的环境影响潜值,提高封层养护的频率可以使预防性养护计划更具有可持续性。宋庄庄等<sup>[21]</sup>的研究结果表明,当沥青路面养护阈值设置为 75 时节能减排效果最佳。目前, LCA 理念已在沥青路面研究领域逐渐普及,但是关于长寿命沥青路面和普通沥青路面的环境影响差异研究仍处于空白阶段。

以高掺量胶粉长寿命沥青路面、典型半刚性基层沥青路面及柔性基层长寿命沥青路面为研究对象,结合工程调研及行业规范建立生命周期能耗排放清单及评价模型,量化分析了三种沥青路面从材料生产到铣刨废弃阶段的能源消耗及碳排放量,结合灵敏度分析确定主要能耗排放环节并分析其节能减排潜力。研究结果弥补了相关领域的空白,对可持续性沥青路面的发展提供了一定的理论依据。

## 1 生命周期评价方法

1997 年由国际标准化组织 (ISO) 制订了 ISO-14040 系列标准,并将 LCA 的工作框架规范为目标范围确定、清单分析、影响评价、结果解释四个步骤,各步骤的工作内容紧密相连。

### 1.1 目标范围确定

本研究评价对象为典型半刚性基层沥青路面、高掺量胶粉沥青路面及柔性基层沥青路面,年平均日交通量取 7500 次/日/车道。柔性基层沥青路面为二广高速洛阳段所采取的长寿命路面<sup>[4]</sup>,典型半刚性基层沥青路面为佛清从高速原定路面结构<sup>[22]</sup>,结合其疲劳寿命取设计年限为 20 年,高掺量胶粉沥青路面为京德高速所采用的半刚性基层长寿命沥青路面,上中下面层沥青胶粉掺量分别取 30%、40%、50%,各路面结构组合

设计信息见下表 1。由于不同路面设计寿命差异较大，在道路网中发挥的作用同样有所差别，因此以“1km\*车道\*年”为功能单位对能耗排放量进行分析比较。根据“从摇篮到坟墓”的原则将研究范围划分为原材料生产、施工建设、维修养护、铣刨废弃四个阶段。为保证可比性，假设三种路面的生产情景完全一致。

表 1 路面结构组成

Table 1 Pavement structure composition

结构类型	柔性基层沥青路面	典型半刚性基层沥青路面	高掺量胶粉沥青路面
设计年限	30 年	20 年	40 年
设计弯沉	-	19.9 (0.01mm)	12.2 (0.01mm)
上面层	4cmAC-13(SBS)	4cmSMA-13 (SBS)	4cmARHM-13
中面层	6cmAC-20(SBS)	6cmAC-20 (SBS)	8cmARHM-20
下面层	20cmAC-25	8cmAC-25	12cmARHM-25
上基层	20cm 级配碎石	18cm 水稳碎石	18cm 水稳碎石
下基层	40cm 级配碎石	18cm 水稳碎石	18cm 水稳碎石
底基层	土基	18cm 水稳碎石	18cm 水稳碎石

### 1.2 清单分析

清单分析常用的方法包括流程法、经济投入产出法和混合法。本研究采用流程法，将沥青路面生命周期划分为原材料生产、施工建设、维修养护、铣刨废弃四个一级单元过程并向上逐级追溯。以《公路工程预算定额》《公路工程机械台班费用定额》等行业规范为主，结合实际工程调查建立生命周期清单。本研究系统边界及各级单元过程见图 1。

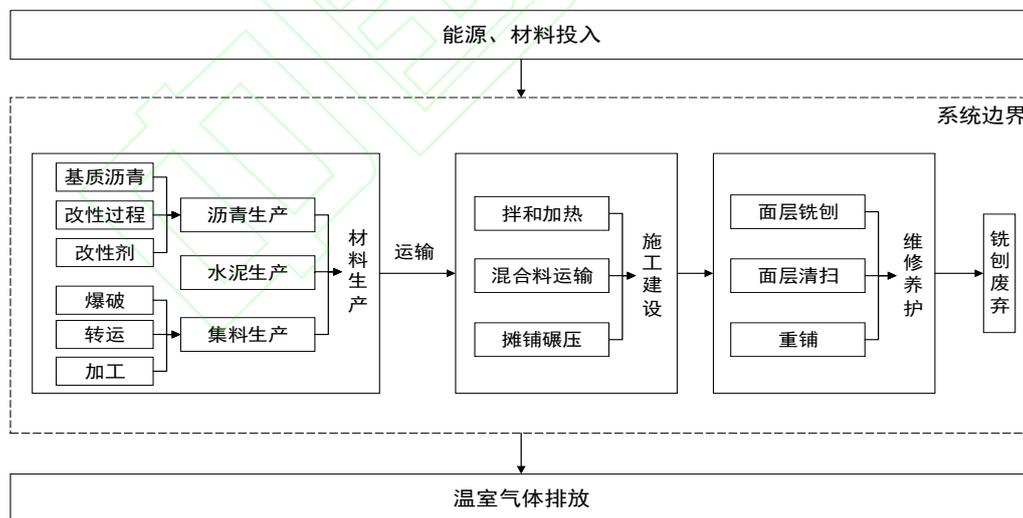


图 1 系统边界及单元过程划分

Fig.1 System boundary and unit process division

### 1.3 生命周期影响评价

生命周期评价 (LCIA) 的主要工作是通过特征化因子将产品的能耗排放数据转变为初级能源消耗及全球变暖潜势等直观的环境影响值，由于原油、原煤、原始天然气均为初级化石能源，直接以其热值为能耗

特征化因子。不同温室气体对全球暖化的作用效果不同, 取 IPCC 机构推荐的全球变暖潜势特征化因子计算碳排放量, 见表 2。表 2 中所提到的特征化因子是判别清单分析结果的各类物质是否对变暖等环境影响存在贡献度, 并将其量化在统一的单位的参数。在计算特征化因子的方法中, 当量评价模型是应用最为广泛的一种, 其思想是在假定清单物质质量相同的前提下, 利用环境压力因子的差异分析相关物质对某一环境影响的相对贡献值, 并在其中选择一种压力因子作为相对参照基准(视其单位环境影响潜值为 1), 而后将基准压力因子与其他物质在相同质量的条件下进行相对比较, 分别确定各物质的单位质量环境影响潜值, 即得到特征化因子。目前主流的特征化因子, 如 IPCC 温室气体排放因子等均采用此方法。沥青路面生命周期内的能耗评价模型及排放评价模型见下式(1)及式(2)。

$$E_{total} = E_{oil} + E_{coal} + E_{gas} \quad (1)$$

$$G_{total} = \sum G_i \cdot F_i \quad (2)$$

式中:  $E_{total}$  为初级能源消耗总量 (MJ);  $E_{oil}$  为原油总消耗量 (MJ);  $E_{coal}$  为原煤总消耗量 (MJ);  $E_{gas}$  为原始天然气总消耗量 (MJ);  $G_{total}$  为生命周期内全球变暖潜值总量;  $G_i$  及  $F_i$  为第  $i$  种温室气体排放量及对应的特征化因子。

表 2 常见温室气体特征化因子

Table 2 Characteristic factors of common greenhouse gases

常见温室气体	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
特征化因子	1	25	298

#### 1.4 结果解释

结果解释阶段的工作主要包括识别、评估、报告三部分, 识别是对清单分析结果和影响评价结果进行分析, 通过计算各个因素对结果影响的灵敏度识别出能耗排放关键环节, 为产品方案的改进及标准制定提供依据, 灵敏度计算模型见下式(3)。评估和报告是对产品进行综合性评估并以报告形式给出评价结果。

$$S_{mn} = (\Delta R_m / R_m) / (\Delta L_n / L_n) \quad (3)$$

式中:  $R_m$  为第  $m$  种环境影响的 LCA 结果;  $\square R_m$  为第  $m$  种环境影响 LCA 结果变化值;  $L_n$  为第  $n$  个环节的清单数据值;  $\square L_n$  为第  $n$  个环节清单数据变化值;  $S_{mn}$  是  $L_n$  对  $R_m$  的灵敏度。

由于本文所涉及的大多数数据来源较为单一, 难以为拟合分布提供足够的支撑, 因此选用定性定量相结合的不确定度分析方法。在本文所界定的系统边界内, 研究结论与真实值的偏差一方面来自部分数据的遗漏缺失, 另一方面来自各基础数据在时间、地域等方面的差异。本文将此部分的偏离程度划分为评价结果的基础不确定度  $U_0$ , 见式(4)<sup>[23]</sup>。对于清单数据的不确定度  $U_1$ , 首先通过系谱矩阵法从时间、地域等五个方面对清单数据的质量指标进行评价分级, 确定分布后通过蒙特卡洛模拟进行抽样, 最后结合  $U_0$  得到评价结果的综合不确定度  $U$ , 见式(5), 评价分级规则如下表 3。

$$U_0 = \frac{E' - E}{E} \quad (4)$$

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2} \quad (5)$$

式中:  $U_0$ —基础不确定度,  $E'$ —计入沥青烟挥发物后的评价结果,  $E$ —不计入沥青烟挥发物后的评价结果,  $U$ —综合不确定度,  $U_0$ —基础不确定度,  $U_1$ —清单数据引起的不确定度

表3 数据质量系谱矩阵

Table 3 Data quality coefficient matrix

得分	1	2	3	4	5
来源可靠性	实测调查得到的数据	假设的数据经过检验/测量的数据未经检验	未经验证的假设数据	定量预估(如专家咨询)	无定量预估
样本完整性	样本充足且时间足够的代表性数据	少量样本但时间足够的代表性数据	样本足够但时间较短的代表性数据	样本时间较少的代表性数据/时间足够的完整数据	代表性未知或来自少量样本且时间较短的不完整数据
时间代表性	3年以内数据或与时间无关	6年以内数据	10年以内数据	15年内的数据	年限未知/大于15年
地域代表性	研究地区的数据	来自包括研究地区在内的更大的地区	来自产条件相似的地区	来自生产条件有轻微差别的地区	来自未知地区或生产条件差异很大的地区
技术代表性	来自研究企业的流程、材料	来自不同企业的流程和材料	工艺和材料相同, 技术不同	材料、流程相关, 技术相同	不同技术的相关工艺或材料

对各基础数据分别进行分级评价后, 整理汇总得到各项  $DQI$  评分, 并通过式(6)进行汇总计算得到综合  $DQI$  值。

$$DQI = \frac{\sum_1^5 DQI_i}{5} \quad (6)$$

确定各数据的  $DQI$  后, 需要确定数据的分布形式, 以便在进行蒙特卡洛模拟时生成相应的随机样本。在形状参数和范围端点的约束下,  $\beta$  分布几乎可表示任意形状分布形式, 因此被广泛应用于不确定性研究。 $\beta$  分布的概率密度函数如式(7)所示, 数据不同  $DQI$  值所对应的形状参数及范围端点见表 4。

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{x}{b-a}\right)^{\alpha-1} \left(\frac{b-x}{b-a}\right)^{\beta-1}, & a \leq x \leq b \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

表4  $DQI$  分值与  $\beta$  分布参数对应表

Table 4 Correspondence table between  $DQI$  scores and  $\beta$  distribution parameters

综合 $DQI$ 值	5.0	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
形状参数( $\alpha, \beta$ )	(5,5)	(4,4)	(3,3)	(2,2)	(1,1)	(1,1)	(1,1)	(1,1)	(1,1)
区间端点( $\pm, \%$ )	10	15	20	25	30	35	40	45	50

通过式(4)-(7)和表 4 可以确定出各数据的概率分布形式。确定样本数量需求后, 生成相应分布的随机数, 并将各随机数代入清单分析模型和评价模型中, 即可计算出清单分析结果和评价结果的样本数据, 并计算出数据的不确定度。由经验可知, 生成的随机数样本越多, 评价结果越逼近真实值, 但由于生命周期评价基础数据多, 运算量大, 且过量的样本数据对结果精度的改善效果并不大, 因此此处设定随机样本的生成次数为 10000 次, 利用 Oracle Crystal Ball 软件进行蒙特卡洛模拟。

## 2 参数及评价模型

### 2.1 能源、材料清单

(1) 能源生命周期清单

柴油、汽油、天然气以及电等常用的终端能源贯穿沥青路面整个生命周期，除燃烧使用过程中会造成温室气体排放外，其自身生产过程同样会造成能源消耗及碳排放。本研究以欧训民等<sup>[24]</sup>的研究成果为基础，结合 IPCC 机构推荐的温室气体排放因子建立常见终端能源生命周期能耗排放清单，见表 5。表 5 中数值代表生产某 1MJ 的能源需要消耗原油、原煤、原始天然气多少 MJ 以及排放三类气体多少 g。

表 5 常见终端能源生命周期能耗及温室气体排放量

Table 5 Life cycle energy consumption and GHG emissions of common final energy sources

消耗排放	柴油 (MJ)	汽油 (MJ)	天然气 (MJ)	燃料油 (MJ)	电 (MJ)	
消耗	原油 (MJ)	1.115	1.122	0.049	1.055	0.357
	原煤 (MJ)	0.175	0.180	0.109	0.139	2.863
	原始天然气 (MJ)	0.029	0.029	1.038	0.026	0.027
排放	CO <sub>2</sub> (g)	101.967	98.127	72.682	102.725	265.220
	CH <sub>4</sub> (g)	0.081	0.089	0.047	0.074	1.010
	N <sub>2</sub> O (g)	0.001	0.001	0.0002	0.001	0.004

### (2) 原材料生命周期清单

沥青路面原材料主要包括各档矿料、水泥及沥青等。对于矿料，根据粒径大小将其分为粗集料、细集料及填料，假定采用铍铵炸药进行爆破，每开采一吨粗细集料块石排放二氧化碳 39g，开采一吨石灰石块石（填料原料）排放二氧化碳 32g，块石转运运距取 1.5km<sup>[25, 26]</sup>。调研我国常见的集料生产线，得粗集料、细集料及填料加工耗电量分别为 2.72kWh、4.15kWh、21.8kWh。水泥及 SBS 改性沥青的生命周期清单分别采用徐小宁<sup>[27]</sup>及欧洲沥青协会的研究成果<sup>[12]</sup>。胶粉能耗参考我国《废旧轮胎综合利用行业规范条件（2020 年本）》，取行业上限值 350kWh/t，由于其原料为废旧胶胎，故不追溯上游原料清单。整理得到各路用材料生命周期清单，见下 6。

表 6 路用材料生命周期能耗及温室气体排放清单 (1t)

Table 6 Energy consumption and GHG emission inventory of road materials during their life cycle

材料种类	原油 (MJ)	原煤 (MJ)	原始天然气 (MJ)	CO <sub>2</sub> (g)	CH <sub>4</sub> (g)	N <sub>2</sub> O (g)
粗集料	4.51	28.19	0.29	2728.67	9.96	0.04
细集料	6.35	42.95	0.43	4095.93	15.17	0.06
填料	29.03	224.85	2.15	20939.10	79.34	0.31
基质沥青	41987.03	21.54	34.04	174244.00	595	0
SBS 沥青	42288.48	177.38	1548.94	295910.46	1085.19	0
水泥	153.97	3201.15	11.64	809000.00	937.00	0.00
橡胶粉	449.82	3607.38	34.02	334177.20	1272.60	4.94

## 2.2 施工建设能耗排放模型

施工建设阶段的能耗排放主要来自材料运输、拌和加热及各类筑路设备的运转。原材料运输距离结合工程调研确定，集料、水泥、沥青等运距分别取 144km、190km、243km，材料运输车辆以国五标准的载重 22t 的货车为例，参考 ILCD 数据库可知运输每吨货物百公里耗油 1.42kg<sup>[28]</sup>，其余筑路机械油耗信息由《公路工程预算定额》《公路工程机械台班费用定额》（以下简称预算定额及费用定额）确定。

(1) 厂内拌合

沥青混合料在投入拌和锅前需要加热至目标温度, 消耗一定量的天然气, 不同沥青混合料的加热温度见 7, 天然气消耗模型见式(8)<sup>[28]</sup>, 拌和设备产能取 380t/h, 各类混合料拌和过程能耗参考预算定额及费用定额, 转运能耗见式(9)及式(10)。

表 7 沥青及矿料目标加热温度

Table 7 Target heating temperature of bitumen and mineral materials

类型	基质沥青混合料	SBS 改性沥青混合料	高掺量胶粉沥青混合料
沥青	165°C	175°C	180°C
矿料	185°C	205°C	190°C

$$E_{gas} = (1 + CL) \cdot 10^{-3} \cdot [m_{as} \cdot C_{as} \cdot (t_{as} - t'_{as}) + m_{st} \cdot C_{st} \cdot (t_{st} - t_0) + m_{st} \cdot w \cdot C_w \cdot (100 - t_0) + L_v \cdot m_{st} \cdot w + m_{st} \cdot w \cdot C_{vap} \cdot (t_{st} - 100)] \quad (8)$$

式中:  $E_{gas}$  为天然气消耗量 (MJ);  $CL$  为温度损失系数, 取 0.27;  $m_{as}$  为沥青质量;  $C_{as}$  为沥青比热容, 取 2.093kJ/kg/°C;  $t_{as}$  为沥青目标加热温度;  $t'_{as}$  为沥青存储温度, 取 130°C;  $m_{st}$  为石料质量;  $C_{st}$  为集料比热容, 取 0.74kJ/kg/°C;  $t_{st}$  为集料加热目标温度;  $t_0$  为环境温度, 取 18°C;  $w$  为集料含水率, 取 0.05;  $C_w$  为水比热容;  $L_v$  为水的蒸发潜热;  $C_{vap}$  为水蒸气比热容。

$$E_{diesel} = \sum m_i \cdot L_i \cdot f + T_{load} \cdot C_{load} \quad (9)$$

$$E_{petrol} = T_{auto} \cdot C_{auto} \quad (10)$$

式中  $E_{diesel}$  为拌和阶段柴油消耗量;  $m_i$  为第  $i$  种路面材料质量;  $L_i$  为材料运输距离;  $f$  为运输能耗因子, 0.61MJ/(t\*km);  $T_{load}$  为装载机台班数;  $C_{load}$  为装载机单位台班耗油量;  $E_{petrol}$  为拌和阶段自卸汽车耗汽油量;  $T_{auto}$  为拌和自卸汽车台班数;  $C_{auto}$  为拌和阶段自卸汽车单位台班耗油量。

(2) 现场施工

路面各结构层摊铺碾压环节的能耗排放主要来源于混合料运输及其他施工设备运作, 沥青混合料在高温下会挥发产生非甲烷有机化合物, 产生的温室气体较少, 此处忽略不计。结合工程调研, 沥青混合料运输距离取 55km, 摊铺、碾压设备及相应油耗参考预算定额及费用定额。施工阶段油耗模型见式(11), 结合柴油生命周期清单可得施工过程能耗排放清单。

$$E_{diesel} = T_{pave} \cdot C_{pave} + T_{roll} \cdot C_{roll} + T_{auto} \cdot C_{auto} + T_{sprinkler} \cdot C_{sprinkler} \quad (11)$$

式中  $E_{diesel}$  为施工环节柴油消耗量;  $T_{pave}$  为摊铺设备工作台班;  $C_{pave}$  为摊铺设备单位台班耗油量;  $T_{roll}$  为碾压设备台班;  $C_{roll}$  为碾压设备单位台班耗油量;  $T_{auto}$  为施工现场自卸汽车台班数;  $C_{auto}$  为施工现场自卸汽车 (30t) 单位台班柴油消耗量;  $T_{sprinkler}$  为洒水车台班数;  $C_{sprinkler}$  为洒水车单位台班耗油量。

2.3 维修养护及铣刨废弃能耗模型

服役期间, 在车辆荷载和外界环境的作用下, 沥青路面不可避免地产生开裂、车辙等损伤, 需要对路面进行养护维修。由于灌缝、坑槽修复等预防性养护难以定量预测, 且其产生的能耗排放少, 对路面强度影响不大<sup>[29]</sup>, 因此本文在假定忽略预防性养护的情境下分析路面的维修时机。其中柔性基层沥青路面服役期间的维修时机及维修形式相关研究<sup>[4]</sup>已给出, 每隔 10 年表面层铣刨重铺一次, 仅针对高掺量胶粉沥青路面及典型半刚性基层沥青路面进行预测计算。

(1) 维修养护阈值及性能衰变模型

《公路沥青路面养护设计规范》(以下简称养护设计规范)规定高速公路 PCI 小于 A2 级别时,需要进行修复养护,因此以 PCI=85 为维修阈值确定沥青路面功能性修复时机;路面结构强度状况通过 PSSI 表征,《公路技术状况评定标准》规定当  $70 \leq PSSI < 80$  时路面强度为中,取 PSSI=75 为结构性修复阈值。孙立军等在《沥青路面结构行为学》中综合考虑荷载、材料、环境及其他因素建立了沥青路面的性能衰变模型,可以很好地预测路面状况指数的衰变趋势, PCI 及 PSSI 衰变模型见式(12)-式(14)。

$$PCI = PCI_0 \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{\alpha}{y}\right)^\beta\right] \right\} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \alpha = K_{r\alpha} K_{m\alpha} \lambda [1 - \exp(-(\frac{\eta}{l_0})^\zeta)] \\ \lambda = a_1 h^{b_1} ESAL^{c_1} \\ \eta = a_2 h^{b_2} ESAL^{c_2} \\ \zeta = a_3 h^{b_3} ESAL^{c_3} \\ \beta = K_{r\beta} K_{m\beta} a_4 h^{b_4} ESAL^{c_4} l_0^d \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} PSSI = \frac{100}{1 + 15.71 \times e^{-5.91 \times PSSI}} \\ SSI = \frac{l_d}{l} \\ l = l_0 \gamma^{(10-PCI/10)} \end{cases} \quad (14)$$

式中: PCI 为路面状况指数;  $PCI_0$  为初始路面状况指数,取 100; y 为路龄;  $\alpha$  为路面寿命因子;  $\beta$  为曲线形状因子; h 为沥青层厚度 (cm); ESAL-日当量轴载作用次数,取 7500 次/日/车道;  $l_0$  为初始弯沉 (0.01mm);  $\lambda, \eta, \zeta, a, b, c, d$  为回归系数,详见《沥青路面结构行为学》;  $K_{r\alpha}, K_{r\beta}$  为环境对路面寿命因子及曲线形状因子的影响系数,按河北环境状况均取;  $K_{m\alpha}, K_{m\beta}$  为沥青材料对路面寿命因子及曲线形状因子的影响系数,普通改性沥青  $K_{m\alpha}$  取 1.5,结合原著定义,高掺量胶粉沥青  $K_{m\alpha}$  取 3,  $K_{m\beta}$  参考原著取 1.1,各参数取值见下表 8。PSSI 为路面结构强度指数;  $l_d$  为路面设计弯沉值;  $\gamma$  为路面结构参数,为面层基层模量下降 15%前后的路面弯沉比值,由 ABAQUS 模拟得到。

表 8 路面结构模型参数

Table 8 Pavement structure model parameters

路面结构		a	b	c	d	$K_{r\alpha}$	$K_{r\beta}$	$K_{m\alpha}$	$K_{m\beta}$	$\gamma$
典型半刚性沥青路面	$\lambda$	15.7238	0.5861	-0.2064		1.0333	1.0042	1.5	1.1	1.096
	$\eta$	119.66	-0.1124	-0.1053	-					
	$\zeta$	1.5247	-0.1016	-0.0986						
	$\beta$	0.6536	0.3349	-0.0255	-0.0981					
高掺量胶粉沥青路面	$\lambda$	15.7238	0.5861	-0.2064		1.0333	1.0042	3	1.1	1.095
	$\eta$	119.66	-0.1124	-0.1053	-					
	$\zeta$	1.5247	-0.1016	-0.0986						

$$\beta \quad 0.6536 \quad 0.3349 \quad -0.0255 \quad -0.0981$$

结合养护工程实例<sup>[30]</sup>, 假设修复养护后路面 PCI 值跃迁至 100。由路面性能衰变方程可得, 典型半刚性基层沥青路面第一次功能性修复时间为第 8 年, 相应 PSSI 值为 87, 结构强度满足要求, 结合养护设计规范确定路面修复养护形式为表面层铣刨重铺, 第二次维修时间为第 16 年, 相应 PSSI 值为 79, 对表面层再次进行铣刨重铺。高掺量胶粉沥青路面首次维修时间在第 24 年左右, 相应 PSSI 值为 86, 维修方式同样采用表面层铣刨重铺。在忽略预防性养护的假设条件下, 两种沥青路面设计年限内 PSSI 均大于 75, 仅需进行功能性修复养护, PCI 衰变趋势见下图 2 及图 3。

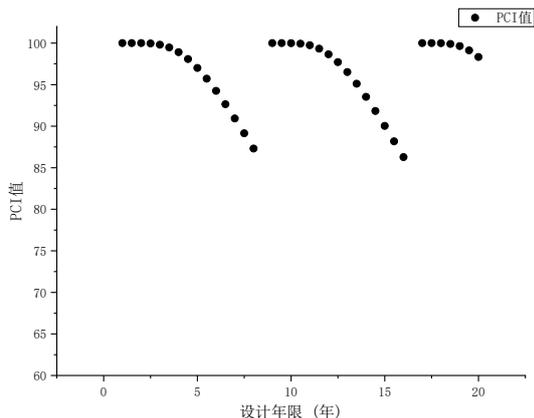


图 2 典型半刚性基层沥青路面 PCI 衰变图

Fig.2 PCI Decay diagram of typical semi rigid base asphalt concrete pavement

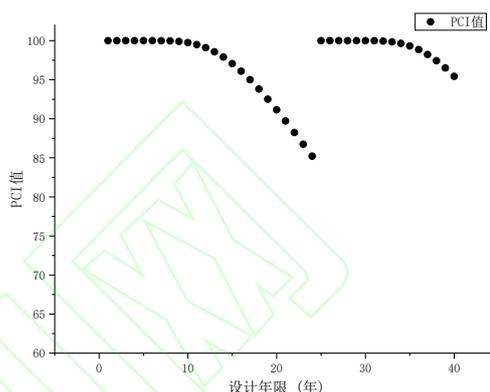


图 3 高掺量胶粉沥青路面 PCI 衰变图

Fig.3 PCI Decay diagram of high content rubber modified asphalt pavement

## (2) 维修施工能耗模型及铣刨废弃能耗模型

维修过程能耗主要来自表面层铣刨处理及铣刨后路面重铺施工, 铣刨处理能源消耗参考《安徽省高速公路养护工程预算编制办法及定额》及费用定额, 铣刨过程油耗模型见下式(15), 结合施工建设能耗排放模型等可得三种沥青路面在维修养护过程及铣刨废弃过程能耗排放清单, 而铣刨后路面进行的重铺施工与前一节施工建设阶段所用的机械设备及材料一致, 因此不再进行赘述。

$$E_{diesel} = T_{mill} \cdot C_{mill} + T_{sweep} \cdot C_{sweep} + T_{sprinkler} \cdot C_{sprinkler} + T_{auto} \cdot C_{auto} \quad (15)$$

式中:  $E_{diesel}$  为铣刨过程中柴油消耗量;  $T_{mill}$  为铣刨设备台班数;  $C_{mill}$  为铣刨设备单位台班油耗;  $T_{sweep}$  为清扫设备台班数;  $C_{sweep}$  为表面层清扫设备单位台班油耗;  $T_{sprinkler}$  为洒水车台班数;  $C_{sprinkler}$  为洒水车单位台班耗油量;  $T_{auto}$  为施工现场自卸汽车台班数;  $C_{auto}$  为施工现场自卸汽车 (30t) 单位台班柴油消耗量

## 3 结果与分析

### 3.1 沥青路面生命周期能耗排放分析

结合各阶段能耗排放模型, 得到功能单位下三种沥青路面在相应设计年限 (20a、30a、40a) 内的能耗排放强度, 见下图 4 及图 5。分析可知, 典型半刚性基层沥青路面初级能源消耗强度比柔性基层沥青路面及高掺量胶粉沥青路面能耗强度高 25.29%、153.03%, 全球变暖潜值比两种长寿命沥青路面分别高 106.97%、107.99%。两种长寿命沥青路面全球变暖潜值总量差别不大, 高掺量胶粉沥青路面碳排放量比柔性基层沥青路面低 0.49%。大量投入的废旧胶粉减少了基质沥青的投入, 使得高掺量胶粉沥青路面能耗强度比柔性基层

沥青路面低 50.48%。原材料生产阶段为三种沥青路面的主要能耗环节，高掺量胶粉沥青路面该阶段能耗强度分别比柔性基层沥青路面及典型半刚性基层沥青路面能耗强度低 54.17%、59.15%。由于未使用高碳排放材料-水泥，柔性基层沥青路面在材料生产环节碳排放量最低。施工建设阶段为碳排放主要环节，占三种沥青路面生命周期碳排放量的 41.68%-62.79%。由于服役寿命短且维修次数较多，典型半刚性基层沥青路面维修阶段能耗排放显著高于两种长寿命沥青路面。

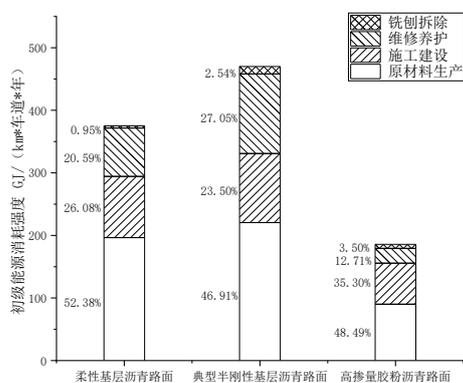


图4 三种沥青路面能耗对比图

Fig.4 Comparison of energy consumption of three types of asphalt pavement

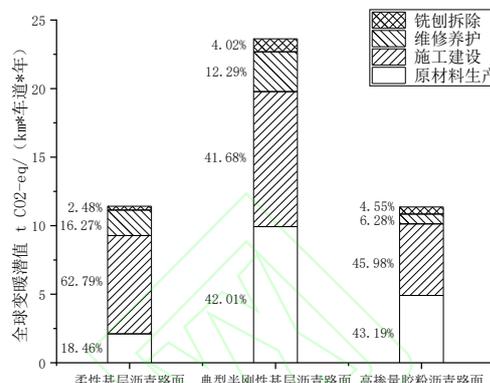


图5 三种沥青路面全球变暖潜值对比图

Fig.5 Comparison of GWP of three asphalt pavements

### 3.2 沥青路面生命周期能耗排放主要因素分析

沥青路面生命周期内能耗排放影响因素众多，灵敏度分析可有效阐明各单元过程对能耗排放结果的影响程度，识别主要环境影响因素。通过式(3)计算各单元过程灵敏度。

表 9 及表 10 列出了灵敏度不小于 10%的二级单元过程。由于是采用蒙特卡罗模拟方法，难以精准表达敏感度对结果不确定度的影响，也无需十分准确对影响程度进行排序，只需要知道哪些数据的影响较大即可，因此灵敏度在 10%以下的单元过程认为对能耗排放结果影响太小，基本上可以忽略不计。沥青生产是各沥青路面的主要能耗环节，初期建设阶段的沥青生产对三种沥青路面能耗结果的灵敏度高达 37.07%-49.17%，维修阶段的沥青生产对能耗结果同样有较大影响。计算沥青生产的上级单元过程能耗灵敏度，由表 11 可知，基质沥青生产为最主要的能耗环节，改性剂生产及改性过程影响不大，在路面设计及施工阶段减少原始基质沥青投入可降低沥青路面能耗。水泥为高碳排放材料，对典型半刚性基层沥青路面及高掺量胶粉沥青路面的碳排放灵敏度为 32.38%、30.55%。施工建设阶段的运输过程及加热过程同样为主要的能耗排放环节，其中集料运输过程为柔性基层沥青路面最大的碳排放环节，灵敏度高达 20.44%。柔性基层沥青路面及高掺量胶粉沥青路面的混合料运输过程碳排放灵敏度为 10.14%、15.64%，调整拌和站位置，优化运距可降低能耗排放。其中混合料加热环节对典型半刚性基层沥青路面能耗排放影响不大，对两种长寿命沥青路面影响相对较高。

表 9 二级单元过程对能源消耗结果的灵敏度

Table9 Sensitivity of secondary unit processes to energy consumption results

单元过程-物质清单	柔性基层沥青路面	典型半刚性基层沥青路面	高掺量胶粉沥青路面
原材料生产-沥青	49.17%	37.54%	37.07%

施工建设-集料运输	-		10.90%
施工建设-混合料加热	-	-	12.19%
维修阶段材料-沥青	15.27%	20.60%	-

表 10 二级单元过程对全球变暖潜值结果的灵敏度

Table10 Sensitivity of second-order unit processes to global warming potential results

单元过程-物质清单	柔性基层沥青路面	典型半刚性基层沥青路面	高掺量胶粉沥青路面
原材料投入-水泥	-	32.38%	30.55%
施工建设-集料运输	20.44%	12.22%	14.09%
施工建设-混合料加热	18.88%	-	12.31%
施工建设-混合料运输	15.64%	-	10.14%

表 11 沥青生产过程的能耗灵敏度

Table11 Sensitivity of asphalt production to energy consumption results

单元过程	柔性基层沥青路面	典型半刚性基层沥青路面	高掺量胶粉沥青路面
基质沥青生产	61.85%	54.77%	42.01%
改性剂生产	2.52%	3.28%	2.80%
改性过程	0.07%	0.09%	0.68%

作为生命周期评价工作开展的基础, 能源清单的不确定度会直接影响清单分析结果及影响评价结果的可靠性。首先通过各条投入产出数据及排放因子的来源分析相应的  $DQI$  值并确定其分布形式, 然后通过蒙特卡洛模拟生成随机数并代入清单模型, 得到能源清单数据的不确定度 (RSD)。对于追溯所得的能源上游生产数据, 由于其数据量过于庞大 (亿级), 逐条标记  $DQI$  值的方法显然不可行, 考虑到追溯中产生的时间地域代表性的浮动和截断误差, 统一取  $DQI = (3+4+3+4+5) / 5$  为其数据质量评分, 形状参数  $\alpha$ 、 $\beta$  均取 5, 上下限值取 90%-110%。

表 12 为能源清单的不确定度分析结果, 观察可得, 能源生命周期能耗清单的不确定度较大, 而排放清单的不确定度相对较小, 主要原因在于各类能源的直接生产过程不会消耗自然资源 (原油、原煤等), 而是消耗石油、煤炭等一次能源或其他二次能源, 其消耗的原油、原煤数据多通过上游产业追溯所得。从整体而言, 本研究所得的终端能源生命周期清单数据的不确定度处于 1.70%-7.68%, 具有较高的可靠度, 主要原因在于采用的能耗投入产出信息、排放因子主要来源于国家部门或行业所公布的年鉴及标准, 尽可能的保证了底层数据的本土化和时间贴合度。

表 12 能源清单的不确定度 (RSD)

Table12 Energy inventory uncertainty (RSD)

能源种类	天然气	柴油	汽油	燃料油	电
原油	7.55%	7.50%	7.59%	7.66%	7.55%
原煤	7.59%	7.56%	7.59%	7.61%	7.52%
原始天然气	2.89%	7.53%	7.56%	7.53%	7.55%
CO <sub>2</sub>	2.78%	2.58%	2.56%	2.70%	3.64%
CH <sub>4</sub>	4.70%	3.53%	3.53%	3.54%	2.87%
N <sub>2</sub> O	4.03%	4.22%	4.23%	4.36%	5.56%

表 13 为三种沥青路面的 LCI 结果的 RSD, 可以看出各能耗排放数据的不确定度均在 10%以内, 说明本研究的数据质量较高。

**表 13** 沥青路面生命周期清单分析不确定度

**Table13** Asphalt pavement life cycle inventory analysis uncertainty

	原油	原煤	天然气	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
典型半刚性基层沥青路面	6.29%	3.77%	4.08%	2.51%	3.59%	2.86%
柔性基层沥青路面	6.22%	5.59%	3.72%	2.72%	3.83%	3.85%
高掺量胶粉沥青路面	6.43%	3.83%	2.69%	2.22%	2.83%	2.62%

沥青在拌和碾压时会挥发出沥青烟, 才洪美<sup>[23]</sup>的研究表明, 沥青在短期老化过程中的沥青烟释放量约为 1.425g/kg。清单数据本身所造成的综合环境影响评价结果不确定度见表 14, 与 LCI 结果相比, 其不确定度略有减小, 原因在于清单结果在经过特征化、标准化后, 不确定度可能会在传递过程中被稀释。结合式(4)及式(5)发现 LCIA 结果的综合不确定度较低, 说明本研究的可靠性较好。

**表 14** 沥青路面生命周期影响评价不确定度

**Table14** Uncertainty in life cycle impact assessment of asphalt pavement

	典型半刚性基层沥青路面	柔性基层沥青路面	高掺量胶粉沥青路面
数据不确定度	2.28%	2.57%	1.75%
综合不确定度	2.93%	3.74%	2.75%

### 3.3 沥青路面生命周期节能降碳潜力分析

针对灵敏度分析结果, 分析水泥材料类型、沥青混合料温拌技术、再生技术及运输效率对三种沥青路面能耗排放的影响规律。

#### (1) 水泥材料类型对沥青路面能耗排放的影响分析

结合《公路路面基层施工技术细则》要求及各通用水泥生命周期清单<sup>[27]</sup>, 分析矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥、复合硅酸盐水泥替换普通硅酸盐水泥后沥青路面的能耗排放减少率, 结果见下图 6。分析可知, 水泥材料替换后两种半刚性沥青路面的碳排放情况均得到有效改善, 能耗强度下降相对不明显。由于矿渣硅酸盐水泥在粉磨过程中掺入了更多的工业矿渣, 减少了原料生产的能耗排放及煅烧过程中二氧化碳的排放, 因此其能耗排放最低, 替换掉普通硅酸盐水泥后典型半刚性基层沥青路面及高掺量胶粉沥青路面碳排放量分别下降了 13.17%、12.43%, 能耗强度分别下降 2.28%、2.62%。火山灰质硅酸盐水泥及粉煤灰水泥的节能减排效果差别不大, 比复合硅酸盐水泥略低。

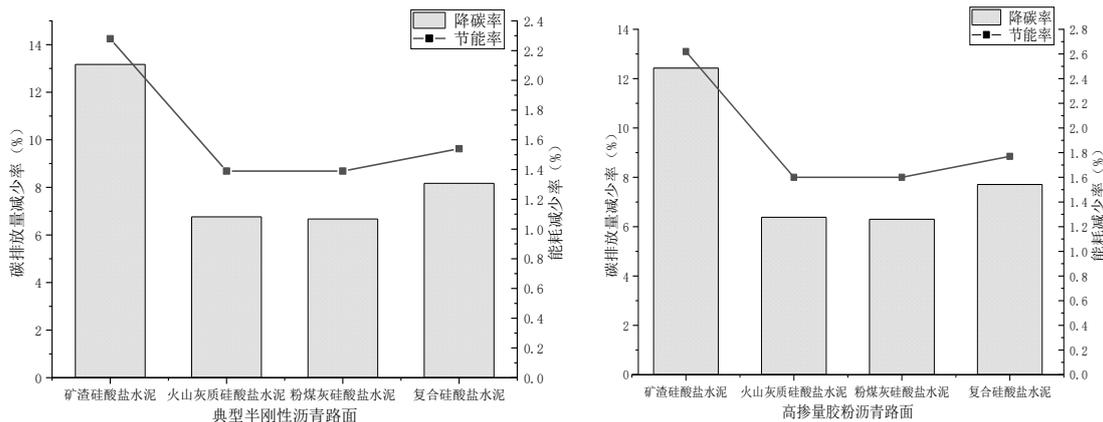


图 6 不同水泥替换普通硅酸盐水泥后两种半刚性沥青路面的能耗排放减少率

Fig.6 Energy consumption and emission reduction rate of two semi-rigid asphalt pavement after replacement of ordinary Portland cement with different cement

### (2) 温拌技术对沥青路面能耗排放的影响分析

相比于同类热拌沥青混合料, 温拌沥青混合料施工温度可降低 30℃, 结合温拌剂生命周期清单<sup>[9, 31]</sup>分析三种沥青路面采用温拌技术后的能耗排放减少率, 结果见下图 7。由图可知, 采用温拌技术可改善沥青路面的能耗排放, 其中柔性基层沥青路面碳排放量下降幅度最大, 比热拌技术低 2.41%, 高掺量胶粉沥青路面能耗强度下降最大, 降低了 3.71%, 典型半刚性基层沥青路面能耗排放改善效果最低, 分别下降了 2.58%、1.22%。对于两种半刚性基层沥青路面来说, 水泥材料替换具有比温拌技术更好的降碳效果。高掺量胶粉沥青路面出现节能率较高而降碳率较低的原因是在此路面结构全生命周期阶段内, 混合料加热阶段对能源消耗的灵敏度较高, 当采用温拌技术, 能耗降低效果较为明显, 而混合料加热阶段对于全球变暖潜值灵敏度影响较小, 同时高掺量胶粉沥青路面全生命周期四个阶段对全球变暖潜值灵敏度影响均在 10%以上, 当采用温拌技术, 碳排放减少量下降不太明显。

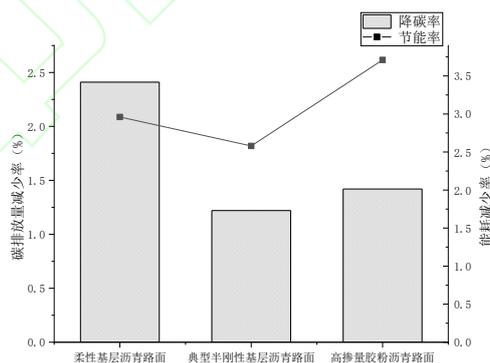


图 7 采用温拌技术后沥青路面的能耗排放减少率

Fig.7 Energy consumption and emission reduction rate of asphalt pavement after adopting warm mixing technology

### (3) 再生技术对沥青路面能耗排放的影响分析

厂拌热再生是应用最广泛、最为实用的路面再生技术, 可应用于高等级沥青路面的各个层位, 目前我国厂拌热再生沥青混合料的 RAP 掺量通常不超过 30%<sup>[32]</sup>, 图 8 及图 9 展示了三种沥青路面在不同 RAP 掺

量下的生命周期能耗排放降低幅度。数据显示, RAP 掺量与沥青路面的能耗排放减少率正相关, 相同掺量下, 柔性基层沥青路面节能减排效果最高。RAP 掺量每提高 10%, 其生命周期能耗减少 6.88%, 碳排放量减少 2.31%。当 RAP 掺量达到 30%时, 柔性基层沥青路面、典型半刚性基层沥青路面、高掺量胶粉沥青路面能耗强度分别下降 20.64%、18.56%、15.26%, 碳排放量分别下降 6.92%、3.92%、4.39%。

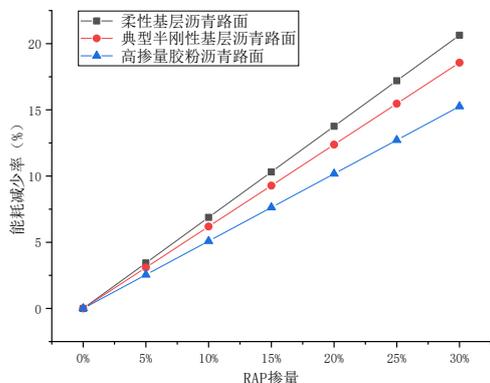


图 8 不同 RAP 掺量下沥青路面能耗减少率

Fig.8 Energy consumption reduction rate of asphalt pavement with different RAP content

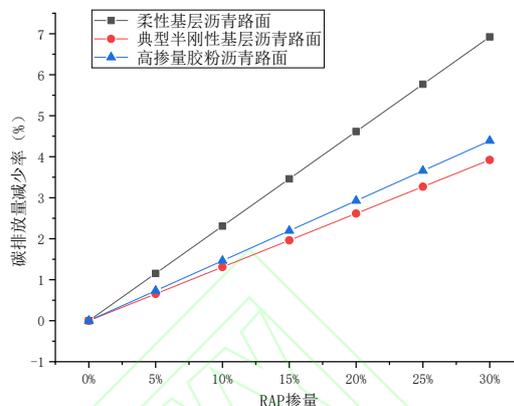


图 9 不同 RAP 掺量下沥青路面碳排放减少率

Fig.9 Carbon emission reduction rate of asphalt pavement with different RAP content

#### (4) 运输效率对沥青路面能耗排放的影响分析

及为运输效率提升 0%-30%时三种沥青路面的能耗排放减少率, 数据显示运输效率提升幅度与沥青路面的能耗排放减少率呈正相关, 运输效率每提升 10%, 柔性基层沥青路面、典型半刚性基层沥青路面、高掺量胶粉沥青路面能耗强度分别下降 1.55%、1.63%、2.10%, 碳排放量分别下降 4.03%、3.26%、3.07%。相同改善幅度下, 高掺量胶粉沥青路面能耗强度减少率最高, 柔性基层沥青路面碳排放强度减少率最低, 这是由于三种沥青路面生命周期能耗排放组成不同, 与灵敏度分析结果一致。

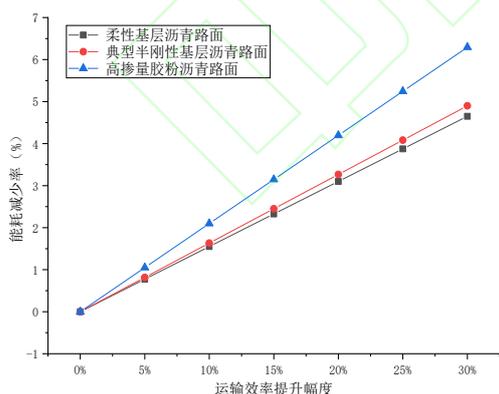


图 10 运输效率提升幅度与能耗下降率关系图

Fig.10 Diagram of the relationship between transportation efficiency improvement and energy consumption reduction rate

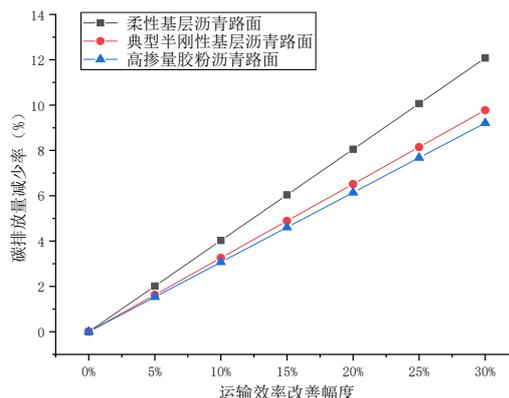


图 11 运输效率提升幅度与碳排放量减少率关系图

Fig.11 Diagram of relationship between transportation efficiency improvement and carbon emission reduction rate

## 4 结论

(1) 典型半刚性基层沥青路面的能耗强度分别比柔性基层沥青路面及高掺量胶粉沥青路面能耗强度高 25.29%、153.03%，全球变暖潜值比两种长寿命沥青路面分别高 106.97%、107.99%。两种长寿命沥青路面碳排放强度相差不大，但高掺量胶粉沥青路面具有更强的节能优势。

(2) 水泥为高碳排放材料，对典型半刚性基层沥青路面及高掺量胶粉沥青路面的碳排放灵敏度为 32.38%、30.55%。相比于普通硅酸盐水泥，采用矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥等可有效降低半刚性沥青路面的碳排放量。矿渣硅酸盐水泥能耗排放最低，替换掉普通硅酸盐水泥后典型半刚性基层沥青路面及高掺量胶粉沥青路面碳排放量分别下降了 13.17%、12.43%。

(3) 混合料加热环节对两种长寿命沥青路面能耗排放影响较高，对典型半刚性基层沥青路面影响相对较小。采用温拌技术可降低沥青路面的能耗排放，其中柔性基层沥青路面碳排放量下降幅度最大，比热拌技术低 2.41%，高掺量胶粉沥青路面能耗强度下降最大，降低了 3.71%。

(4) 再生技术可有效降低沥青路面能耗排放，当 RAP 掺量达到 30%时，柔性基层沥青路面、典型半刚性基层沥青路面、高掺量胶粉沥青路面能耗强度分别下降 20.64%、18.56%、15.26%，碳排放量分别下降 6.92%、3.92%、4.39%。运输效率提升幅度与沥青路面的能耗排放减少率呈正相关。

(5) 服役阶段的清单内容忽略了预防性养护，且仅考虑了表面层铣刨重铺这一种养护形式，与实际情况有一定差别，后续需建立更为完善的维修预测模型并对实际工程进行跟踪监测，以获得更可靠的数据结果。

## 参考文献

- 1 Wang X C, Hou R G. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2007(06):46. (in Chinese).  
王选仓, 侯荣国. *交通运输工程学报*, 2007(06):46.
- 2 Liu F. Study on Damage Behavior and Structural Life Reasonable Matching of Long-Life Asphalt Pavement. Master's thesis, South China University of Technology, China, 2010. (in Chinese).  
刘福明. 长寿命沥青路面损伤行为及其结构寿命合理匹配研究. 硕士学位论文, 华南理工大学, 2010.
- 3 Cui P, Sun L J, Hu X. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2006(10):10. (in Chinese).  
崔鹏, 孙立军, 胡晓. *公路交通科技*, 2006(10):10.
- 4 Yi X Y. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2015,32(06):25. (in Chinese).  
易向阳. *公路交通科技*, 2015,32(06):25.
- 5 Xue Z J, Wang C M, Zhang W, et al. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2015,32(10):37. (in Chinese).  
薛忠军, 王春明, 张伟, 等. *公路交通科技*, 2015,32(10):37.
- 6 Häkkinen T, Mäkelä K. *Technical Research Center of Finland*. Research Notes 1752. 1996.
- 7 Pan M P. The Methodology Research and Application on Energy Consumption and Carbon Emissions of Highway based on the Life Cycle Assessment. Master's thesis, South China University of Technology, China, 2011. (in Chinese).

- 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. 硕士学位论文, 华南理工大学, 2011.
- 8 Li X Y. Environmental Impact Assessment of Concrete Pavement and Asphalt Pavement Based on LCA. Master's thesis, Southeast University, China, 2015. (in Chinese).  
李肖燕. 基于 LCA 的水泥路面与沥青路面环境影响评价. 硕士学位论文, 东南大学, 2015.
- 9 Zaumanis M, Jansen J, Haritonovs V, et al. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2012,48.
- 10 Fusong W, Inge H, Fei Y, et al. *Journal of Cleaner Production*, 2021,297.
- 11 Vega-Araujo D, Martinez-Arguelles G, Santos J. *Procedia CIRP*, 2020,90.
- 12 Wu S. Research on the environmental impact of HMA pavement and WMA pavement based on LCA. Master's thesis, Southeast University, China, 2015. (in Chinese).  
吴爽. 基于 LCA 的热拌与温拌沥青路面环境影响研究. 硕士学位论文, 东南大学, 2015.
- 13 Zhang Y J. Study on Energy Saving and Emission Reduction of Asphalt Mixture and the Technology of Warm Mix Recycling. Master's thesis, Shenyang Jianzhu University, China, 2017 (in Chinese).  
张玉杰. 沥青混合料节能减排评价及温拌再生技术研究. 硕士学位论文, 沈阳建筑大学, 2017.
- 14 Pantini S, Borghi G, Rigamonti L. *Waste management (New York, N.Y.)*, 2018,80.
- 15 Garraín D, Lechón Y. *Journal of Environmental Management*, 2019,252(C).
- 16 Alessandra B, Anna D E, Chiara M. *Frontiers in Materials*, 2020.
- 17 Cong L, Guo G, Yu M, et al. *Journal of Cleaner Production*, 2020,256(C).
- 18 Qi J, Fusong W, Quantao L, et al. *Materials*, 2021,14(5).
- 19 Feng M, Wenhao D, Zhen F, et al. *Journal of Cleaner Production*, 2020,288(prepublish).
- 20 Mulian Z, Wang C, Xiaoyan D, et al. *Sustainability*, 2021,13(9).
- 21 Song Z Z, Zhu H Z. *Journal of China & Foreign Highway*, 2020,40(05):36. (in Chinese).  
宋庄庄, 朱洪洲. *中外公路*, 2020,40(05):36.
- 22 Li X R, Chang R H. *Guangdong Highway Communications*, 2021,47(02):9. (in Chinese).  
李兴荣, 常荣华. *广东公路交通*, 2021,47(02):9.
- 23 Cai H M. Research on the impact of asphalt on the environment during the use of asphalt. Ph.D. Thesis, China University of Petroleum, China, 2010. (in Chinese).  
才洪美. 沥青使用过程中对环境的影响研究. 博士学位论文, 中国石油大学, 2010.
- 24 Ou X M, Zhang X L. *China Soft Science*, 2009(S2):208. (in Chinese).  
欧训民, 张希良. *中国软科学*, 2009(S2):208.
- 25 Lin R Y. Research on Greenhouse Gas Emission Evaluation System for Asphalt Pavement Construction. Ph.D. Thesis, Chang'an University, China, 2014. (in Chinese).  
蔺瑞玉. 沥青路面建设过程温室气体排放评价体系研究. 博士学位论文, 长安大学, 2014.
- 26 Shen Y Q. Evaluation Model and Method for Energy Consumption and Emissions of Freeway Reconstructed Project. Master's thesis, Hefei University of Technology, China, 2017. (in Chinese).  
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.
- 27 Xu X N. Life Cycle Assessment of Cement in China. Master's thesis, Dalian University of Technology, China, 2013. (in Chinese).

- 徐小宁. 中国水泥工业的生命周期评价. 硕士学位论文, 大连理工大学, 2013.
- 28 Zou J J. Environmental Burden Database and Green Development Evaluation System for Asphalt Mixture Production. Master's thesis, Harbin Institute of Technology, China, 2020.(in Chinese).  
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.
- 29 Wang L J. Study on Integration Optimization of Asphalt Pavement Preventive Maintenance Timing and Countermeasures. Master's thesis, Chang'an University, China, 2011. (in Chinese).  
王丽君. 沥青路面预防性养护时机与对策一体优化研究. 硕士学位论文, 长安大学, 2011.
- 30 Chen A Q . Study of Decision Method of Asphalt Pavement Maintenance Based on National Test. Master's thesis, Southeast University, China, 2018. (in Chinese).  
陈安琪. 国检体系下的沥青路面养护决策研究. 硕士学位论文, 东南大学, 2018.
- 31 Li H Y. Energy saving and emission reduction and economic evaluation of warm mix asphalt pavement construction based on life cycle assessment. Master's thesis, Chongqing Jiaotong University, China, 2016. (in Chinese).  
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. 硕士学位论文, 重庆交通大学, 2016.
- 32 Yu H Y, Ma T, Wang D W, et al. *China Journal of Highway and Transport*, 2020,33(10):1.  
于华洋, 马涛, 王大为, 等. *中国公路学报*, 2020,33(10):1.



张磊, 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院副教授、博士研究生导师。2008年哈尔滨工业大学道路桥梁与渡河工程专业本科毕业, 2010年哈尔滨工业大学道路与铁道工程专业硕士毕业, 2013年哈尔滨工业大学博士毕业后到哈尔滨工业大学工作至今。目前主要从事沥青基材料力学行为研究、路面低碳技术及环境友好型材料研发、特种沥青研发、路面智能检测技术等方面的研究工作。发表论文30余篇, 包括 *Construction and Building Materials*, *Journal of Materials in Civil Engineering*, *Road Materials and Pavement Design* 等。