

学校代码: 10286
分类号: U416
密 级: 公开
U D C: 625
学 号: 153386



东南大学

工程硕士学位论文

基于生命周期分析的 钢桥面铺装层环境影响研究

(应用研究)

研究生姓名: 高 辉

导师姓名: 钱振东 教授

校外导师: 王建强 研究员

申请学位类别 工程硕士 学位授予单位 东南大学

工程领域名称 交通运输工程 论文答辩日期 2018年1月24日

研究方向 道路与铁道工程 学位授予日期 2018年 月 日

答辩委员会主席 夏井新 评 阅 人 闵召辉 潘友强

2018年1月25日

東南大學
硕士学位论文

基于生命周期分析的
钢桥面铺装层环境影响研究

专业名称: 交通运输工程

研究生姓名: 高辉

导师姓名: 钱振东 教授

王建强 研究员

RESEARCH ON THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF STEEL BRIDGE DECK PAVEMENT BASED ON LIFE CYCLE ANALYSIS

A Thesis Submitted to

Southeast University

For the Academic Degree of Master of Engineering

BY

GAO Hui

Supervised by

Prof.QIAN Zhen-dong

and

WANG Jian-qiang

Intelligent Transport System Research Center

Southeast University

January 2018

摘要

随着我国能源紧张和环境污染问题日益突出，道路工程在建设和运营过程中产生的环境影响受到越来越多的关注，钢桥面沥青铺装层作为道路工程中不可或缺的重要组成部分，也应当注重推行节能减排环保技术，保护生态环境。然而目前国内外对钢桥面铺装层的研究大多集中于结构设计和材料性能研究，对铺装层的环境影响关注较少。因此本文应用生命周期分析展开钢桥面铺装层环境影响研究。

首先，在对钢桥面铺装与传统沥青路面进行比较的基础上提出应对已有路面生命周期分析模型进行改进，即建立适用于钢桥面铺装层的生命周期清单和建立分析结果可信度评估方法，总结常用的生命周期分析方法，并选择过程生命周期分析方法展开研究。

其次，将钢桥面铺装层的生命周期划分为原材料生产、混合料拌合、铺装层铺筑、运营管理和铺装层铲除四个阶段，在对各阶段环境影响因素调研的基础上，对钢桥面沥青铺装层能耗和气体排放数据进行收集和计算，建立钢桥面沥青铺装层生命周期清单。

进而，以生命周期基础理论为指导，对路面生命周期分析模型进行改进，采用不确定度指标和敏感度指标对数据质量进行评估，应用蒙特卡罗模拟计算分析结果的不确定度，并规定当分析结果不确定度小于 10% 时，分析结果具有可信度，从而建立起基于生命周期分析的钢桥面铺装层环境影响分析模型。

最后，应用钢桥面铺装层环境影响分析模型对钢桥面铺装层中应用较广的“双层环氧”铺装层和“下层浇注+上层 SMA”铺装层展开环境影响研究，通过蒙特卡罗模拟得出分析结果不确定度小于 10%，从而验证了分析结果具有可信度。根据分析结果可知，“下层浇注+上层 SMA”铺装层的初级能源消耗约为“双层环氧”铺装层的 1.32 倍，全球变暖潜值约为“双层环氧”铺装层的 1.59 倍，酸化约为“双层环氧”铺装层的 1.63 倍，可吸入无机物约为“双层环氧”铺装层的 1.58 倍，因此“下层浇注+上层 SMA”铺装层的环境影响大于“双层环氧”铺装层，并根据分析结果提出了相应的铺装层节能减排建议。

关键词：钢桥面铺装层，生命周期分析，能源消耗，气体排放

Abstract

As the energy shortage and environmental pollution are becoming serious problems in China, the environmental impact of road engineering is getting more and more concern. Steel deck asphalt pavement is an important part of road engineering, and it should also pay attention to promote environmental-friendly technology. However, the researches on the steel deck pavement mainly focus on the structure design and material property, and less concern are paid to the environmental impact of the pavement. Therefore, this paper applies life cycle analysis to study the environmental impact of steel deck pavement.

Firstly, based on the comparison of the steel deck pavement and the traditional asphalt pavements, the paper proposes to improve the existing road surface life cycle analysis model, which is to establish a life cycle list for the steel deck pavement and to establish a method for evaluating the reliability of the analysis results. The common life cycle analysis methods are summarized, and select the process life cycle analysis method to launch the research.

Secondly, the life cycle of the steel deck asphalt pavement is divided into four stages, including mixture production, pavement, operation management and pavement remove. On the basis of investigation of environmental influence factors in each stage, the data of energy consumption and gas emission of steel deck asphalt pavement are collected and calculated, and the life cycle list of steel deck asphalt pavement layer is established.

And then the pavement life cycle analysis model is improved. The uncertainty index and the sensitivity index are used to evaluate the data quality, and the uncertainty of the analysis result is applied by Monte Carlo simulation. The analysis result is credible when the uncertainty of the analysis result is less than 10%. Thus, the environmental impact analysis model of steel deck pavement based on life cycle analysis is established.

Finally, the environmental impact analysis model of steel deck pavement is applied to research the environmental impacts of "EA+EA" pavement and "GA+SMA" pavement. The uncertainty of the analysis results is less than 10%, which verifies the reliability of the analysis results. According to the results of the analysis, the PED value of the "GA+ SMA" pavement is about 1.32 times times of the "EA+EA" pavement, GWP value is about 1.59 times times of "EA+EA" pavement, AP value is about 1.63 times of "EA+EA" pavement, RI value is about 1.58 times times of "EA+EA" pavement. Therefore, the environmental impacts of "GA+SMA" pavement is greater than "EA+EA" pavement. And then some suggestions for energy saving and emission reduction of the pavement are put forward based on the results.

Keywords: Steel Bridge Deck Pavement, Life Cycle Analysis, Energy Consumption, Gas Emission

目录

摘要.....	I
Abstract.....	III
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 路面生命周期分析研究现状.....	2
1.2.2 生命周期分析不确定度研究现状.....	4
1.2.3 国内外研究现状总结.....	5
1.3 研究内容与技术路线.....	5
1.3.1 研究目标.....	5
1.3.2 研究的主要内容.....	5
1.3.3 研究技术路线.....	6
第二章 钢桥面铺装层生命周期分析方法研究.....	7
2.1 钢桥面沥青铺装材料.....	7
2.1.1 常用铺装材料.....	7
2.1.2 典型铺装结构.....	8
2.1.3 现有路面 LCA 运用于钢桥面铺装层的适用性分析.....	9
2.2 钢桥面铺装层生命周期分析方法.....	10
2.2.1 生命周期分析技术框架.....	10
2.2.2 钢桥面铺装层 LCA 类型的选择.....	12
2.3 本章小结.....	13
第三章 钢桥面铺装层生命周期清单分析.....	15
3.1 能耗与排放计算方法.....	15
3.2 原材料生产阶段.....	16
3.3 混合料拌合阶段.....	18
3.3.1 混合料拌合的能源消耗.....	18
3.3.2 混合料拌合的环境排放.....	21
3.4 铺装层铺筑阶段.....	22
3.4.1 混合料运输阶段.....	22
3.4.2 现场施工阶段.....	23
3.5 运营管理阶段.....	24
3.6 铺装层铲除阶段.....	26
3.7 本章小结.....	26
第四章 钢桥面铺装层环境影响分析模型研究.....	27

4.1 目标与范围定义.....	27
4.1.1 研究目标.....	27
4.1.2 研究范围.....	27
4.1.3 功能单位与基准流.....	28
4.2 影响评价.....	28
4.2.1 清单分析结果分类.....	28
4.2.2 特征化模型选择.....	29
4.3 结果解释.....	30
4.3.1 数据质量评估.....	31
4.3.2 数据质量控制.....	34
4.4 模型参数与分析工具.....	35
4.4.1 模型参数.....	35
4.4.2 分析工具.....	35
4.5 本章小结.....	36
第五章 钢桥面典型铺装层环境影响研究.....	37
5.1 案例背景.....	37
5.1.1 模型参数的确定.....	37
5.1.2 养护频率与养护面积.....	38
5.2 影响评价与数据质量评估.....	40
5.2.1 影响分析结果.....	40
5.2.2 数据质量评估.....	41
5.3 结果分析与建议.....	44
5.3.1 “双层 EA”与“GA+SMA”环境影响对比分析.....	44
5.3.2 “双层 EA”环境影响关键因素分析.....	48
5.3.3 “GA+ SMA”环境影响关键因素分析.....	49
5.4 本章小结.....	51
第六章 总结与展望.....	53
6.1 主要结论.....	53
6.2 进一步研究的设想.....	54
参考文献.....	55
致谢.....	61
攻读硕士期间发表的论文.....	63

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

近年来,随着我国交通建设事业的快速发展,桥梁建设取得了巨大成就,其中尤其以大跨径桥梁建设取得了突飞猛进的发展。目前我国已建成或在建的大跨径桥梁大都采用了自重较轻、经济性较好的正交异性钢箱梁桥面板形式,而作为大跨径钢桥建设的关键技术之一的正交异性钢桥面铺装技术,也因此受到越来越多的关注。由于沥青混凝土具有重量轻、变形协调性好等优点,因此国内外钢桥面一般均采用沥青混凝土铺装。

然而,沥青混凝土在钢桥面铺装得到大规模应用的同时也造成了不可忽视的环境影响。在钢桥面沥青铺装层铺设过程中,不仅会消耗大量的资源和能源,同时还会排放出温室气体和其它有害气体。据统计,我国2011年沥青混合料年产量为2亿吨~3亿吨,其生产过程中消耗的燃料折合柴油大约120万吨~180万吨,同时排放383.1万吨~574.7万吨的温室气体(主要为CO₂)^[1]。此外,由于钢桥面铺装层对自然因素的变化敏感,工作环境较为严苛,沥青铺装层容易出现各种病害,在其养护过程中,同样需要消耗大量的能源和产生气体排放。

近年来,全球性能源紧张和环境污染问题逐渐引起了国际社会的普遍关注,节能减排、减少环境污染已成为国际社会的共同责任。在我国,由于道路工程在建设和运营过程中采用了大量高能耗和高碳密度的原材料和产品,同时产生了大量的温室气体排放,给环境造成了严重的负担。因此,交通运输部编制的《交通运输节能环保“十三五”发展规划》中明确提出以强化基础设施生态保护为任务,将生态保护理念贯穿交通基础设施规划、建设、运营和养护全过程^[2]。钢桥面铺装层作为道路工程中不可或缺的重要组成部分,也应当注重推行节能环保技术,降低能源消耗和气体排放,保护生态环境。

然而,目前国内外对钢桥面铺装层的研究大多集中于结构设计和材料性能研究,对铺装层的环境影响关注较少。因此,有必要对钢桥面铺装层的环境影响展开全面分析,为铺装层节能减排提供理论基础。由于在钢桥面铺装层铺筑和维修养护等各个环节都有可能消耗资源和能源,并产生气体排放问题,因此,需要借助生命周期分析方法,全面详细地分析钢桥面铺装层的能耗和排放问题。生命周期分析(Life Cycle Analysis,简称LCA)是一种量化分析产品、工艺或活动在整个生命周期内所有环境影响的评价方法,应用生命周期分析对铺装层的能耗和排放进行量化计算,有利于了解铺装层生命周期各个阶段能耗和排放的详细情况以及一些关键的影响因素,从而有利于有针对性的展开节能减排技术的研究。目前,在国内已有的铺装方案中,“下层浇注式沥青混凝土+上层改性沥青SMA”铺装方案与“双层环氧沥青混凝土”铺装方案因综合性能较好,较其它铺装方案具有一定优势,在我国应用较广^[3]。对“下层浇注+上层SMA”与“双层环氧”铺装层展开环境影响研究,全面比较分析这两种典型铺装方案的能耗与气体排放,可以为铺装层材料和结构比选提供环境方面的数据支持。

综上所述,本文拟通过建立基于生命周期分析的钢桥面沥青铺装层环境影响分析模型,对“双层环氧”铺装层和“下层浇注+上层SMA”这两种典型铺装层进行环境影响对比分析,

同时确定铺装层产生环境影响较大的环节,提出相应的节能减排建议。应用该钢桥面铺装层环境影响分析模型可以系统而定量地计算出钢桥面沥青铺装层在生命周期内产生的环境影响,为今后钢桥面铺装层材料和结构比选以及铺装层节能减排技术的发展提供数据支持。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 路面生命周期分析研究现状

生命周期分析是指对一个产品系统的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价^[4]。生命周期分析最早开始于上世纪 70 年代初美国开展的一系列针对包装品环境影响的分析与评价,随后由于区域性与全球性环境问题日益严重,资源与环境状况分析逐渐受到公众和社会的关注。在上世纪 90 年代,国际环境毒理学与化学学会统一相关概念并形成了生命周期分析的基本技术框架,国际标准化组织将生命周期分析的概念、技术框架进行标准化并发布了系列标准 ISO 14040,并在世界范围进行应用推广。目前,生命周期分析在国内外工业领域已得到较为广泛的应用。随着道路建设的迅速发展,由其所带来的能耗和环境污染问题受到越来越多的关注,生命周期分析逐渐应用到道路工程领域。

国外路面生命周期分析研究始于上世纪 90 年代,目前国外对路面工程的生命周期分析已有大量研究成果,并已经将一些研究成果成功地应用于工程实践。作为早期应用于路面工程的生命周期分析研究之一,Häkkinen 和 Mäkelä^[5]采用过程生命周期分析方法对沥青玛蹄脂碎石路面和设传力杆的水泥混凝土路面的环境影响进行了比较分析。该项研究同时也是最为全面的生命周期分析研究之一,其研究范围包括了材料生产、使用和废弃等所有路面生命周期阶段,同时也包括了路面对车辆油耗、噪音、照明条件和灰尘等方面的影响,并采用了 CO₂ 排放、不可再生资源消耗、污染气体排放和重金属排放等环境指标对两种路面结构进行环境影响对比分析。该研究采用的案例为新建路面,因此并未考虑初次建设时引起的交通延误,但是该研究包含了养护维修阶段的交通延误和交通中断所导致的影响。同时,为了在合理的误差水平下比较两种路面结构使用阶段的油耗差异,作者研究了绝对交通量下路面的环境影响。

随后,Roudebush^[6]、Berthiaume 和 Bouchard^[7]、Stripple^[8]、Nisbet 等^[9]均采用过程生命周期分析方法对沥青路面和水泥混凝土路面的环境影响进行了比较分析。

Horvath 和 Hendrickson^[10]则采用了投入产出生命周期分析方法对热拌沥青路面和连续配筋水泥混凝土路面的环境影响进行研究。该研究采用 1992 年美国工业投入-产出清单中的相关数据,环境影响评价指标包括燃料消耗、电力消耗、矿石和化肥消耗,以及大气排放、水污染排放、土地占用等,但是该研究没有量化温室气体的排放。该研究侧重于定量分析原材料生产和混合料拌合两个阶段,对路面建设和拆除阶段则只进行了定性分析。由于缺乏可靠的数据,该项研究没有分析使用阶段和养护阶段。

Park 等^[11]首次利用混合型生命周期分析方法对高速公路沥青路面环境影响展开研究。该研究在原材料生产阶段将韩国经济投入-产出模型与韩国能源消耗平衡表相结合

来进行环境影响评估，在路面建设与拆除阶段采用过程生命周期分析方法进行分析，在维修养护阶段则同时采用了投入产出模型和过程生命周期分析方法。然而该项研究并未对输入数据的来源进行详细说明，同时没有对所研究的沥青和水泥路面结构做出明确界定，支持文件的缺失使得理解该研究的结果变得困难。

Treloar 等^[12]采用混合型生命周期分析方法对包括水泥混凝土路面、复合路面、沥青路面在内的八种不同结构形式路面进行环境影响研究。该研究的生命周期范围没有包括路面拆除阶段。材料生产阶段采用过程生命周期分析方法进行评估，在路面建设和使用阶段则采用了澳大利亚的经济投入-产出模型。

在国内路面生命周期分析发展的初期，研究对象大多为水泥混凝土路面。郑莉^[13]采用过程生命周期分析方法对水泥混凝土、再生水泥混凝土和粉煤灰混凝土三种路面材料的环境影响进行了比较分析。该研究严格按照生命周期基本理论的四个阶段进行，采用不可再生能源消耗、温室效应、环境酸化、人体健康损害、光化学氧化物生成、氮化作用六种评价指标，对三种路面材料进行环境负荷定量分析。郑艳华^[14]构建了基于生命周期分析方法的公路工程环境影响框架，该研究以水泥混凝土路面为研究对象，分析范围包含原材料采掘和原材料半成品加工、路面建设、营运使用和拆除回收四个阶段，计算分析了水泥混凝土路面生命周期内的能耗和排放，并根据分析结果提出了针对性的改善措施及建议。尚春静等^[15]采用混合型生命周期分析方法对水泥混凝土高速公路的能耗和大气排放进行了分析，该研究的研究对象包括路基土石方、排水、防护和路面工程。该研究根据计算结果给出了除使用阶段以外的各个生命周期阶段能耗大小的排序，同时提出了减少水泥混凝土路面环境负荷的措施。

随着沥青路面在我国的推广应用，路面生命周期分析研究的重点逐渐转向沥青路面的环境影响评价及不同结构路面的比较研究。杨博^[1]应用过程生命周期分析方法，构建了基于生命周期分析的沥青路面节能减排量化分析体系。该研究对沥青路面生命周期内环境影响因素展开详细调查，通过应用定额法和排放因子法，建立了沥青路面各生命周期阶段能耗与排放的量化分析模型，并以淮固高速公路新建工程为具体案例，对沥青混合料拌合、路面建设和运营三个阶段的能耗和排放进行了计算分析。该研究同时选取相关评价指标，建立了沥青路面节能减排评价指标体系，借助层次分析法和模糊综合评价法，提出了沥青路面节能减排综合评价方法与评价过程。

潘美萍^[16]采用过程生命周期分析方法，建立了高速公路生命周期的能耗和碳排放量计算模型，归纳整合了高速公路相关产品的能耗和碳排放清单分析，并利用计算模型和整合的清单对半刚性基层沥青路面、柔性基层沥青路面和水泥混凝土路面进行生命周期的清单分析，同时还论述了我国高速公路生命周期分析系统设计与开发的思路。随后，黄仕伟^[17]、韩雨^[18]、崔璨^[27]和李肖燕^[20]均利用生命周期分析方法对水泥混凝土路面和沥青路面的环境影响进行了比较分析。

随着交通建设的发展，路面生命周期分析不再仅仅局限于沥青路面和水泥路面的对比研究，已有研究开始关注路面维修养护过程中的环境问题以及新型环保技术在路面工程中的应用。Huang 等^[21]采用过程生命周期分析方法，建立了一种针对沥青路面建设与

维修养护的分析模型, 比较了道路养护维修施工本身及其导致的交通中断两者的环境影响。Wang 等^[22]分析了不同交通量和不同滚动阻力作用下的沥青路面和水泥路面进行维修养护时所产生的能耗和温室气体排放。Mroueh 等^[23]首次关注将工业副产品应用在路面结构中所产生的环境影响, 该研究主要分析了掺入粉煤灰、破碎水泥混凝土废渣、高炉矿渣作为集料替代品的 7 种沥青路面的环境影响。

贾晓娟^[24]运用生命周期分析方法分析了沥青路面在原材料生产、沥青混凝土拌和、沥青路面摊铺压实、沥青混合料运输和路面结构拆除过程中的环境负荷, 系统比较了四种再生技术对环境影响的差异。在此基础上运用层次分析法, 提出再生沥青混凝土全生命周期分析的评价指标。温肖博^[25]采用基于生命周期分析的研究方法, 定量评估了泡沫温拌沥青混合料的环境效益。该研究对机械发泡、化学添加剂、沸石添加剂等四种不同温拌技术的能耗和碳排放与热拌沥青进行对比, 研究范围包括了材料生产、施工阶段和运输阶段, 但该研究并未对数据来源做出说明。

1.2.2 生命周期分析不确定度研究现状

尽管国内外路面生命周期分析研究得到了快速发展, 但依然存在一些问题, 其中最突出的问题是现有路面生命周期分析模型都未包含对数据质量和模型分析结果可信度进行评估的方法。由于受到技术、地域、时间等条件的限制, 不同来源的数据可能存在较大差异。以沥青为例, 在现有的路面生命周期分析中, 根据不同的研究, 沥青的能耗在 0.6MJ/kg 至 6.0MJ/kg 之间^[26]。在国内路面生命周期分析研究中, 由于缺乏沥青能耗的基础数据, 大多直接引用了国外的研究成果, 由于国内沥青生产工艺和规模与国外并不完全相同, 因此导致了分析结果与真实的环境影响水平存在差距。但是目前已有的相关研究中仅仅对数据来源做出了说明, 并未定量的评估数据质量对于分析结果的影响, 因此严重降低了分析结果的可信度。

在生命周期分析方法论研究中, 对数据质量评估和分析结果评估的研究已取得一定的研究成果, 通常采用不确定度指标来描述数据质量和分析结果可信度。Heijungs 和 Suh^[27]提出利用矩阵相位法进行不确定度分析, 该方法可以定量的表达当输入参数发生变化时输出结果的变化程度, 但是该方法只适用于输入参数在小范围内波动的生命周期分析研究, 同时该方法在具体操作时具有相当的复杂性。Ciroth^[28]等人将蒙特卡罗模拟与逼近函数相结合来计算不确定度, 该方法在真值的基础上进行随机模拟, 从而获得数据的误差即不确定度。但是该方法只适用于单一产品的链状生命周期, 并不能很好的表征有副产品的生命周期分析不确定度。Hong 等人^[29]以泰勒系列展开式为基础对生命周期分析结果展开不确定度研究, 利用该方法得到的结果和蒙特卡罗模拟结果相似, 但是在操作方法上更为简便。在该研究中, Hong 等人仅对输入参数为正态分布的生命周期分析进行了研究, 并未验证该方法在输入参数为其它统计分布类型的生命周期分析中的适用性。

朱立红等人^[30]结合多元线性回归模型与偏回归平方和理论, 对生命周期输入清单数据的不确定性进行分析。该方法利用多元线性回归模型计算得到分析结果的不确定度,

然后结合偏回归平方和理论确定对分析结果不确定度影响较大的清单数据，并通过生命周期清单数据对方法进行了验证。黄娜等人^[31]则提出利用两次蒙特卡罗模拟从生命周期分析的原始数据开始展开不确定度分析。

1.2.3 国内外研究现状总结

从国内外研究现状来看，现阶段对道路工程的环境影响研究主要针对普通公路的路面结构，但是由于钢桥面铺装层直接铺设在正交异性钢板上，没有普通路面具有的路基与基层结构，因此不能将普通公路路面的环境影响研究结论直接应用在钢桥面铺装层上。

在现有的路面生命周期分析模型中已经建立起了热拌沥青混凝土生命周期清单、温拌沥青混凝土生命周期清单等，但是随着钢桥面铺装层车辆荷载的逐渐加强，对铺装材料的要求越来越高，普通热拌沥青混凝土由于自身性能不足而逐渐被取代。目前钢桥面铺装层常用的铺装材料在生产工艺和施工工艺上与普通热拌沥青混凝土存在较多差异，现有的路面生命周期分析清单并不能描述钢桥面铺装层的环境影响，因此不能直接将路面生命周期分析模型直接应用于钢桥面铺装层。

现有的路面生命周期分析模型并没有包含完整的数据质量和分析结果可信度评估方法，相关研究均未对研究成果的可信度进行验证，因此严重阻碍了路面生命周期分析的应用和发展。

1.3 研究内容与技术路线

1.3.1 研究目标

本研究旨在建立以生命周期分析为基础的钢桥面沥青铺装层环境影响分析模型，并运用该模型对典型钢桥面沥青铺装层进行环境影响对比分析，根据分析结果提出钢桥面铺装层节能减排措施的建议。

1.3.2 研究的主要内容

1) 钢桥面铺装层生命周期分析方法研究

总结钢桥面沥青铺装层应用现状，分析比较常用的生命周期分析方法，选择适用于钢桥面铺装层特点及数据收集分析的生命周期分析方法。

2) 钢桥面铺装层生命周期清单分析

以钢桥面铺装层生命周期分析方法为依据，分析钢桥面沥青铺装层在生命周期各阶段的主要工艺流程、技术设备，确定其能源消耗和排放的类别及数量，建立钢桥面沥青铺装层生命周期清单。

3) 钢桥面铺装层环境影响分析模型研究

在对钢桥面典型铺装层生命周期清单数据进行详尽调查的基础上，参考国内外相关研

究,对现有的沥青路面生命周期分析模型进行改进,增加对数据质量进行评估和控制的环节,建立起钢桥面铺装层环境影响分析模型。

4) 典型铺装层环境影响研究

应用已建立的钢桥面铺装层环境影响分析模型,对钢桥面“双层环氧”铺装层与“下层浇注+上层 SMA”铺装层的环境影响展开对比分析,根据分析结果提出相应的节能减排改善措施。

1.3.3 研究技术路线

本文以生命周期分析基础理论为指导,应用过程生命周期分析方法展开研究,在对钢桥面沥青铺装层生命周期内的环境影响进行调研分析的基础上,对已有路面生命周期模型进行改进以形成钢桥面沥青铺装层的生命周期分析模型,最后应用模型对典型铺装层环境影响进行分析。具体研究路线如图 1-1 所示:

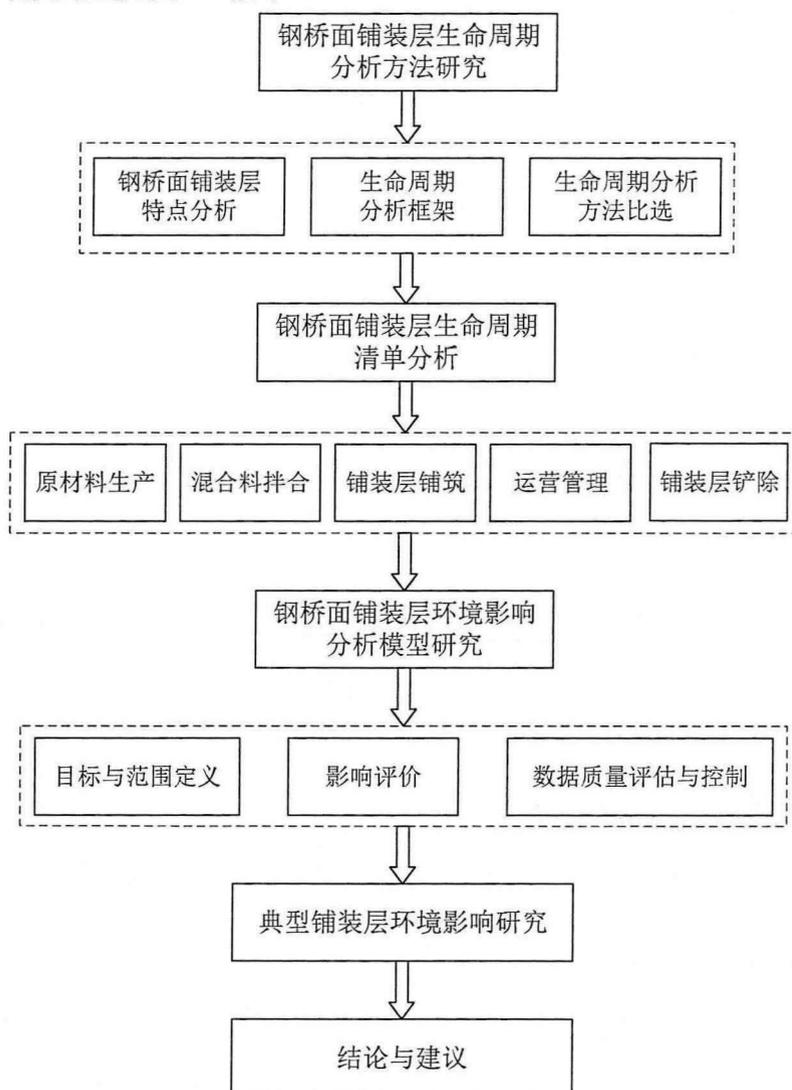


图 1-1 本文技术路线图

第二章 钢桥面铺装层生命周期分析方法研究

钢桥面沥青铺装层和普通沥青路面有着诸多区别,已有的路面生命周期分析模型并不能满足钢桥面铺装层环境影响研究的要求。本章拟通过理论分析的方式对钢桥面沥青铺装层的生命周期分析方法展开研究,为建立钢桥面铺装层环境影响分析模型提供技术支持。

2.1 钢桥面沥青铺装材料

2.1.1 常用铺装材料

钢桥面沥青铺装层的支撑条件、温度条件与交通条件等方面较沥青路面均更为严苛,因而对其强度、变形稳定性、疲劳耐久性等性能均有更高要求,普通沥青混凝土由于自身性能不足而逐渐被取代,目前常用的钢桥面沥青铺装材料主要有以下三类^[33]:(1)以美国、中国和日本为代表的环氧沥青混凝土(Epoxy Asphalt);(2)以德国和日本为代表的高温拌和浇注式沥青混凝土(Guss Asphalt),以及以英国为代表的沥青玛蹄脂混凝土(Mastic Asphalt);(3)德国和日本等国采用的改性沥青 SMA(Stone Mastic Asphalt)。

1) 环氧沥青混凝土 EA

环氧沥青是通过在沥青中添加环氧树脂和固化剂,经过复杂的化学改性而形成的一种力学性能优异的沥青材料。固化后的环氧沥青混合料不会随温度的变化而发生逆反应,从而具有较高的整体强度。同时,环氧沥青混合料的高温稳定性和低温抗裂性均比其它类型的沥青混合料高得多,并具有较好的抗疲劳性能和水稳定性。环氧沥青混合料按照拌合温度分为冷拌环氧沥青混合料(常温拌合)、温拌环氧沥青混合料(110℃~130℃)和热拌环氧沥青混合料(170℃~180℃),本文中所涉及的环氧沥青混合料为温拌环氧沥青混合料。

2) 浇注式沥青混凝土 GA

浇注式沥青混凝土是在高温状态(约220℃~240℃)下进行拌合,摊铺时仅依靠混合料自身的流动性密实成型而无需碾压的悬浮密级配沥青混凝土。浇注式沥青混凝土所采用的沥青结合料一般为普通沥青、天然特立尼达湖沥青(Trinidad Lake Asphalt,简称TLA)或两者的混合物以及改性沥青,具有“两高一低”的特点,即浇注式沥青结合料和细集料含量高、粗集料含量低,这种类型的混合料掺配组成确保浇注式沥青混合料具有良好的密水性能以及与钢板协同变形的能力。但是同时也给浇注式沥青混凝土带来高温稳定性差的特点。因此,采用浇注式沥青混凝土作为钢桥面沥青铺装材料通常会出现高温车辙、推移等病害。

3) 沥青玛蹄脂混凝土 SMA

SMA是一种由集料骨架和填充在骨架内的沥青玛蹄脂所组成的热拌间断级配沥青混合料,其特点是含有较多的粗集料和沥青结合料,较多的粗集料形成了紧密嵌挤的骨

架结构，使混合料具有良好的高温抗变形能力，而富含沥青及矿粉的沥青玛蹄脂填充于粗集料骨架的空隙中，赋予混合料良好的抗裂性、密水性及耐久性。但是当 SMA 材料作为钢桥面铺装材料时，铺装层较厚，对集料要求高，在我国工程实践中保质年限较短。

2.1.2 典型铺装结构

当前，国内外大跨径钢桥面沥青铺装结构主要有单层和双层两种类型。由于双层铺装结构可以针对上下层不同的使用性能要求进行分别设计，比起单层铺装结构更能够适应钢桥面铺装较高的性能要求，因而目前我国钢桥面铺装层更多地采用双层铺装结构。

1) “双层环氧”铺装结构

“双层环氧”铺装结构是一种双层同质铺装结构，其铺装结构组成如图 2-1 所示。由于环氧沥青混凝土具有良好的综合性能，高低温稳定性及抗疲劳性能优异，因此在国内多座钢桥面铺装工程中得到应用。

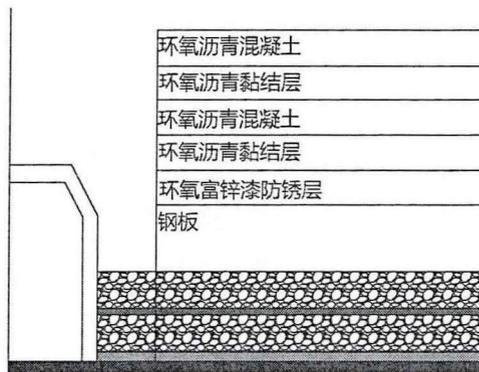


图 2-1 “双层环氧”铺装结构示意图

2) “下层浇注+上层 SMA”铺装结构

“下层浇注+上层 SMA”铺装结构是一种双层异质铺装结构，其铺装层结构组成如图 2-2 所示，结构中的上下两层分别起到不同作用。浇注式沥青混凝土具有良好的防水性能并且与钢桥面板有良好的黏结力，用作铺装下层时可以起到保护钢桥面板和提供协调变形的作用。SMA 具有良好的路用性能，但其空隙率相对较大（3%~4%），并且难以与钢板达到密贴的效果，并不适合用作钢桥面铺装下层，因此将其用作铺装上层，主要起到磨耗层的作用。

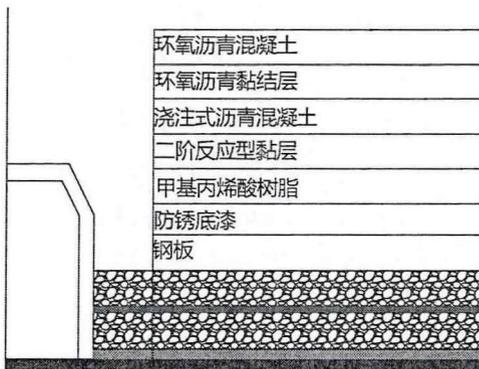


图 2-2 “下层浇注+上层 SMA”铺装结构示意图

3) “下层浇注+上层环氧”铺装结构

在“下层浇注+上层环氧”铺装结构中，浇注式沥青混凝土因其模量比环氧沥青混合料低，用作铺装下层可以起到应力吸收层的作用，有利于降低铺装表面应变。而环氧沥青混凝土具有优异的疲劳性能，用作铺装上层可以提供良好的路用性能。其铺装层结构组成如图 2-3 所示

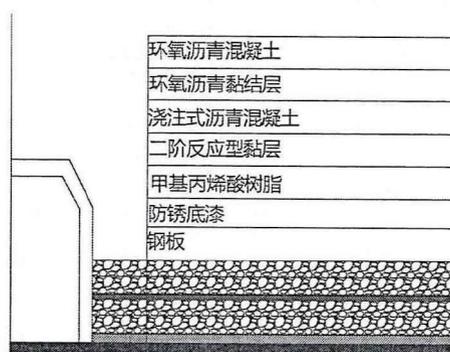


图 2-3 “下层浇注+上层环氧”铺装结构示意图

4) “下层环氧+上层 SMA”铺装结构

“下层环氧+上层 SMA”铺装结构是一种长寿命桥面沥青铺装方案，其铺装层结构组成如图 2-4 所示。铺装下层采用性能优异的环氧沥青混凝土，起到防水和保护钢桥面板的作用，而铺装上层采用 SMA 材料作为磨耗层，提供舒适、安全的行车环境。

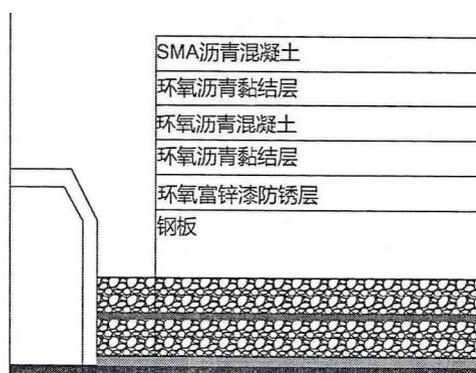


图 2-4 “下层环氧+上层 SMA”铺装结构示意图

2.1.3 现有路面 LCA 运用于钢桥面铺装层的适用性分析

参考目前有关路面生命周期分析模型的应用与研究成果，利用路面生命周期分析模型展开钢桥面沥青铺装层的环境影响研究可能出现以下问题：

1) 路面生命周期清单不能表征钢桥面铺装层

目前在有关路面生命周期分析模型的研究中已经建立起普通路面沥青混凝土生命周期清单，该生命周期清单是在根据沥青混凝土在普通公路应用时的生产工艺、施工流程等而建立的，涵盖了普通沥青混凝土路面生命周期内各个阶段的能耗和排放。

然而钢桥面铺装层所用沥青混凝土材料与普通路面沥青混凝土在生产、运输、摊铺等方面均存在一定区别。浇注式沥青混凝土生产过程中温度较高、运输和摊铺需要专用

机械、摊铺后不需要碾压；环氧沥青混凝土的结合料环氧沥青是一种多组分的混合物，生产工艺比普通石油沥青更为复杂。此外，由于钢桥面铺装层使用环境严苛，受力和变形较为复杂，其工作方式、病害机理上与普通沥青混凝土路面存在显著差异，因此普通沥青路面的养护维修方案并不能适用于钢桥面沥青铺装层。因此普通沥青混凝土路面生命周期清单中的能耗和排放数据并不能描述钢桥面铺装层的环境影响。

2) 无法评估研究结果的可信度

生命周期分析的结果是建立在大量输入数据的基础上，而由于受到来源、时间、技术等条件的制约，部分数据在一定程度上与真实值存在差距，因此导致生命周期分析结果并不能总是描述真实的环境影响水平，可信度即是指分析结果与真实值的接近程度，可信度越高，说明生命周期分析结果越接近真实的环境影响。然而目前已有的生命周期分析模型中均未包含对分析结果可信度评估的内容，相关的路面生命周期能耗与排放研究中也仅对数据来源做出了说明，并未定量的表述研究成果的可信度，因此阻碍了研究成果的应用。

基于以上分析，本研究拟对钢桥面沥青铺装层生命周期分析研究所需的基础数据进行收集，以期形成适用于钢桥面沥青铺装层的生命周期清单，并对已有路面生命周期分析模型进行改进，增加数据质量评估与控制的内容以验证分析结果的可信度，从而建立起钢桥面沥青铺装层的环境影响分析模型。

2.2 钢桥面铺装层生命周期分析方法

2.2.1 生命周期分析技术框架

生命周期分析是对产品整个生命周期内环境影响进行量化分析评价的一种方法，国际标准化组织将其定义为对一个产品系统的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价^[4]。经过几十年的发展，生命周期分析的应用对象已经从单一的工业产品逐渐扩展到资源开采、生产工艺以及各类工程项目等具有系统性质的评价对象，并且针对应用对象的日趋复杂化，生命周期分析方法也在不断地改进，以适应新的应用要求。目前，关于生命周期分析方法已形成了 ISO14040 和 ISO14044 两项通用国际标准，这两项标准确定了生命周期分析的原理及技术框架，并对生命周期分析的实施细则进行了规范，成为各项生命周期分析研究的基础。然而，这两项标准也存在一定的局限性。标准中所规定的生命周期分析框架只是一个程序性框架，并未详细规定生命周期分析各阶段的方法学，例如未能对分配问题、影响评价方法的选择等做出明确的规定。因此在展开生命周期分析研究时，需要根据各研究对象的特点制定更为详细的有针对性的框架。

根据 ISO 14040 标准的定义，生命周期分析研究包括目标与范围定义、清单分析、影响评价和结果解释 4 个阶段^[34]，如图 2-5 所示。

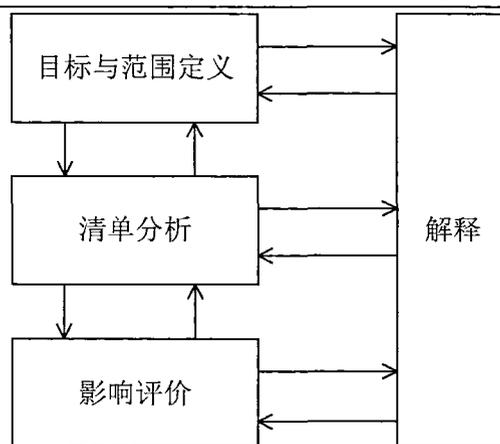


图 2-5 生命周期分析流程

1) 目标与范围定义

目标与范围定义是生命周期分析的第一步，直接影响到后续阶段的进行和最终的分析结果。这一阶段需明确生命周期分析研究的目的、范围以及功能单位和基准流。明确铺装层生命周期分析研究的目的是指确定其应用意图与开展研究的理由。在生命周期分析研究中，研究目标可以是分析某一类产品或服务全生命周期的环境影响，也可以是针对产品生命周期中某个特定阶段，不同的研究目标将导致清单数据来源和收集过程的差异。生命周期分析的范围包括所研究的产品系统和系统边界，由于物质与外界的联系可以无限延伸，而在现有的研究条件下研究范围无法无限扩大，因此需要规定合理的研究范围。目前国内外对于路面生命周期范围划分没有统一的规定，研究者需要根据研究目的和内容对路面生命周期范围进行合理划分，铺装层生命周期范围划分亦是如此。此外，功能单位选择也非常重要。功能单位量化了所选定的产品功能，其首要目的是为相关的输入和输出数据提供参考，以保证分析结果的可比性。对于钢桥面铺装层而言，功能单位通常用于强调其几何尺寸和使用性能。

2) 清单分析

清单分析是生命周期分析的基础，其主要内容是对相关数据进行收集和计算，以此来量化产品系统中相关的输入和输出。铺装层生命周期清单分析是对铺装层生命周期各个阶段能耗与排放的量化分析，内容包括资源和能源消耗、温室气体排放、大气污染（氮氧化物、可吸入颗粒物、二氧化硫等）。由于数据质量在很大程度上决定了分析结果的准确性，因此在进行数据时应选择来源可靠、具有代表性的数据。由于国内路面生命周期分析研究起步较晚，生命周期数据清单缺少基础数据支持，在收集铺装层生命周期数据时可以采用文献数据和实测数据相结合的方法。清单数据收集结束后，选择合理的计算方法计算铺装层的能耗和排放是清单分析的最终目标。目前路面生命周期分析中关于能耗的计算方法有实测法、理论法和定额法三种，而排放的计算方法则相对复杂，在对铺装层的能耗和排放进行计算时，需要结合可获得的数据选择合适的计算方法，以保证分析结果的准确性。

3) 影响评价

影响评价是生命周期分析的重要组成部分，其目的根据清单分析的结果对各种潜在

环境影响进行评价。这一过程包括清单分析结果分类和类型参数结果特征化。首先根据环境影响将清单数据分为不同的影响类型，如能源消耗、气候变化和人体健康损害等。在钢桥面铺装层生命周期分析中，可以根据可获得数据类型合理选择影响类型。其次，由于不同环境影响因子对环境影响的贡献程度不同，因此需要选择特征因子将不同影响因子的作用进行表征，从而获得以量化数值表示的综合性评价指标。该阶段的关键在于特征化因子的确定，目前国际上通用的特征化因子分为中点类型和端点类型。

4) 结果解释

结果解释是综合考虑清单分析和影响评价的一个阶段，即根据研究目标及范围的要求对清单分析及影响评价的结果进行归纳以形成结论及建议。该阶段是一个根据研究目的对所收集数据的性质和质量进行评审与修订的反复过程。此外，根据 ISO 14040 的要求，有必要对所使用数据的完整性、代表性等数据质量进行评价。

2.2.2 钢桥面铺装层 LCA 类型的选择

目前，根据系统边界和方法学原理的不同，可将生命周期分析方法分为三种不同的类型，即过程生命周期分析（Process-based LCA，简称 PLCA）、投入产出生命周期分析（Input-output LCA，简称 I-O LCA）以及混合生命周期分析（Hybrid LCA，简称 HLCA）。这三类生命周期分析方法各有优缺点，在研究具体问题时需要结合研究对象的特点选择合适的类型。

1) 过程生命周期分析 PLCA

过程生命周期分析是最为传统和经典的生命周期分析方法，其以产品系统的生命周期流程为基础，根据流程中资源、能源和排放的数据清单来进行评价。以钢桥面沥青铺装层为例，将铺装层生命周期各个阶段划分为更细化的单元过程，并研究每个单元过程的能耗和环境排放，最后将各个单元过程的结果进行加和，即可得到钢桥面铺装层整个生命周期的能耗和环境排放量。

该方法的优点是直观、可操作性强，能够对具体产品的环境影响进行精确的分析，并且可以根据研究的要求调整模型的范围和精度^[35]。然而过程生命周期分析方法不可避免的存在截断误差，由于完整的生命周期清单数据的收集需要不断向前推进，将流程细化至矿石和化石能源开采阶段，在这个过程中可能会出现分析规模难以控制和数据量较大的问题，因此往往需要人为的设置边界条件以排除一些影响较小的次一级流程，从而降低研究难度，并减少收集和分析数据的工作量。原则上所排除的过程应该对分析结果的影响不大，但这种处理方式难免带来一些截断误差，影响分析结果的准确性。

2) 投入产出生命周期分析 I-O LCA

为了解决 PLCA 在系统边界确定上的弊端，经济系统中的投入产出表分析方法被引入生命周期分析，从而形成了投入产出生命周期分析^[36]。与 PLCA 的自下而上分析方法相比，I-O LCA 是基于投入产出表的一种自上而下的生命周期分析方法。在分析过程中，首先利用经济投入产出表计算出部门层面的能耗及排放水平，再通过研究对象与经济部门的对应关系分析研究对象的环境影响。以钢桥面沥青铺装层生命周期分析中沥青生产

阶段为例，由于沥青是石油工业的产品之一，因此首先需要获得石油工业的直接能耗和排放，然后用沥青的价格乘以石油工业的能耗或排放强度，即可算出沥青生产过程所引起全部能耗或排放。

由于经济投入产出表的系统边界为整个国民经济系统，因此 I-O LCA 可以避免截断误差。但是由于 I-O LCA 采用的是部门层面的能耗和排放数据，因此分析结果只能是部门平均水平，而不能对部门内的产品进行比较。并且该方法假设在给定的部门中，不同产品的单位成本与环境影响具有正相关性，而实际情况与假设差距较大，在分析过程中难免会造成误差。此外，I-O LCA 仅能反映研究对象的生产阶段，不能反映其使用阶段，因此该方法的评价结果并不能反映全生命周期情况^[37]。

3) 混合生命周期分析 HLCA

由于 PLCA 和 I-O LCA 均具有一定的局限性，因此产生了混合生命周期分析方法，该方法将 PLCA 和 I-O LCA 有机结合，从而充分发挥这两种分析方法的优点，克服各自的缺陷。对于钢桥面铺装层而言，可以利用 I-O LCA 计算沥青混合料原材料生产过程的环境影响，而采用 PLCA 计算混合料拌合、运输、施工等阶段的环境影响。但由于 HLCA 出现时间不长，目前在路面生命周期分析中应用较少。并且 PLCA 和 I-O LCA 的边界划分问题较为复杂，使得该方法不易操作。

目前在路面生命周期分析中，PLCA 发展较为成熟，并且得到了广泛应用。对于钢桥面沥青铺装层而言，其生命周期可以认为是一个前后衔接的线性过程，各个过程涉及较多的产品投入，比较符合 PLCA 的使用特点。因此本文选择过程生命周期分析方法 PLCA 展开研究。

2.3 本章小结

本章主要介绍了钢桥面沥青铺装层常用材料以及铺装层典型结构，在对生命周期分析技术框架进行介绍后选取了适用于钢桥面铺装层的生命周期分析方法，主要结论有以下几点：

1) 由于现有普通沥青路面生命周期清单不能表征钢桥面铺装层的环境影响，同时已有的生命周期分析模型不能评估分析结果的可信度，因此需要对其进行改进，以建立适用于钢桥面铺装层环境影响研究的分析模型

2) 生命周期分析方法目前形成了三种类型，即过程生命周期分析、投入产出生命周期分析和混合生命周期分析，而结合钢桥面沥青铺装层的特点，本文选择过程生命周期分析方法展开研究。

第三章 钢桥面铺装层生命周期清单分析

生命周期清单分析是对整个生命周期过程中的资源和能源消耗以及排放等进行量化,完成这一阶段需要收集大量数据,因此清单分析是生命周期分析研究中最耗时耗力的环节,同时也是整个生命周期分析研究的基础。基于此,本章将钢桥面沥青铺装层的生命周期清单分析作为研究的重点。钢桥面沥青铺装层清单分析的核心是建立以 1 功能单位表达的铺装层生命周期内环境影响的量化值,本章将从原材料生产、混合料拌合、铺装层铺筑、运营管理和铺装层铲除五个阶段分别展开,对建立铺装层生命周期清单所需的数据展开详尽研究。

3.1 能耗与排放计算方法

钢桥面铺装层生命周期内产生的主要环境影响为能耗和气体排放,因此为建立生命周期清单,需获得生命周期内每个生产环节的能耗和气体排放。尽管有些环节的能耗和气体排放数据可以直接获取,然而大部分的数据仍需要选用合理的方法通过计算获得。

本研究采用净发热值法计算能耗,该方法可以将各种能源资源消耗数据转换为普通能源单位,如 MJ。净发热值法的通用计算公式如式(3.1)所示。

$$E = \sum_{i=1}^n (F_i \times NCV_i) \quad (3.1)$$

式中: E —综合能耗;

F_i —生产或服务过程中消耗的第 i 种能源资源消耗量;

NCV_i —第 i 种能源的净发热值。

式(3.1)中的能源净发热值采用《综合能耗计算通则》(GB/T 2589-2008)^[38]中提供的数据。对于能源资源消耗量,目前形成了三种计算方法,即实测法、理论法和定额法^[1]。实测法是指根据机械设备的实际使用情况测定其能源资源消耗量,通常采用生产企业的实测平均值用于计算。理论法即根据机械设备的标准参数,计算其在标准工况下的能源资源消耗量,该方法以设备在理想状况下运转为假设。定额法首先根据我国现行的《公路工程预算定额》(JTG/T B06-02-2007,以下简称预算定额)^[39]确定单位产量的机械台班数量,然后根据《公路工程机械台班费用定额》(JTG/T B06-03-2007,以下简称机械台班费用定额)^[40]查询机械设备的单位台班能源资源消耗量,最终计算得到单位产量的能源资源消耗量。上述三种计算方法各有其特点,实测法计算结果较为准确,但适用范围有限;理论法适用范围广,结果具有代表性,但可能出现误差;而定额法以国家权威部门颁布的相关标准为基础,具有较高的权威性,但其仅适用于定额中给出的机械设备的能耗计算。由于钢桥面沥青铺装层中涉及机械设备种类比较多,工艺流程复杂,因此本研究采用实测法、理论法和定额法相结合的办法,在保证计算结果具有广泛性和代表性的基础上,提高其准确性。

目前,路面生命周期种常用的排放计算方法为排放因子法。排放因子法以能源资源消耗量计算结果为基础,利用排放因子计算生命周期各阶段的排放量。排放因子是指单位质量、单位体积或单位距离的某种活动所产生的排放量,该方法的计算公式如式(3.2)所示。

$$Q = A \times EF \times \left(1 - \frac{ER}{100}\right) \quad (3.2)$$

式中: Q —气体排放量;

A —活动数据;

EF —排放因子;

ER —减排效率。

3.2 原材料生产阶段

普通沥青混合料主要由沥青、集料和矿粉组成,而钢桥面铺装层常用的三种沥青混合料在组成上与普通沥青混合料有所不同,从生命周期的角度来研究钢桥面沥青铺装层的环境影响时,需对每一种原材料的环境影响进行分析。

浇注式沥青混凝土是由较细粒径的集料、高比例矿粉以及一定比例的沥青,同时掺配 15%~35%的天然湖沥青 TLA 拌合生产的材料。其中,天然湖沥青 TLA 是石油在自然界长期受地壳挤压并与空气、水接触逐渐变化而形成的,以天然形态存在的沥青,生产过程不需经过原油开采、提炼等工艺流程,只需将其中杂质去除后即可直接使用,对环境污染小,可以忽略不计。石油沥青是原油蒸馏后的残渣,在其生产过程中需要消耗大量能源并产生气体排放。改性沥青是指在石油沥青中添加一定数量的改性剂,使普通石油沥青性能得以改善而制成的沥青材料。与石油沥青相比,改性沥青的生产工艺增加了改性剂生产、剪切等加工过程,因此改性沥青的能耗与排放与石油沥青存在较大差异。对于这两种沥青的环境影响,国内尚缺乏权威数据,而在国外相关数据中,欧洲沥青协会(European Bitumen Association, 简称 EBA)所发布的沥青生命周期清单数据应用范围较广,具有较高的权威性,并且欧洲的原油开采、沥青提炼等工艺与我国相对来说比较接近,因此本研究将采用 EBA 报告中有关石油沥青和改性沥青的生命周期清单数据,如表 3-1 所示^[41]。

集料和矿粉的生产过程中涉及到石料开采、破碎、振动筛分等工艺流程,所产生的环境影响主要来源于各种机械设备的运转。本研究拟采用瑞士 Ecoinvent 数据库中关于集料的矿粉的生命周期清单数据,ecoinvent 数据库是目前国际上应用十分广泛的生命周期清单数据库,其数据质量高、来源透明,采用该数据库可以保证数据的可信度。

改性 SMA 的组成材料包括改性沥青、集料和矿粉,此外,为了防止混合料在拌合及运输过程中存在析漏现象,通常在 SMA 中加入一定含量的纤维稳定剂。在钢桥面铺装层改性 SMA 中,纤维稳定剂的添加量一般为混合料质量的 0.2%~0.8%。而根据目前生命周期分析中常用的取舍规则,当普通物料重量 < 1% 产品重量时,可忽略该物料的上游生产数据^[42]。因此,本研究将不考虑纤维稳定剂的环境影响。

表 3-1 石油沥青与改性沥青的生命周期清单

生产 1t 沥青（不考虑建设过程）		石油沥青	改性沥青
原材料消耗 (kg)	原油	1000	988
能源资源消耗 (kg)	天然气	20.1	50
	原油	40.9	59.9
	煤	1.03	8.5
排放到大气 (g)	CO ₂	174244	295910
	SO ₂	781	1630
	NO _x	770	1375
	CO	613	671
	CH ₄	595	1085
	碳氢化合物	46.8	1063
	非甲烷挥发性有机化合物	331	331
	微粒	161.2	265

环氧沥青混凝土是一种由环氧树脂、固化剂与基质沥青经过复杂的化学改性后与一定级配的集料、矿粉拌制所得的混凝土材料。目前，国内常有的环氧沥青包括美国环氧沥青、国产环氧沥青和日本环氧沥青，其中，国产环氧沥青的各项使用性能基本达到了美国环氧沥青的标准，而成本大大降低，具有较高的经济效益和社会效益^[43]。因此，本研究将以国产环氧沥青为研究对象，分析其生命周期内的环境影响。由于环氧树脂和固化剂一旦混合，即发生固化反应，因此，一般情况下，环氧沥青的组成材料分成两个组分分别生产和放置。环氧树脂为 A 组分，固化组为 B 组分，该组分主要包括基质沥青、固化剂以及其它添加剂。环氧树脂的生命周期清单数据可以从 Ecoinvent 数据库直接获取。而固化剂种类较为繁多，主要包括多元胺类、酸酐类、醇类及合成树脂类，其中又以多元胺类和酸酐类固化剂最为常用，占到所用固化剂的 94%^[44]。本研究通过对国内外文献和数据库展开调研，获得了酸酐类固化剂的环境影响数据，如表 3-2 所示^[45]。

表 3-2 酸酐类固化剂的能耗与排放数据

项目	能源消耗 (GJ/t)	CO ₂ 排放 (kg/t)
酸酐类固化剂	78.9	3960

环氧沥青 B 组分是将沥青、固化剂和改性剂通过搅拌、剪切、混合等工艺进行强制高效物理共混而形成的均匀稳定的多组分混合物，其生产流程及产污环节如图 3-1 所示。目前，国内外尚无环氧沥青 B 组分生产过程的环境影响研究，因此无法直接获得其能耗与排放数据。本研究对国内环氧沥青生产厂家展开调研，获取环氧沥青 B 组分在生产过程中能耗和排放的实测值，如表 3-3 所示^[46]。

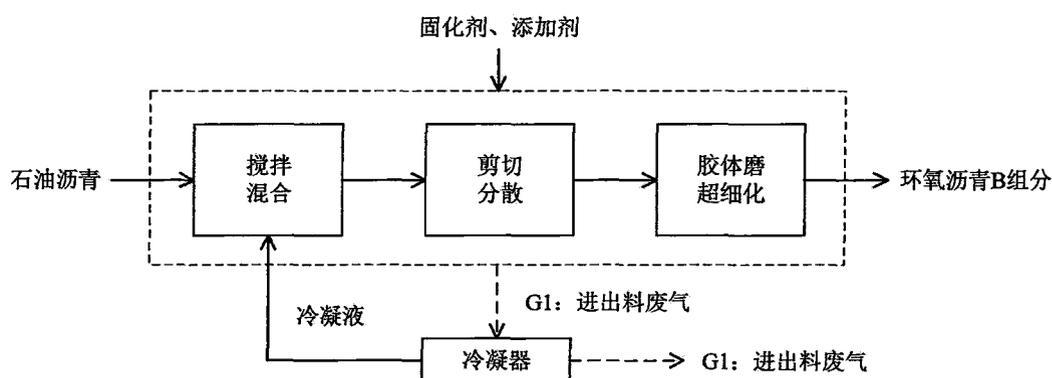


图 3-1 环氧沥青 B 组分生产流程及产污环节

表 3-3 环氧沥青 B 组分生产过程的能耗和排放数据

项目	能源资源消耗		排放到大气		
	燃煤 (kg)	电 (kW·h)	SO ₂	NO _x	烟尘
生产 1t 环氧 沥青 B 组分	25.2	58.5	23.388	47.25	19.975

3.3 混合料拌合阶段

沥青混合料的拌合是将一定级配的沥青、集料和矿粉等原材料通过拌合设备在特定温度下拌合均匀而形成混合料的过程，其工艺流程包括冷料烘干与计量、沥青加热与计量、集料与沥青拌合等环节，能耗主要来源于加热环节的燃料燃烧与设备运行的电力消耗，同时产生一定的气体排放。

3.3.1 混合料拌合的能源消耗

由于改性 SMA、浇注式沥青混凝土和环氧沥青混凝土的拌合过程存在很大差异，因此本研究将对这三种沥青混合料分别进行分析。

1) 改性 SMA

预算定额和台班费用定额中已提供了 SMA 混合料拌合过程中的相关数据，因此本研究采用定额法计算 SMA 混合料拌合过程中的能耗。

预算定额中明确了拌合 1000m³ 的 SMA 混合料所需各种机械设备的台班数，机械台班费用定额中则规定了每一台班机械的燃料和电力消耗，根据这两项数据可以计算得到拌合过程中总能源消耗，计算过程如表 3-4 所示。

2) 浇注式沥青混凝土

在沥青混凝土拌合过程中，拌合站的能量转换形式为燃料化学能转换为热能以及电能转换为机械能。浇注式沥青混凝土与普通沥青混凝土拌合工艺相类似，两者的主要区别在于浇注式沥青混凝土拌合温度更高，拌合时间相对更长。因此，浇注式沥青混凝土拌合过程消耗的电能可以参考普通沥青混凝土计算。《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004) 对普通热拌沥青混合料的加热温度做出了规定，在使用强制间歇式拌和设备

的情况下, 沥青加热温度在 150°C~170°C 之间, 集料加热温度比沥青加热温度高 10°C~30°C^[47]。而浇注式沥青混凝土的拌合温度高达 220°C~240°C, 沥青加热温度为 165°C~180°C 左右, 若矿粉常温添加, 则集料的加热温度高达 280°C~320°C。沥青和集料的加热是混合料拌合过程中产生能耗的重要环节, 因此有必要对其进行详细分析。

表 3-4 SMA 混合料拌合的能源资源消耗

单位: 1000m³

沥青拌合设备 (t/h)	台班	重油消耗 (kg/台班)	电力消耗 (kW·h/台班)	累计消耗	
				重油 (kg)	电力 (kW·h)
				④=①×②	⑤=①×③
120	4.65	3590.40	1859.23	16695.36	8645.4195
160	3.09	4787.20	3052.46	14792.448	9432.1014
240	2.07	7180.80	4474.63	14864.256	9262.4841
320	1.57	9574.40	5917.61	15031.808	9290.6477

针对沥青混凝土拌合过程中的能耗, 唐皓^[48]曾提出加热温度修正系数 K 的概念, 用以考虑不同加热温度对综合加热油耗的影响。但是该方法并没有考虑到集料含水量变化对能耗的影响, 相关研究表明, 在集料烘干过程中, 集料的含水量每降低 1%, 燃料消耗率可以降低 10%^[49], 因此在计算混合料拌合的能耗时需考虑到集料烘干的能耗。本研究采用热力学平衡方程, 通过理论计算的方法来获取浇注式沥青混凝土拌合过程中的能耗。

集料加热过程所需热量包括两个部分: 集料加热至烘干温度所需热量与集料中水分升温汽化所需热量, 假设集料和水分在温度变化过程中比热值为定值, 列出集料加热过程中的需热量计算公式, 如式 3-3 所示。

$$Q_{\text{需}} = C_a M (1 - \omega) (T_d - T_0) + C_w M \omega (T_1 - T_0) + M \omega L_v + C_s M \omega (T_d - T_1) \quad (3.3)$$

式中: $Q_{\text{需}}$ —集料加热过程的需热量 (J);

C_a —集料的比热容 (J/(kg·°C)), 可取为 920J/(kg·°C);

M —集料质量 (kg);

ω —集料含水量 (%);

T_d —集料的烘干温度 (°C);

T_0 —集料的初始温度 (°C);

C_w —水的比热容 (J/(kg·°C)), 可取为 4200J/(kg·°C);

T_1 —水的汽化温度 (°C), 通常为 100°C;

L_v —水的潜伏热 (J/kg), 可取为 2256 J/kg;

C_s —水蒸气的比热容 (J/(kg·°C)), 可取为 1926J/(kg·°C)。

目前, 大部分沥青混凝土拌合站都使用重油作为加热集料的燃料。由于重油具有复杂的结构和组分, 在燃烧时并不能完全燃烧, 此外, 重油燃烧所产生的热量也不能完全被集料吸收, 而是存在一定的热损耗, 因此本研究定义参数 η 为烘干筒传热效率和参数

θ 为燃料燃烧热效率，根据热力学平衡方程，建立起集料加热的热力学平衡公式，如式 (3.4) 所示。

$$Q_{需} = \eta \cdot \theta \cdot Q_{供} \quad (3.4)$$

式中： $Q_{需}$ —集料加热过程的需热量 (J)；

η —烘干筒传热效率；

θ —燃料燃烧热效率；

$Q_{供}$ —燃料完全燃烧提供的热量 (J)。

本研究以预算定额中给出的各项数据为基础，以生产 1000m^3 的沥青玛蹄脂碎石混合料为例计算集料加热效率。首先根据式 (3.3) 计算出集料加热过程所需的总热量为 330GJ ，设定计算参数如表 3-5 所示；然后根据机械台班定额查得生产 1000m^3 的沥青玛蹄脂碎石混合料所需重油数量为 12638.21kg ；对于重油燃烧热效率 θ ，战尧文^[50]通过计算得到沥青混凝土拌合站在加热集料时，重油燃烧效率为 0.88 ，并利用实测数据验证了该结果具有可信度，因此本文引用该结果进行计算。由此可以计算得到加热效率 η ：

$$\begin{aligned} \eta &= Q_{需} / (\theta \cdot Q_{供}) \\ &= 330 \times 10^6 / 12638.21 / 400000 \\ &= 74\% \end{aligned}$$

表 3-5 集料加热过程需热量的计算参数

项目	沥青拌合设备 (t/h)	重油热值 (kJ/kg)	T_a ($^{\circ}\text{C}$)	T_0 ($^{\circ}\text{C}$)	M (kg)	ω (%)
数值	240	400000	175	25	2234366	3

按照国家交通行业标准 JT/T 270-2002《强制间歇式沥青混合料搅拌设备》规定，干燥滚筒的热效率不得低于 70% ^[51]。李海鹏^[52]应用理论分析与软件仿真相结合的方法对沥青混凝土拌合站的干燥滚筒进行研究，该研究得出干燥滚筒的热效率为 72.79% 。王鑫^[53]则应用干燥动力学曲线，建立起干燥滚筒的传热、传质方程，分析得到集料烘干筒的热效率为 79.8% 。本研究的计算结果接近上述研究结果，具备可信度。因此，本研究即采用该方法计算浇注式沥青混凝土集料加热过程的能耗。

已有的路面生命周期分析中尚无有关沥青加热能耗的研究，本研究仍利用热力学平衡方程来计算沥青加热的能耗。导热油加热方式是国内外广泛使用的沥青加热方式，该方法利用加热至较高温度的矿物油作为传热介质，使其在导管内循环流动来加热管外的沥青。根据热力学平衡方程建立起该加热过程的热力学平衡公式，如式 (3.5) 所示。

$$Q_{沥青} = K \cdot Q_{燃料} \quad (3.5)$$

式中： $Q_{沥青}$ —沥青加热过程的需热量 (J)；

K —沥青加热效率；

$Q_{燃料}$ —燃料完全燃烧提供的热量 (J)。

刘晓丽^[54]通过理论分析和计算得到沥青加热系统的工作效率为 20%，本研究对市场常见的导热油加热沥青罐展开调研，调研结果显示每加热 1 吨沥青，沥青加热罐需消耗 20kg~30kg 标准煤当量，利用式 (3.5) 计算可以得到沥青实际加热效率在 15%~23% 之间，刘晓丽的计算结果符合该实测结果，可以认为该结果是可信的，因此本研究将沥青加热效率 K 设定为 0.2，并运用其计算浇注式沥青混凝土拌合过程中加热沥青的能耗。

3) 环氧沥青混凝土拌合

环氧沥青混凝土拌合工艺与普通沥青混凝土拌合工艺相似，主要区别在于环氧沥青的添加。环氧沥青混凝土拌合过程中需使用环氧沥青专用混合设备将 A 组分和 B 组分加热、按比例混合和反应，从而生成环氧沥青结合料，并按施工要求将环氧沥青结合料喷射进搅拌缸。考虑到环氧沥青两组分的化学特性和施工要求，环氧沥青混合设备采用电热带加热方式。相关研究显示沥青罐加热功率为 29.5 kW，环氧罐加热功率为 11.5kW^[55]。对于环氧沥青混凝土集料加热系统的能耗，本研究仍采用热力学平衡方程进行计算，而电能的计算则参考普通沥青混凝土。

3.3.2 混合料拌合的环境排放

在沥青混合料拌合过程中，燃料的燃烧会产生大量气体排放，包括 CO_2 、 NO_x 、 SO_2 、颗粒性物质 PM 等，此外，集料在堆放过程会产生大量无组织排放粉尘，因此影响沥青混合料拌合过程环境排放的重要环节在于集料输送和沥青混合料拌和两个阶段。由于沥青混合料拌合过程所涉及的环境排放种类较多，计算相对复杂，目前国内缺少相关研究。因此本研究在对国内沥青混凝土拌合站排放进行调研的基础上，提出符合我国实际的排放因子。

根据污染物形态，沥青混凝土拌合站的环境排放可以分为固体颗粒物排放和气态污染物排放两大类，气态污染物排放来自燃料燃烧，固体颗粒物排放来自燃料燃烧和集料堆料。从产生源角度，又可以将排放分为燃料燃烧产生排放和非燃料燃烧产生排放。目前沥青混凝土拌合站大多使用重油作为燃料，重油燃烧时产生的排放可以利用排放因子法计算获得。本文根据《第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数手册》^[56]确定重油在工业锅炉中燃烧时的排放因子。

非燃料燃烧产生的环境排放包括集料在烘干滚筒加热和振动筛筛分过程中产生的粉尘，以及集料堆棚无组织排放的粉尘。集料在筛分和烘干加热过程中会产生一定粉尘，但是由于集料比重比较大，粉尘产生量较小。根据本研究对沥青混凝土拌合站的调研^[57]，集料在传送和拌合时的粉尘产生量约为集料用量的 0.1%左右，并且通常采用布袋除尘器进行除尘，除尘效率在 99%以上，因此该部分粉尘排放可忽略不计。而在集料卸料、堆放过程会产生无组织排放粉尘，该环节粉尘发生系数约为 0.02kg/t，通常拌合站对堆场进行定期洒水抑尘，采取此措施后，可以将扬尘量可减少 70%~80%，本研究取中间值 75%进行计算得到沥青混凝土拌合站的粉尘排放系数为 0.015kg/t。综上所述，本研究建立起符合国内沥青混凝土拌和站实际生产情况的排放因子，如表 3-6 所示。

表 3-6 沥青混凝土拌合站的排放因子

单位:g/kg

污染物种类	CO ₂	SO ₂	NO _x	微粒
数值	3126.96	1.9	3.28	3.62

3.4 铺装层铺筑阶段

铺装层铺筑阶段是使用各种运输车辆和施工机械使用最为密集的阶段，该阶段产生的能耗与排放主要来源于燃料燃烧。

3.4.1 混合料运输阶段

1) 混合料运输的能耗

改性 SMA 和环氧沥青混凝土的运输一般采用大吨位自卸汽车，而浇注式沥青混凝土在运输途中还需要不断搅拌和保温，以免混合料发生离析或温度降低而无法施工，因此通常浇注式沥青混凝土使用专用运输设备 Cooker 进行运输。其中，预算定额和机械台班定额已经给出了改性 SMA 运输过程中的相关参数，因此可以利用定额法获得改性 SMA 运输过程的能耗，如表 3-7 所示。

表 3-7 SMA 混合料运输的能源资源消耗

单位: 1000m³

15t 以内自卸汽车		台班	柴油消耗 (kg/台班)	累计柴油消耗 (kg)	
第一个 1km		7.99	67.89	542.44	
每增运 0.5km	平均运距 (km)	5 以内		0.73	938.92
		10 以内		0.65	1336.75
		15 以内		0.62	1721.01

对于环氧沥青混凝土和浇注式沥青混凝土的运输能耗，本研究采用理论法进行计算。国外已有研究提出了路面建设过程中材料运输过程的能耗计算公式^[58]，如式 (3.6) 所示。本研究以该公式为基础，结合沥青混合料运输过程的实际情况，对环氧沥青混凝土和浇注式沥青混凝土的运输能耗进行分析。

$$E_{total} = (1 + \alpha) \cdot \sum_{i=1}^N E_i \quad (3.6)$$

式中： E_{total} —运输过程总能耗 (J)；

α —返程系数；

N —运输车辆数；

E_i —每一运输车辆的能耗 (J)。

返程系数 α 的值主要取决于返程是否负载，当空载返程时，与重载去程组成一个运输流程，此时 α 取 0.8；当负载返程时，可视为一个独立的运输流程，此时 α 取 0。本研究假定混合料运输过程中均为满载去程，空载返程。

在钢桥面铺装层铺筑时,为了保证铺筑工作的连续性,车辆数量必需满足拌合设备连续生产的要求。运输车辆数量 N 可以根据拌合设备生产能力、车辆的载重能力及运输时间等因素确定,可按下式计算^[59]:

$$N = \beta \cdot (t_1 + t_2 + t_3) \cdot \frac{G}{60G_0} \quad (3.7)$$

式中: N —运输车辆数;

β —储备系数,视交通情况而定,一般取 $\beta=1.1\sim 1.2$;

t_1 —重载运程时间 (min);

t_2 —空载运程时间 (min);

t_3 —装料和等待总时间 (min);

G_0 —车辆载重能力 (t);

G —沥青混凝土拌合设备生产能力 (t/h)。

以环氧沥青混凝土为例计算其运输所需车辆数。由于环氧沥青混凝土是一种热固性材料,其强度形成过程不仅与温度密切相关,在很大程度上还受到反应时间的影响,因此需要对其施工时的温度和时间进行严格控制。相关研究显示,环氧沥青混凝土在不同温度下对容留时间的要求不同,当施工温度为 110°C 时,容留时间范围为 $42\text{min}\sim 90\text{min}$;当施工温度为 130°C 时,容留时间范围为 $30\text{min}\sim 55\text{min}$ ^[60]。本研究假设容留时间为 30min ,摊铺时间为 10min ,重载去程时间为 20min ,同时假定空载返程时间和重载去程时间相同。当选用生产能力为 240t/h 的沥青混合料拌合设备和装载能力为 15t 的混合料运输车时,根据式 (3.7) 计算得到运输车辆数为 $14\sim 15$ 。可采用同样方法计算浇注式沥青混凝土运输过程中所需车辆数。

浇注式沥青混凝土专用运输设备 *Cooker* 兼具搅拌、加热保温和运输的功能,其主要组成部分包括沥青混凝土搅拌系统、加热系统和搅拌罐储存系统。目前市面上常见的 *Cooker* 分为卧式和直立式两种,本研究选择装载能力为 13t 的卧式 *Cooker* 作为代表展开市场调研。*Cooker* 的燃烧器和发动机均以柴油作为动力来源,根据本研究的调研结果得到 *Cooker* 每小时消耗柴油 11.92kg ^[61]。然后根据式 3-7 计算得到浇注式沥青混凝土运输车辆数以及运行时间,即可得到浇注式沥青混凝土运输过程的能耗,计算过程这里不再累述。

2) 混合料运输的排放

在沥青混合料运输过程中主要环境排放来自柴油燃烧过程产生的各种气态污染物,国内外均对柴油的排放因子进行了大量研究。为了使研究结果能够更好地符合我国实际情况和特点,本研究采用中国生命周期基础数据库 (CLCD) 的相关数据,CLCD 数据库由四川大学和亿科环境科技有限公司联合开发,其数据主要来自国内行业统计及文献,是中国本地化的生命周期基础数据库,代表了中国市场的平均水平。

3.4.2 现场施工阶段

沥青混合料运输至施工现场后,还需要经过摊铺、压实才能完成钢桥面铺装层铺筑

的完整过程。在铺装层铺筑过程中,各种机械设备不会进行长距离的行驶,因此,机械设备的类型是影响铺装层铺筑过程能耗的排放的主要因素。

1) 现场施工的能耗

钢桥面铺装层 SMA 混合料的摊铺碾压工艺与普通沥青混合料的摊铺碾压工艺没有太大区别,对机械设备也没有特别要求。预算定额中确定了铺筑与压实 SMA 混合料时所需的机械台班数量,因此本研究采用定额法计算 SMA 混合料施工时的能耗,计算过程与混合料拌合、运输过程一致,这里不再累述。

浇注式沥青混凝土是一种自密成型、无须碾压的沥青混合料,其摊铺过程需使用浇注式混凝土专用摊铺机。该摊铺机主要由三部分组成:自行牵引系统、混合料摊铺系统以及前置的布料系统。本研究对目前市场上常见的浇注式混凝土专用摊铺机展开调研,获得其每小时消耗柴油 4.59kg^[62]。而环氧沥青混凝土的铺筑环节与普通沥青混凝土施工并无太大差异,因此该部分的能耗计算可参考普通沥青混凝土施工能耗计算。

2) 现场施工的排放

区别于沥青混合料运输过程,铺装层铺筑时所需要的各种机械设备均为非道路移动源,如何确定这些非道路移动源的排放因子是本部分计算的关键。目前,国际上最流行的非道路移动源排放因子计算方法是使用美国环保局发布的 NONROAD 模型,该模型将非道路移动源机械按照燃油类型和发动机功率进行了类,排放量以非移动源发动机保有量、发动机功率、负荷因子、活动水平等因素作为自变量来进行计算^[18],但该模型并不对外提供免费使用。在国内的路面生命周期中,大部分研究均借用了道路移动源的柴油机排放因子进行计算,因此计算结果与实际排放存在一定出入。为了使研究结果最大程度符合实际情况,本研究采用《非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值及测量方法(中国第三、四阶段)》(GB 20891-2014)^[61]中提供的相关数据。

3.5 运营管理阶段

钢桥面沥青铺装层完成铺筑并开放交通后,即进入运营管理阶段。该阶段包括两个子阶段:车辆运行和铺装层维修养护。由于钢桥面铺装层运营过程中的主要功能是为车辆提供平整、舒适的行车环境,当铺装层出现病害,导致使用性能下降时,车辆的行驶状况会受到影响,从而导致能耗和排放增加^[64]。然而,车辆的油耗是多种外部因素综合作用的结果,车辆类型、驾驶速度、车辆载重、驾驶人驾驶技术等因素都会对汽车油耗产生影响,很难将这些因素剥离对铺装层使用性能部分进行单独分析。因此,目前还难以从理论角度明确铺装层使用性能与车辆油耗之间的定量关系。基于此,本文在对运营管理阶段进行分析时将车辆运行阶段排除,仅研究铺装层维修养护所产生的环境影响。

随着钢桥面沥青铺装层服务使用年限的增加和铺装材料性能的下降,铺装层在使用过程中将不可避免的出现一些病害,进而影响到桥梁的顺畅运营,对病害的及时维修可以提高铺装层的使用性能,延长铺装层使用寿命。根据沥青路面养护的分类标准和钢桥面支撑的特点,可以将钢桥面沥青铺装层的养护分为三种类型,即预防性养护、矫正性

养护和铺装层重建^[33]。

预防性养护针对铺装层正常使用状态下的部分功能性缺失，以延缓铺装层损坏、延长铺装层使用寿命为目的，需要在铺装层出现明显破坏前进行，主要手段包括裂缝填封、雾封层、微表处等。矫正性养护则是用于铺装层结构和使用功能遭到破坏时，如局部严重车辙和较大面积裂缝，常用处治方法是将病害影响范围内的铺装挖除后重新铺装。预防性养护中的裂缝填封以及矫正性养护均是针对铺装层的局部病害，以人工养护手段为主，工程量较小，所造成的环境影响相对而言可以忽略不计。而铺装层重建后可以认为是进入一个新的生命周期，新铺装层已不属于原铺装层生命周期的范围。因此，本研究在计算钢桥面铺装层运营管理阶段的能耗和排放时，重点分析以微表处为代表的预防性养护技术。

微表处技术是指由聚合物改性沥青、100%轧碎石料、填料、水和必要的添加剂组成，使用专门的施工设备拌合摊铺的一种表面处置技术。微表处混合料按矿料公称最大粒径的不同，分为 MS-2 型和 MS-3 型。其中 MS-3 型微表处混合料，公称最大粒径为 9.5mm，可用于典型钢桥面沥青铺装层的车辙填充与罩面，提高铺装层抗滑能力，延长铺装层的使用寿命。在微表处材料的组成材料中，石料和水的清单数据可以直接从 CLCD 数据库中获得，而填料一般采用普通水泥，其用量不超过微表处材料总量的 1%，根据生命周期分析取舍规则，该部分环境影响可以忽略不计。对于改性乳化沥青，目前国内外尚无相关的生命周期数据，因此本研究选用欧洲沥青协会发布的乳化沥青生命周期数据来进行替代，如表 3-8 所示^[41]。

表 3-8 乳化沥青的生命周期清单

生产 1t 沥青（不考虑建设过程）		乳化沥青
原材料消耗（kg）	原油	1001.1
能源资源消耗（kg）	天然气	21.9
	原油	44.9
	煤	5.32
排放到大气（g）	CO ₂	203746
	SO ₂	876
	NO _x	835
	CO	629
	CH ₄	640
	碳氢化合物	63
	非甲烷挥发性有机化合物	338
	微粒	185.5

微表处施工过程中需使用专用摊铺机械，根据微表处施工工艺的要求，该专用摊铺机械必须具有给料、拌合、摊铺和计量控制等功能。微表处摊铺车通常由盘系统、作业动力系统、给料系统、拌和系统、摊铺系统和控制操作系统等组成，并且由柴油提供动力。由于无法直接获得微表处摊铺车的能耗等相关数据，而相关研究表明微表处摊铺车可以认为是一种高层次的稀浆封层车^[65]，因此本研究采用预算定额和机械台班费用定额中提

供的稀浆封层车能耗数据进行替代。

3.6 铺装层铲除阶段

当普通的维修养护措施已经无法使钢桥面沥青铺装层使用性能达到最低要求时，需要将原有铺装层铲除后铺装新的铺装层。钢桥面沥青铺装层铲除时通常使用铣刨机进行铣刨，为了保护钢桥面板，一般地，铣刨厚度控制为以铣刨到原有铺装层剩余厚度为 $25\text{mm}\pm 5\text{mm}$ 止，然后由人工凿除残余铺装。机械台班定额中对铣刨机的油耗进行了说明，本研究即采用定额法对铣刨过程中的能耗和排放进行计算，如表 3-9 所示。

表 3-9 铺装层铲除的能源资源消耗 单位： 10m^3

项目	台班	柴油消耗 (kg/台班)	累计柴油消耗 (kg)
$10\text{m}^3/\text{min}$ 以内机动空压机	0.76	24	18.24

3.7 本章小结

本章对环氧沥青混凝土、浇注式沥青混凝土和 SMA 三种常用铺装材料各生命周期阶段进行了详细分析，包括原材料生产、混合料拌合阶段、铺装层铺筑阶段、运营管理阶段和铺装层铲除阶段的主要工艺流程、能源消耗和排放来源等，主要结论如下：

1) 生命周期分析能源资源消耗计算方法有实测法、理论法和定额法三种，在钢桥面铺装层生命周期分析研究中采用以上三种方法相结合的办法，以保证生命周期清单的完整性；而排放则采用排放因子法进行计算。

2) 在混合料拌合阶段，SMA 混合料拌合的能耗可以由定额法获得，而浇注式沥青混合料和环氧沥青混合料的能耗则利用理论法计算得到；提出了符合国内沥青混凝土拌合站实际生产情况的排放因子，从而获得三种沥青混合料拌合的排放。

3) 钢桥面沥青铺装层铺筑过程中，对于无法利用定额法直接计算的环节，根据本研究对机械设备实际使用情况的调研，结合理论法进行能耗计算；排放因子选用国内本地化数据以提高分析结果的可信度。

4) 铺装层运营管理阶段主要考虑以微表处为代表的预防性养护技术所产生的环境影响，可以利用理论法计算得到环境影响量化值，而铺装层铲除阶段的能耗与排放则可以通过定额法计算得到。

第四章 钢桥面铺装层环境影响分析模型研究

钢桥面沥青铺装层在建设使用过程中消耗大量资源和能源，并产生大量气体排放，对环境造成严重负担。因此，随着我国环境问题的日益凸显，有必要对钢桥面沥青铺装层的环境影响展开全面分析。上一章已经对钢桥面铺装层的生命周期清单分析进行了研究，建立起铺装层生命周期内能耗与排放流程，为环境影响分析模型的建立奠定了基础。本章将根据钢桥面铺装层的特点，对已有路面生命周期分析模型进行改进，增加对数据质量进行评估和控制的环节，以期形成一个完整的钢桥面铺装层环境影响分析模型。

4.1 目标与范围定义

4.1.1 研究目标

本研究运用生命周期分析的方法对钢桥面沥青铺装层从原材料的开采到最终结构物拆除整个生命周期内的环境影响进行分析和量化，主要目标如下：

1) 得到钢桥面铺装层在生命周期内各个阶段产生环境影响的量化结果，分析环境影响较大的环境，为铺装层节能减排提供理论依据。

2) 通过对环氧沥青混凝土、浇注式沥青混凝土和 SMA 三种常用铺装材料的环境影响进行研究，为钢桥面铺装层的材料比选提供环境影响方面的数据支持。

4.1.2 研究范围

前一章在钢桥面沥青铺装层的生命周期清单进行分析时，将铺装层生命周期划分为原材料生产、混合料拌合、铺装层铺筑、运营管理和铺装层铲除四个阶段。通过该分析得出在混合料拌合阶段沥青混合料拌合是重要影响因素，同时环氧沥青混凝土、浇注式沥青混凝土和 SMA 三种铺装材料的拌合过程存在较大差异，因此本研究将沥青混合料拌合过程单独划分为一个阶段进行分析。基于此，本研究的范围包括原材料生产阶段、混合料拌合阶段、铺装层铺筑阶段、运营管理阶段以及铺装层铲除阶段。

钢桥面沥青铺装层生命周期内环境影响因素种类较多，涵盖面较广，在生命周期各个阶段均涉及到基础设施建设和机械设备生产等间接相关环节，如沥青厂建设、沥青混合料拌合楼建设、摊铺机生产等。由于现阶段我国生命周期分析还缺乏足够的支撑，因此本研究不考虑间接相关环节，仅分析与铺装层直接相关的环节。同样，由于缺少基础数据，本研究仅对铺装层生命周期内产生的主要气体排放进行分析，而不考虑水体污染和土壤污染等。本研究的研究范围如图 4-1 所示。

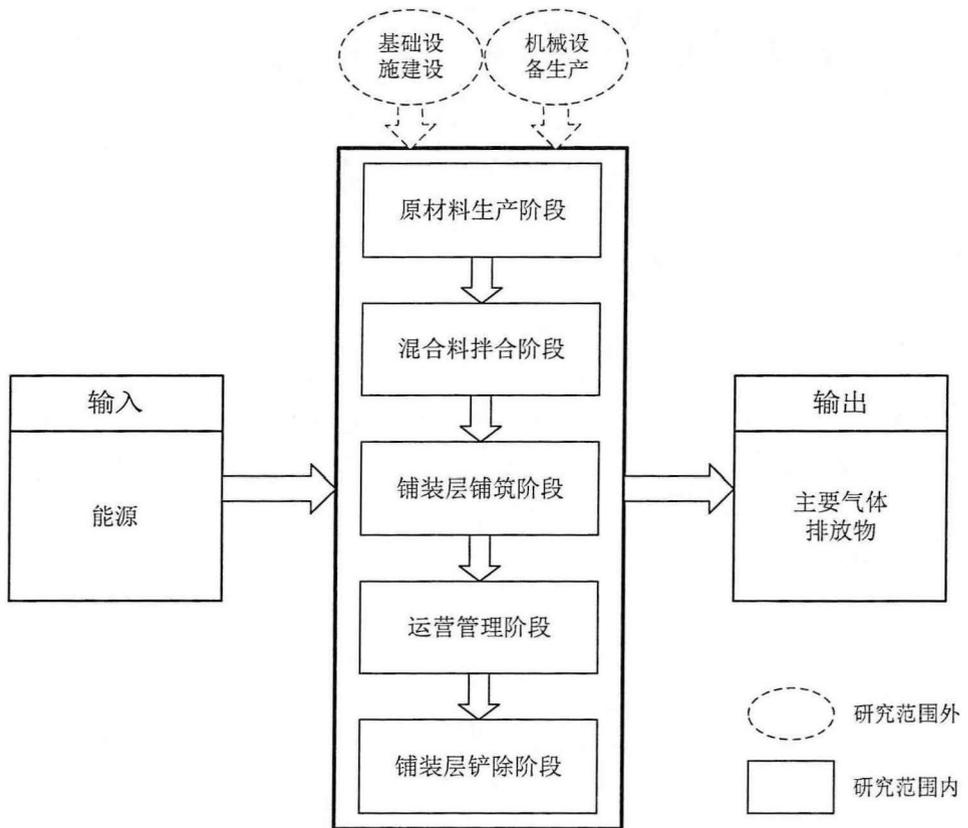


图 4-1 钢桥面铺装层生命周期分析研究范围

4.1.3 功能单位与基准流

为了能够比较同一类型的不同产品或服务，需要选择一个具有可比性的功能单位。通常，功能单位可以是一定数量的产品或服务。在路面生命周期分析，常常采用一定长度的路面作为基准单位。然而，考虑到不同结构的钢桥面沥青铺装层在厚度上具有一定区别，本研究采用 1000m^3 的沥青混合料作为功能单位。

4.2 影响评价

按照上一章的内容完成对钢桥面铺装层生命周期清单分析后，得到的是有关环境影响的繁杂数据，影响评价阶段则是根据影响效果将繁杂的数据为不同的影响类型，并将数据转化为具有实际意义的参数，以便进一步对结果进行解释和评价。通常，这一阶段包括清单分析结果分类和特征化两个步骤。

4.2.1 清单分析结果分类

清单分析所得到的数据代表了某一环境影响因子的具体数值，然而，很多环境因子对环境造成的影响效果相同或类似，因此，清单分析结果分类就是将影响效果相同或类似的影响因子归为一类，如 CO_2 、 CH_4 等气体均会导致温室效应，在分析时将其归为一类。目前，生命周期分析中的影响类别包括全球气候变化、资源消耗、人体毒性影响和

生物多样性等,在钢桥面沥青铺装层生命周期中,主要的环境影响为能源消耗和气体排放,因此,本研究采用能源消耗、气候变化和人体健康这三种目前社会关注度较高的环境影响类型作为主要研究类型。

4.2.2 特征化模型选择

特征化模型选择的主要内容为特征因子的确定,其目的是将不同种类的清单数据汇总为综合性的评价指标,从而使得分析结果更加直观,便于展开更全面的分析。目前,国际上通常将特征化因子分为中点型和端点型两种类型^[66]。中点型特征因子侧重于环境的影响类别及其作用机理,描述了各种环境影响因素的相对重要性,如 CO₂、CH₄ 和 N₂O 等气体都会导致温室效应,但这几种气体对温室效应的贡献程度不同,中点型特征因子即代表了各种气体对温室效应的贡献值。由于中点型特征因子通常是基于物质的基本性质而得到,与环境背景条件无关,因此中点型特征因子原则上没有区域限制。而端点型特征因子是基于更复杂的环境特征化模型得到的,包含了不同地区的环境背景条件(如大气、水体、土壤、生态系统条件)。但端点类特征因子的模型非常复杂,需要大量的环境背景数据支持,目前国内相关研究甚少。因此本研究选用中点型特征因子对清单数据进行计算,其计算公式如式(4.1)所示。

$$EI = \sum_i (I_i \times C_i) \quad (4.1)$$

式中: EI —特征化指标;

I_i —第 i 个影响因素的清单数据;

C_i —第 i 个影响因素的特征因子。

本研究选用的特征化指标包括初级能源消耗(Primary Energy Demand,简称 PED)、全球变暖潜值(Global Warming Potential,简称 GWP)、酸化(Acidification Potential,简称 AP)和可吸入无机物(Respiratory Inorganics,简称 RI),其中全球变暖潜值 GWP、酸化 AP 和可吸入无机物 RI 分别以 CO₂ 当量、SO₂ 当量和 PM_{2.5} 当量表示。根据特征化指标对国内外的数据库展开调查,最终获得各特征化指标对应的特征化因子,将其汇总于表 4-1。

表 4-1 特征化指标与特征因子

影响类别	特征化指标	影响因素	特征因子单位	特征因子	来源
能源消耗	初级能源消耗	柴油、重油、天然气等	MJ	1	
气候变化	全球变暖潜值	CO ₂	kg CO ₂ eq/kg	1	IPCC2013 ^[67]
		CH ₄		28	
	酸化	SO ₂	kg SO ₂ eq/kg	1	CML2002 ^[68]
		NO _x		0.7	

人体健康	可吸入无机物	总颗粒物	kg PM2.5 eq/kg	0.157	IMPACT2002+[69]
		CO		0.00104	
		SO ₂		0.078	
		NO _x		0.127	

4.3 结果解释

结果解释是指将清单分析和影响评价的结果进行归纳, 所得到的结果应该与所规定的目标和范围保持一致, 并对结果进行解释和提出相应的建议。ISO 14040 中建议结果解释阶段可包含一个对所收集数据的性质和质量进行评审和修订的阶段。通过对获得的数据进行质量评估, 对其中质量较低的数据进行改进, 以保证生命周期分析结果的可信度。然而, 国内已有路面生命周期分析模型中均未对分析结果的可信度进行分析。目前, 国内外生命周期分析研究中均采用不确定度指标来描述清单数据质量, 因此本研究参考已有的生命周期清单不确定性分析研究成果, 建立对钢桥面铺装层生命周期清单数据质量进行评估和控制的方法。

生命周期分析中的不确定度包括数据不确定度和分析结果不确定度, 数据不确定度是指通过调研、实验或计算得到的数据与真实值之间的差异, 分析结果不确定度是指由于清单数据不确定度在计算过程中传播, 从而导致计算得到的环境影响结果与真实环境影响值的差异。由于生命周期分析中不确定度分析研究起步较晚, 发展相对不够成熟, 目前尚未形成一整套完整统一的不确定度分析方法。生命周期分析中已有的不确定度分析方法包括蒙特卡罗模拟、泰勒系列展开式、数据质量指标法等, 但以上方法均具有一定局限性, 如利用蒙特卡罗模拟和泰勒系列展开式可以评估分析结果不确定度, 但是不能确定清单数据对分析结果不确定度的贡献度; 数据质量指标法仅能表征数据不确定度, 无法评估分析结果不确定度。本研究将数据质量指标法和蒙特卡罗模拟进行结合, 应用数据质量指标法评估数据不确定度和蒙特卡罗模拟评估分析结果不确定度, 同时结合敏感度分析来评价数据质量对分析结果不确定度的影响。结合钢桥面铺装层生命周期清单分析过程, 本研究建立起铺装层生命周期清单数据质量评估和控制流程, 如图 4-2 所示。

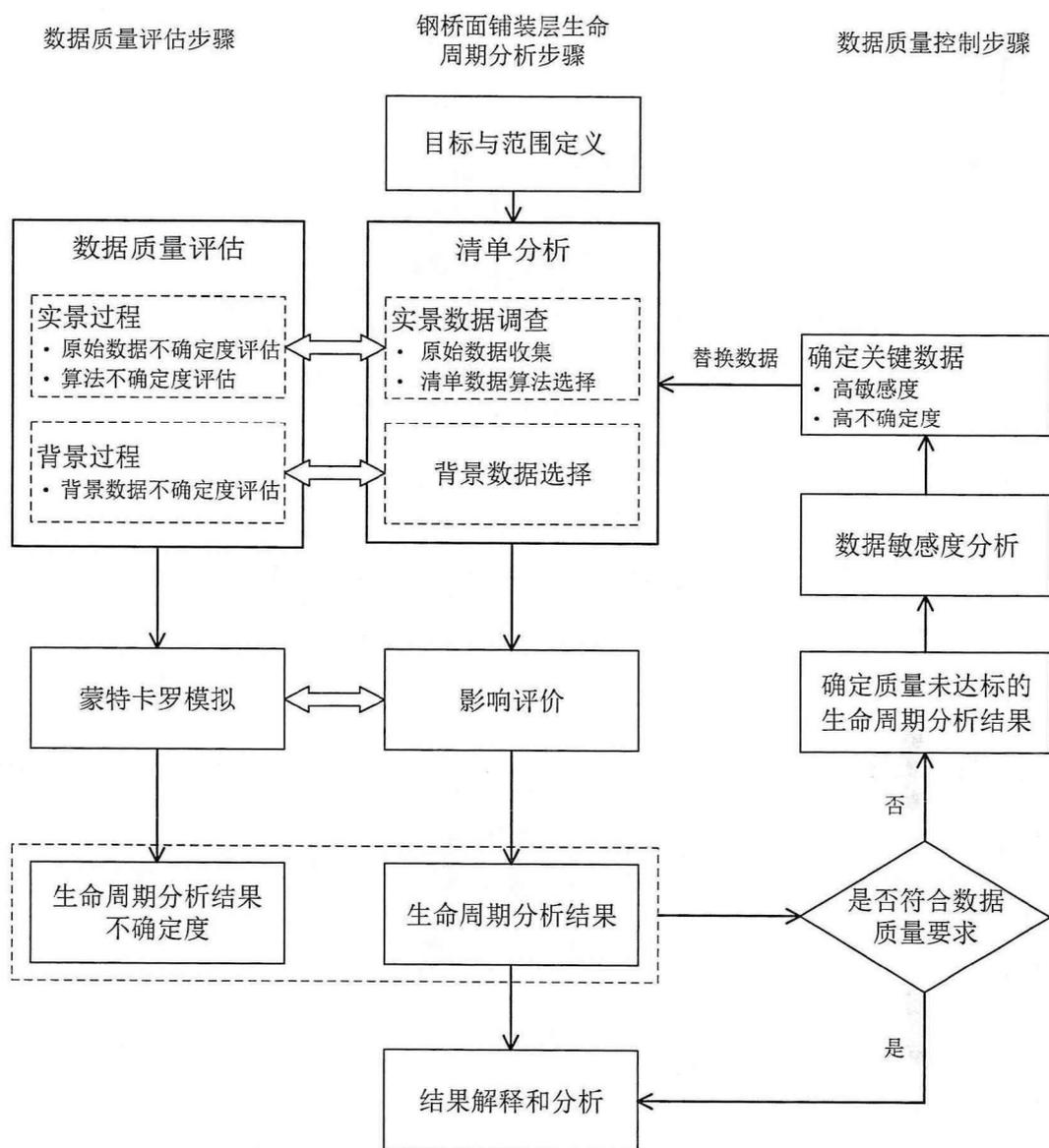


图 4-2 铺装层生命周期清单数据质量评估和控制流程

4.3.1 数据质量评估

从数据来源划分，钢桥面铺装层生命周期清单数据可以分为实景过程清单数据和背景过程清单数据。实景数据是指根据对生命周期单元过程的调查，将原始数据经过计算转换为此单元过程相对应的输入和输出数据，以沥青混合料拌合阶段为例，根据投入的沥青、集料等原始数据计算得到的能源消耗即为混合料拌合阶段的实景数据。而背景数据是指直接从生命周期数据库获取的清单数据，如集料的生命周期清单数据。由于实景数据和背景数据决定了生命周期分析结果，因此其数据质量也是决定生命周期分析结果可信度的重要原因。此外，由于各原始数据和清单数据的不确定度在生命周期分析过程中进行传播，进而导致分析结果具有一定的不确定度，因此本研究还包含应用蒙特卡罗模拟对分析结果不确定度进行评估。

4.3.1.1 1 实景清单数据不确定度评估

1) 原始数据不确定度评估

数据质量指标法是指基于信息谱系矩阵的评分方法,信息谱系矩阵一般包括数据来源、时间和地域等数据基本特征指标,从这些方面对数据评分从而获得其不确定度。本研究采用 Ecoinvent 数据库提出的半定量谱系矩阵,如表 4-2 所示^[70]。当对原始数据进行质量评估时,根据半定量谱系矩阵获得各原始数据的基本不确定度 U_i ,然后将 U_i 合并从而得到原始数据总体的不确定度 U_r ,计算方法如式 (4.2) 所示。

$$U_r = \sqrt{\sum_i^5 U_i^2} \quad (4.2)$$

式中: U_r —实景数据不确定度;

U_i —第 i 个数据不确定度指标值。

表 4-2 数据不确定度半定量谱系矩阵

指标	数据说明				
	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
来源可靠性 (U_1)	现场调查或测量得到的原始数据 (0)	来自权威的、定期更新的数据 (0.025)	来自于一般文献或专著的不定期更新数据 (0.050)	基于文献或经验的推论,估计或假设 (0.100)	无根据的估算与假设 (0.200)
样本完整性 (U_2)	充足的样本,合适的期间 (0)	代表数据来自稍小范围但期间合适 (0.010)	代表数据来自合适的范围但期间稍短 (0.025)	来自小范围和期间的代表数据或来自充足的范围和期间的数据 (0.050)	未知和来自小范围与短期间的不足数据 (0.100)
技术代表性 (U_3)	从被研究企业得到的数据 (0)	技术、过程和原料相同,但企业不同 (0.025)	技术相同,但过程和原料有差别 (0.100)	技术不同,但产品相同 (0.200)	数据缺失时,以类似产品的数据替代 (0.350)
时间代表性 (U_4)	与时间无关或 3 年以内 (0)	6 年以内 (0.015)	10 年以内 (0.050)	15 年以内 (0.100)	数据年代未知或 15 年以上 (0.200)
地域代表性 (U_5)	来自研究区域数据 (0)	来自包含研究区域的较大区域范围的平均数据 (0.005)	数据来自生产条件和生产力水平相似度较高的区域 (0.010)	数据来自生产条件和生产力水平相似度较中等的区域 (0.025)	数据来自未知区域或生产条件和生产力水平完全不同的区域 (0.050)

注:括号中数值为各级对应的不确定度。

2) 算法不确定度评估

算法是指将原始数据转化为单元过程清单数据的计算步骤,其不确定度取决于所选算法的合理性,黄娜等人对生命周期清单分析中常见的算法进行收集和分类,并规定了每种算法的不确定度,如表 4-3 所示^[31],对照该表即可获得算法不确定度 U_a 。综合原始数据和算法两方面,通过式 (4.3) 可以计算得到实景过程的最终不确定度。

$$U_{foreground} = \sqrt{U_r^2 + U_a^2} \quad (4.3)$$

式中: $U_{foreground}$ —实景过程不确定度;

U_r —实景数据不确定度;

U_a —算法不确定度。

表 4-3 清单数据算法的不确定度

算法	说明	不确定度
直接获取算法	直接得到获得的原始数据作为清单数据	0
总量算法	研究范围内(产出/污染物排放)总量/研究范围内产出总量	0
平衡算法	根据已知实测数据,通过各种物料、元素或能量的平衡计算得到	0.025
(半)经验算法	根据工程实际经验获得的算法(经验公式),或者理论公式的经验修正(半经验公式)得到的数据	0.050
理论算法	基于化学反应方程式、产品设计方案等,未经过经验修正获得的数据	0.100

4.3.1.2 背景清单数据不确定度评估

本研究中的背景数据均来自各权威生命周期数据库,因此其不确定度 $U_{background}$ 包含两个部分:一是由数据库提供的清单数据不确定度 U' ;二是由背景数据代表性和研究目的的代表性之间的差异而导致的代表性不确定度 U_i ,此不确定度可以根据表 4-2 中后三个指标获得。因此,背景过程的不确定度可按下式计算获得:

$$U_{background} = \sqrt{U'^2 + U_3^2 + U_4^2 + U_5^2} \quad (4.4)$$

式中: $U_{background}$ —背景过程不确定度;

U' —背景数据不确定度;

U_3 —技术代表性不确定度;

U_4 —年份代表性不确定度;

U_5 —地理代表性不确定度。

综合实景清单数据不确定度和背景清单数据不确定度,可计算得到各清单数据的最终质量评估结果,如式 (4.5) 所示。清单数据的不确定度越小,则说明其越接近真实值。

$$U = \sqrt{U_{foreground}^2 + U_{background}^2} \quad (4.5)$$

式中： U —清单数据总不确定度。

4.3.1.3 生命周期分析结果不确定度评估

蒙特卡罗模拟是一种不确定度随机模拟分析法，其在生命周期分析中的应用是以概率分布代替确定数值，即将环境影响因素考虑为随机变量，将其清单分析结果表达为统计分布的结果。

在生命周期影响评价过程中，利用清单数据计算得到分析结果的过程可视为随机变量的函数取值问题，即：

$$Y=g(X) \quad (4.6)$$

式中： Y —分析结果；

X —清单数据；

g —分析结果和清单数据的转换关系，由影响评价模型决定。

然后确定清单数据 X 的统计分布类型，在生命周期分析中，数据的统计分布类型包括正态分布、对数正态分布、均匀分布、三角形分布等，其中对数正态分布可以较好的代表来源单一或样本量较小的数据，满足了大多数生命周期数据的分布特征^[31]。因此本研究假设清单数据均服从对数正态分布，则其概率分布函数为：

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.7)$$

由于清单数据不确定度可由选定分布类型下的标准偏差 σ 表示，因此根据清单数据不确定度可确定概率函数的特征参数。随后根据该概率分布函数对清单数据进行 N 次抽样，从而获得 N 个相对应的分析结果，对这 N 个分析结果进行统计，根据其分布参数进而确定分析结果不确定度。

4.3.2 数据质量控制

本研究将分析结果不确定度定义为数据质量控制指标，同时规定钢桥面铺装层生命周期数据质量标准为 10%，即当铺装层生命周期分析结果的不确定度小于 10% 时，可以认为该分析结果具有可信度。对于未达标的分析结果，则需要确定对分析结果不确定度贡献最大的关键数据，从而有针对性的寻找更高质量的数据，有效提高分析结果可信度。

由于蒙特卡罗模拟无法确定各原始数据和清单数据的不确定度对分析结果不确定度的影响程度，因此本研究采用敏感度指标来衡量数据不确定度与结果不确定度的关系。敏感度分析是对数学模型中输入变量对输出结果影响程度进行定量分析的方法，在生命周期分析中，敏感度的定义为：

$$S_{mn} = (\Delta O_m / O_m) / (\Delta I_n / I_n) \quad (4.8)$$

式中： S_{mn} — I_n 对 O_m 的敏感度；

O_m —第 m 种特征化指标值；

I_n —第 n 种清单数据值或原始数据值。

当数据 I_n 变化时，相应的特征化指标值 O_m 也会发生变化， S_{mn} 即是 I_n 对 O_m 的敏感度， S_{mn} 的值越大，说明此数据对特征化指标的影响就越大。因此，需要进行改进的关键数据即为高敏感度和高不确定度的数据。

通过以上数据质量评估和数据质量控制步骤，可以定量地描述钢桥面铺装层生命周期分析结果的可信度，同时也可以根据数据不确定度分析和敏感度分析，不断改进数据质量，使得生命周期分析结果更可信。

4.4 模型参数与分析工具

4.4.1 模型参数

经过以上生命周期分析步骤，即可建立起基于生命周期分析的钢桥面沥青铺装层环境影响分析模型，该模型可以计算环氧沥青混凝土铺装层、浇注式沥青混凝土铺装层和改性 SMA 铺装层的环境影响。对于不同的铺装结构，只需调整输入参数即可得到分析结果。由于该模型计算过程较为复杂，所涉及的参数较多，因此本研究将各阶段所需输入参数整理如表 4-4 所示。

表 4-4 模型参数

类别	输入变量	单位
功能单位	铺装面积	m ²
	铺装层厚度	m
原材料生产	混合料密度	kg/m ³
	配合比	
沥青混合料拌合	集料加热温度	°C
	沥青加热温度	°C
	集料含水率	%
铺装层铺筑	拌合站距施工现场平均运输距离	km
	铺装层施工时间	h
运营管理	养护面积	m ²
	养护频率	
铺装层铲除	铲除厚度	m
	铲除面积	m ²

4.4.2 分析工具

目前，国外已有较多生命周期分析软件，如 Gabi、Simapro 等，而国内专业的生命

周期分析软件相对较少，主要以四川大学和亿科环境科技有限公司联合开发的 eBalance 和 efootprint 软件为主。本研究应用 efootprint 软件完成建模和分析过程，该软件是在线的 LCA 数据填报和分析平台，可基于 web 实现供应链的数据调查、数据库集成、LCA 建模和分析、数据质量评估等功能，从而大幅提高 LCA 工作效率和提高分析结果可信度。图 4-3 为借助该软件建立的钢桥面改性 SMA 铺装层生命周期模型。



图 4-3 钢桥面 SMA 铺装层环境影响分析模型

4.5 本章小结

本章以生命周期分析基本理论为依据，在钢桥面沥青铺装层生命周期清单分析研究的基础上，对路面生命周期分析模型进行改进，增加了数据质量评估和控制环节，从而建立起钢桥面铺装层环境影响分析模型。本章详细阐述该模型的研究目的与范围、影响评价指标、敏感度与不确定度等质量评估方法等，主要结论有以下几点：

1) 本模型的目的是获得钢桥面铺装层生命周期环境影响的量化值，其研究范围包括从原材料生产到铺装层铲除的全生命周期，模型的计算对象为铺装层的能耗和主要气体排放。

2) 本模型主要分析的环境影响类别为能源消耗、气候变化和人体健康，相应的特征化指标包括初级能源消耗 PED、全球变暖潜值 GWP、酸化 RI 和可吸入无机物 AP。

3) 本模型利用敏感度和不确定度两项指标进行数据质量评估，识别从原始数据收集到影响评价等各个阶段的关键数据，并通过蒙特卡罗模拟获得分析结果的不确定度，将其作为数据质量控制指标，规定当分析结果不确定度小于 10%时，可以认为分析结果具有可信度，反之则需对关键数据进行替换，从而通过数据迭代提高模型分析结果的可信度。

4) 只需确定铺装层生命周期各阶段输入参数的值，即可通过本模型获得铺装层环境影响的量化值，建模和求解过程可以借助 efootprint 软件完成。

第五章 钢桥面典型铺装层环境影响研究

本章拟选择钢桥面典型铺装结构中应用较为广泛的“双层环氧”铺装结构和“下层浇注+上层 SMA”铺装结构，应用前一章所建立的铺装层环境影响分析模型分析这两种典型铺装结构的环境影响，并根据分析结果提出节能减排相关建议。

5.1 案例背景

本研究对国内已建成的钢桥面“双层环氧”铺装层和“下层浇注+上层 SMA”铺装层展开调研，参照目前常用的铺装结构厚度组合，选定“双层环氧”铺装层的结构组成为 30cm 环氧沥青混凝土铺装上层+30cm 环氧沥青混凝土铺装下层，“下层浇注+上层 SMA”铺装层的结构组成为 35cm 改性 SMA 铺装上层+35cm 浇注式沥青混凝土铺装下层，结构示意图如图 5-1 所示。本研究将结合国内钢桥面铺装层的工程实践确定各模型参数的值。

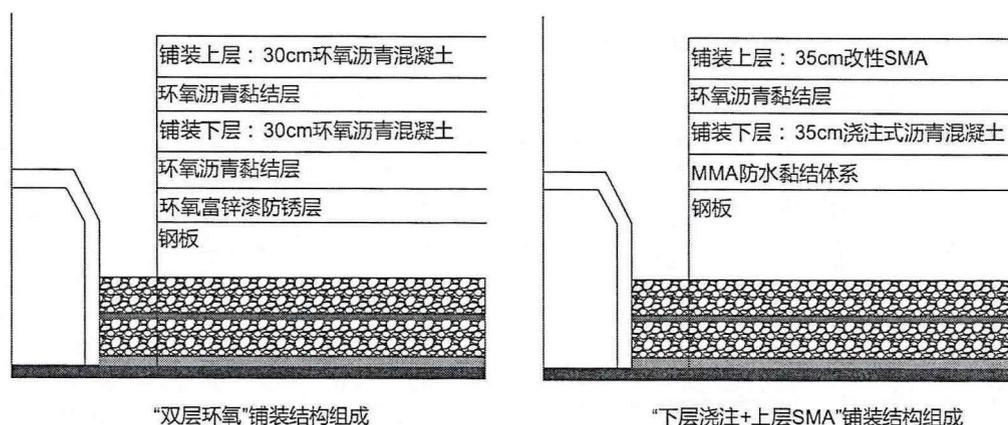


图 5-1 典型铺装层结构组成示意图

5.1.1 模型参数的确定

为了消除铺装规模和设计年限不同带来的影响，使得分析结果具有可比性，本研究选择长 500m、宽 11.25m 的半幅桥面作为功能单位。在路面生命周期分析中，分析期通常选取路面最长设计使用年限。根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JT.G D64-2015)^[71]中的相关规定，钢桥面铺装的设计使用年限宜不小于 15 年。结合我国各钢桥面铺装层的设计实践，本研究选取 15 年为分析期，将分析期内的能耗与排放量化分析结果统一表示为 MJ/功能单位和 kg/功能单位。

通常情况下，由于钢桥面铺装层预测交通量、环境等因素的不同，各铺装层的材料组成比例都不尽相同，本研究根据调研结果，选择经典油石比和常用材料组成，确定了各铺装层的材料组成比例，如表 5-1 所示。

表 5-1 铺装层组成材料

单位: t

沥青混合料种类	浇注式沥青结合料	改性沥青	环氧沥青结合料	集料	矿粉
环氧沥青混凝土			26.475	366.488	40.725
浇注式沥青混凝土	37.615			336.488	106.275
改性 SMA		26.25		392.963	43.65

5.1.2 养护频率与养护面积

目前国内外常用的预防性养护时机确定方法有行驶质量指数法、破坏指数法、基于时间或路况的方法、效益费用评估法和决策树法等,其中,效益费用评估法是利用预防性养护措施的效益和比值来衡量,并不会受到不同评价指标的影响,在普通沥青路面的预防性养护时机选择中已得到了广泛应用。因此,本研究选用效益费用评估法来确定预防性养护时机。

在效益费用评估法中,效益面积是指评价指标的衰变曲线与该指标的最低可接受水平基线所围成的面积,实施预防性养护后,效益面积会变大,该面积增量则被定义为预防性养护效益面积,随后只需计算预防性养护效益面积与其养护费用的比值,当效益费用比最大时,即为实施预防性养护的最佳时机。本研究应用费用效益比评估法选取预防性养护时机的步骤可以归纳为以下三个方面。

5.1.2.1 评价指标和最低可接受水平线的确定

目前已有的路面生命周期分析研究中,在确定预防性养护时机时选取了不同的路面性能评价指标,如杨博^[1]选用了路面损坏状况指数 PCI,而李肖燕^[20]则选用了国际道路平整度指数 IRI 作为路面状况的评价标准。由此可见,在预防性养护时机确定中并没有规定的特定指标,而是需要结合预防性养护的目的和要求,有针对性的选择性能评价指标。

微表处具有抗滑、耐磨、防水等功能,可以有效地改善铺装层表面的防滑性能,通常适用于抗滑性较差的铺装面。基于此,本研究参考王睿^[72]建立的钢桥面铺装用封层性能评价指标体系,包括封层后表面构造深度、抗滑性能、防渗水性能和封层耐久性能四个方面,从中选择抗滑性能作为性能评价指标,以摆式摩擦试验摆值 BPN 作为抗滑性能的评价标准;同时,根据其提出的钢桥面铺装用封层性能评价指标分级标准,选取摆式摩擦试验摆值 BPN 的最低可接受水平为 45。此外,当铺装层抗滑性能为优时,即 BPN 的值大于 55 时,不需要进行预防性养护,因此可将 BPN 处在 45~55 区间时的时间段作为实施微表处的时机选择区间。

5.1.2.2 性能指标衰变曲线

由于目前缺少国内钢桥面沥青铺装层抗滑性能指标的长期观测数据,本研究参考

已有的铺装层抗滑性能衰减模型研究成果^[73,74], 得到钢桥面改性 SMA 铺装层和环氧沥青混凝土铺装层的 BPN 衰减规律公式, 如式 (5.1) 所示, 相应的衰变曲线如图 5-2 所示。

$$y = Ae^{Bx} \quad (5.1)$$

式中: y —摆式摩擦试验摆值 (BPN);
 x —标准轴载作用次数 (万次);
 A 、 B —经验系数, 取值见表 5-2。

表 5-2 BPN 与荷载作用次数的指数回归系数和相关系数

混合料类型	A	B	R^2
环氧沥青混凝土	79.217	-0.0006	0.9759
改性 SMA	74.054	-0.00126	0.9458

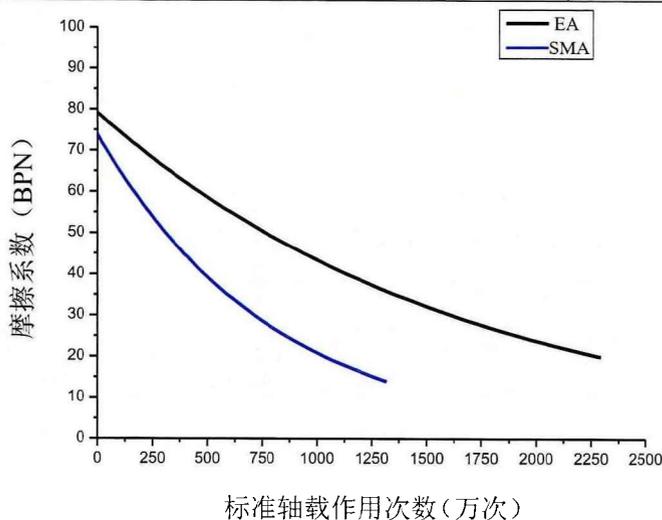


图 5-2 BPN 衰变曲线

5.1.2.3 效益费用比的计算

由 BPN 衰变曲线可知, BPN 为下降型性能指标, 则可根据下降型性能指标效益面积计算出预防性养护效益面积, 计算方法如图 5-3 所示。

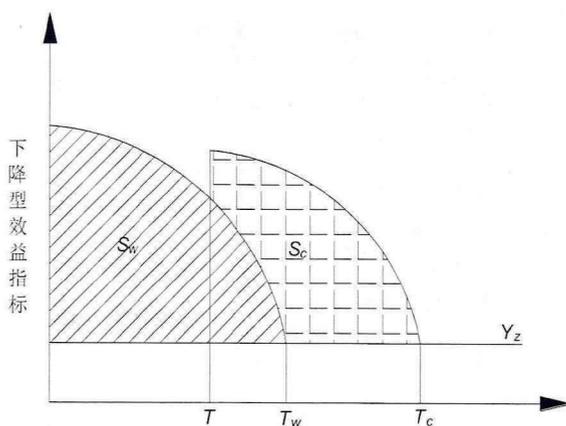


图 5-3 下降型性能指标预防性养护效益面积计算图示

图中： S_w —未采取预防性养护措施时的效益面积；

S_c —预防性养护效益面积；

Y_z —最低可接受水平线；

T —采取预防性养护措施时间；

T_w —未采取预防性养护措施时指标衰变到最低可接受水平的时间；

T_c —采取预防性养护措施后指标衰变到最低可接受水平的时间。

根据图 5-3，在确定性能指标和最低可接受水平线以后，只需根据实施预防性养护措施的时间 T 和采取预防性养护措施后性能指标衰变到最低可接受水平的时间 T_c ，即可计算得到预防性养护效益面积。将不同养护时机的预防性养护效益面积与各自的费用相比，所得到的效益费用比最大者即为最佳养护时机。

以改性 SMA 铺装层为例，当其 BPN 在 45~55 之间时，利用式 (5.1) 可计算得到轴载作用次数为 236.1 万次至 395.3 万次之间，即当钢桥面改性 SMA 铺装层受到 236.1 万次至 395.3 万次的标准轴载作用时可采取微表处措施进行养护。根据国内已有的大跨径钢箱梁桥交通量调查与预测，钢箱梁桥的月平均标准轴载作用次数在 15 万次左右^[72]，因此改性 SMA 铺装层实施微表处的最佳养护时机在其投入使用后的第 15 个月至 26 个月之间。利用同样的方法可以得到环氧沥青混凝土铺装层受到轴载作用次数为 608.1 万次至 942.5 万次时为实施微表处措施的区间，即实施微表处养护措施的最佳时机在 41 个月至 63 个月之间。

然而，由于采取预防性养护措施后的铺装层性能衰变规律目前缺少实测数据和相关研究，本研究暂时无法计算。今后可在获得更多的铺装层预防性养护数据后，根据图 5-3 进一步确定实施预防性养护的最佳时机。本研究将采用中间值来进行计算，即认为改性 SMA 铺装层在投入使用后第 20 个月实施微表处，而环氧沥青混凝土铺装层则是在第 52 个月实施微表处。

5.2 影响评价与数据质量评估

5.2.1 影响分析结果

在确定各项模型输入参数的值以后，即可应用第四章建立起的生命周期分析模型对“双层环氧”铺装层和“下层浇注+上层 SMA”铺装层的环境影响展开研究，将分析结果阐述如下。

通过应用模型分析得到的是“双层环氧”铺装层和“下层浇注+上层 SMA”铺装层在生命周期内产生环境影响的量化值，具体表现为特征化指标的值，包括初级能源消耗 PED、全球变暖潜值 GWP、酸化 AP 和可吸入无机物 RI，分析结果汇总如表 5-3 所示。

表 5-3 典型铺装层环境影响分析结果

分析结果		原材料生产	混合料拌合	铺装层铺筑	运营管理	铺装层铲除	全生命周期
PED (MJ)	GA+SMA	1.97E+06	8.50E+05	8.52E+04	3.20E+05	2.19E+04	3.25E+06
	EA+EA	1.74E+06	3.32E+05	4.87E+04	3.20E+05	1.70E+04	2.46E+06
GWP (kg CO ₂ eq)	GA+SMA	6.45E+04	7.68E+04	7.10E+03	8.04E+03	1.82E+03	1.58E+05
	EA+EA	6.34E+04	2.23E+04	4.06E+03	8.04E+03	1.42E+03	9.93E+04
AP (kg SO ₂ eq)	GA+SMA	1.76E+02	2.10E+02	4.91E+01	5.10E+01	2.12E+01	5.08E+02
	EA+EA	1.59E+02	6.05E+01	2.81E+01	5.10E+01	1.31E+01	3.12E+02
RI (kg PM _{2.5} eq)	GA+SMA	3.20E+01	4.08E+01	9.06E+00	9.06E+00	2.33E+00	9.32E+01
	EA+EA	3.00E+01	1.27E+01	5.18E+00	9.06E+00	1.81E+00	5.87E+01

5.2.2 数据质量评估

在完成钢桥面典型铺装层环境影响量化后，仍需对模型中所使用的数据进行质量评估，以保证模型输出结果的可信度。

5.2.2.1 数据不确定度与敏感度分析

1) 敏感度分析

按照第四章的方法计算清单数据变化对于各特征化指标的敏感度，当敏感度低于10%时，可以认为该数据的质量对分析结果可信度影响不大，而对于敏感度大于10%的数据，应重点分析其数据质量，以保证分析结果的可信度，因此本研究筛选出敏感度高于10%的数据，表 5-4 至表 5-7 为各清单数据和原始数据对于特征化指标初级能源消耗 PED、全球变暖潜值 GWP、酸化 AP 以及可吸入无机物 RI 敏感度大于 10% 的数据。

表 5-4 各清单数据对 PED 敏感度

单元过程-清单数据	GA+SMA	单元过程-清单数据	EA+EA
原材料生产-改性沥青	39.58%	原材料生产-环氧沥青 A 组分	45.12%
原材料生产-石油沥青	38.43%	运营管理-乳化沥青	24.59%
石油沥青生产-原油	36.22%	原材料生产-环氧沥青 B 组分	20.05%
改性沥青生产-原油	35.70%	环氧沥青 B 组分生产-石油沥青	18.74%
混合料拌合-重油	11.09%	石油沥青生产-原油	17.81%

表 5-5 各清单数据对 GWP 敏感度

单元过程-清单数据	GA+SMA	单元过程-清单数据	EA+EA
原材料生产-改性沥青	33.28%	运营管理-乳化沥青	32.06%
改性沥青生产-原油	23.33%	原材料生产-环氧沥青 A 组分	28.17%
运营管理-CO ₂	22.10%	原材料生产-环氧沥青 B 组分	17.63%
混合料拌合-CO ₂	20.93%	环氧沥青 B 组分生产-固化剂	12.51%
混合料拌合-电	10.07%	混合料拌合-CO ₂	11.27%

表 5-6 各清单数据对 AP 敏感度

单元过程-清单数据	GA+SMA	单元过程-清单数据	EA+EA
运营管理-NO _x	31.86%	运营管理-乳化沥青	37.42%
原材料生产-改性沥青	19.15%	原材料生产-环氧沥青 A 组分	33.97%
混合料拌合-石油沥青	12.42%	乳化沥青生产-SO ₂	20.42%
混合料拌合-电	10.27%	运营管理-NO _x	15.83%

表 5-7 各清单数据对 RI 敏感度

单元过程-清单数据	GA+SMA	单元过程-清单数据	EA+EA
运营管理-NO _x	29.92%	原材料生产-环氧沥青 A 组分	40.84%
原材料生产-改性沥青	16.29%	运营管理-乳化沥青	29.19%
混合料拌合-电	15.51%	运营管理-NO _x	15.58%
混合料拌合-石油沥青	11.81%	乳化沥青生产-NO _x	13.49%

5.2.2.2 数据不确定度

根据上述敏感度分析结果,本研究对敏感度大于 10%的数据进行不确定度评估,结果如表 5-8 所示,其中数据来源相同或算法相同的数据已被省略,如石油沥青生产和改性沥青生产中投入的原油数据均来自欧洲沥青协会的报告,这两个数据具有相同的不确定度,故将重复数据进行省略。

表 5-8 清单数据不确定度

单元过程-清单数据	不确定度
原材料生产-改性沥青	5%
原材料生产-环氧沥青 A 组分	13.23%
原材料生产-环氧沥青 B 组分	20%
石油沥青生产-原油	12.25%
混合料拌合-CO ₂	5%
混合料拌合-重油	30.82%
铺装层铺筑-NO _x	5%
运营管理-乳化沥青	7.07%
运营管理-NO _x	7.07%

若分析结果的不确定度不满足数据质量控制标准，则可根据表 5-4 和表 5-5 确定对分析结果不确定度影响较大的数据，从而有针对性的替换数据来源，提高分析结果的可信度。

5.2.2.3 分析结果不确定度

利用蒙特卡罗模拟获得“双层环氧”铺装层和“下层浇注+上层 SMA”铺装层环境影响分析结果的不确定度，如表 5-9 和表 5-10 所示。由表中可知，“下层浇注+上层 SMA”铺装层和“双层环氧”铺装层的分析结果不确定度均小于 10%，因此可以认为钢桥面铺装层环境影响分析模型的输出结果具有可信度。

表 5-9 “下层浇注+上层 SMA”铺装层生命周期分析结果不确定度

特征化指标	单位	LCA 结果	结果不确定度
初级能源消耗 PED	MJ	3.25E+06	7.32%
全球变暖潜值 GWP	kg CO ₂ eq	1.58E+05	4.47%
酸化 AP	kg SO ₂ eq	5.08E+02	3.64%
可吸入无机物 RI	kg PM _{2.5} eq	9.32E+01	4.06%

表 5-10 “双层环氧”铺装层生命周期分析结果不确定度

特征化指标	单位	LCA 结果	结果不确定度
初级能源消耗 PED	MJ	2.46E+06	6.46%
全球变暖潜值 GWP	kg CO ₂ eq	9.93E+04	6.18%
酸化 AP	kg SO ₂ eq	3.12E+02	4.50%
可吸入无机物 RI	kg PM _{2.5} eq	5.87E+01	3.92%

5.3 结果分析与建议

在验证了模型分析结果具有可信度后，本节将对“双层环氧”铺装层和“下层浇注+上层 SMA”铺装层的环境影响展开对比分析，并提出相应的节能减排建议。

5.3.1 “双层 EA”与“GA+SMA”环境影响对比分析

“双层环氧”铺装层和“下层浇注+上层 SMA”铺装层生命周期内初级能源消耗 PED 的对比分析结果如图 5-4 所示，“下层浇注+上层 SMA”铺装层生命周期内产生的能耗约为“双层环氧”铺装层的 1.32 倍。在这两种典型铺装层的生命周期内，产生能耗较大的阶段依次为原材料生产阶段、混合料拌合阶段和运营管理阶段。

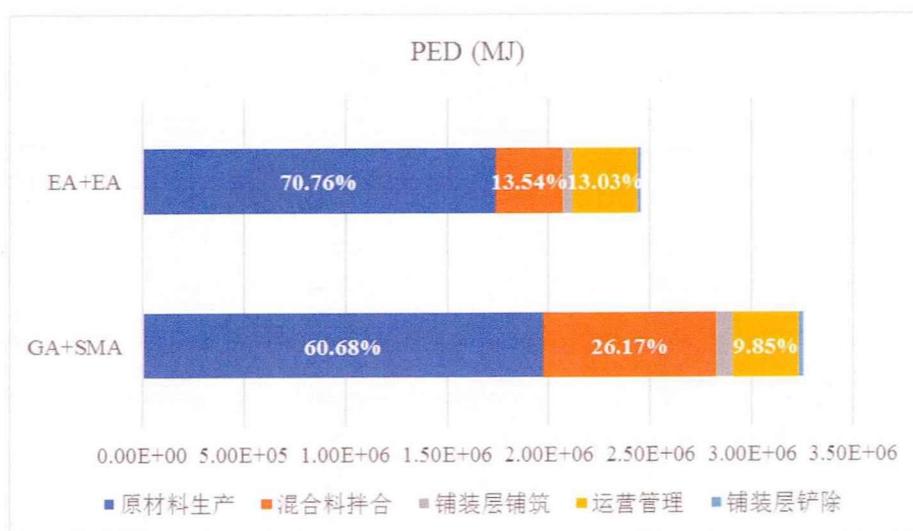


图 5-4 铺装层生命周期内的初级能源消耗

铺装层生命周期内全球变暖潜值 GWP、酸化 AP 和可吸入无机物 RI 的对比分析结果如图 5-5 至图 5-7 所示，“下层浇注+上层 SMA”铺装层全球变暖潜值 GWP 约为“双层环氧”铺装层的 1.59 倍，酸化 AP 约为“双层环氧”铺装层的 1.63 倍，可吸入无机物 RI 约为“双层环氧”铺装层的 1.58 倍，因此，“下层浇注+上层 SMA”铺装层生命周

期内产生气体排放大于“双层环氧”铺装层。在以上三个指标中，贡献程度较大的生命周期阶段均为原材料生产阶段、混合料拌合阶段和运营管理阶段。

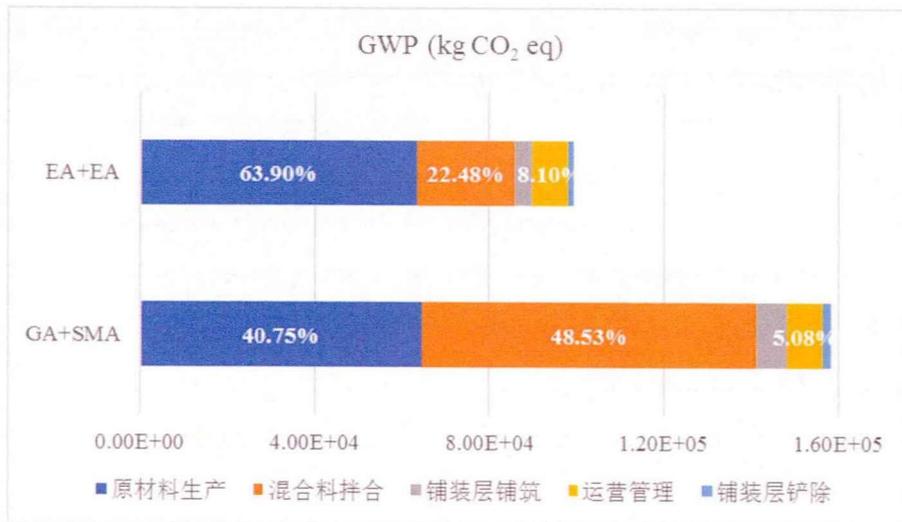


图 5-5 铺装层生命周期内的全球变暖潜值

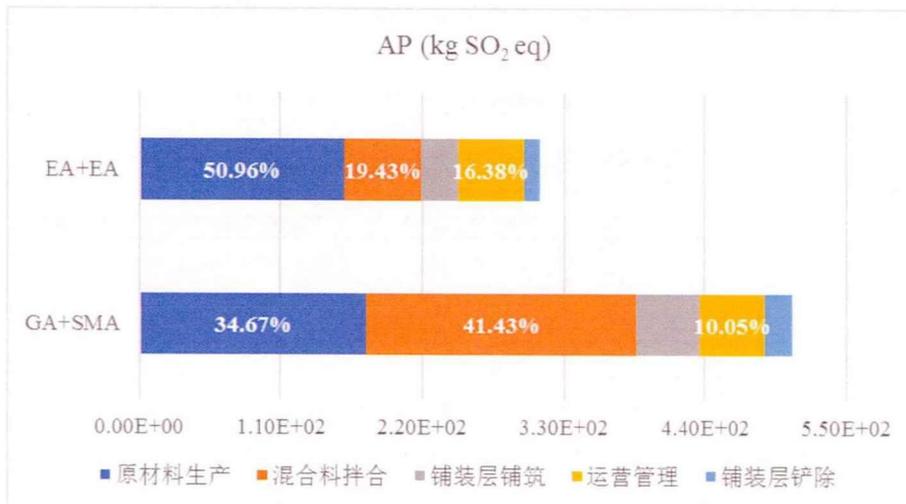


图 5-6 铺装层生命周期内的酸化

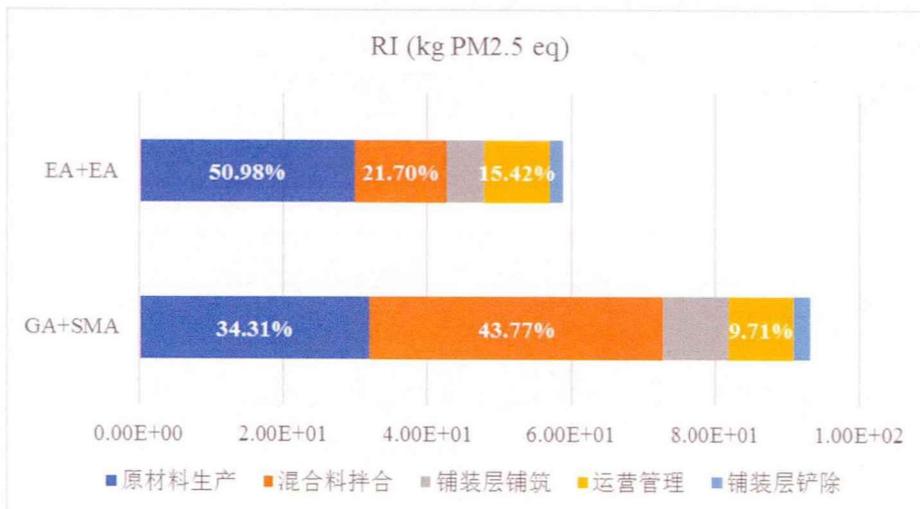


图 5-7 铺装层生命周期内的可吸入无机物

综上所述，“下层浇注+上层 SMA”铺装层生命周期内产生环境影响大于“双层

环氧”铺装层。为了进一步明确环境影响差异的原因，本研究对两种铺装层在生命周期各个阶段的环境影响分别展开详细分析。

“双层环氧”铺装层和“下层浇注+上层 SMA”铺装层在各个生命周期阶段内产生的初级能源消耗 PED 对比如图 5-8 所示，在原材料生产阶段、运营管理阶段和铺装层铲除阶段，“双层环氧”铺装层和“下层浇注+上层 SMA”铺装层的 PED 相差较小。而在混合料拌合阶段，“下层浇注+上层 SMA”铺装层的 PED 指标值约为“双层环氧”铺装层的 2.5 倍，在铺装层铺筑阶段，“下层浇注+上层 SMA”铺装层的 PED 指标值约为“双层环氧”铺装层的 1.7 倍。因此，“下层浇注+上层 SMA”铺装层生命周期内产生的初级能源消耗大于“双层环氧”铺装层的主要原因在于混合料拌合阶段和铺装层铺筑阶段消耗了大量能源。

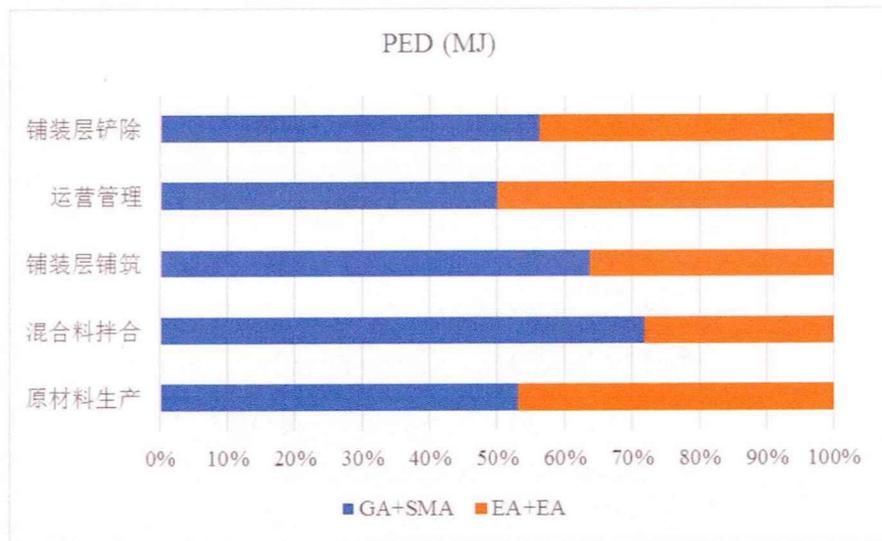


图 5-8 铺装层各生命周期阶段的初级能源消耗

“双层环氧”铺装层和“下层浇注+上层 SMA”铺装层在各个生命周期阶段内产生的全球变暖潜值 GWP 对比如图 5-9 所示，在原材料生产阶段、运营管理阶段和铺装层铲除阶段，这两种铺装层的 GWP 较为接近。在混合料拌合阶段，“下层浇注+上层 SMA”铺装层的 GWP 指标值约为“双层环氧”铺装层的 3.4 倍，在铺装层铺筑阶段，“下层浇注+上层 SMA”铺装层的 GWP 指标值约为“双层环氧”铺装层的 1.7 倍。

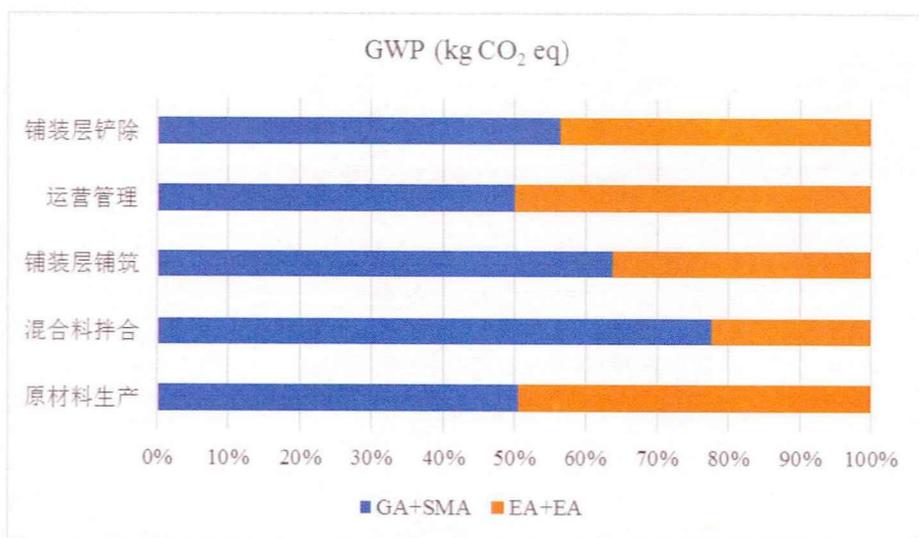


图 5-9 铺装层各生命周期阶段的全球变暖潜值

“双层环氧”铺装层和“下层浇注+上层 SMA”铺装层在各个生命周期阶段内产生的酸化 AP 和可吸入无机物 RI 对比如图 5-10 至图 5-11 所示。与全球变暖潜值 GWP 相似，“下层浇注+上层 SMA”铺装层在混合料拌合阶段和铺装层铺筑阶段的 AP 指标值和 RI 指标值均远大于“双层环氧”铺装层。

基于上述分析，“双层环氧”铺装层和“下层浇注+上层 SMA”铺装层在原材料生产阶段、运营管理阶段和铺装层铲除阶段的环境影响较为接近。而在混合料拌合阶段和铺装层铺筑阶段，“下层浇注+上层 SMA”铺装层产生的能耗和气体排放远远大于“双层环氧”铺装层，其中在混合料拌合阶段，“下层浇注+上层 SMA”铺装层的 PED 指标值约为“双层环氧”铺装层的 2.5 倍，GWP 指标值约为“双层环氧”铺装层的 3.4 倍，因此导致了“下层浇注+上层 SMA”铺装层生命周期内产生的环境影响大于“双层环氧”铺装层。

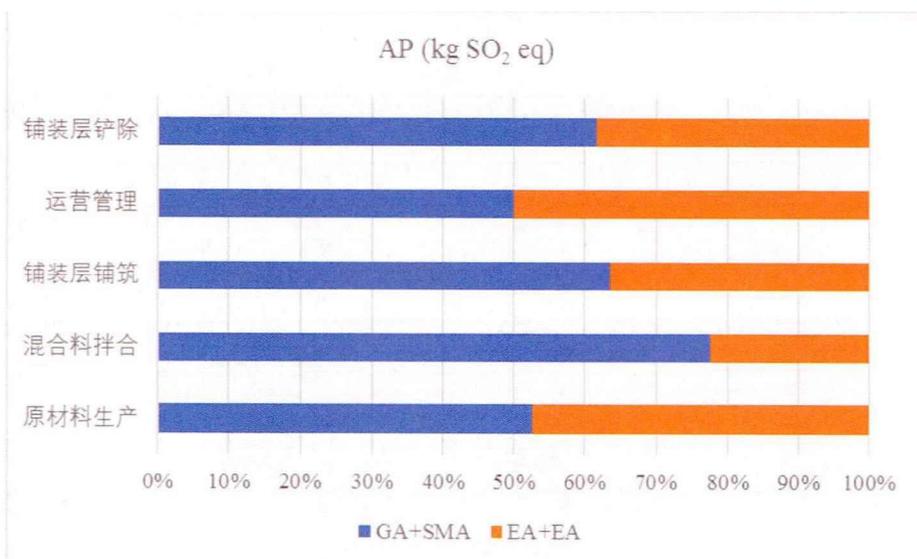


图 5-10 铺装层各生命周期阶段的酸化

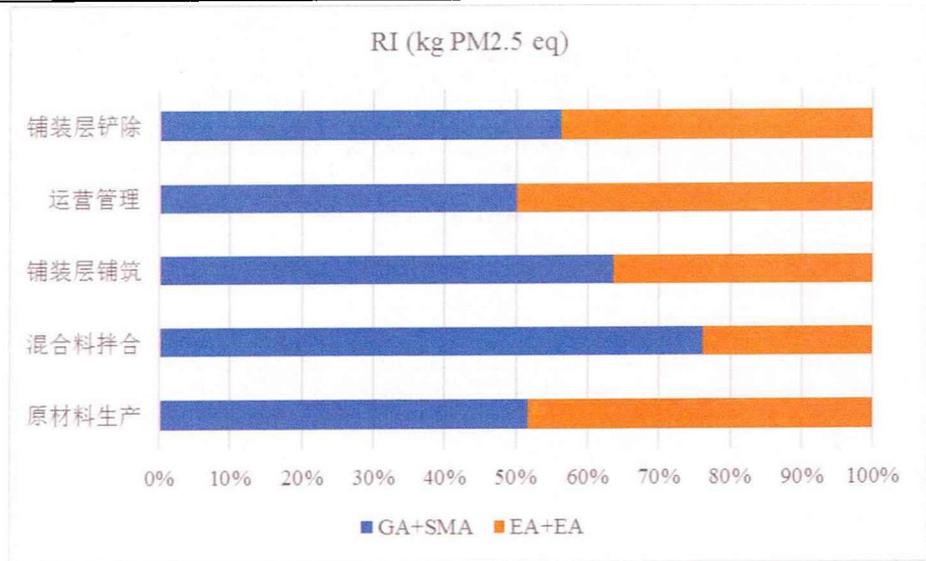


图 5-11 铺装层各生命周期阶段的可吸入无机物

5.3.2 “双层 EA” 环境影响关键因素分析

“双层环氧”铺装层各个生命周期阶段的环境影响对比如图 5-12 所示，在生命周期内产生环境影响较大的阶段依次为原材料生产阶段、混合料拌合阶段和运营管理阶段，其中原材料生产阶段产生的初级能源消耗占全生命周期初级能源消耗的 70%左右，该阶段产生的气体排放对全生命周期气体排放的贡献程度超过 50%，因此，“双层环氧”铺装层节能减排的重点在于原材料生产阶段。

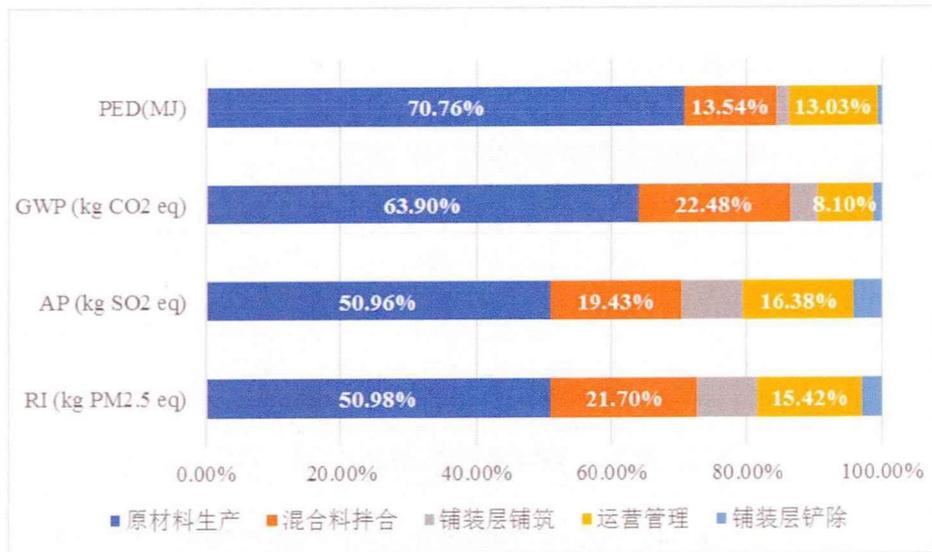


图 5-12 “双层环氧”铺装层生命周期内的环境影响

环氧沥青混凝土的主要原材料组成包括环氧沥青 A 组分、环氧沥青 B 组分、集料和矿粉，以上几种原材料所产生的环境影响比例如图 5-13 所示。由图中可知，对环境贡献最大的环节是环氧沥青 B 组分生产，其次是环氧沥青 A 组分生产。因此，在“双层环氧”铺装层原材料生产阶段应优化环氧沥青 A 组分和环氧沥青 B 组分的生产工艺，提高能源利用率，加强末端治理以减少气体排放。

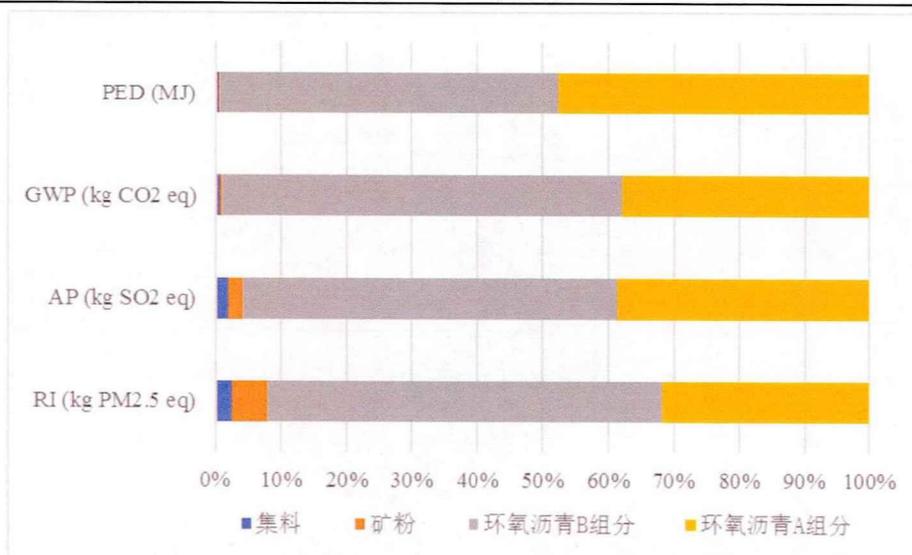


图 5-13 “双层环氧”原材料生产阶段的环境影响比例

5.3.3 “GA+SMA”环境影响关键因素分析

“下层浇注+上层 SMA”铺装层各个生命周期阶段的环境影响对比如图 5-14 所示，在生命周期内产生环境影响较大的阶段为原材料生产阶段、混合料拌合阶段和运营管理阶段。“下层浇注+上层 SMA”铺装层原材料生产阶段的初级能源消耗占全生命周期初级能源消耗的 60%左右，是生命周期内产生初级能源消耗最大的阶段；而混合料拌合阶段的 GWP、AP 和 RI 三个指标值均大于原材料生产阶段，因此“下层浇注+上层 SMA”铺装层产生气体排放最大的阶段是混合料拌合阶段。

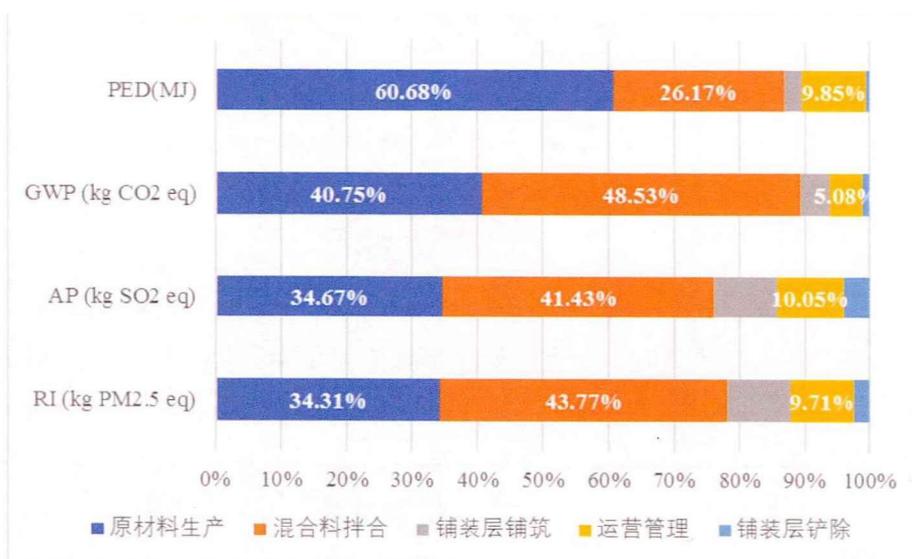


图 5-14 “浇注+SMA”铺装层生命周期内的环境影响比例

“下层浇注+上层 SMA”铺装层在原材料生产阶段的初级能源消耗 PED 组成如图 5-15 所示，由图中可知，浇注式沥青混凝土铺装下层和改性 SMA 铺装上层的 PED 指标值较为接近，产生初级能源消耗最大的环节均为沥青结合料的生产。

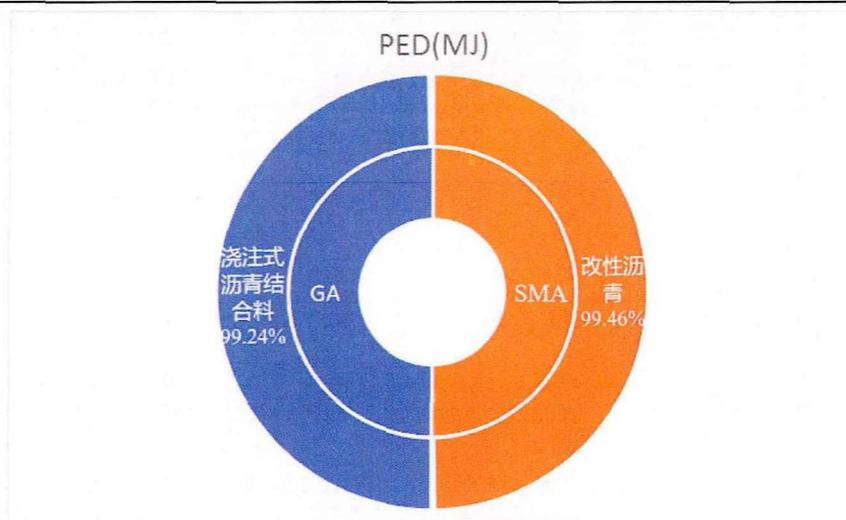


图 5-15 “浇注+SMA”原材料生产阶段的初级能源消耗组成

“下层浇注+上层 SMA”铺装层在混合料拌和生产阶段的全球变暖潜值 GWP 组成如图 5-15 所示，浇注式沥青混凝土铺装下层的 GWP 指标值约为“下层浇注+上层 SMA”铺装层 GWP 指标值的 80%。对于浇注式沥青混凝土铺装下层和改性 SMA 铺装上层，拌合站现场拌合混合料时排放的 GWP 指标值均为混合料拌合阶段 GWP 指标值的 70%左右，远大于电厂发电和重油生产的 GWP 指标值。

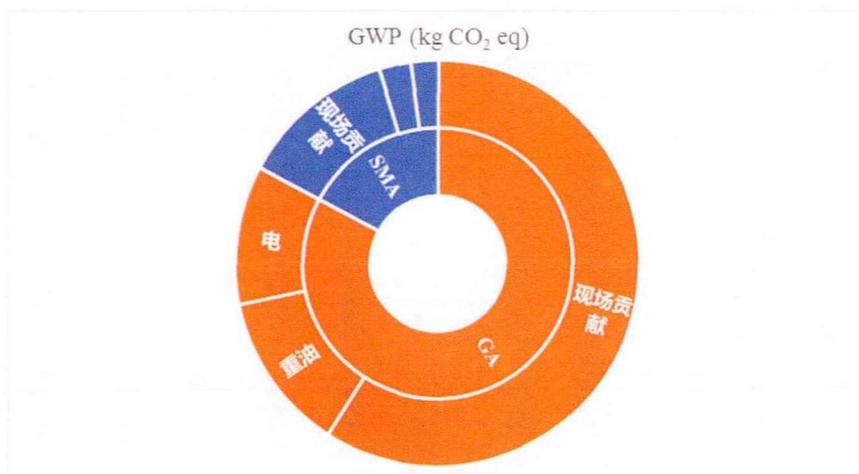


图 5-16 “浇注+SMA”混合料拌合阶段的全球变暖潜值组成

“下层浇注+上层 SMA”铺装层在混合料拌和生产阶段的酸化和可吸入无机物组成如图 5-17 至图 5-18 所示，浇注式沥青混凝土铺装下层对 AP 和 RI 的贡献度远大于改性 SMA 铺装上层，其中 AP 指标值约为改性 SMA 铺装上层的 4.8 倍，RI 指标值约为改性 SMA 铺装上层的 4 倍。在浇注式沥青混合料拌合过程中，现场拌合依然是对 AP 和 RI 贡献最大的环节。

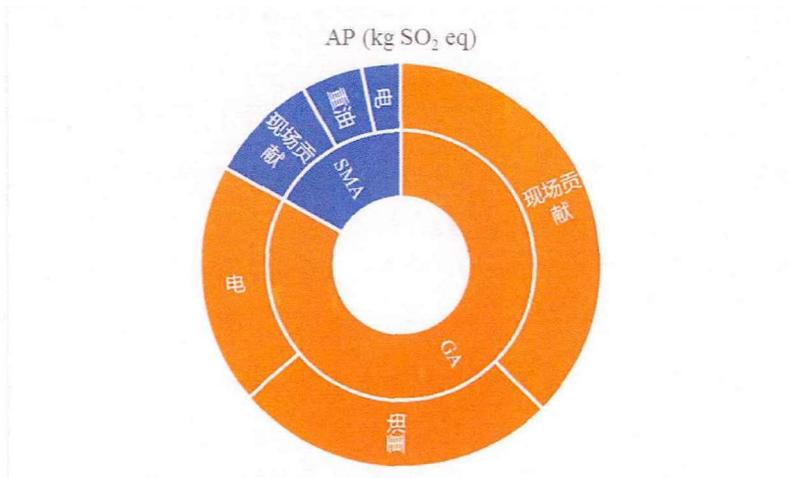


图 5-17 “浇注+SMA”混合料拌合阶段的酸化组成

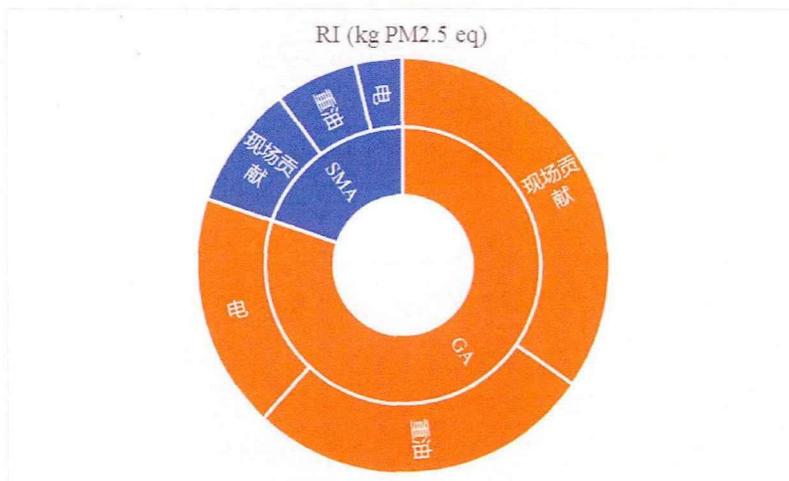


图 5-18 “浇注+SMA”混合料拌合阶段的吸入无机物组成

由于混合料拌合阶段是“下层浇注+上层 SMA”铺装层生命周期产生气体排放最大的阶段，同时结合上一节的分析，“下层浇注+上层 SMA”铺装层混合料拌合阶段的环境影响远远大于“双层环氧”铺装层，其中 PED 指标值约为“双层环氧”铺装层的 2.5 倍，GWP 指标值约为“双层环氧”铺装层的 3.4 倍，因此“下层浇注+上层 SMA”铺装层节能减排的重点在于混合料拌合阶段。根据上述分析，浇注式沥青混合料拌合产生的环境影响约占“下层浇注+上层 SMA”铺装层混合料拌合阶段环境影响的 80%，因此，有必要采取相应措施降低浇注式结合料的拌合温度，如加入温拌改性剂等^[75]，从而减少混合料拌合过程中的环境影响。

5.4 本章小结

本章应用钢桥面铺装层环境影响分析模型对“双层环氧”和“下层浇注+上层 SMA”这两种典型铺装层的环境影响进行计算和对比分析，根据分析结果对铺装层生命周期内环境影响较大的环节提出相应的节能减排建议，具体结论如下：

1) 结合国内钢桥面铺装层工程实践确定了模型输入参数的值，其中预防性养护时机可利用效益费用评估法获得，本文选取铺装层表面抗滑性能作为决策指标，结合钢

桥面铺装层抗滑性能模型分别确定了“双层环氧”铺装层和“下层浇注+上层 SMA”铺装层的预防性养护时机。

2) 通过不确定度分析和敏感度分析确定了钢桥面铺装层生命周期清单数据中对分析结果不确定度影响较大的数据, 利用蒙特卡罗模拟获得各特征化指标的分析结果不确定度均小于 10%, 验证了分析结果具有可信度。

3) 分析结果显示, “下层浇注+上层 SMA”铺装层生命周期内产生的环境影响大于“双层环氧”铺装层, 其中, “下层浇注+上层 SMA”铺装层的 PED 指标值约为“双层环氧”铺装层的 1.32 倍, GWP 指标值约为“双层环氧”铺装层的 1.59 倍, AP 指标值约为“双层环氧”铺装层的 1.63 倍, RI 值约为“双层环氧”铺装层的 1.58 倍。在这两种典型铺装层的生命周期中, 产生环境影响较大的阶段为原材料生产阶段、混合料拌合阶段和运营管理阶段。

4) “双层环氧”铺装层原材料生产阶段的 PED 指标值约为全生命周期 PED 指标值的 70%, 所产生的气体排放对全生命周期气体排放贡献度均大于 50%, 因此“双层环氧”铺装层节能减排的重点在于原材料生产阶段, 减少环氧沥青 A 组分生产和环氧沥青 B 组分生产过程的环境影响。

5) “下层浇注+上层 SMA”铺装层混合料拌合阶段的 PED 指标值约为“双层环氧”铺装层的 2.5 倍, GWP 指标值约为“双层环氧”铺装层的 3.4 倍, 同时该阶段也是“下层浇注+上层 SMA”铺装层生命周期内产生气体排放最大的阶段, 因此应将该阶段作为“下层浇注+上层 SMA”铺装层节能减排的重点。其中, 浇注式沥青混合料拌合阶段的环境影响约占“下层浇注+上层 SMA”铺装层混合料拌合阶段环境影响的 80%, 因此应采取相应措施降低浇注式沥青混合料的拌合温度, 从源头降低环境影响。

第六章 总结与展望

6.1 主要结论

本文根据钢桥面沥青铺装层的特点和工程实际,以路面生命周期分析基础理论为指导,形成了钢桥面铺装层生命周期分析技术框架,应用过程生命周期分析方法对铺装层从原材料生产到铺装层铲除全生命周期内的能耗和气体排放的数据进行收集和计算,建立了钢桥面沥青铺装层生命周期清单。随后对已有路面生命周期分析模型进行改善,建立起符合钢桥面铺装层实际的生命周期分析模型。最后该模型对钢桥面典型铺装层的环境影响进行分析,主要结论如下:

1) 钢桥面沥青铺装层生命周期的主要环境影响是能源消耗和气体排放,对铺装层从材料生产阶段到铺装层铲除阶段的环境影响因素展开调研,并将理论法、实测法和定额法三种方法相结合来计算各个生命周期阶段的能耗值,应用排放因子法计算排放值,从而形成了钢桥面沥青铺装层生命周期清单。

2) 建立起钢桥面沥青铺装层环境影响分析模型,利用该模型可以获得铺装层生命周期内的能耗和气体排放的量化值,输出结果表现为初级能源消耗 PED、全球变暖潜值 GWP、酸化 AP 和可吸入无机物 RI 四项指标的值,并采用不确定度指标和敏感度指标建立了模型数据质量评估和控制工作流程,规定数据质量控制指标为分析结果不确定度小于 10%。

3) 应用钢桥面沥青铺装层环境影响分析模型对“双层环氧”铺装层和“下层浇注+上层 SMA”铺装层的环境影响展开分析,并根据敏感度指标值和不确定度指标值确定了关键数据,利用蒙特卡洛模拟获得分析结果的不确定度均小于 10%,从而验证了分析结果具有可信度。

4) 分析结果显示,“下层浇注+上层 SMA”铺装层生命周期内产生的环境影响大于“双层环氧”铺装层,其中,“下层浇注+上层 SMA”铺装层的 PED 指标值约为“双层环氧”铺装层的 1.32 倍,GWP 指标值约为“双层环氧”铺装层的 1.59 倍,AP 指标值约为“双层环氧”铺装层的 1.63 倍,RI 值约为“双层环氧”铺装层的 1.58 倍。在这两种典型铺装层的生命周期中,产生环境影响较大的阶段均为原材料生产阶段、混合料拌合阶段和运营管理阶段。

5) “双层环氧”铺装层原材料生产阶段的 PED 指标值约为全生命周期 PED 指标值的 70%,所产生的气体排放对全生命周期气体排放贡献度大于 50%,因此“双层环氧”铺装层节能减排的重点在于原材料生产阶段,减少环氧沥青 A 组分生产和环氧沥青 B 组分生产过程的环境影响。“下层浇注+上层 SMA”铺装层混合料拌合阶段的 PED 指标值约为“双层环氧”铺装层的 2.5 倍,GWP 指标值约为“双层环氧”铺装层的 3.4 倍,同时该阶段也是“下层浇注+上层 SMA”铺装层生命周期内产生气体排放最大的阶段,因此应将该阶段作为“下层浇注+上层 SMA”铺装层节能减排的重点。其中,

浇注式沥青混合料拌合阶段的环境影响约占“下层浇注+上层 SMA”铺装层混合料拌合阶段环境影响的 80%，因此应采取相应措施降低浇注式沥青混合料的拌合温度，从源头降低环境影响。

6.2 进一步研究的设想

本文在已有路面生命周期分析研究的基础上，结合钢桥面沥青铺装层自身的特点，初步建立了钢桥面铺装层环境影响分析模型。但由于个人能力有限，研究不够深入，本文研究内容存在诸多不足之处，主要包括以下几个方面：

1) 运用生命周期分析对钢桥面铺装层展开环境影响研究是建立在大量基础数据的基础上，然而目前我国生命周期基础数据库尚不完善，对于缺失的数据本文选择引用国外权威数据库进行替代，或通过假设和计算求得近似值。因此，随着国内生命周期分析的发展和生命周期数据库的完善，在获得新的数据后可以对本文中的数据进行补充和更新。

2) 本文仅对钢桥面沥青铺装层生命周期内的初级能源消耗和主要气体排放展开研究，缺少对其它类型环境影响的分析，后期随着生命周期数据库的完善和补充，在获得其它类型环境影响的基础数据后可以对本文的模型进行补充。

3) 在铺装层运营管理阶段，由于车辆油耗和铺装层表面使用性能之间的数量关系并不明确，因此本研究并未包含车辆运行产生的环境影响。随着相关研究的发展，在明确铺装层性能和车辆油耗之间的数量关系后，可将该阶段的生命周期分析补充到本文的模型中。

4) 由于缺少钢桥面沥青铺装层养护阶段的实测数据，本文仅考虑了实施微表处养护措施的环境影响，并且仅通过计算得到实施预防性养护时机的区间，在计算时选择了中间值进行替代。在收集更多数据后可进一步完善铺装层养护阶段的环境影响分析。

参考文献

- [1] 杨博. 沥青路面节能减排量化分析方法及评价体系研究[D]:[博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2012.
- [2] 中华人民共和国交通运输部. 交通运输节能环保“十三五”发展规划[R]. 2016.
- [3] 郝增恒. 大跨径钢桥面铺装典型结构路用性能评价与研究[J]. 公路, 2012(6):103-108.
- [4] 中国标准化研究院, 清华大学, 中国科学院生态环境研究中心, 等. GB/T 24040-2008, 环境管理-生命周期评价-原则与框架[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [5] Häkkinen T, Mäkelä K. Environmental Impact of Concrete and Asphalt Pavements in Environmental Adaption of Concrete[J]. Technical Research Center of Finland. Research Notes 1752, 1996.
- [6] Roudebush H W. Environmental Value Engineering Assessment of Concrete and Asphalt Pavement[R]. Skokie: Portland Cement Association, 1999
- [7] Berthiaume R, Bouchard C. Exergy analysis of the environmental impact of paving material manufacture[J]. Transactions of the Society for Mechanical Engineering. 1999, 23(1B):187-196.
- [8] Stripple H. Life cycle assessment of road: a pilot study for inventory analysis[R]. Swedish National Road Administration, 2001.
- [9] Nisbet M A, Marceau M L, VanGeem M G, et al. Environmental Life Cycle Inventory of Portland Cement Concrete and Asphalt Concrete Pavements[R]. Skokie: Portland Cement Association, 2001.
- [10] Horvath A, Hendrickson C. Comparison of Environmental Implications of Asphalt and Steel-Reinforced Concrete Pavements[J]. Transportation Research Record, 1998, 1626:105-113.
- [11] Park K, Hwang Y, Seo S, et al. Quantitative Assessment of Environmental Impacts on Life Cycle of Highways[J]. Journal of Construction Engineering & Management, 2003, 129(1):25-31.
- [12] Treloar G J, Love P E D, and Crawford R H, Hybrid Life-Cycle Inventory for Road Construction and Use[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2004, 130(1):43-49.
- [13] 郑莉. 路面材料 LCA 及其信息化开发[D]:[硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2007
- [14] 郑艳华. 生命周期分析法在公路建设项目环境影响分析中的应用[D]:[硕士学位论文]. 南京: 南京林业大学, 2009.
- [15] 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(08):149-154.
- [16] 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]:[硕士学位论文].

- 广州:华南理工大学,2011.
- [17]黄仕伟.路面结构全寿命能耗分析方法[D]:[硕士学位论文].长沙:湖南大学,2013.
- [18]韩雨.路面生命周期能耗与污染物排放模型与计算方法研究[D]:[硕士学位论文].北京:北京交通大学,2013.
- [19]崔璨.基于生命周期道路能耗评价模型的建立分析及应用[D]:[硕士学位论文].郑州:郑州大学,2014.
- [20]李肖燕.基于 LCA 的水泥路面与沥青路面环境影响评价[D]:[硕士学位论文].南京:东南大学,2015.
- [21]Huang Yue, 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*, 2009,17(2):283-296.
- [22]Wang T, Lee I S, Kendall A, et al. Life cycle energy consumption and GHG emission from pavement rehabilitation with different rolling resistance[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 33(5):86-96.
- [23]Mroueh U M, Eskola P, Laine-Ylijoki J, et al. Life cycle assessment of road construction[R]. Helsinki: Finnish National Road Administration, 2000.
- [24]贾晓娟.沥青路面材料全生命周期分析研究[D]:[硕士学位论文].武汉:武汉理工大学, 2007.
- [25]温肖博.泡沫温拌沥青混合料性能研究与环境影响评价[D]:[硕士学位论文].南京:东南大学,2016.
- [26]Nicholas J, Eric M, Arpad H. Life-cycle assessment of pavements - Critical review[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2011.
- [27]Heijungs R, Suh S. The use of matrix perturbation theory for addressing sensitivity and uncertainty issues in LCA[C]. *Proceedings of The Fifth International Conference on EcoBalance – Practical Tools and Thoughtful Principles for Sustainability*. Tokyo: The Society of Non-Traditional Technology, 2002.
- [28]Ciroth A, Fleischer G & Steinbach J. Uncertainty calculation in Life Cycle Assessments – A combined model of simulation and approximation[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2004, 9(4):216-226.
- [29]Hong J, Shaked S, Rosenbaum R, et al. Analytical uncertainty propagation in life cycle inventory and impact assessment: application to an automobile front panel[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2010, 15(5):499-510.
- [30]朱立红,刘光复.生命周期清单的不确定性分析[J].*合肥工业大学学报:自然科学版*,2012,35(7):870-873.
- [31]黄娜,王洪涛,范辞冬,等.基于不确定度和敏感度分析的 LCA 数据质量评估与控制方法[J].*环境科学学报*,2012,32(06):1529-1536
- [32]吴海涛.钢桥面沥青混凝土铺装层性能评价与预测研究[D]:[硕士学位论文].南京:东

- 南大学,2014.
- [33]钱振东,黄卫.钢桥面沥青铺装养护维修及评价[M].人民交通出版社,2014.
- [34]International Standard Organization(ISO).ISO 14040 Environmental management-life cycle assessment: principles and framework[S]. Geneva, Switzerland: ISO, 2006.
- [35]Bilec M. A Hybrid Life Cycle Assessment Model for Construction Process [D]. Pittsburgh, United States: University of Pittsburgh, 2007.
- [36]Lave L B, Cobas-Flores E, Hendrickson C T, et al. Using input-output analysis to estimate economy-wide discharges[J]. Environmental Science & Technology, 1995, 29(9): 420A-426A.
- [37]Lenzen M. Errors in conventional and input-output-based life-cycle inventories [J]. Journal of Industrial Ecology, 2001, 4(4): 127-148.
- [38]国家发展和改革委员会能源研究所.GB/T 2589-2008 综合能耗计算通则[S].2008.
- [39]交通公路工程定额站.JTG/T B-06-02-2007 公路工程预算定额[S].北京:人民交通出版社,2007.
- [40]交通公路工程定额站.JTG/T B06-03-2007 公路工程机械台班费用定额[S].北京:人民交通出版社,2007.
- [41]Blomberg T, Barnes J, Bernard F, et al. Life Cycle Inventory: Bitumen[R]. Belgium: The European Bitumen Association, 2011.
- [42]European Commission. ILCD Handbook: General Guide for Life Cycle Assessment—Detailed Guidance[R]. Belgium: Joint Research Centre, 2010.
- [43]张勇,钱振东,罗桑.国产环氧沥青混合料在钢桥面铺装的应用[J].上海公路,2008,(02):23-26,5.
- [44]冯焘.国产环氧沥青钢桥面铺装材料配合比设计及疲劳特性研究[D]:[硕士学位论文].西安:长安大学,2015.
- [45]Patel M. Cumulative energy demand (CED) and cumulative CO₂ emissions for products of the organic chemical industry[J]. Energy,2003,28(7): 721-740.
- [46]镇江市环境科学研究所.句容宁武科技发展有限公司环氧沥青生产装置项目环境影响报告书[R].2014
- [47]交通部公路科学研究所.JTG F40-2004 公路沥青路面施工技术规范[S].北京:人民交通出版社,2004.
- [48]唐皓,蒯海东,黄晓明.基于生命周期分析法的公路养护能耗模型[J].东南大学学报(自然科学版),2016,46(03):629-634.
- [49]蔡日升.沥青混合料能耗与碳排放量化分析体系研究[D]:[硕士学位论文].西安:长安大学,2013.
- [50]战尧文.沥青混合料碳排放计算模型及分级标准研究[D]:[硕士学位论文].西安:长安大学,2014.
- [51]中华人民共和国交通部.JT/T 270-2002 强制间歇式沥青混合料搅拌设备[S].北京:人

- 民交通出版社,2002.
- [52]李海鹏.沥青搅拌设备干燥滚筒热效率分析和结构优化设计[D]:[硕士学位论文].西安:长安大学,2011.
- [53]王鑫.间歇式沥青搅拌站烘干加热系统的研究[D]:[硕士学位论文].长沙:长沙理工大学,2012.
- [54]刘晓丽.沥青混凝土搅拌站沥青加热系统的节能改造[J].工程机械与维修,2012,(03):122-123.
- [55]支永光.钢桥面铺装环氧沥青混合设备国产化研究[D]:[硕士学位论文].南京:东南大学,2005.
- [56]国务院第一次全国污染源普查领导小组.第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数手册[R].2010.
- [57]国家环境保护总局.沥青混凝土拌合站项目环境影响报告表[R].2014
- [58]Tung H, Cédric D, Anne V, et al. A global tool for environmental assessment of roads—Application to transport for road building[C]. European Conference of Transport Research Institutes, 2010.
- [59]张登良.沥青路面工程手册[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [60]陈磊磊,钱振东,王建伟,等.国产环氧沥青混凝土施工关键技术研究[J].施工技术,2010,39(10):74-76.
- [61]Benninghoven.Technologies and complete solutions of mastic asphalt[R].2016.
- [62]International Mastic Asphalt Association. The mastic asphalt industry—A global perspective[C].2013.
- [63]环境保护部,国家质量监督检验检疫总局.GB 20891-2014 非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值及测量方法(中国第三、四阶段)[S].北京:中国环境科学出版社,2014.
- [64]Yu B, Lu Q. Life cycle assessment of pavement: Methodology and case study[J]. Transportation Research Part D, 2012,17(5):380-388.
- [65]徐剑.沥青路面微表处养护技术的研究[D]:[博士学位论文].南京:东南大学,2002.
- [66]郭焱,刘红超,郭彬.产品生命周期评价关键问题研究评述[J].计算机集成制造系统,2014,20(05):1141-1148.
- [67]Forster P, Ramaswamy, V, Artaxo, P, et al. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing[C]. In: Solomon S, Qin D, Manning M, et al., eds. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [68]Jeroen G, Gorrée M, Heijungs R, et al. Handbook on life cycle assessment—operational guide to the ISO standards[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2001,6(5):255.
- [69]Jolliet O, Margni M, Charles R, et al. IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2003,

8:324-330.

- [70] Weidema B P, Bauer C, Hischer R, et al. Overview and methodology: data quality guideline for the ecoinvent database version 3[R]. St. Gallen: the Ecoinvent Center, 2011.
- [71] 中交公路规划设计院有限公司.JTG D64-2015 公路钢结构桥梁设计规范[S].北京:人民交通出版社,2015.
- [72] 王睿.钢桥面铺装层预防性养护技术研究[D]:[硕士学位论文].南京:东南大学,2015.
- [73] 刘长波.基于抗滑性能的钢桥面铺装用环氧沥青混合料设计[D]:[硕士学位论文].南京:东南大学,2015.
- [74] 赵战利.基于分形方法的沥青路面抗滑技术研究[D]:[硕士学位论文].西安:长安大学,2005.
- [75] 杨理广,钱振东,罗桑,等.温拌改性剂对浇注式沥青混合料性能的影响性研究[J].公路,2013,(04):80-84.

致谢

本论文是在我的导师钱振东教授的悉心指导下完成的，在论文选题、研究思路、论文撰写等方面，钱老师始终都给予我细心的指导和莫大的鼓励。在我攻读硕士研究生期间，深深受益于钱老师的关心和教导。在学习上，钱老师深厚的理论素养、严谨的治学态度，开拓了我的视野，成为我求学路上的榜样。而在生活中，钱老师平易近人，给我以无微不至的关怀。能够跟随钱老师学习，我感到非常幸运，在此谨向钱老师致以诚挚的感谢和敬意。

其次，我要感谢校外导师王建强研究员和公安部交通管理研究所四部的刘东波主任以及王运霞助理研究员。在我实习期间，王建强研究员、刘长波主任和王运霞助理研究员不仅在工作上提点我和帮助我，同时也关注我在科研所的实习生活，尤其是王建强研究员对我的论文写作提出了很多建议，让我获益匪浅。

感谢张勐师兄、向磊师兄和杨阳学长在我论文撰写过程中提供的指导和帮助，感谢同门程蓝星、尹硕、刘博文和贝志达在生活中对我的帮助和关怀，能和这样一群优秀的同学一起学习、奋斗，我感到十分荣幸。

最后感谢我的父母，他们对我无私的爱和支持是我完成学业的最大动力。

高辉

2018年1月

攻读硕士期间发表的论文

[1]Hui Gao, Zhen-dong Qian. Car Sharing to Develop In China, Proceedings of the 17th COTA International Conference of Transportation Professionals (已录用)