

硕士学位论文

基于 LCA 的水泥路面与沥青路面环境影响评价

专业名称: 交通运输工程

研究生姓名: 李肖燕

导师姓名: 钱吮智

ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT OF
CONCRETE PAVEMENT AND ASPHALT PAVEMENT
BASED ON LCA

A Thesis Submitted to
Southeast University
For the Academic Degree of Master of Engineering

BY
LI Xiaoyan

Supervised by
Prof. QIAN Shunzhi

Southeast University-Monash University Joint Graduate School (Suzhou)

Southeast University

June 2015

摘要

自改革开放以来,我国的公路基础建设实现了飞跃式的发展。公路的建设在推动经济发展的同时,也带来了许多环境问题。因此,在公路建设过程时,在追求效益的同时需充分考虑公路建设的环境影响。一条公路从原材料的开采到路面的报废,每个阶段都需要消耗能源并排放大量的温室气体和其他污染物。对路面的能源消耗与排放进行量化分析可以帮助设计者意识到各个环节中能耗和排放的详细情况以及一些潜在的影响因素。有利于设计者从源头上认清问题并在设计过程中进行合理的、科学的、系统的节能减排方案设计。

为了解决我国优质沥青数量不足,并改善普通水泥混凝土路面行车舒适性差以及损坏后修复难度大等问题,新型水泥混凝土路面,连续配筋混凝土路面(Continuously Reinforced Concrete Pavement, 简称 CRCP)成为人们新的关注点。虽然连续配筋混凝土路面在使用性能方面的优势已经得到论证,但其在环境影响方面的表现却鲜有研究。因此,本文采用生命周期评价(LCA)方法对连续配筋混凝土路面与得到广泛认可的沥青路面的环境影响进行了对比分析。文中将两种路面的生命周期分为四个阶段,包括原材料生产阶段,路面建设施工阶段、运营养护阶段和结构物拆除阶段等。并针对每个阶段选择合理的计算方法对能耗与排放进行量化分析。其中,能耗的计算方法包括定额法和 IRI-车速-油耗模型。定额法适用于路面建设阶段,路面运营养护阶段中的维修以及路面结构拆除阶段施工机械的能耗计算。IRI-车速-油耗模型用于计算运营养护阶段因路面状况变化导致的车辆增加的油耗。排放的计算方法是统一采用排放因子法。

由两种路面的生命周期清单数据分析可知,虽然连续配筋混凝土路面在整个生命周期中的能耗大于沥青混凝土路面,但由于连续配筋混凝土路面使用寿命长,折算成每年的能耗后连续配筋混凝土路面能耗低于沥青混凝土路面的能耗。从节能角度将,连续配筋混凝土路面绿色度高于沥青混凝土路面。这将为连续配筋混凝土路面在我国的推广在环境方面做出支持。路面运营养护阶段的环境负荷在两种路面生命周期环境影响中都是最大的。在沥青混凝土路面和连续配筋混凝土路面总能耗中分别占 88.14%和 73.3%。因此,保证路面状况良好,不仅能保证车辆的稳态行驶还将对路面的节能减排做出重要贡献。在两种路面的环境排放中,三种类别的排放量大小均为全球变暖>酸化效应>颗粒排放。而且,酸化效应和颗粒排放相比于全球变暖的排放往往相差两个和四个数量级。这说明在路面的整个生命周期内,温室气体的排放问题最为突出,所以应将减少温室气体排放作为减排的重点。

本研究的研究成果有利于节能减排新技术的提出和应用并可为政府相关部门制定相应节能减排法规政策提供依据。

关键词：生命周期评价 能源消耗 气体排放 水泥路面 沥青路面

Abstract

Since reform and opening up, China's highway infrastructure construction has achieved a leap-style development. While highway construction was promoting economic development, it also brought many environmental problems. Therefore, the environmental impact of highway construction should be fully considered at the same time with the pursuit of profits in highway construction process. From the exploitation of raw materials to the abandonment of pavement, each stage of a road needs to consume energy and discharge greenhouse gases and other pollutants. To quantify the energy consumption and emissions of pavement can help designers to realize the details of the energy consumption and emission and some potential influencing factors of each stage. It is advantageous for the designer to identify problems originally and conduct reasonable, scientific, systematic energy conservation and emissions reduction plan in the design process.

In order to solve the high-quality asphalt shortage and to improve the Portland Cement Concrete Pavement's drawback including poor driving comfort and difficult repair, new cement concrete pavement, Continuously Reinforced Concrete Pavement become the new focus. Although the advantage of the continuous reinforced concrete pavement in the use performance has been demonstrated, its performance on environmental impact are rarely studied. Therefore, this article will use life cycle assessment (LCA) method to compare the environmental effects of continuous reinforcement concrete pavement and widely recognized asphalt pavement. In this paper, two kinds of pavement life cycle are divided into four stages, including raw material production stage, pavement construction stage, use and maintenance stage, and structure demolition stage, etc. this paper choose reasonable calculation methods for quantitative analysis of energy consumption and emissions of each stage. The calculation method of energy consumption including quota method and IRI-speed-fuel consumption model. Quota method is suitable for calculating the energy consumption of machine of road construction phase, maintenance of the operation and maintenance phase and structure demolition phase. IRI-speed-fuel consumption model is used to calculate fuel consumption increase due to road conditions change during operating maintenance phase. Emission factor model can be used to calculate air emission.

After life cycle inventory data analysis of two kinds of pavement, it can be seen that although

the energy consumption of continuous reinforced concrete pavement in the whole life cycle is greater than the asphalt concrete pavement, as a result of continuous reinforcement concrete pavement's long service life, continuously reinforced concrete pavement's annual energy consumption after converted is lower than the energy consumption of asphalt concrete pavement. From the perspective of energy saving, continuously reinforced concrete pavement's green degree is higher than that of asphalt concrete pavement. This will support the continuous reinforced concrete pavement's promotion in our country. The environmental load of operation and maintenance phase in both two kinds of pavement is the biggest of all. It occupy 88.14% energy consumption in continuously reinforced concrete pavement and 73.3% in asphalt concrete respectively in total energy consumption. Therefore, to guarantee the road is in good condition, not only can ensure the vehicle's steady state forms but also can make an important contribution to energy saving and emission reduction. In the environmental emissions of two kinds of road, the emission size of the three categories of emissions is global warming > acidification effect > particle emissions. Compared with the global warming emissions, acidification effect and particle emissions often differ two and four orders of magnitude. This illustrates that among the entire life cycle of road, the emission of greenhouse gases is most prominent. So, reducing greenhouse gas emissions should be the main focus to reduce emissions.

The research results of this study are conducive to the proposal and application of new technology used for energy conservation and emissions reduction. It also can help government departments to formulate relevant laws, regulations and policies related to energy saving and emission reduction.

Keywords: life cycle analysis, energy consumption, gas emission, cement pavement, asphalt pavement

目录

摘要	I
Abstract	III
第一章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	2
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 国外研究现状	3
1.2.2 国内研究现状	7
1.3 研究内容	7
1.4 技术路线	8
第二章 生命周期评价 (LCA) 概述	9
2.1 生命周期评价的概念	9
2.2 生命周期评价的起源与发展历程	10
2.3 生命周期评价的技术框架	13
2.3.1 目标与范围的确定	14
2.3.2 清单分析	16
2.3.3 影响评价	17
2.3.4 结果解释	18
2.4 生命周期评价的特点、优势与局限性	19
2.4.1 生命周期评价的特点	19
2.4.2 生命周期评价的优势	20
2.4.3 生命周期评价的局限性	20
第三章 路面生命周期评价体系框架	22
3.1 路面生命周期目标与范围确定	22
3.1.1 研究目标	22
3.1.2 研究范围	22
3.2 路面生命周期清单分析	24
3.2.1 数据来源	25
3.2.2 路面生命周期能耗与排放通用计算方法	25
3.3 路面影响评价与结果解释	26
3.3.1 清单分析结果分类	26
3.3.2 清单分析结果特征化和加权赋值	26
3.3.3 结果解释	27
3.4 eBalance 建模	27
3.4.1 eBalance 软件介绍	27
3.4.2 eBalance 软件操作流程	28
3.4.3 路面生命周期评价 eBalance 建模	29
第四章 两种路面生命周期清单分析	31
4.1 路面原材料生产阶段清单数据收集与计算	31
4.1.1 沥青路面工程量计算	31
4.1.2 连续配筋水泥混凝土路面工程量计算	32

4.1.3 eBalance 建模与计算.....	33
4.2 路面建设阶段清单数据收集及计算.....	35
4.2.1 沥青路面建设阶段清单数据收集与计算.....	35
4.2.2 水泥路面建设阶段清单数据收集与计算.....	42
4.2.3 eBalance 建模与计算.....	45
4.3 路面运营阶段清单数据收集与计算.....	47
4.3.1 IRI-车速-油耗-排放量化模型建立.....	48
4.3.2 两种路面车辆行驶油耗计算.....	52
4.3.3 路面养护维修时能耗与排放.....	63
4.4 路面结构拆除阶段清单数据收集与分析.....	67
4.5 路面生命周期清单数据汇总分析.....	68
第五章 结论与展望.....	71
参考文献.....	73
致谢.....	76

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

全球经济的快速发展,带来了人类物质文明的空前发展。随着世界人口的增长和经济活动的扩大,人类对于能源的需求持续增加。一些企业为了保证经济的持续发展,会以环境牺牲作为代价。据统计,中国每年约有 1000 亿美元的经济损失是由于环境污染造成的。为了减少损失,交通行业作为能源消耗量和温室气体排放量增长最快的领域之一开始受到越来越多的关注。公路基础设施建设,无论是高速公路的建设还是乡镇道路的建设养护,都会消耗大量的能源并且排放大量的温室气体和其他污染物。而且,我国的公路基础设施建设量自改革开放以来实现了飞跃式的发展。根据交通运输部发布的《2013 年交通运输行业发展统计公报》统计,截止 2013 年末,全国公路的总里程数达到 435.62 万公里,比上年末增加 11.87 万公里。公路养护里程 425.14 万公里,占公路总里程 97.6%,提高 0.4 个百分点^[1]。相比于 1998 年的 127.85 万公里公路总里程数,我国的公路里程数已提高了 2.4 个百分点。“十二五”期间,随着我国经济发展迈入新的阶段,交通运输包括公路基础建设也将迈入新的发展时期。基础设施建设的飞速增长也必然带来更多的环境问题。其中,普遍并为大众所熟知的环境问题就是“温室效应”。据国外调查数据显示^[2],约 25%的 CO₂ 气体源自于交通行业。

温室效应又被称为“花房效应”。温室气体的大量排放会带来冰川融化、虫害增多、酸雨、沙漠面积增大等自然危害。据统计,我国每建造 1 公里高速公路大约需要 1 万吨水泥,而每生产一吨水泥大约会产生 653kg 的 CO₂ 排放^[3]。作为《联合国气候变化框架公约》的缔约国,同时为了减少我国在参与公约活动时的压力,我国有义务也有责任承担减少能源消耗量和污染物排放量的任务。为了解决公路基础设施建设与能源供给日益突出的矛盾,交通运输部编制的《交通运输“十二五”发展规划》中明确指出要以建设能源节约型环境友好型的交通运输行业为着力点来推进交通运输业的长久稳定发展^[4]。

近几年,由于水泥路面行车舒适性差以及损坏后修复难度大等问题,沥青路面的发展相对于水泥路面呈现出压倒性的优势。沥青路面以具有良好的力学性能和路用性能,铺筑的路面平整无接缝,减震吸声,行车舒适,便于分期修建和再生利用等优点,成为路面的一种重

要结构形式。然而,我国的优质沥青资源匮乏,随着公路里程数的增加,可能产生供不应求的现象。作为水泥生产大国,研究路用性能好的新型水泥混凝土路面以应对沥青产量不足的现状成为人们新的关注点。连续配筋混凝土路面(Continuously Reinforced Concrete Pavement,简称 CRCP)是在路面纵向连续配置足够数量的钢筋,施工时完全不设胀、缩缝的一种混凝土路面结构。它消除了普通混凝土路面的横向接缝,大大提高了路面平整度和行车舒适性。虽然连续配筋混凝土路面在使用性能方面的优势已经得到论证,但其在环境影响方面的表现却鲜有研究。因此,本文将对连续配筋混凝土路面与得到广泛认可的沥青路面的环境影响进行对比分析。一条道路从原材料的开采到路面的报废,每个阶段都需要消耗能源并排放大量的温室气体和其他污染物。若想对两种路面的环境影响进行可靠地对比分析需要全面详细的考虑两种路面在所有生命阶段的能耗和排放。作为 21 世纪最有活力和影响力的环境评价工具,生命周期评价法(LCA)是一种可以系统地评估一种产品或一个过程在其整个生命周期中,即从原材料的获取、产品的生产、试用直至产品使用后的处置,对环境影响的技术和方法。用生命周期分析法对公路的整个生命周期中的能耗和排放进行计算量化,可以帮助设计者意识到各个环节中能耗和排放的详细情况以及一些潜在的影响因素。有利于设计者从源头上认清问题并在设计过程中进行合理的、科学的,系统的节能减排方案设计。因此,本文将采用生命周期分析法(LCA)对连续配筋水泥混凝土路面和沥青混凝土路面的环境影响进行对比分析。

1.1.2 研究意义

本文将选用生命周期分析法对国内的两种主要路面形式水泥路面和沥青路面进行环境影响分析。在经济发展和环境污染矛盾愈演愈烈的今天,本文的选题意义可以分为几个方面:

(1) 为我国路面生命周期评价方法的发展提供理论和数据基础

作为一种对产品整个生命过程的能耗和排放进行详细量化的环境评价工具,生命周期分析方法在国内外有很强的生命力和发展前途。然而,我国运用生命周期分析方法来分析计算道路整个生命周期过程中的能耗和排放的研究很少。而且,仅有的少量研究只重点考虑了道路的建设阶段,而忽略道路的运营养护阶段。本文对道路整个生命周期的清单数据收集和分

析可以为以后的类似生命周期分析提供数据支持,并对生命周期研究法在我国道路上的应用进行一定程度上的完善和发展。

(2) 为节能减排新技术的提出和应用提供数据依据

为适应我国经济的高速发展,我国的公路里程数在逐年增加。无论什么等级、什么材料的道路都有一定的使用寿命。因此,一大批发展初期建设的道路亟待拆除翻新。无论是新路面的建设还是旧路面的翻修都会消耗大量的能源并造成严重的环境污染。节能减排新技术的提出和应用将对减轻道路发展和环境污染之间的矛盾起着至关重要的作用。生命周期分析法通过对道路整个生命周期过程的阶段划分和分阶段能耗与排放计算,可以让设计者用从源头上找出能耗高的环节,并提出相应的改善措施或者新的节能减排技术。而且,本文通过不同类型的路面的环境影响评价对比,还可以分析出哪种路面类型或者原材料以及施工方式更加的环保。

(3) 为政府相关部门制定相应法规政策提供依据

为了更好地约束道路整个生命周期中的能源消耗和环境排放,政府部门应制定相应的法规政策。通过生命周期分析法得到的道路各阶段的能源消耗和排放以及整个生命周期中总的能源消耗和排放可以为相应的法规政策的制定提供理论和数据支持,使法规政策的制定更加具有说服力。同时,还可以向公众提供相关的资源数据,帮助企业节能减排,提高自身生产效率。

1.2 国内外研究现状

随着资源的衰竭和环境问题的增重,政府和工业部门越来越注重绿色设计和可持续发展。路面建设作为耗能高、环境影响大的建设项目必须予以重视。为了系统了解路面建设对环境的影响,生命周期分析(LCA)作为新世纪最有发展潜力的环境影响评价方法在路面上的应用越来越多。作为两种最主要的路面形式,沥青路面和水泥路面在经济影响和环境影响方面一直被反复比较。来自政府、学术界、水泥制造商、沥青与水泥铺筑业等方面的大量研究都试图发现哪种类型的路面更有优势。然而,不同的研究往往得到不同的结果。现将国内外研究人员的部分研究成果汇总如下。

1.2.1 国外研究现状

自上世纪九十年代中期第一篇关于路面生命周期分析的文献发表后,国外对于沥青路面和水泥路面的环境影响评价的研究开展的如火如荼,并已经将一些研究成果成功地运用到工程实践过程中。

Häkkinen and Mäkelä^[5]采用基于流程的生命周期评价模式对沥青玛蹄脂碎石路面和榉

钉接缝的普通水泥混凝土路面进行了生命周期评价。两种路面结构通过18种不同的环境标准进行了评价,包括CO₂排放,能源消耗,空气污染和重金属排放等。路面结构承受年平均日交通量20000辆/天的载重,分析年限为50年。覆盖范围包括原材料生产阶段,建设阶段,路面使用阶段以及路面维修和重建阶段,不包括结构物拆除。研究结果显示,水泥路面的CO₂排放比沥青路面高40%到60%,具体的差别取决于维修方案的选择。相反的,当沥青的原料能被包含时,沥青路面消耗的不可再生能源大约是水泥路面的两倍。

Horvath and Hendrickson^[6]采用经济输入-输出生命周期评价模式(EIO-LCA)对热拌沥青路面和连续配筋混凝土路面进行了环境影响对比分析。该研究选取的研究对象为长度为1km,交通量为1*10⁸ ESALs的典型双车道公路,其中两种路面功能等效。文中的研究阶段主要为原材料的开采和生产,路面建设阶段和使用后的处置阶段。由于数据的不足,运营阶段和路面维修阶段没有考虑。其中,EIO-LCA模型主要被用于评价原材料的开采和生产中的环境影响,其他阶段数据来自于文献。研究结果显示,沥青路面在材料生产阶段消耗的能量是连续配筋混凝土路面的1.4倍。但矿石消耗量和其他集料消耗量远低于连续配筋混凝土路面。而在污染物排放方面,沥青路面除了在危害性垃圾产生和管理方面比连续配筋混凝土路面不利外,在其他方面包括污水排放,土地占用,污染气体(包括SO₂, CO₂, NO等)的环境影响远小于连续配筋混凝土路面。此外,考虑到沥青路面在使用后处置阶段相较于水泥路面可以进行大量的回收利用,它的资源消耗和污染物排放将随之较少,环境友好型更加增强。

Roudebush^[7]运用环境价值工程学方法论对热拌沥青混凝土和硅酸盐水泥混凝土公路进行了生命周期评价。区别于其他的评价系统,该研究将整个生命周期分为十个阶段:自然资源形成,自然资源开采和挖掘,材料生产,设计,构件生产,建设,使用,拆除,自然资源回收和废弃物处置。为了克服整个生命周期中输入能源类型与质量的不同,文中选取“能值”作为基本单位来将不同类型的能源转化成同一种类型的能源来进行量化比较。系统输入的能值来自于十个生命阶段的环境、燃料能源、物品和服务(主要指人力)等四个方面。且在使用阶段发生的能值输入仅包括两种路面的表面重修、拆除等。与车辆使用相关的能值输入不在本文的考虑范围。在比较两种路面的能值输入时,设计阶段、自然资源回收和废弃物处置三个阶段被认为相同,不进行计算。能值输入计算结果显示,材料转换阶段和使用阶段的能值输入在两种路面类型中都占绝大部分。且水泥路面较沥青路面在材料转换阶段、使用阶段分别低32.2%和60.1%,在建设阶段和拆除阶段分别高33.3%和

383.9%。综合能值方面，水泥路面比沥青路面少47.6%。

Berthiaume and Bouchard^[8] 使用“有效能”并采用基于流程的生命周期分析方法来比较沥青路面和水泥路面。“有效能”是能量的衍生物用来表示一项产品距离热力学平衡的距离。作者认为有效能与环境的关系比能源与环境的关系更为直接。研究涵盖的范围仅包括原材料生产阶段和维修重建阶段，分析周期为40年。结果显示水泥路面相比沥青路面有更高的有效能消耗。

Mroueh et al.^[9]打破传统的沥青路面与水泥路面对比转而研究工业副产品在路面结构中的应用。报告研究了七种组合结构分别为掺加煤灰、破碎混凝土废弃物、高炉矿渣作为原材料替代品。环境影响范围包括资源使用，水和土地排放，空气排放和噪音等。覆盖的阶段包括原材料生产，建设，维修，使用和生命终止等阶段。采用专家评分的方法确定影响分析并通过不同指标的权重，量化环境影响。

Stripple^[10] 进行了普通水泥路面与分别使用热生产和冷生产技术的两种沥青路面的对比。覆盖的范围包括原材料生产阶段，建设阶段，路面使用阶段以及路面维修和重建阶段，研究年限40年。考虑的环境影响因素主要包括：能源消耗，不同的水和空气污染，垃圾堆积和资源消耗。结果表明，能源消耗结果取决于沥青的原料能。当没有原料能时，普通混凝土路面比两种沥青路面消耗的能源都多。但当考虑原料能时，结果相反。对于CO₂排放，普通混凝土路面比两种沥青路面消耗的能源都高。

Park et al.^[11]是首位将综合生命周期评价运用到路面的人。文中用经济的输入-输出模型国际能源平衡表结合来对生命周期材料生产阶段进行评估。建设和生命末阶段采用基于流程的生命周期模型分析。维修阶段既用了输入输出型又用了过程型生命周期评价。支持文件的缺乏使得结论的获取非常困难。

Zapata and Gambatese^[12]研究连续配筋混凝土路面与沥青路面在原材料生产和路面建设过程中的能源消耗。研究是受到Horvath and Hendrickson(1998) and Stripple (2001)相反的结果的激发。为了进行公证的对比，研究人员采用了与Horvath and Hendrickson相同的路面结构和交通假设。研究结果显示连续配筋混凝土路面在原材料生产和建设阶段消耗大量的能量，这与Stripple的结果一致。

Chan^[13]采用基于流程的生命周期分析模型（SETAC-EPA model）比较了沥青路面和水泥路面的环境影响并与成本分析结合进行了经济影响评价。为了克服不同地区不同路面设计导致的变数，该研究随机选取了13条美国密歇根州实际存在的路面就行分析。为了将作为外部成本的环境影响融入道路生命周期成本分析，该研究首次提出环境影响货币化，并

通过收益转换来量化。该研究分析生命阶段包括原材料的生产与运输、路面的建设的机械使用以及建设阶段或维修阶段导致的交通延误与绕道等，并将原材料消耗，能源消耗，温室气体排放，常见空气污染物和致癌物质排放等作为评价指标。结果显示，沥青路面的原材料需求量大于水泥路面。这主要是因为沥青路面通常需要更厚的骨料基层以及沥青路面的上面层通常在使用中期需要重新铺筑。同时，因为沥青自身高的原料能，沥青路面的一次性能源消耗通常是水泥路面的1-3倍。就污染物排放层面，沥青路面在温室气体， NO_x ， SO_2 ，铅的排放量方面优于水泥路面。但是在挥发性有机化合物和致癌物排放方面较水泥路面表现差。

Huang^[14]分析了路面翻修时由于交通拥堵引起的附加燃料消耗和污染物排放。文章的研究对象为一条南北向日交通量总和为 26493 辆/天的双车道沥青路面，全线长 2.6km。该研究通过微观仿真软件 VISSIM 对正常状态和路面维修状态下的交通流就行模拟，然后把仿真结果输入到一个纽卡斯尔大学运输业务研究小组开发生命周期模型 EnvPro 中。EnvPro 软件的输出清单为 CO ， NO_x ， CO_2 ， HC ， PM 等的排放量和燃料消耗量。通过对比分析显示，由于路面施工导致燃料消耗量和排放明显量增多。其中，除了路面翻修导致的大量能源消耗和污染物排放，拥堵状态下车辆排放的 CO ， HC 和 PM 相较于正常状态下的排放分别增长了 3.2%，5.5%，2.4%，燃料消耗增长了 3.0%。这意味着，在路面翻修和由于交通拥堵引起的环境影响分析也是整个路面生命周期分析中不可缺少的一个环节。

Rosario^[15]等对由再生沥青混合料组成的热拌沥青路面和添加天然沸石的温拌沥青路面进行了LCA对比分析。矿物、胶结剂和化学添加剂的开采和处理，沥青生产，材料运输，沥青铺筑，道路交通，土地利用，生命周期结束的路面拆除，垃圾填埋或回收等生命阶段的能量消耗、气体排放和一些其他环境影响被作为评价指标。文中运用蒙特卡洛模拟来考虑关键性输入参数的可变性。考虑整个生命周期阶段的环境影响时，添加天然沸石的温拌沥青路面对环境的影响基本等同于含相同再生沥青混合料的热拌沥青路面。这是因为温拌沥青路面由于降低制造温度而减小的对环境的影响被沸石使用造成的影响所抵消。而且，通过比较再生沥青含量不同的沥青混合料显示，当增大再生沥青含量时，沥青混合料的环境影响会显著降低。当增加15%的再生沥青含量时，所有的终端影响包括气候变化，化石消耗和累计能量消耗会降低13%至14%。温拌沥青的关键优势在于可大量使用再生沥青。因此，由于大量使用再生沥青带来的影响减少使温拌沥青路面在环境方面相对于热拌沥青变成一个更好的选择。

1.2.2 国内研究现状

因为数据缺乏和起步较晚,国内关于生命周期评价的研究相对较少。长沙理工大学郑莉^[16]研究了水泥混凝土路面、再生水泥混凝土路面以及粉煤灰水泥混凝土路面的环境影响。北京工业大学的马丽萍^[17],对材料生命周期的道路运输成本进行了研究。南京林业大学郑艳华^[18]对公路建设项目进行了生命周期影响评价。她将生命周期划分为原材料的开采和半成品加工,公路施工,公路运营养护,拆除回收等四个阶段。该文章以上界市高速公路建设项目为例,进行了生命周期影响评价。2011年,尚春静^[3]研究了高速公路路基土石方、排水、防护和路面工程的生命周期能耗与大气排放。华中科技大学的吕莎莎^[19]和长安大学的杜丽^[20]均对道路的基层进行了生命周期评价。

1.3 研究内容

本论文的主要研究内容包括以下几个方面:

(1) 生命周期评价概述

对生命周期评价的概念、起源与发展历程、技术框架以及生命周期评价的特点、优势与缺点进行了介绍。着重对生命周期分析法四个有机联系的部分:目标和范围的界定、清单分析、影响评价和结果解释进行了阐述。

(2) 研究目标与范围的确定

确定研究目标和研究范围是生命周期评价的第一步。本文的研究目标是运用生命周期评价方法对沥青路面和连续配筋混凝土路面两种路面的环境影响进行量化对比分析。本文的研究范围为路面的整个生命过程,包括路面原材料的生产,材料运输,路面施工,路面运营使用以及最终的废弃物处置等阶段。

(3) 路面生命周期清单分析

生命周期清单分析是对系统整个生命周期的输入和输出进行汇编和量化评价的过程。公路生命周期评价的输入数据为能源消耗,输出数据为各种气体排放。按划分的生命周期阶段确定能耗与排放的计算方法,并对各阶段生命清单数据进行收集。通过 eBalance 软件建模以及 eBalance 软件数据库应用对路面个生命阶段的能耗和排放进行量化对比分析。

1.4 技术路线

本文运用生命周期分析的方法对沥青路面与水泥路面的能耗和气体排放等环境影响因素进行了量化分析。本研究的技术路线如图 1 所示。

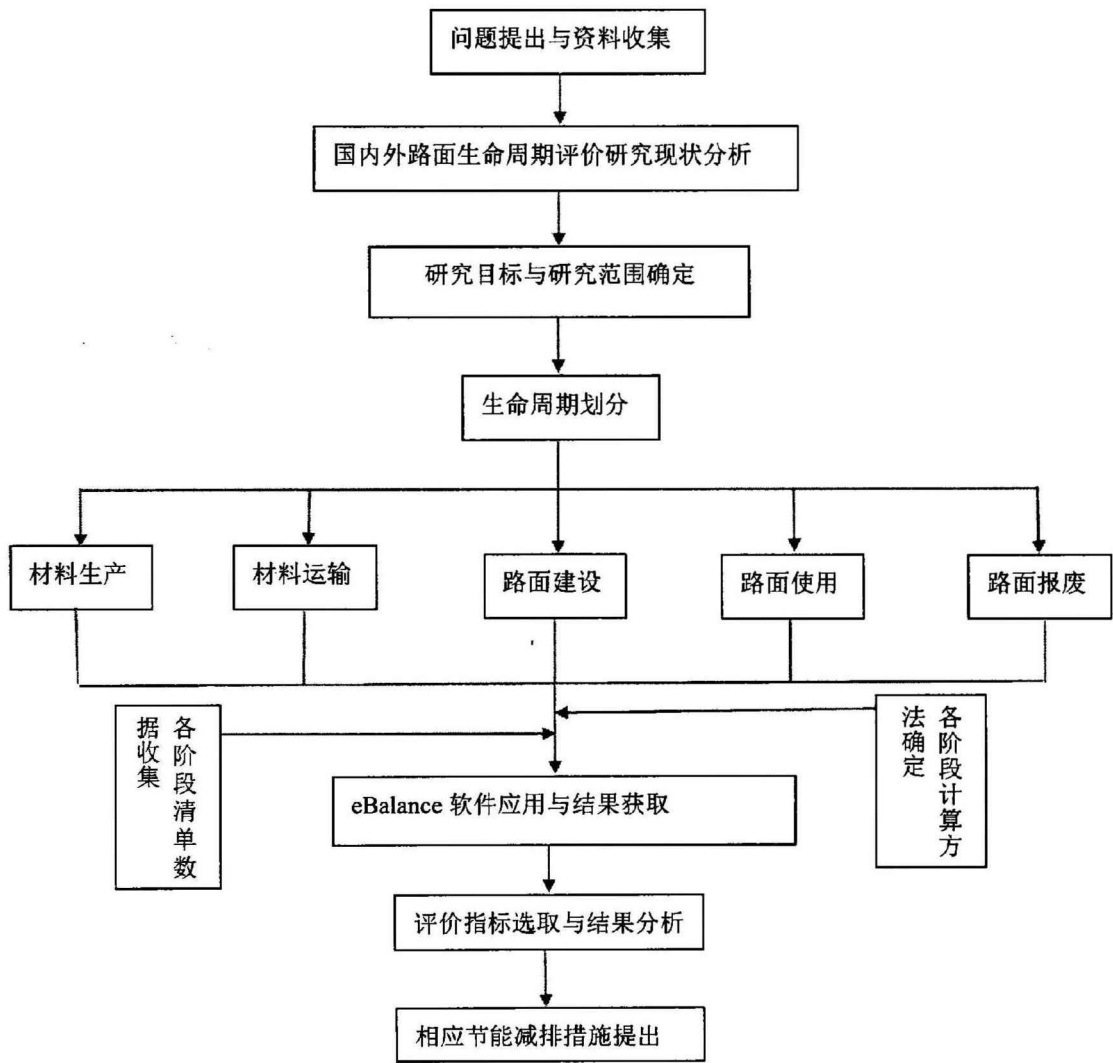


图 1.1 技术路线图

第二章 生命周期评价 (LCA) 概述

2.1 生命周期评价的概念

生命周期是指产品在使用寿命期间从产品所需原材料的获取, 产品制造, 使用, 维修一直到最终处置所有连续的且相互关联的生命阶段的综合。生命周期评价 (Life Cycle Assessment, 简称LCA) 是对产品整个生命周期内环境影响进行评价的一种方法。目前, 有很多机构或者政府部分对LCA进行了定义, 如:

国际环境毒理学与化学学会 (SETAC) 对LCA的定义是^[21]: 生命周期分析是一个通过识别并量化能源和材料使用以及对环境的废物排放来评价一种产品、过程或者活动的环境负担, 评价这些能源和材料使用, 废物排放的影响以及寻求环境改善机会的过程。评价过程包括产品、过程或者活动的所有生命阶段: 原材料的采掘和处理, 制造, 运输和分布, 使用, 再使用, 维修, 循环利用和最终处置。

美国环保局 (EPA) 对 LCA 的定义是: 生命周期评价是一种对工业系统“从摇篮到坟墓”的评价方法, “摇篮到坟墓”开始于从地球上聚集原材料来制造产品结束于所有的材料返还地球。LCA 可估测产品生命周期所有阶段的累积环境影响, 并把很多传统分析中没有考虑到影响包含在内 (如原材料的采掘, 材料的运输和最后的产品处置等)。

国际标准化组织 (ISO) 对 LCA 的定义是^[22]: 生命周期评价是对一种产品系统整个生命周期的输入, 输出和潜在的环境影响进行编辑和评价。

三角研究所 (RTI) 对LCA的定义是: 生命周期评价包括对产品系统从摇篮到坟墓的分析并提供对上下游所有的能量输入和多样化的环境排放的组合评价。

佛兰德科技研究所 (FITR) 对LCA的定义是: 生命周期评价是对一种产品或过程从原材料开采, 生产, 使用一直到废弃物处置为止造成的环境影响的系统清单分析。每一生命阶段都会有相应的清单记录材料与能量的使用以及对环境的排放。

综合以上对LCA的定义, LCA的概念可以归纳为: LCA是一种评价产品、过程或者服务从原材料的采掘处理直至最后的废弃物处理整个生命周期的环境潜在影响的技术, 并包括以下三个阶段 (1) 编辑相关的能源和原材料输入, 环境释放的清单; (2) 根据确定的输入和输出数据评价潜在的环境影响; (3) 解释结果来帮助决策制定者做出更加合理的决策。

2.2 生命周期评价的起源与发展历程

环境生命周期评价思想萌芽于上世纪 60 年代。对原材料和能源有限性的担心引发了研究人员对计算能量的累计使用和规划未来能源的供应和使用的兴趣。第一次众所周知的环境研究是可口可乐公司在 1969 年进行的饮料包装瓶环境影响评价研究^[23]。这项研究是由可口可乐公司负责产品包装生产的 Harry 提出,并委托美国中西部研究所进行的。这项研究试图量化不同饮料包装瓶从原材料开采到废弃物处置整个生命周期的能量,材料和环境影响来判断哪一种饮料瓶对环境有更小的影响以及哪种饮料包装瓶受到的自然资源供给的影响更小。这次的研究为以后的生命周期评价研究开展奠定了基础。

随后,美国伊利诺斯州大学和斯坦福大学的生态学居研究所以及欧洲的一些公司也进行了类似的生命周期清单对比分析^[24]。这些研究很少被公开,因为大部分研究是企业为了自身的产品开发和管理进行的。很多研究中既包括好的结果又包括坏的结果,因此并不合适作为企业营销工具。美国国家环境保护局(EPA)在推动生命周期分析理论和方法的发展上也起着重要的作用。在 1972 年 EPA 的固体垃圾研究所已经着手研究实施包装业标准。在 1972 年末, EPA 联合美国中西部研究所意图完成一次对啤酒喝饮料包装瓶的资源与环境状况分析,从而来判断使用可再装的玻璃瓶来替代一次性易拉罐的环境影响。这在当时是影响范围最大的资源与环境状况分析,因为研究涉及到玻璃,钢铁,铝,纸以及塑料产业,超过 40 种材料被纳入研究。研究结束后, EPA 在 1974 年发表了报告“九种饮料容器的资源与环境概况分析”并通过国家技术信息中心对外公开。这次研究不仅为当时的研究提供了综合的数据和详细的方法论,而且标志着生命周期分析进入公开领域。在当时,这种对产品的材料消耗和环境影响进行的评价的方法在美国被称为“资源与环境状况分析”(简称 REPA),在欧洲被称为“生态平衡”(Ecobalance)。

19 世纪 70 年代到 80 年代,在石油危机的影响下,综合性研究的发展日益衰弱,大众对环境的关注点转移到危险品和家庭垃圾管理。很多研究的方向是减少环境影响中对点源废弃物的处置。因为这些研究方法都是基于一个产品生命的一个单一阶段,比如生产阶段,或者基于一个单一问题,如水源浪费,他们并不能有效得达到网状环境效益。1979 年,国际环境毒理学与化学学会(SETAC)作为一个专业的无盈利的机构建成来传播多学科的环境研究方法。国际环境毒理学与化学学会(SETAC)建成的目的除了提供解决环境问题的方法外,还有促进学术界,商业与政府,以及科学客观性之间的三角平衡。

19 世纪 80 年代末期，生命周期评价作为一个可以更好地理解产品系统的风险、机会、权衡以及环境影响的工具出现。德国斯图加特大学 LBP 研究所和德国 PE 公司在 1989 共同研发发布的 Gabi 软件是最早用于生命周期评价的商业软件之一。1989 年荷兰国家居住、规划与环境部首次提出面向产品的环节策略。该研究要对产品生产，消费直至最后报废在内的所有环节进行影响评价，并提出标准化所有的用于该生命周期评价的方法和数据。

1990 年，在国际环境毒理学与化学学会（SETAC）首次发起的国际研讨会上，“生命周期评价”这个概念首次被提出并使用^[25]。生命周期评价相对于点源管理的优势在于可以避免将一种产品的环境负担转移到其他的生命阶段或者生产系统的其他部分。在随后的几年时间里，SETAC 又主持召开了多次研讨会以推进生命周期评价方法论的发展。其中，对生命周期分析方法论的推动具有里程碑意义的事件是 SETAC 在 1993 年出版的第一个 LCA 指导性报告《生命周期评价纲要—使用指南》。该报告总结了 LCA 的定义、基本的技术框架和应用前景。

1991 年，美国 11 个州的总检察长共同谴责了在统一规范的生命周期分析方法制定之前广泛的使用该方法进行产品开发，并认为不正确的 LCA 使用会导致过大的营销要求。同时，受到其他的环境组织关于标准化 LCA 方法论的压力，国际标准化组织（ISO）在 1993 年成立了一个由 SETAC 的生命周期专家组成的小组来探索制定生命周期评价的统一标准，并在 1997 年完成了第一个生命周期评价国际标准 ISO14040《环境管理—生命周期评价—原则与框架》。一些其他的标准也在随后的几年里不断地完善并最终被编写在 1998 年发表的 ISO14041《环境管理—生命周期评价-目标与范围的确定，清单分析》，2000 年发表的 ISO14042《环境管理—生命周期评价-生命周期影响评价》，ISO14043《生命周期评价-生命周期结果解释》以及 2006 年发表的 ISO14044《环境管理—生命周期评价—要求与指导方针》中。为生命周期评价工作在各国的展开提供有效的知道和统一的标准。

美国国家环境保护局（EPA）在 1993 年为了寻求人类活动与环境承载力之间的平衡，委托风险降低工程实验室进行生命周期清单分析研究，并发表了《生命周期评价：清单分析指导方针和原则》。这份文件描述了生命周期评价的三个阶段，分别为清单分析，影响分析和改善分析，并对生命周期分析过程的发展做了简单概括，同时为实施生命周期分析提供了指导。在随后的 1995 年发表了《生命周期影响评价：概念框架，关键问题和现有方法概况》，《评价生命周期清单分析质量指导方针》等，2001 年发表了《生命周期工程指导方针》，并于 2006 年发表《生命周期评价：原则与实践》来提供解决现在环境问题的数据和

技术支持并建立科学基础来降低未来的环境风险^[26]。这些都对生命周期的发展和应用起到推动作用。

随着生命周期评价理论的日渐完善，国际上有关的商业软件也迅速发展。表 2.1 是几种软件的简单介绍。

表 2.1 常用 LCA 商业软件介绍

软件名称	特点	LCI 计算方法和 LCIA	潜在用户
Boustead	数据库含有英国、欧洲和美国、日本、中国等超过 3000 个单元操作的信息。包括能源、燃料生产和运输的数据模块以及单个和组合工艺和完整产品的数据。每个工艺约有 24 个排放物类别。	清单分析单元过程计算。最顶层是产品，不包括生命周期影响评价。	通常为专家
KCL-ECO 1.0	一个单元操作的输入和输出之间的关系是由一组线性方程及功能单位来确定的，因而方程的不确定性为一个范围值。这个范围值随后参与敏感性分析。	KCL-ECO 使用连续（默认）或稀疏矩阵来求解系统方程。该方法不考虑副产品，但其一个重要的特色是不确定性分析方法，如 Monte Carlo 法。	公司的研究与环境管理人员、独立的研究机构
Simapro	是一个面向产品开发和产品设计的综合 LCA 软件，包括大部分工业生产工艺数据，主要数据以欧洲和荷兰的数据为基础。	通过菜单驱动，利用过程（制造、使用、再循环）建立产品系统。生命周期影响评价模块以 ISO14042 为基础，将影响类型分为 11 种类型，采用特征化、标准化、评估三个步骤。	普通产品开发与设计人员
EcoManager	四个数据库：材料、能源、废弃物和运输。除运输外，其他三个数据库可以被更新。	逆向链数据处理。各工艺的环境影响由最终的输出量决定。工艺间的关系是非动态的。分配原则是按照重量计算。	非专家

Gabi 3	主要针对固体废弃物管理。拥有非常详细的废弃物处理与再利用数据库。另外，包括了 400 种工业工艺数据，并按照一定的层级结构进行组织。同时包括清单分析和生命周期影响评价。	清单分析采用建立各单元过程的流，然后对过程进行链接建立规划方案的方法。提供开放式的生命周期影响评价平台，用户可以自己建立评价原则、标准和指标。包括五个基本步骤：选择重要生态领域、分类、计算影响、标准化、评估等。	专家
LCAiT 2.0	程序提供一个能源生产和运输的数据库，也包括化学品、塑料、纸浆和纸产品的全生命周期数据。同时含有欧洲的二手数据，如 Boustead 能源数据、PWMI 塑料数据和 BUWAL 数据。	对基于工序间的流和运输方式的线性方程组进行求解。每个流按其占总流中的比例进行分配。每个工艺不能超过 16 个材料流。	非专家
TEAMTM2.0	模型含有 10 个类别，每类 216 个产品、材料生产、能源和运输的单一数据夹。10 类分别是：纸和纸浆、石油化工品和塑料、无机化学品、钢、铝、其他金属、玻璃、能源转化、运输、废物管理。	TEAMTM 数据层中，单元操作（工艺、运输等）存在与独立的模块中。系统中节点代表工艺步骤。节点可相连或成组，以表示次系统。次系统相连成整个系统。	LCA 专业人士

在资源与环境压力日益紧张的现在，生命周期分析作为最全面有效的环境分析工具受到越来越多的关注。正如对LCA做出重要贡献的Jim Fava所言，生命周期评价已经变成一个公认的用于评价产品或活动在整个生命周期过程中的生态负担和人类健康影响的工具。

2.3 生命周期评价的技术框架

生命周期评价的技术框架是由国际环境毒理学与化学学会（SETAC）在 1993 年制定的《生命周期评价纲要—使用指南》中首次提出。SETAC 将 LCA 分为定义目标与范围，清单分析，影响评价和改善评价四个有机联系的部分，如图 2.1 所示。

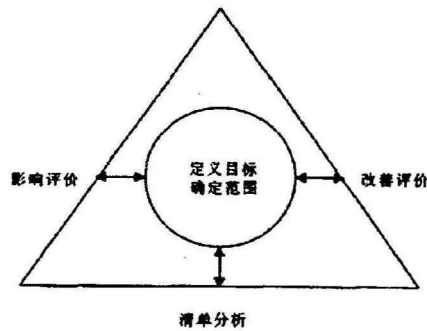


图 2.1 SETAC 生命周期评价技术框架

国际标准化组织（ISO）在 1997 年发表的 ISO14040（环境管理-生命周期评价-原则和框架）标准中，对 SETAC 定义的 LCA 技术框架进行了改动，去掉了改善评价阶段并添加结果解释阶段。因此，ISO 将生命周期分析的技术框架分为目标与范围的确定，清单分析，影响评价和结果解释四个相互联系、重复进行的有机部分，如图 2.2 所示。ISO 做出如此改动的原因是他认为改善评价是 LCA 开展的目的，而不是自身的必须阶段。

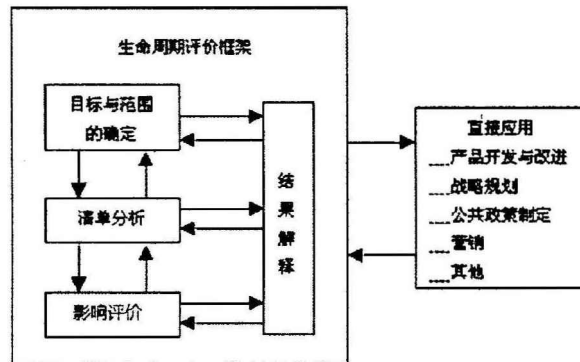


图 2.2 ISO 生命周期评价框架

无论哪种定义，其基本内涵是一致的，都是对产品系统的环境影响的科学、系统的定量研究。

2.3.1 目标与范围的确定

目标与范围的确定是 LCA 研究的第一步也是很重要的一步，直接影响着最终结果的准确性。因此，研究的目标与范围必须要清楚地定义并与预期目标相一致。LCA 研究的目标应该清楚地阐明预期应用，进行研究的目的和研究结果的未来应用。随着研究目标的改变研

究的宽度和深度也会改变。在研究目的确定后，研究的范围可以根据研究目的进行界定。

在确定 LCA 研究的研究范围时，以下内容需进行考虑和清晰的描述^[27]：

- 要被研究的产品系统
- 产品系统的功能
- 功能单位
- 产品系统边界
- 配置程序
- 影响类型，影响评价方法
- 结果解释
- 数据要求
- 假设
- 局限性
- 原始数据数据质量等。

2.3.1.1 功能单位

LCA 研究的范围应该明确指定要被研究的系统的功能。功能单位是对产品系统功能输出的测量。功能单位建立的主要目的是标准化输入和输出来保证生命周期评价结果的可比性，特别是当不同的产品系统进行对比分析的时候。因此，生命周期清单分析时收集到的所有数据需转化为功能单位。

2.3.1.2 产品系统与系统边界

产品系统是单元过程，通过系统的基本流、产品流和系统内部的中间流集合。系统边界决定了哪些单元过程被包含在生命周期评价中。系统边界的确定由研究的预期应用，做出的假设，界限标准，数据和成本约束以及未来的应用等因素决定。输入和输出的选择，数据分类的综合水平以及系统的建模应该跟研究的目标一致。产品生命周期从原材料的开采加工到废弃物的处置都包括在边界内，边界外是系统环境，如图 2.3 所示。

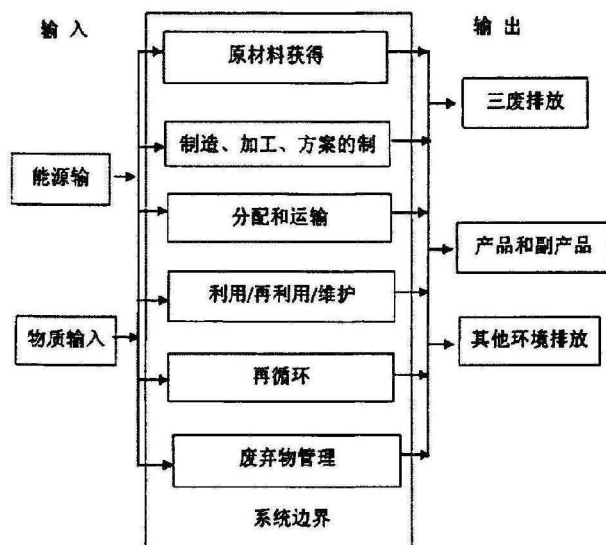


图 2.3 LCA 的评价系统边界

2.3.1.3 数据质量要求

数据的质量应该被定义以保证生命周期评价研究目标与范围的实现。数据质量要求确定时应考虑以下几点：

- 时间、空间、技术涵盖性
- 数据的精度，完整性和代表性
- 整个评价过程所用方法的一致性
- 数据的来源和代表性
- 信息的不确定性。

2.3.2 清单分析

清单分析是生命周期评价中研究最多，发展最完善的一部分。清单分析开始于原材料的获取，中间过程包括制造/加工、分配/运输、利用/再利用/维护，结束于产品的最终处置^[28]。它是对产品、工艺过程或者活动等研究系统整个生命周期阶段，系统相关的输入与输出的数据进行收集和定量的技术过程。系统的输入和输出包括系统相关的资源和材料的利用以及对土地，水和空气的废物排放。收集的数据质量和数量必须保证系统边界内的每个单元格都被包含在内。这些数据组成了生命周期影响评价的输入，并为结果解释提供数据基础。

清单数据分析过程是反复的。随着收集的数据量和对系统的了解增多，新的数据要求和

局限性将显现。此时为了达到研究目的,数据的收集过程必须做出相应改变。甚至有的时候,研究的目标和范围都需要做出修正。详细的清单分析流程如图 2.4 所示^[29]。

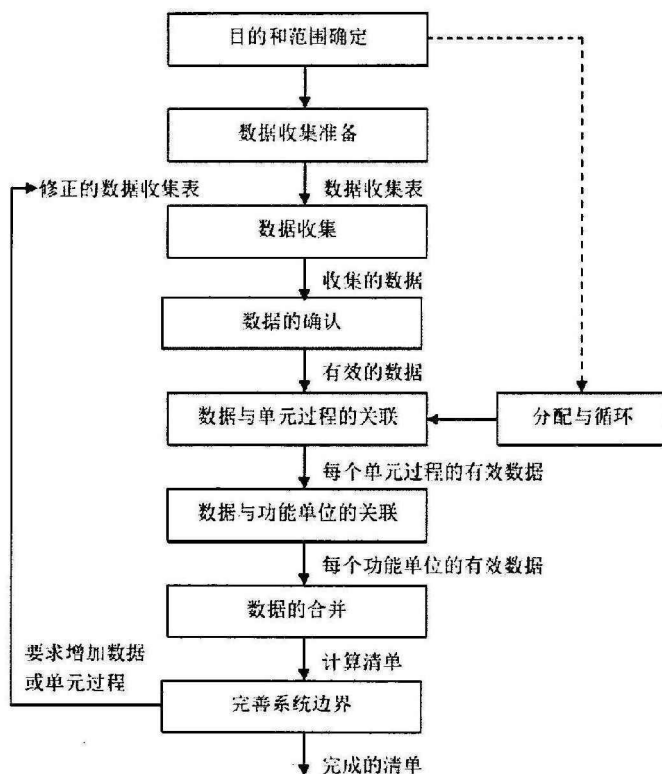


图 2.4 清单分析的简化程序

在清单分析一些需要注意的计算考虑包括:

(1) 分配程序

当处理含有多种产品的系统时需要考虑分配程序(如自石油提炼得到的多种产品)。材料和能量流以及相应的环境排放都应按照明确的程序分配到不同的产品。

(2) 能量流计算

能量流的计算应该考虑使用的不同类型的燃料和电力,能量流的转化效能和分配和能量流生成与使用时候的输入和输出。

2.3.3 影响评价

生命周期影响评价是 LCA 的重要组成部分,它涉及到数据的归类和计算,目的是对清单分析所识别的环境影响因子进行定性与定量的表征评价,以确定产品生命周期过程中的物质能量交换对其外部环境的影响程度。

影响评价是由定性分类、数据的特性化及加权赋值三个步骤组成^[30]。定性分类是在建立环境因子与影响类型对应联系的基础上,对某一类型有一致或相似影响的排放物归类,以探明影响因子作用的途径、污染物的贡献、影响强度和范围,并确定分析评价对象。在发达国家的 LCA 实例研究中,大多采用了美国国家环保局(USEPA)定义的 8 种影响类别:全球气候变化、平流层臭氧消耗、酸雨化、光化学烟雾、富营养化、人体毒性、生态毒性与资源消耗^[31]。总结为需要考虑的环境影响的一般范畴包括资源使用(原材料和能源),人类健康和生态影响。数据的特性化将影响因子对环境影响的强度或程度定量化,归纳为相应指标,其量化方法是当量因子法,将贡献率最大的影响因子作为标准,如全球变暖常以 CO₂ 为标准,其余污染物按对 CO₂ 的当量进行折算,把同类环境影响进行累加。加权赋值对不同类型的环境影响进行加权、排序和赋值,并归结为单一指标,用以比较不同产品、工艺或活动。加权方法目前多采用专家评分法和模型推算法,如目标距离法,距离目标值越近,权越重。

科学的影响评价方法论框架依旧在研究中。目前没有统一的方法论能一致准确地将清单数据与特定的潜在环境影响结合。典型的清单分析方法包括贝尔实验室的定性法,柏林工业大学的半定量法,荷兰的“环境效应”法以及日本的生态管理 NETS 法。在影响评价中都存在主观性如影响类型的选择,建模和评价。因此,在影响评价中必须保证透明度来保证假设条件的明确阐述。

2.3.4 结果解释

结果解释是生命周期评价的最后一步,在这一步中将清单分析的结果和影响评价相结合并得出结论和建议。解释的结果表现为结论和建议的形式并与研究的目标和范围相一致。解释阶段可能包含有循环过程来检验并矫正 LCA 研究的范围和想预期目标一致的数据质量。解释阶段的结果应能反映所有进行过的敏感性分析的结果。详细的生命周期解释与生命周期评价其他阶段的关系如图 2.5 所示^[32]。

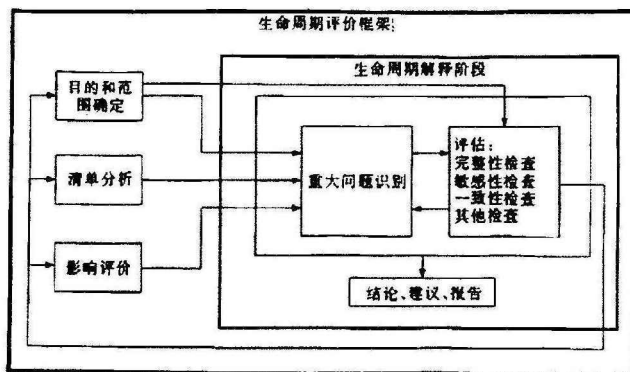


图 2.5 生命周期解释与生命周期评价其他阶段的关系

2.4 生命周期评价的特点、优势与局限性

2.4.1 生命周期评价的特点

LCA 的特点包括以下几点^[33]：

(1) LCA 研究应系统地、充分地评价产品系统环境方面的影响，从原材料获取到最终处置。研究的细节深度和时间范围根据研究目标和范围的定义会有很大的不同。

(2) 范围，假设，数据质量描述，方法论和 LCA 研究的输出应该是透明的。LCA 研究应明确、准确地讨论并记录数据的来源。同时，LCA 方法应该经得起新的科学发现和最先进的技术的检验，并应根据 LCA 研究预期的应用做出相应规定以遵守保密和专有的事项。

(3) LCA 本身不涉及产品的经济和社会影响，但可以 and 成本分析、社会影响等结合作为评价指标。

(4) LCA 评估建立在生命周期概念和环境编目数据的基础上，从而可以系统地、充分地阐述与产品系统相关的环境影响，进而才可能寻找和辨别环境改善的时机和途径。这体现了环境保护手段由简单粗放向复杂精细发展的趋势。

(5) LCA 方法并不具有行政和法律管理手段的强制性。LCA 方法作为环境管理工具不要求企业被动地接受检查和监督，而是鼓励企业发挥主动性，将环境因素结合到企业的决策过程中。

(6) 目前没有唯一统一的进行 LCA 研究的方法。进行研究的组织应该参考 ISO14040 至 ISO14044 国际标准中的规定按照用户的需求和预期的应用实际、灵活地进行 LCA 研究。

2.4.2 生命周期评价的优势

生命周期评价能帮助决策制定者选择对环境影响最小的产品或过程。这些环境信息也可以和其他因素，如成本和工作特性等相结合来帮助产品或过程选择。LCA 数据能识别并帮助避免产品的环境影响从一个媒介向另一个媒介或者一个生命阶段向另一个生命阶段的转移。LCA 追踪并记录环境影响转移的能力能帮助决策者和管理者充分实现产品或过程的环境权衡。LCA 研究是对整个产品系统的研究，因此可以避免将某一单一过程作为研究重点产生的局部优化^[34]。例如，在选择两种竞争性产品时，因为产品 1 产生更少的固态垃圾，所以产品 1 看起来比产品 2 对环境更加友好。然而，完整的 LCA 研究后可能会发现，当三种类型环境影响（空气，水，土地）都被测算时，产品 1 实际上会产生更大的“摇篮到坟墓”环境影响。

通过开展生命周期评价，分析者可以：

- 对既定产品进行系统的环境影响评价
- 分析某个或多个特定产品/过程的环境权衡来帮助利益相关者接受一个计划好的活动
- 量化每个生命周期阶段或者主要的参与过程对空气，水和土地的环境排放
- 帮助发现生命周期阶段或者环境媒介之间需要注意的环境影响转移
- 评价材料消耗和环境排放对当地，区域和世界的人类学和生态学影响
- 比较两种或多种竞争产品的健康和生态影响
- 识别对某个或多个关心的特定环境领域的影响。

2.4.3 生命周期评价的局限性

生命周期评价具有以下局限性：

（1）应用范围的局限性

作为一种环境管理工具，LCA 并不适合于所有的情况，所以在决策环境中不可以依赖 LCA 方法解决所有的问题。LCA 只考虑生态环境、人类健康、资源消耗等方面的环境问题，不涉及技术、经济或社会效果方面。

（2）评估范围的局限性

LCA 的评估范围没有包括所有与环境相关的问题。例如，LCA 只考虑发生了的或一定会发生的环境影响，不考虑可能发生的环境风险及其必要的预防和应急措施。LCA 方法也

没有要求必须考虑环境法律的规定和限制。但在企业的环境政策和决策过程中这些都是十分重要的方面。

（3）评估方法的局限性^[35]

LCA 的评价方法既包括了客观，也包括了主观的成分，因此他并不完全是一个科学问题。在 LCA 方法中主观性的选择、假设和价值判断涉及到多个方面，例如系统边界的确定、数据来源和影响范畴的选择、计算方法的选择等。无论其评估的范围和详尽程度如何，所有的 LCA 都包含了假设、价值判断和折衷这样的主观因素，所以 LCA 的结论需要完整的解释说明，以区别有测量或自然科学知识得到的信息和基于假设和主观判断得出的结论。

（4）时间和地域的局限性

无论 LCA 中的原始数据还是评价结果，都存在时间和地域上的限制。在不同的时间和地域范围内，会有不同的环境编目数据，相应的评价结果也只是用于某个时间段和某个区域，这是有产品系统的时间性的地域性决定的。

第三章 路面生命周期评价体系框架

公路建设,无论是高速公路的建设还是乡镇道路的建设养护,都会消耗大量的能源并且排放大量的温室气体和其他污染物,对环境造成严重的负担。目前我国正在逐步推广一些低碳环保的新技术来促进公路建设的节能减排,并取得了一些成果。但是这些成果没有可靠的数据证据,而且缺少对每个环节的系统的定量化的分析。很多研究仅考虑了道路初始建设阶段的能耗和排放,而忽略了包括后期维修在内的能耗和排放。一条道路从原材料的开采到路面的报废,每个阶段都需要消耗能源并排放大量的温室气体和其他污染物。只有清楚每一阶段详细的能耗和排放,才能选择合理的路面形式和施工工艺。

3.1 路面生命周期目标与范围确定

3.1.1 研究目标

本研究运用生命周期评价的方法对路面从原材料的开采到最终报废整个生命周期的原材料和能源的消耗,废弃物的排放等环境影响进行全面详细的分析和量化。主要包括以下几个目标:

第一,通过详细的生命周期阶段划分与各阶段环境影响分析,探索哪个生命阶段环境影响大,并为以后的施工工艺改善措施的提出提供依据。

第二,通过水泥路面与沥青路面两种路面的比较,探索绿色路面材料的使用和环境友好性的路面结构。分析连续配筋混凝土路面的在环境方面的影响,为连续配筋混凝土路面在我国的推广提供环境影响方面的数据支持。

第三,本文的研究结果可以为我国以后的道路生命生命周期评价开展提供一定参考和数据支持。

3.1.2 研究范围

3.1.2.1 定义产品系统

本研究的研究产品是沥青路面与水泥路面。路面包括垫层,基层和面层等结构层,本文的研究对象为沥青路面与水泥路面的面层。拟建公路按照双向四车道高速公路标准建

造，路基宽 27m，路面宽度为 24m，其中包括：2×0.5m 土路肩+2×3m 硬路肩+4×3.75m 行车道+2m 中央分隔带，设计行车速度为 100km/h。2015 年交通量折合成小汽车为 6543 辆/日，2020 年交通量为 9134 辆/日，2030 年为 15020 辆/日。交通组成如表 3.1 所示：

表 3.1 拟建公路交通量组成

车型	小型车辆		中型车辆		大型车辆		合计
	小客 (<2t)	小货 (<2.5t)	中客 (<10t)	中货 (<10t)	大客 (<14~18t)	大货 (>10t)	
车辆数 (辆/日)	1797	801	874	408	631	335	4857
车辆比例 (%)	37.0	16.5	18.0	8.4	13.0	6.9	100%

沥青路面的结构形式为 60 厘米 6%石灰土底基层+15 厘米二灰碎石基层+8cm Superpave-25 粗粒式高性能沥青路面+6cm Superpave-20 中粒式高性能沥青路面+4cm SMA-13 沥青马蹄脂碎石沥青上面层，基质沥青采用 A 级 70 号石油沥青。路面设计年限内一条车道累计当量轴次为 2.2×10⁷ 次，设计弯沉为 19 (0.01mm)。设计年限为 15 年。

连续配筋混凝土路面的结构型式为：18cm 的 4%水泥稳定碎石底基层+18cm 的 6%水泥稳定碎石基层+1cm 沥青表处+28cm 水泥混凝土面层。连续配筋混凝土面层设置单层钢筋网，纵向钢筋配筋率为 0.61%，采用 Φ18Ⅱ级钢筋；横向钢筋采用 Φ18Ⅱ级钢筋，间距为 100cm。面层混凝土材料为：P.O.42.5 普通道路硅酸盐水泥、级配碎石、中砂和粉煤灰。确定的配合比为水泥：碎石：砂：水=1：3.63：1.87：0.48，水泥用量为 360kg/m³，施工配合比混凝土的实际抗压强度大于 40.25MPa，抗弯拉强度则在 5.75MPa 以上。连续配筋混凝土路面设计寿命为 30 年。

3.1.2.2 系统边界

要利用 LCA 分析法对路面进行全面系统的环境影响分析，首先需要合理地对路面的整个生命过程进行阶段划分。目前，国际上对于路面生命周期没有统一标准的阶段划分。研究者会根据研究自身的研究目的和研究内容对整个生命周期进行合理的划分。通常，将忽略对能耗和排放计算影响很小的室内设计阶段，将路面的整个生命周期划分为四个主要阶段，分别为原材料的开采加工阶段、路面的建设施工阶段、路面使用阶段和路面结构拆除阶段等。

不同的研究人员也会根据需要对其中的某一阶段进行单独的环境影响计算。本文将路面整个生命过程分为原材料生产，路面建设，运营养护和路面结构拆除四个阶段，材料的运输包括在四个阶段内。输入为原材料和能量，输出为各种废弃物的排放。本研究的系统边界设定如图 3.1 所示。

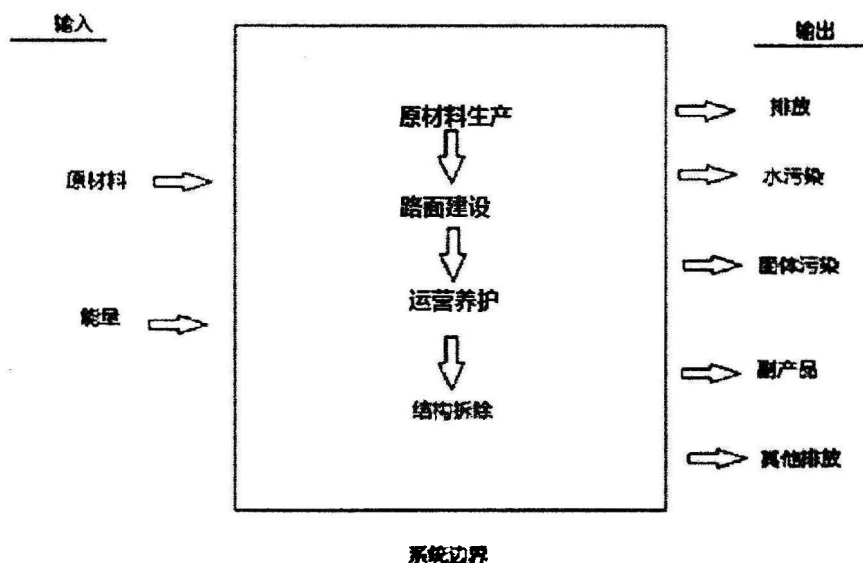


图 3.1 路面生命周期评价系统边界

3.1.2.3 功能单位

功能单位是度量产品系统输入输出功能时采用的单位，可以是一定数量的产品或某种服务。最后得到的所有数据都必须以功能单位为标准。其目的是为有关的输入和输出数据提供参考基准，以保证生命周期评价结果的可比性。本研究中取 1km 双向四车道公路作为 1 个基本单位，输入为 1km 双向四车道公路在生命周期内消耗的能量，单位是 MJ/功能单位，输出 1km 双向四车道公路路面生命周期内产生的排放，单位为 t/功能单位。

3.2 路面生命周期清单分析

公路路面清单分析是对路面生命周期各个阶段能耗与排放的量化分析。清单分析的主要内容是收集能源消耗与环境排放的相关数据，并选择合适的计算方法，将能耗与排放进行量化。数据收集前，需确定各阶段主要的环境影响因素。

表 3.2 各阶段主要环境影响因素

	环境影响因素
原材料生产阶段	原材料在使用和之前所有上有过程和活动的总和，包括原材料的开采、生产、加工以及中间运输等过程。
建设施工阶段	混合料的拌合、运输以及路面摊铺压实等施工机械运行
运营养护阶段	使用过程中因路面状况变化增加的车辆油耗，路面维修过程中原材料和施工机械的运行
结构拆除阶段	路面拆除投入的施工机械运行

3.2.1 数据来源

要进行完整的使用寿命评价，需要根据产品使用寿命阶段内的各工艺流程进行大量的清单数据收集。要获得合适的数据，需要充分利用公共信息。本研究的数据主要来自于已建成的数据库，相关文献，各类统计年鉴等和现场调研等。国外的使用寿命评价开展较早，数据库相对我国比较详细。但是由于各国材料参数，原材料开采生产工艺不同，国外数据库的部分数据会出现不符合我国实际的情况。本文采用的数据库为 eBalance 软件数据库。eBalance 是由亿科环境科技有限公司（IKE）研发、具有自主知识产权的通用 LCA 分析软件，并提供中国以及世界范围的高质量数据库支持。eBalance 数据库中除了欧盟研究总署（JRC，EC）提供的欧盟使用寿命基础数据库（ELCD）以及瑞士 Ecoinvent 数据库外，还包括四川大学研发的中国使用寿命基础数据库（CLCD），并允许用户将新的数据和计算结果添加到数据库中。

3.2.2 路面使用寿命能耗与排放通用计算方法

使用寿命各阶段数据收集结束后，选择合理的计算方法计算路面的能耗与排放是清单分析的最终目标。

本文中能耗的计算方法选择定额法。定额法首先根据交通部颁发的《公路工程预算定额》（JTG/T B06-02-2007），查询生产单位体积或面积实体路面建设过程中所需的机械台班数量，再根据《公路工程机械台班费用定额》（JTG/T B06-03-2007）查询每台班的能耗参数，将二者相乘后，即可得生产单位体积或面积实体路面所需要的能耗。最终通过计算实际路面折算成单位路面的数量，即可确定实际路面建设过程中各施工工艺的能耗。通过这种方法得到的

能耗数据是各种燃料，如汽油，重油，柴油的质量或体积。为了方便统一的计算和统计，需根据各种燃料的 发热值，将能耗单位统一变成 MJ。

根据定额法计算得到各个阶段的燃料用量后，可根据排放因子法来计算生命周期各阶段的环境排放。排放因子是指单位质量、单位体积或单位距离某种活动产生的排放量。计算公式如式所示：

$$E=A \times EF \times \left(1 - \frac{ER}{100}\right) \quad (2.1)$$

其中： E — 排放量；

A — 活动数据；

EF — 排放因子；

ER — 减排效率。

3.3 路面影响评价与结果解释

生命周期影响评价是 LCA 的重要组成部分，它涉及到数据的归类和计算，目的是对清单分析所识别的环境影响因子进行定性与定量的表征评价，以确定产品生命周期过程中的物质能量交换对其外部环境的影响程度。结果解释是将清单分析的结果和影响评价相结合并得出结论和建议。

3.3.1 清单分析结果分类

清单分析得出的结果是某一个环境影响因子的具体数值。然而，很多环境影响因子的影响类型相同。清单分析结果归类就是对某一类型有一致或相似影响的排放物归类，并探明影响因子作用的途径、污染物的贡献、影响强度和范围。如，SO₂，NO_x 等气体均能产生酸化反应，在分析时应该归为一类。路面生命周期各阶段产生的污染主要包括气体排放，固体废弃物，水污染以及各种副产品等。本文中研究的排放类型为气体排放，并选取全球变暖，酸化效应和颗粒物排放等目前关注度比较高的影响类型作为气体排放的主要研究类型。

3.3.2 清单分析结果特征化和加权赋值

对某一类型有一致或者相似影响的排放为应归为一类，但是由于他们的影响贡献率不同，不能单纯的将排放量进行相加。需利用特征因子进行转化，特征因子是指某一影响类型中的

代表因子。例如，全球变暖影响类型中选择具有代表性的 CO₂ 排放作为特征因子。并将其他影响因子利用公式进行特征化。

$$EI_i = \sum_j (I_{ij} \times C_{ij})$$

(2.2)

式中：EI_i — 为第 i 个影响类别的特征化结果；

I_{ij} — 第 i 个影响类比中，第 j 个影响因子的清单分析结果；

C_{ij} — 为第 i 个影响类比中，第 j 个影响因子的特征参数。

经过计算，全球变暖，酸化效应和颗粒物三种环境影响类别的影响因子以及影响因子对应的特征因子如表 3.3 所示^[36]。

表 3.3 影响类别、影响因子及特征因子

影响类别		影响因子	特征因子单位（吨）	特征因子
环境排放	全球变暖	CO ₂	Kg 等效 CO ₂ (IPCC100 年模型)	1
		CH ₄		25
		N ₂ O		298
	酸化效应	SO _x	Kg 等效 SO ₂	1
		NO _x		0.7
		NH ₃		1.88
	颗粒物	PM ₁₀ 、PM _{2.5}	Kg	1

3.3.3 结果解释

结果解释是根据分析量化后的结果，进行环境影响解释，并提出相应的改善措施。如根据不同路面原材料和施工工艺的不同，分析哪一种路面材料或者施工工艺更加绿色环保。

3.4 eBalance 建模

3.4.1 eBalance 软件介绍

eBalance是由亿科环境科技有限公司（IKE）研发、具有自主知识产权的通用LCA分析软件，并提供中国以及世界范围的高质量数据库支持。eBalance软件全面支持LCA方法的各标准步骤，包括目标与范围定义、构造生命周期流程图、输入清单数据、LCI及LCIA计算与分析等。主要功能如下：

生命周期建模：支持用户构建任意形式的生命周期流程图，适合于各种产品的生命周期建模；可支持浮动运输框和废物处理框的建模方式。

清单数据输入：支持手工录入单元过程的清单数据，也支持从清单数据库或之前保存的清单文件中导入清单数据，也可以从ILCD或EcoSpold 1或EcoSpold 2格式的XML文件中导入清单数据。

LCI与LCIA计算：允许指定模型中任意一个过程的产品作为基准流进行计算，也允许指定多个过程的产品作为基准流，进行计算并比较。程序内置了常用的10多种LCIA特征化指标、2005和2010年中国的归一化基准值以及面向中国节能减排政策目标的ECER权重因子，支持完整的LCIA特征化指标、归一化指标和加权综合指标的计算，用户还可以自定义其他LCIA指标。

计算结果分析与显示：提供了多种数据图表和图表选项，用于分析和显示各项计算结果。此外，通过自定义图表可以对比分析多种条件下的多套计算结果。

计算结果输出：LCI和LCIA计算结果可以导出为Excel或CSV文件，用于LCA报告。还可以输出到清单数据库，用于以后的LCA研究，也可以导出为清单文件 (*.inv)，传递给下游用户。

3.4.2 eBalance 软件操作流程

1. 程序启动后，从“文件”菜单或工具栏上，“新建”一个项目文件 (*.lca)，或“打开”一个已存在的项目文件。在“项目描述”页中，填写项目名称、作者、委托方等一系列信息，描述项目的目标与范围。

2. 选择 在“流程图”页中，采用过程框和连线，可以构建任意产品的生命周期流程图。

3. 双击流程图中任意一个过程框，可以打开相应的过程页。在过程页中可以：

- 在相应的子标签中编辑过程的描述信息和清单数据。
- 从清单数据库或者清单文档中导入数据，清单数据库如图3.2所示。
- 将过程中的清单数据和信息导出到清单数据库或清单文档中。

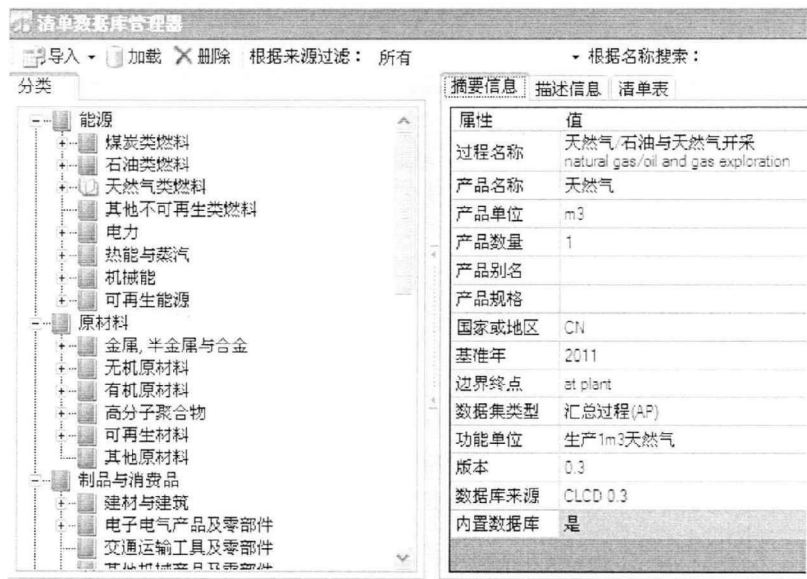


图3.2 eBalance软件清单数据库展示

- 4. 在“计算条件”中，可以
 - 选择一个或多个产品作为基准流，点击“计算按钮”开始汇总计算。
 - 也可在此设置敏感度计算的条件。
- 5. 在“计算结果”页中，可以
 - 浏览LCI和LCIA指标的计算结果，在即时图表中逐一进行图表分析。
 - 如果计算条件中设置了敏感度计算条件，那么这里会显示敏感度的结算结果。
 - 在“自定义图标”中对比分析和显示多个计算方案的指标结果。
- 6. 计算结果的保存：在“计算结果”页中，
 - LCI和LCIA计算结果可以到处为Excel或CSV文件，用于LCA报告。
 - 可以输出到清单数据库，用于以后的LCA研究。

3.4.3 路面生命周期评价 eBalance 建模

eBalance 软件通过建立产品流流程图，对产品生命周期各阶段的能耗和排放的影响因子进行详细的展示。并通过数据库数据选择进行各个基本流的环境影响评价。以沥青路面的 eBalance 建模为例（图 3.3），将沥青路面生命周期被分为原材料生产阶段，路面建设阶段，运营养护阶段，结构物拆除阶段等四个子系统。其中，原材料生产阶段的输入为沥青，矿粉，砂，纤维，集料，剥落剂等材料的质量。路面建设阶段在软件中的输入为重油，电力，柴油的用量。运营养护阶段的输入为汽油，柴油，重油和电力的用量。最后的废弃物拆除阶段输

入的是柴油的消耗量。具体的计算将在下面的章节就行展示。

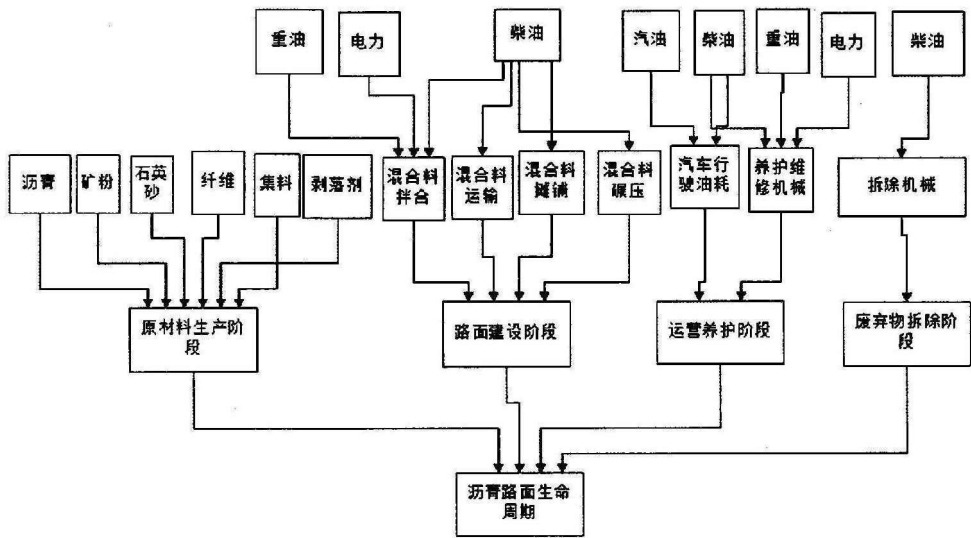


图 3.3 沥青路面生命周期建模

第四章 两种路面生命周期清单分析

路面生命周期清单分析主要包括四个阶段：原材料生产阶段、路面施工建设阶段，运营养护阶段和结构拆除阶段。本章将分阶段进行清单数据的收集和计算。

4.1 路面原材料生产阶段清单数据收集与计算

要进行原材料生产阶段的生命周期清单计算，需先确定 1 功能单位路面消耗的原材料类型和用量。

4.1.1 沥青路面工程量计算

1km 沥青路面面层建设需要的混合料总体积为： $23\times0.18\times1000=4140\text{m}^3$ ，其中包括 SMA-13 沥青 920 m^3 ，Superpave-20 沥青 1380 m^3 和 Superpave-25 沥青 1840 m^3 。取 SMA-13 沥青混合料密度为 2.46 t/m^3 ，则 1km 沥青路面面层的 SMA-13 沥青混合料的使用量为 $920\text{m}^3\times2.46\text{t}/\text{m}^3=2263.2\text{t}$ 。根据表 4.1 可计算得，

表 4.1 1 吨 SMA-13 沥青混合料各项材料用量

配合比 (%)								实际用量 (重量值)							
集料 (%)				沥青 (%)	矿粉 (%)	纤维 (%)	抗剥落剂 (%)	集料 (吨)				沥青 (吨)	矿粉 (吨)	纤维 (kg)	剥落剂 (kg)
机制砂	(1)	(2)	(3)					机制砂	(1)	(2)	(3)				
8	4.2	35.2	41.6	5.6-6.0 (5.8)	11	0.3	0.3-0.5 (0.4)	0.075	0.04	0.332	0.392	0.058	0.103	3	0.232

注：(1)0-2.36 机制砂，(2)2.36-4.75，(3)4.75-9.5，(4)9.5-13.2

1km 沥青路面上面层的的原材料用量为集料 1898.8t（其中机制砂用量为 169.7t，2.36-4.75mm 集料用量为 90.5t，4.75-9.5mm 集料用量为 751.4t，9.5-13.2 mm 集料用量为 887.2t），沥青 131.3t，矿粉 233.1t，纤维 6.8t 和剥落剂 2.8t。

同理，可求出中面层和下面层的原材料用量并相加得到 1km 沥青路面面层的原材料用量。汇总结果如表 4.2 所示。

表 4.2 1km 沥青路面原材料消耗清单

材料类型	消耗量
沥青	433.8t
矿粉	576.4t
纤维	6.8t
剥落剂	4t
机制砂	1634.7t
2.36-4.75mm 集料	760.6t
4.75-9.5mm 集料	1653.4t
9.5-13.2 mm 集料	2300.3t
13.2-16mm 集料	2631.9t

4.1.2 连续配筋水泥混凝土路面工程量计算

水泥混凝土是指由水泥、砂、石等用水混合结成整体的工程复合材料的统称。连续配筋混凝土路面是指面层内配置纵向连续钢筋和横向钢筋，横向不设缩缝的水泥混凝土路面。钢筋布置如图 4.1 所示。



图 4.1 连续配筋混凝土路面钢筋布置展示

1km 本文中的连续配筋水泥混凝土路面建设需要的混合料总体积为： $23\times0.28\times1000=6440\text{m}^3$ ，水泥用量为 $6440\text{m}^3\times360\text{kg/m}^3=2318.4\text{t}$ 。根据确定的配合比可得 1km 水泥混凝土路面面层需使用碎石 8415.8t，砂 4335.4 以及水 1112.9t。查询资料知，钢筋密度为 7.85t/m^3 ，且根据圆钢规格重量表知 $\Phi18$ II 级钢筋每米重 2kg。则，连续配筋混凝土面层纵向钢筋用量为： $23\times0.28\times0.61\%\times1000\times7.85=308.4\text{t}$ 。横向钢筋用量为： $23\times2\times1000/0.1\text{m}=460,000\text{kg}=460\text{t}$ 。总的 $\Phi18$ II 级钢筋用量为 768.4t。根据以上计算，1km 连续配筋混凝土路面面层的原材料用量汇总如表 4.3 所示。

表 4.3 1km 连续配筋混凝土路面面层的原材料用量

材料类型	消耗量
水泥	2318.4t
碎石	8415.8t
砂	4335.4t
水	1112.9t
圆钢	768.4t

4.1.3 eBalance 建模与计算

以沥青路面为例，在 eBalance 软件中画出沥青原材料生产阶段基准流。同理，也可绘制出水泥路面在原材料生产阶段的基准流。

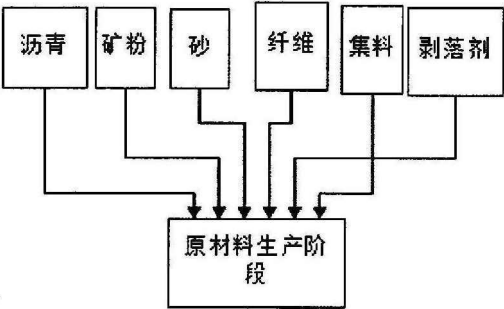


图 4.2 沥青路面原材料生产阶段建模

通过将原材料的能耗与排放数据库导入，可求得沥青和水泥路面原材料生产阶段的能耗与排放。因 eBalance 软件数据库中缺少沥青的能耗与排放数据，本文将欧洲沥青协会计算

的沥青从开采到生产的生命周期清单数据添加入 eBalance 数据库。软件操作后计算结果如表 4.4 所示。

4.4 1km 路面原材料生产阶段主要材料能耗

沥青路面原材料	能耗值（MJ）	水泥路面原材料	能耗值（MJ）
沥青	3959726.4	水泥	7469142.9
矿粉	24208.8	碎石	319800.4
砂	62118.6	砂	164745.8
集料	279155.6	圆钢	19186179.68
总计	4325209.4		27139868.78

4.5 1km 路面原材料阶段特征化后气体的排放

	沥青路面(kg)	水泥路面(kg)
全球变暖	82186	377200
酸化效应	2107	12880
颗粒物	1569.42	6440

根据以上计算结果，可得出两种路面中各原材料对能耗的贡献度，各种原材料能耗组成情况如图 4.3 与图 4.4 所示。

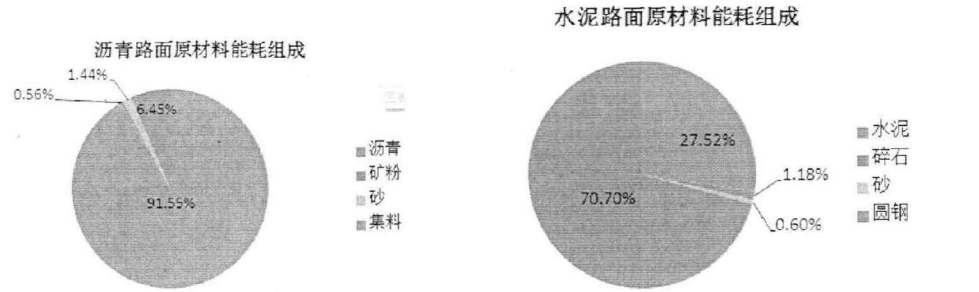


图 4.3 沥青路面原材料能耗组成

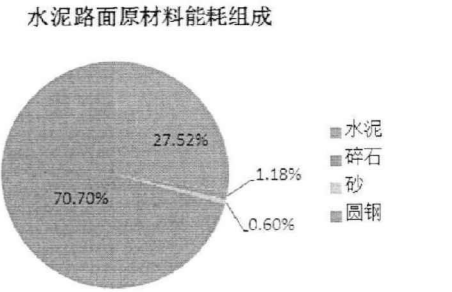


图 4.4 水泥路面原材料能耗组成

由图 4.3 可见，在沥青路面所有原材料中，沥青的生产耗能最多，占总的原材料生产能耗总和的 91.55%。对于连续配筋混凝土路面而言，圆钢和水泥生产耗能最多，分别占原材料生产能耗总和的 70.70%和 27.52%。且连续配筋混凝土路面的在原材料生产阶段的总能耗远大于沥青路面，这主要是因为连续配筋混凝土路面中圆钢的生产消耗了大量的能量。若将

两种路面总的能耗按照设计寿命折合成每年的能耗，则沥青路面每年为 288347.27MJ，连续配筋混凝土路面为 904662.29MJ，约为沥青路面的 3 倍。

根据输出的气体排放数据，可比较两种结构特征化后的三种类型的气体排放。比较情况如图 4.5 所示。

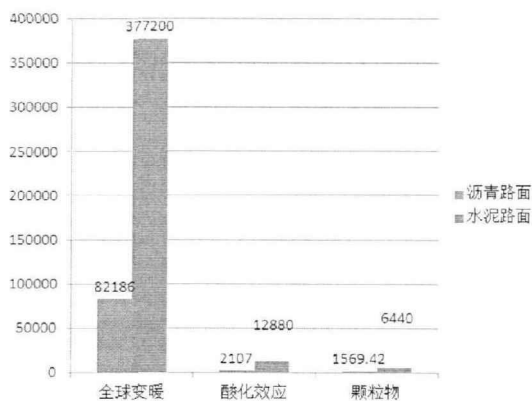


图 4.5 两种路面的空气排放

由图可知，无论是沥青路面还是连续配筋混凝土路面，三种影响类型的排放量都是全球变暖>酸化效应>颗粒物排放。尤其是在连续配筋混凝土路面中，全球变暖这一影响类型占气体排放污染的绝大部分。且，连续配筋混凝土的气体排放远大于沥青路面，这主要是因为钢在生产过程中排放大量的 CO_2 导致的。

综上可知，沥青路面原材料生产阶段沥青消耗产生的环境负荷最大。矿粉、砂、集料等虽然用量大，但是在生产过程中能耗低，排放小，承担的环境负荷比例小。在连续配筋混凝土路面原材料生产阶段钢材消耗产生的环境负荷最大，其次是水泥，其他材料如砂，碎石等虽然用量大，但能耗与钢材，水泥产生的能耗相比可忽略。这意味着要降低路面原材料生产阶段的能耗与排放，必须优化沥青、水泥、钢材等耗能高的原材料的生产工艺。

4.2 路面建设阶段清单数据收集及计算

4.2.1 沥青路面建设阶段清单数据收集与计算

4.2.1.1 沥青路面施工工艺与机械确定

沥青路面的施工过程主要包括混合料的拌合与运输，摊铺和碾压等工艺过程。具体的施工工艺流程如图 4.6 所示^[37]。

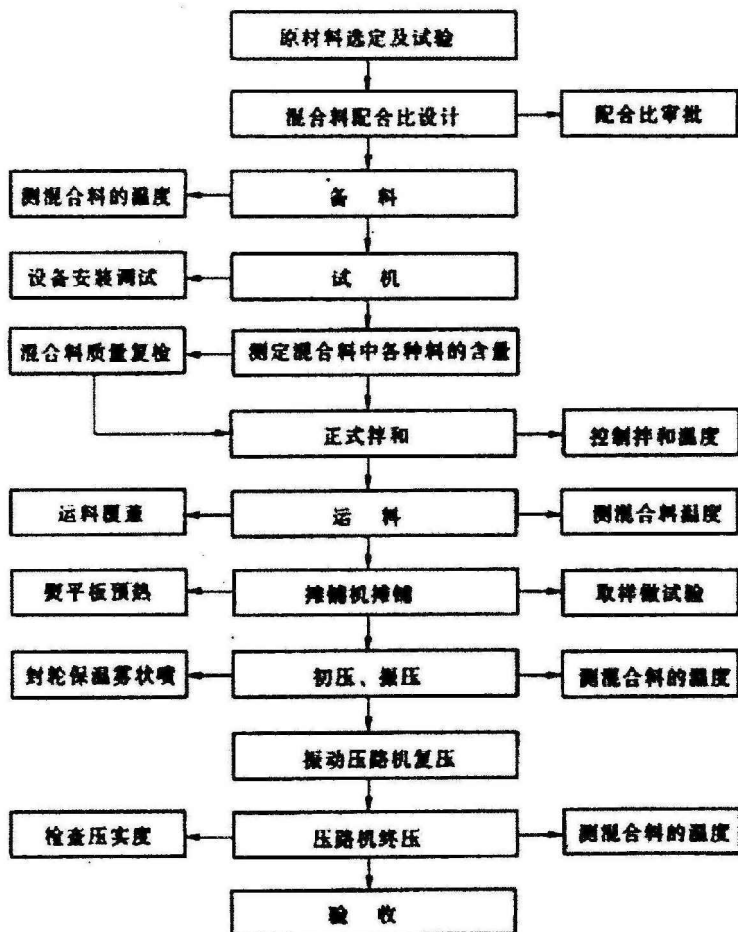


图 4.6 沥青混合料施工流程

4.2.1.2 沥青混合料拌合过程清单数据收集与计算

沥青混合料是现代道路路面结构的主要材料之一。沥青混合料是矿质混合料(简称矿料)与沥青结合料经拌制而成的混合料的总称,其中矿料起骨架作用,沥青与填料起胶结与填充作用。沥青混合料的生产就是把一定级配的集料和沥青,按规定比例在给定的温度下拌合均匀,制成混合料的过程。

沥青混凝土搅拌站按工艺流程可分为间歇强制式和连续滚筒式拌合设备。间歇强制式拌和机的特点是冷矿料的烘干、加热以及与热沥青的拌和,是先后在不同的设备中进行的。其中,集料的烘干与加热是连续进行的,而混合料的拌制则是间歇进行,由搅拌器强制拌和^[38]。在连续滚筒设备中,集料不仅在滚筒中烘干、加热,而且也与沥青结合料拌和。在滚筒式搅拌设备中没有级配筛网、热料仓(斗)、称量桶和搅拌品,集料的级配是在冷料时按质量或体

机配比予以控制的,当集料进入滚筒内烘干时,沥青通过流量计由微机控制流量被送入滚筒。目前国内市场,间歇式沥青混合料搅拌设备的使用量相较于连续式沥青混合料搅拌设备仍独占鳌头。主要有以下三方面的原因:一是间歇式沥青混合料搅拌设备对集料的要求较低。目前,国内生产集料的设备简陋,集料标准较国外低。二是间歇式沥青混合料搅拌设备有二次计量系统,可以保证集料的级配,提高沥青和集料的比例精确度。此外,间歇式沥青混合料搅拌设备还随时改变集料的级配以适应不同的要求^[39]。沥青混凝土搅拌设备按其生产能力分为大型、中型和小型三种。大型的生产率为 400t/h 以上,都属于固定式,适用于集中工程及城市道路工程;中型的生产率为 30~400t/h,可以是固定式或半固定式(半固定式指将设备固定在几个拖车上);小型的生产率为 30t/h 以下,多为移动式,即设备全部组成部分都设置在一辆半拖车或大型特制汽车底盘上,可随工地点转移,适用于工程量小的公路施工工程或者养路作业。由交通部发行的《公路工程机械台班费用定额》(JTG/T B06-03-2007)根据拌和设备的生产能力将沥青混合料拌和设备分为 7 类,并给出了代表的主机型号,如表 4.6 所示。

表 4.6 沥青混凝土拌和设备代表型号

生产能力 (t/h)	30 以内	60 以内	80 以内	120 以内	160 以内	240 以内	320 以内
主机型号	LB-30	LB800	LB1000	LB1500	LB2000	LB3000	H4000

在沥青混合料生产过程中,除沥青混凝土拌和设备外,还需配备轮胎式装载机负责上料和收料。由交通部发行的《公路工程机械台班费用定额》(JTG/T B06-03-2007)根据轮胎式装载机的斗容量将沥青混合料拌和设备分为 7 类,并给出了代表的主机型号,如表 4.7 所示。

表 4.7 轮胎式装载机代表型号

斗容量 (m ³)	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	3.5	2.0	3.0
主机型号	ZL10	ZL20	ZL30	ZL40	ZL50	ZL60	ZLD40 三向倾斜	ZLD50 三向倾斜

由沥青混合料拌合的生产工艺以及所需生产设备可知,沥青混合料拌合过程中主要的能源消耗为机械的液体燃料消耗和电力消耗。其中拌和设备的液体燃料类型一般为重油,装载机的液体燃料类型为柴油。本文将采用定额法,通过计算生产 1 功能单位路面建设所需的机械台班数与每单位台班的机械台班费用定额相乘的方法来确定沥青混合料生产过程中的燃料消耗量和电力消耗。

通过整理《公路工程机械台班费用定额》(JTG/T B06-03-2007)和《公路工程预算定额》(JTG/T B06-02-2007)中的数据(表 4.8 所示),可分别计算 1000m³粗粒式、中粒式、细粒

式沥青混凝土路面实体拌合中拌合设备的能源消耗量。计算结果如表 4.9 所示。

表 4.8 1000m³ 路面实体拌合时拌和设备台班数与每台班能耗值

设备生产能力	台班			重油消耗 (kg/台班)	电力消耗(kw·h/台班)
	粗粒式	中粒式	细粒式		
30 以内	16.56	16.51	16.46	897.6	606.06
60 以内	6.94	6.92	6.9	1795.2	1318.11
120 以内	3.76	3.74	3.73	35930.4	1859.23
160 以内	2.65	2.64	2.63	4787.2	3052.46
240 以内	1.77	1.76	1.76	7180.8	4474.63
320 以内	1.35	1.34	1.34	9574.4	5917.61

表 4.9 1000m³ 路面实体拌合时拌和设备累积能耗

设备生产能 力	重油累计消耗 (kg)			电力累积消耗量(kw·h)		
	粗粒式	中粒式	细粒式	粗粒式	中粒式	细粒式
30 以内	14864.26	14819.38	14774.50	10036.35	10006.05	9975.75
60 以内	12458.69	12422.78	12386.88	9147.68	9121.32	9094.96
120 以内	135098.30	134379.70	134020.39	6990.71	6953.52	6934.93
160 以内	12686.08	12638.21	12590.34	8089.02	8058.49	8027.97
240 以内	12710.02	12638.21	12638.21	7920.10	7875.35	7875.35
320 以内	12925.44	12829.70	12829.70	7988.77	7929.60	7929.60

目前，国内常用的沥青混合料拌和设备为生产能力为 240t/h 的 LB3000 型。计算沥青路面工程量时已求得，路面实体包括 SMA-13 沥青 920 m³，Superpave-20 沥青 1380 m³ 和 Superpave-25 沥青 1840 m³。根据表 4.9 的计算结果，可得出修建 1km 沥青混凝土路面面层时，拌和设备的累积能源消耗为：

重油总能耗=920×12638.21/1000+1380×12638.21/1000+1840×12710.02/1000=52454.31kg

电力总消耗=920×7875.35/1000+1380×7875.35/1000+1840×7920.10/1000=32686.28kw·h。

为配合为生产能力为 240t/h 的 LB3000 型沥青混合料拌合设备，负责上料和收料的轮胎式装载机选择斗容量为 2m³ 的 ZL40 型装载机。ZL40 型装载机在配套拌合能力为 240t/h 的拌和设备情况下生产 1000m³ 沥青混合料路面实体的台班数和柴油消耗量如表 4.10 所

示。

表 4.10 生产 1000m³ 沥青混合料路面实体时装载机的台班数和柴油消耗量

设备	台班			柴油消耗量 (kg/台班)	累计柴油消耗量 (kg)		
	粗粒式	中粒式	细粒式		粗粒式	中粒式	细粒式
ZL40 型轮胎装载机	4.99	4.97	4.96	92.86	463.37	461.51	460.59

则修建本文中 1km 沥青混凝土路面面层时，装载机设备的累积能耗为：

柴油总消耗=920×460.59/1000+1380×461.51/1000+1840×463.37/1000=1913.23kg。

4.2.1.3 沥青混合料运输过程清单数据收集与计算

沥青混合料成品应及时运往工地，工前应查明具体位置、施工条件、摊铺能力、运输路线、运距和运输时间，以及所需混合料的种类和数量等^[40]。拌和设备时开时停会造成燃料的浪费，并影响混合料的质量。车辆数量必须满足拌和设备连续生产的要求，不因车辆少而临时停工。应采用载重量大于 150kN 的大型自卸汽车运送沥青混合料到摊铺现场，以减少摊铺机前经常短时换车卸料的情况，运输自卸车的数量应该较拌和能力和摊铺速度有所富余，应保证将拌和机拌制的沥青混合料(含预先储存在成品储料室内的沥青混合料)及时运送到摊铺现场，并在摊铺机前常保持有 4、5 辆待卸车^[41]。同时，拌和厂与工地现场距离应充分考虑交通堵塞的可能，确保混合料的温度下降不超过要求，且不致因颠簸造成混合料离析。本文中假设沥青拌合厂距离施工现场为 10km，并选用载重量为 20t 的自卸汽车进行运输。

沥青混合料运输过程中的主要能源消耗来自于运输车辆的燃油消耗，主要为柴油。对环境的排放则包括运输过程中的逸散排放和燃料完全燃烧和不完全燃烧时产生的气体排放，如 CO₂，CO，NO_x 等。根据《公路工程预算定额》(JTG/TB06-02-2007)和《公路工程机械台班费用定额》(JTG/TB06-03-2007)可知，1000m³ 沥青混合料实体路面采用 20t 装载质量的自卸汽车运输时的台班和每台班的柴油消耗量（表 4.11），从而得到运输过程中的能源消耗值。

表 4.11 运输 1000m³ 沥青混合料实体路面的机械台班和能源消耗

设备	台班				柴油消耗 (kg)
	第一个 1km	每增运 0.5km			
		平均运距 (km)			
		5 以内	10 以内	15 以内	
20 以内自卸车	6.14	0.56	0.49	0.47	77.11

路面实体沥青混合料共消耗 4140m^3 ，运距为 10km ，则修建 1km 沥青混凝土路面面层在混合料运输过程中消耗的柴油量为： $(6.14+0.49\times(10-1)/0.5)\times 77.11\times 4140/1000=4775.76\text{kg}$ 。

4.2.1.4 沥青混合料摊铺过程清单数据收集与计算

沥青混合料摊铺是利用沥青混合料摊铺机将拌制出的沥青混合料按一定的技术要求(厚度和横截面形状)均匀地摊铺在路基或基层上，并给以初步捣实和整平的施工过程。沥青混合料摊铺机分履带式和轮胎式两种^[42]。轮胎式摊铺机具有结构简单，造价低；行驶速度快；机动性好等优点，但由于其接地面积较小，牵引力较小会导致后驱动轮因料斗内材料发生变形，从而影响自卸汽车卸料速度。履带式摊铺机接地面积大，牵引力大，对路面的不平整度不敏感。履带式摊铺机行驶速度慢，不利于转移。但是在大的工程时却表现出很强的优越性。因此，我国公路建设使用的摊铺机主要类型为履带式摊铺机。

沥青混合料摊铺过程中的能源消耗主要来自于摊铺机的燃油消耗，主要为柴油。摊铺过程中的排放主要来源于燃油完全燃烧和不完全燃烧产生的气体排放。除此之外，沥青摊铺过程中沥青混合料也会产生排放，经检测排放的气体主要包括沥青烟，苯可溶物以及苯并芘等^[43]。单位排放量和总排放量计算结果如表 4.12 所示。

表 4.12 沥青烟，苯可溶物以及苯并芘单位排放量

有害气体	单位排放量 (mg/m^3)	总排放量 (mg)
沥青烟	21.1	87354
苯可溶物	19.5	80730
苯并花	0.0944	390.816

根据《公路工程预算定额》(JTG/T B06-02-2007)和《公路工程机械台班费用定额》(JTG/T B06-03-2007)可知，当对应生产能力为 $240\text{t}/\text{h}$ 的沥青混合料拌合设备时，应选用最大摊铺宽度为 12.5 以内的沥青混合料摊铺机。则， 1000m^3 沥青混合料实体路面摊铺时所需的摊铺设备台班数和每台班的柴油消耗量如表 4.13 所示。

表 4.13 摊铺 1000m^3 沥青混合料实体路面的机械台班和能源消耗

设备	台班			柴油消耗量 ($\text{kg}/\text{台班}$)
	沥青玛蹄脂碎石混合料	中粒式沥青混合料	粗粒式沥青混合料	
最大摊铺宽度 12.5m 的沥青混合料摊铺机	2.23	1.92	1.91	136.41

因此，修建本文中 1km 沥青混凝土路面面层时，摊铺设备的累积能耗为：

柴油总消耗=(920/1000×2.23+1380/1000×1.92+1840/1000×1.91) ×136.41=1120.69kg。

4.2.1.5 沥青混合料压实过程清单数据收集与计算

沥青路面的耐用性主要受两个指标的影响，即设计的混合料和压实。在沥青路面施工中，使用单一机型的压实机械往往难以完成整个工程的压实工序，通常需要采用大、中、小型配合或多机种组合进行。为此压实机械的选择和配备要在综合分析的基础上做出最经济合理的选择。常用的沥青路面压实机械包括静力式压路机、轮胎式压路机和振动式压路机。沥青路面的碾压过程通常分为三个阶段，即初压、复压和终压。静力式压路机使用历史较久，目前常用的是中型或者超重型两轮压路机。其作用机理是依靠自重货或加配重对沥青混合料产生静压力，主要适用于路面的初压和终压。轮胎式压路机的优点是初压时混合料产生的推移小，但轮胎式压路机在高温作业的情况下容易产生轮胎痕迹，而且产生轮胎痕迹在低温季节很难被后续碾压消除。因此，轮胎式压路机适用于复压时，来消除静力式压路机碾压后的热裂纹现象。振动式压路机的作用机理是利用自重和钢轮振动完成对路面的压实，主要包括两种类型：单碾压轮式振动压路机和双碾压轮式振动压路机。其中碾压轮式振动压路机只适用于中、下面层的施工，而双碾压轮式振动压路机由于其优良的特性成为路面复压的最好选择^[44]。在实际工程中，为减少调迁和保证设备的维修保养和管理，应使用多用途的压实机械。对于摊铺厚度为 3~7cm 的沥青路面，可按照表 4.14 给出的建议选择压实设备。

表 4.14 碾压机型选型参考

碾压过程	上面层	中、下面层
初压	8/10t 双钢轮	8/10t 双钢轮
	或 6/8t 双钢轮	或 6/8t 双钢轮
	或静压自重 7~10t 双钢轮铰接转向振动压路机	或静压 7~10t 双钢轮铰接转向压路机
复压	7~10t 双钢轮铰接转向振动压路机和 9~16t 轮胎压路机	7~10t 双钢轮铰接转向振动压路机和 9~16t 轮胎压路机
		或者 8~18t 轮胎钢轮振动压路机和 9~16t 轮胎压路机
终压	8~10t 双钢轮	2Y 8/10t 双钢轮
	或 6/8t 双钢轮	或 2Y 6/8t 双钢轮
	或静压 7~10t 双钢轮铰接转向压路机	或 9~16t 轮胎压路机

沥青混合料摊铺过程中的能源消耗主要来自于压路机的燃油消耗，主要为柴油。摊铺过程中的排放主要来源于燃油完全燃烧和不完全燃烧产生的气体排放。根据《公路工程预算定额》(JTG/T B06-02-2007)和《公路工程机械台班费用定额》(JTG/T B06-03-2007)数据可知，当对应生产能力为 240t/h 的沥青混合料拌合设备时，1000m³ 沥青混合料实体路面碾压时所需的碾压设备台班数和每台班的柴油消耗量（表 4.15）。

表 4.15 1000m³ 沥青混合料实体路面碾压时所需的碾压设备台班数柴油消耗量

设备	台班			柴油消耗量 (kg/台班)
	沥青玛蹄脂 碎石混合料	中粒式沥青 混合料	粗粒式沥青 混合料	
6~8t 光轮压路机	4.38	3.78	3.75	54.86
12~15t 光轮压路机	4.38	3.78	3.75	80.92
15t 以内振动压力机	4.34	-	-	80.92
16~20t 轮胎压路机	-	0.55	0.55	42.29
20~25t 轮胎压路机	-	1.29	1.28	50.29

根据表可计算得，

上面层（SMA-13）压实过程柴油总消耗

$$=920/1000 \times (4.38 \times 54.86 + 4.38 \times 80.92 + 4.34 \times 80.92) = 870.24 \text{kg}。$$

中面层（Superpave-20）压过程实柴油总消耗

$$=1380/1000 \times (3.78 \times 54.86 + 3.78 \times 80.92 + 0.55 \times 42.29 + 1.29 \times 50.29) = 829.91 \text{kg}。$$

下面层（Superpave-25）压实过程柴油总消耗

$$=1840/1000 \times (3.75 \times 54.86 + 3.75 \times 80.92 + 0.55 \times 42.29 + 1.28 \times 50.29) = 1098.12 \text{kg}。$$

三者相加可得，修建本文中 1km 沥青混凝土路面面层时，压实设备的累积能耗的柴油量为 2798.27kg。

4.2.2 水泥路面建设阶段清单数据收集与计算

按照《公路水泥混凝土路面施工技术规范》(JTG-F30-2003)的要求，连续配筋混凝土路面建设主要包括钢筋绑扎、混凝土拌合与运输、滑膜摊铺、做施工缝、路面养生等施工过程。

具体的施工工序如下图 4.6 所示。

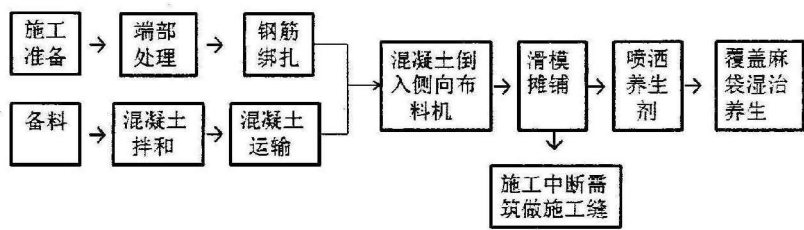


图 4.6 连续配筋混凝土路面施工工艺

对应上述施工过程，连续配筋混凝土路面建设阶段要用到的施工机械主要包括装载机，强制式搅拌楼、自卸汽车、滑模摊铺机和洒水车。建设阶段的主要能耗是机械的燃油消耗和电力消耗。建设阶段的排放则包括燃油燃烧产生的排放物以及水泥混凝土拌合过程中产生的烟尘等逸散排放。

1. 混凝土拌合设备

不同摊铺方式所要求的搅拌楼最小生产容量应满足表的规定。一般可配备 2~3 台搅拌楼，最多不宜超过 4 台。

表 4.16 混凝土路面不同摊铺方式的搅拌楼最小配置容量 (m³/h)

摊铺宽度 \ 摊铺方式	滑模摊铺	轨道摊铺	碾压混凝土	三辊轴摊铺	小型机具
单车道 3.75~4.5m	≥100	≥75	≥75	≥50	≥25
双车道 7.5~9m	≥200	≥150	≥150	≥100	≥50
整幅宽 ≥12.5m	≥300	≥200	≥200	-	-

为确定混凝土拌合楼的数量和型号，需确定拌合场的混凝土总拌和生产能力。当采用滑膜摊铺机进行摊铺时，拌合场的混凝土总拌和生产能力可按照式进行计算。

$$M = 60\mu b h v_t \tag{4.1}$$

式中 M ——拌和楼总拌和能力，m³/h；
 b ——摊铺宽度，m；
 v_t ——摊铺速度，m/min， $v_t \geq 1\text{m/min}$ ；
 h ——面板厚度，m；

μ ——拌和楼可靠性系数，一般取 1.2~1.5，拌和楼可靠性高时取较大值，反之取较小值，拌和钢纤维混凝土或坍落度要求较低时，取较大值。

2. 运输车辆

运输车辆车型和数量的选择应该根据施工的进度，运输的距离与路况等进行确定。运输

车辆的运输能力相比于拌合能力应有富余，以保证运送到施工现场的混凝土摊铺工作性。运输时，应选用车况优良、载重量 5~20t 的自卸车，且运输距离不宜超过 20km。在运输过程中，应尽量减少颠簸，防止离析现象的发生。当远距离运输或摊铺钢筋混凝土路面时，宜选配混凝土罐车。机械摊铺系统配套的运输车数量可按式 4.2 计算：

$$N = 2n(1 + \frac{Sr_c m}{v_q g_q}) \quad (4.2)$$

式中 N——汽车辆数；

n——相同产量拌和楼台数；

S——单程运输距离，km；

r_c ——混凝土密度，t/m³；

m——一台拌和楼每小时生产能力，m³/h；

v_q ——车辆的平均运输速度，km/h；

g_q ——汽车载重能力，t/辆。

3. 滑膜摊铺机施工

滑模摊铺机施工技术是用自带滑动模板的摊铺机，沿设在基层的基准线自动转向和自动找平，一次性完成布料、振动密实、成型、金回修整和拉毛、养生等水泥混凝土路面摊铺工序。它是目前混凝土路面摊铺中速度最快、工程质量最好、施工规模大的现代化、机械化和智能化的先进技术。因此，滑膜摊铺施工技术适合于各等级的公路。

滑模摊铺机按照技术参数可以分为特大、大、中、小四个级别。高速公路和一级公路施工时，应选用可以一次性摊铺 2 到 3 个车道宽度的滑模摊铺机（按每车道 3.75m 计算）。二级及以下公路施工时，选用的滑模摊铺机的最小摊铺宽度不可小于单车道设计宽度。除滑膜摊铺机外，在路面摊铺时，应配备装载机来辅助布料。施工过程中选用的滑模摊铺机可以按照表 4.17 的技术参数进行选择。

表 4.17 滑膜摊铺机的基本技术参数

项目	三车道 滑模摊铺机	双车道 滑模摊铺机	多功能单车道 滑模摊铺机	路缘石 滑模摊铺机
发动机功率 (KW)	200~300	150~200	70~120	≤80
摊铺宽度 (m)	12.5~16.0	3.6~9.7	2.5~6.0	<2.5
摊铺厚度 (m)	0~500	0~500	0~500	<450
			护栏高度 0~500	
摊铺速度 (m/min)	0~3	0~3	0~3	0~5
空驶速度 (m/min)	0~5	0~5	0~9	0~9

行走速度 (m/min)	0~15	0~18	0~15	0~10
履带数 (个)	4	2~4	2,3,4	2,3
整机自重 (t)	57~135	22~50	12~27	≤10

综合以上要求，本文拟建连续配筋混凝土路面选择的施工机械为 60m³/h 以内混凝土拌合站，6m³ 以内混凝土搅拌运输车，3m³ 以内轮胎式装载机，双车道滑模摊铺机，600L 以内洒水汽车。假定拌合站距离施工现场 6km。根据《公路工程预算定额》(JTG/T B06-02-2007) 和《公路工程机械台班费用定额》(JTG/T B06-03-2007) 可求得，1000m² 水泥混凝土路面建设过程中所需的各施工机械台班数和每台班的柴油消耗量如表 4.18 所示。

表 4.18 1000m² 水泥混凝土路面建设机械台班与油耗

施工机械	台班		拟 建 道 路 总 台 班 数 (28cm)	柴油消耗 (kg/台班)	电消耗 (kw·h/台班)	柴油总消耗 (kg)	电总消耗 (kw·h)
	路面厚度 (cm)						
	16	每增减 1m					
3m³ 以内轮胎式装 载机	0.94	0.06	1.66	115.15		191.15	
滑模式水泥混凝 土摊铺机	0.37	0.02	0.61	83.66		51.03	
6m³ 以内混凝土搅 拌运输车	2.19	0.14	3.87	55.54		214.94	
60m³/h 以内混凝 土搅拌站	0.54	0.03	0.9		684.98		616.49
6000L 以内洒水车	1.9	-	1.9	42.43		80.62	
总计						537.75	616.49

拟建的 1km 连续配筋混凝土路面总面积为: 23×1000=23000m²，根据表的计算结果可得，拟建的 1km 连续配筋混凝土路面共消耗柴油：23000/1000×537.75=12368.25kg，电力：23000/1000×616.49=14179.27kw·h。

4.2.3 eBalance 建模与计算

对两种路面建设过程中各施工工艺消耗的资源及数量进行汇总得：

表 4.19 两种路面建设过程中各施工工艺消耗的资源及数量

沥青施工工艺	沥青路面能源消耗	水泥施工工艺	水泥路面
混合料拌合	52454.31kg 重油， 32686.28kw·h 电， 913.23kg 柴油	混合料拌合	14179kw.h 电， 4397kg 柴油。
混合料运输	4775.76kg 柴油	混合料运输	4944kg 柴油
路面碾压	1120.69kg 柴油	路面摊铺	1174kg 柴油
路面摊铺	2798kg 柴油	路面洒水养护	1854kg 柴油

在 eBalance 中建模并输入表中数据，得出两种路面建设过程中各施工工艺总的能耗。

表 4.20 两种路面建设过程中各施工工艺能耗

沥青施工工艺	沥青路面总能耗（MJ）	水泥施工工艺	水泥路面总能耗（MJ）
混合料拌合	2650799.59	混合料拌合	397969
混合料运输	226906.76	混合料运输	234900.21
路面碾压	53246.42	路面摊铺	55779.29
路面摊铺	132939.08	路面洒水养护	88087.58
总计	3063891.85	总计	776736.08

表 4.21 1km 路面原材料阶段特征化的排放

	沥青路面(kg)	水泥路面(kg)
全球变暖	72936.63	23409.20
酸化效应	260.39	102.48
颗粒物	82.34	25.77

根据以上计算结果，可得出两种路面中各施工过程对能耗的贡献度以及特征化后两种路面的排放对比，如图 4.7 和 4.8 所示。

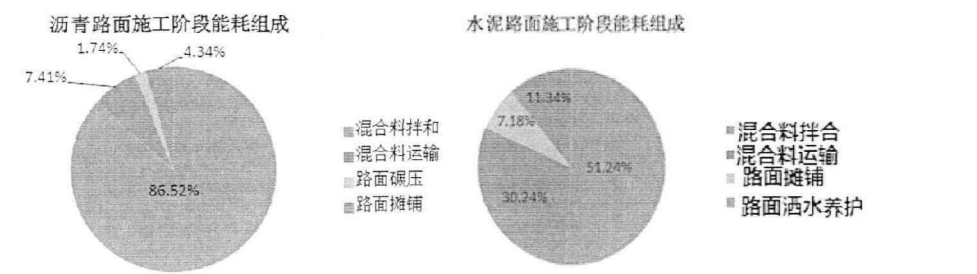


图 4.7 两种路面施工阶段能耗组成

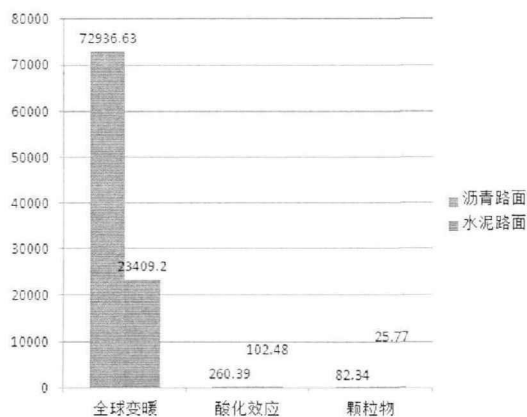


图 4.8 两种路面施工阶段空气排放

由图可知，无论是沥青路面的施工还是连续配筋混凝土路面的施工，混合料拌合过程造成的环境负荷都为最大。对于沥青路面，拌合过程中的能耗占施工过程总能耗的 86.52%，对于连续配筋混凝土路面，拌合过程中的能耗占施工过程总能耗的 51.24%。其次为混合料的运输，分别占 7.41%和 30.24%。此外，水泥路面在路面建设施工过程中无论是能耗还是排放均远低于沥青路面，这主要是由于水泥混凝土路面在混合料拌合过程中的能耗消耗远低于沥青混合料的拌合。因此，提高两种混合料的拌合效率，尤其是沥青混合料拌合效率是节能减排的有利途径。

4.3 路面运营阶段清单数据收集与计算

公路在建成使用时，相应的要承受行车荷载的作用以及遭受风吹、雨淋、冰雪、冻融、日晒等自然力的侵蚀，这样必然造成其使用功能和行车服务质量的下降。公路功能和服务质量的下降会影响车辆的车速，车速的变化导致油耗变化，从而影响路面运营期间总的排放。因此，要计算运营期间的能耗与排放，需建立路面状况-车速-能耗-排放量化模型。

以往的很多研究中，往往会忽略路面运营阶段的能耗和排放。虽然每辆车的油耗和排放微不足道，但是沥青路面在生命周期内要承载大量的交通设备且运营阶段是沥青路面生命周期中持续时间最长的阶段，因此在此阶段内的能耗与排放不可忽略。丹麦的一个研究表明，交通部门的 CO₂ 排放量约占全国总排放量的 1/3，其中交通运输领域的排放量占 95%。这意味着当车辆的燃油率降低 3.3%时，可以减少 4800 万升燃消耗和 4.5 万吨的 CO₂ 排放。路面运营阶段的能耗和排放主要来自于两方面。一是由于路面状况变化导致的行驶车辆的油耗和排放增加量，二是路面养护时材料和施工机械产生的能耗和排放。

4.3.1 IRI-车速-油耗-排放量化模型建立

行驶车辆的能耗与排放受到路面状况的影响。本文中选取国际平整度指数（IRI）作为路面状况的评价指标。国际平整度指数（IRI）是世界很多国家公认采用的平整度指标。它的定义是为标准车辆悬架的总位移（m）与行驶距离（km）之比，随着 IRI 指数增大，路面的状况越来越差。因此，行车车辆的能耗与排放将通过 IRI-车速-油耗-排放量化模型进行计算。

IRI-车速-能耗-排放量化模型的建立首先要确定 IRI 随着路面使用时间的变化规律。邵东野^[45]根据国道 108,210,310 以及省道 107 路面养护的相关资料，通过实测 IRI 值进行回归后，得出路面的 IRI 的回归曲线（图 4.9）表达式为：

$$y = -8 \times 10^{-6}x^3 + 0.0026x^2 - 0.0198x + 1.3339 \quad (R^2=0.9673) \quad (4.3)$$

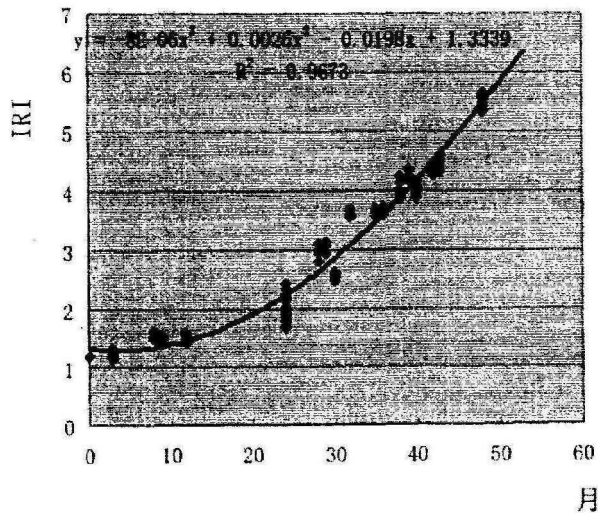


图 4.9 IRI 的回归曲线

张文字^[46]等人根据路面结构理论得到路面行驶质量指数（RQI）的表达式。

$$RQI = RQI_0 \{1 - \exp[-(A/y)^B]\} \quad (4.4)$$

根据所选取指标对行驶质量的不同影响，将参数 A、B 定义为：

$$A = ah^b ESAL^c I_0^d \quad (4.4.1)$$

$$B = ah^b ESAL^c I_0^d \quad (4.4.2)$$

其中：RQI——新建路面在使用到 y 年时路面行驶质量指数；

RQI₀——初始年份的行驶质量指数；

Y——路龄;

A,B——方程的回归参数;

h——新建路面面层厚度/cm;

ESAL——分布日标准轴次 (次/日/车道);

l_0 ——初始弯沉值 (0.01mm);

a, b, c, d——回归系数或指数, 在式 (4.4.1), 式 (4.4.2) 中各不相同。且沥青路面与水泥路面也不相同。

两个公式中, 式 4.3 虽然计算简便, 能符合道路的实际情况, 但通用性差。不如式 4.4 考虑因素全面, 所以在本文中选择式 4.4 作为 IRI 随使用时间的衰变方程。

根据《公路沥青路面养护技术规范》(JTJ 073.2-2001) 的规定, 路面行驶质量指数 (RQI) 与国际平整度指数 (IRI) 的关系为:

$$RQI=11.5-0.75IRI, \quad (4.5)$$

《公路水泥混凝土路面养护技术规范》(JTJ 073.1-2001) 规定 RQI 与 IRI 之间的关系如下:

$$RQI=10.5-0.75IRI, \quad (4.6)$$

式中:

RQI——行驶质量指数, 数值范围为 0~10。如出现负值, 则 RQI 取值 0; 如果计算结果大于 10, RQI 取值 10。可推导得出 IRI 以路龄为自变量的表达式。

在确定 IRI 与路龄的关系后, 需寻求 IRI 与行驶速度的关系。周晓青^[47], 张金喜^[48]等都对 IRI 与行驶车速的关系进行了研究, 其中张金喜的研究利用挪威拥有自主专利的 AutoSim 驾驶模拟舱, 开发了具有不同平整度水平的波浪形路面, 进行了不同驾驶员的自由驾驶实验。统计分析后, 得出 IRI 与驾驶速度 (V) 的关系表达式:

$$V=116.555-22.631\ln IRI (X>0) \quad (R=0.962, P<0.005) \quad (4.7)$$

该研究采用先进的模拟工具, 对道路的实际状况进行了真实的模拟, 并且利用该公式得出的结果与世界银行的推荐值符合度高, 因此本文中选择公式 4.7 作为行驶速度与国际平整度指数的关系表达式。

确定了 IRI 与路龄的关系表达式和 IRI 与速度的关系表达式后, IRI-车速-油耗-排放量模型的建立只需确定车速与油耗的量化关系。贾洪飞^[49]等人以国道 102 线和长平高速公路的实际交通情况为基础, 通过选取不同车型的典型车型进行对比分析, 并用 SPSS 回归的方法, 确定了两条公路的行驶速度与油耗的关系曲线和量化模型。

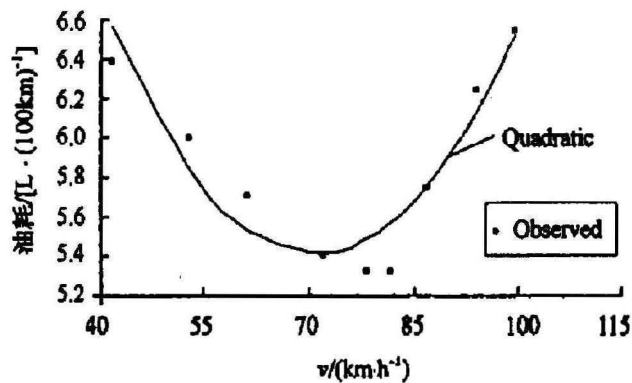


图 4.10 国道 102 线小客车速度油耗曲线拟合

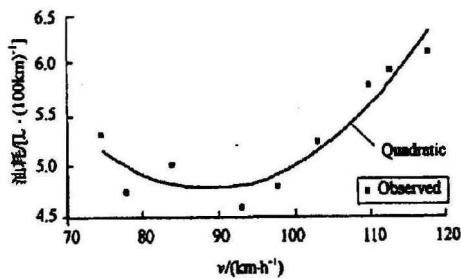


图 4.11 高速公路小客车速度油耗曲线拟合

表 4.22 油耗模型

车型	基本国道 102 线		长平高速公路	
	Fm	R^2	Fm	R^2
小客	$0.0016v^2-0.2485v+15.6111$	0.923	$0.001v^2-0.1824v+13.4078$	0.934
中客	$0.0038v^2-0.5055v+28.9853$	0.799	$0.0028v^2-0.4013v+25.6694$	0.897
大客	$0.0097v^2-1.1911v+61.8450$	0.725	$0.0073v^2-0.9698v+55.4053$	0.77
小货	$0.0046v^2-0.6371v+30.7762$	0.87	$0.0034v^2-0.4917v+25.0686$	0.88
中货	$0.0082v^2-0.9613v+45.8858$	0.904	$0.0041v^2-0.5817v+36.9862$	0.904
大货	$0.0162v^2-1.8171v+75.2396$	0.961	$0.0126v^2-1.4781v+65.6573$	0.931

张卫华^[50]等人根据京石高速公路及其辅道的汽车油耗实验，进行高速公路及其辅道的油耗与行驶速度关系研究。通过对 5 种车型在京石高速公路及其辅道上的油耗和速度分布状况，模拟出了各种车型的油耗与行驶速度曲线和量化模型。

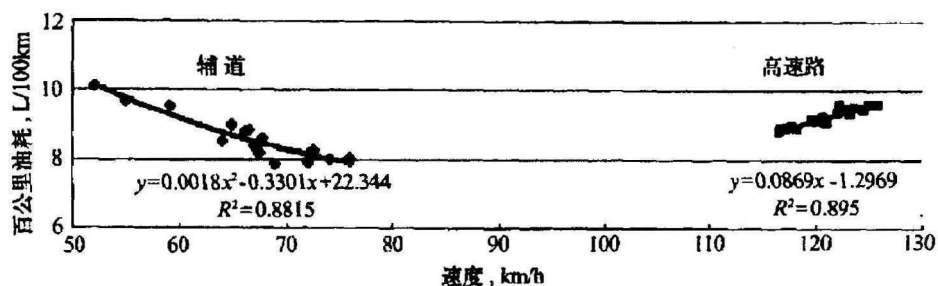


图 4.12 桑塔纳小轿车在京石高速公路及其辅道上的油耗分布图

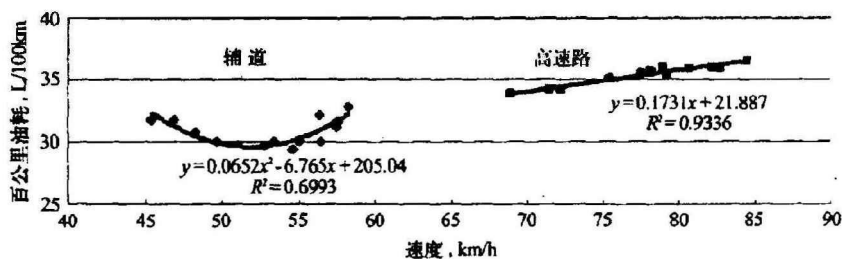


图 4.13 SG680 大客车在京石高速公路及其辅道上的油耗分布图

表 4.23 各车型在京石高速公路及其辅道上的油耗 (L/100km) 与速度 (km/h) 回归模型

车型	道路	油耗范围	油耗均值	车速范围	车速均值	油耗与速度关系模型	模型相关系数
桑坦纳	高速路	8.8~9.6	9.2	117~126	121	$y=0.0869x-1.2969$	$R^2=0.895$
小轿车	辅道	7.4~10.1	8.6	55~76	67	$y=0.0018x^2-0.33x+22.34$	$R^2=0.8815$
SG680	高速路	33.8~36.6	35.3	69~81	78	$y=0.1731x+21.887$	$R^2=0.9336$
大客车	辅道	29.6~32.8	28.5	45~58	49	$y=0.0652x^2-6.77x+205.04$	$R^2=0.6993$
JN150	高速路	33.5~36.1	35.2	66~71	67	$y=0.4723x+2.6214$	$R^2=0.9241$
重型货车	辅道	30.1~32.9	31.2	41~57	49	$y=0.0324x^2-3.12x+105.53$	$R^2=0.8636$

NJ1401s	高速 路	17.5~19. 2	18.2	85~92	88	$y=0.1964x+0.9758$	$R^2=0.9291$
轻型货 车	辅道	14.9~15. 8	15.2	49~66	59	$y=0.0057x2-0.69x+35.78$	$R^2=0.832$
EQ140	高速 路	29.3~31. 3	30.2	76~84	79	$y=0.2418x+11.284$	$R^2=0.9349$
中型货 车	辅道	26.1~27. 4	26.6	49~62	58	$y=0.02x2-2.22x+87.85$	$R^2=0.8152$

陈立维^[51]将上述两个油耗与行驶速度量化模型与世界银行模型进行了对比拟合，结果显示长平高速的油耗与行驶速度量化模型相比于世界银行模型和京石高速公路及其辅道上的油耗与速度回归模型与理论速度-油耗模型更加相符。因此本文中选择使用长平高速的形式速度-油耗量化模型进行计算。

根据以上的 IRI 与速度的量化模型和速度与油耗的量化模型，可得出高速公路 IRI 与油耗的量化模型，如表 4.24 所示

表 4.24 高速公路 IRI 与油耗的量化模型

车型	油耗 F_c (L/100km)
小客	$FC=0.5121(\ln IRI)^2-1.1476\ln IRI+5.7332$
小货	$FC=1.7412(\ln IRI)^2-6.8088\ln IRI+13.9477$
中客	$FC=1.4339(\ln IRI)^2-5.6893\ln IRI+16.9341$
中货	$FC=2.0997(\ln IRI)^2-8.4647\ln IRI+24.8849$
大客	$FC=3.7385(\ln IRI)^2-16.5630\ln IRI+41.5413$
大货	$FC=6.4527(\ln IRI)^2-33.0191\ln IRI+64.5492$

4.3.2 两种路面车辆行驶油耗计算

两种路面的车辆行驶油耗通过 IRI-车速-油耗量化模型进行计算。首先需确定两种路面在使用年限内的 IRI 值。IRI 值的确定根据公式 4.4 进行计算。对于沥青路面，已知路面初始弯沉值为 19(0.01mm)，且在标准轴载 BZZ-100 作用下半刚性基层沥青路面回归参数 A，B 的回归系数 a,b,c,d 的值如表 4.25 所示。

表 4.25 半刚性基层沥青路面回归参数 A，B 的回归系数 a,b,c,d 的值

基层类型	回归参数	a	b	c	d
半刚性基层	A	19.492	0.239	-0.238	-0.119
	B	0.3686	0.150	-0.164	-0.050

计算知沥青路面日当量轴载作用次数 4018.27 次/日/车道。则 A=3.80, B=1.3。将数据代入公式 4.4 后可求得 RQI 在 15 年的生命周期中的预测值。将 RQI 代入公式 4.5 可得，可得沥青路面 IRI 对应值，计算结果如表 4.26。

表 4.26 沥青路面 RQI 和 IRI 在 15 年的生命周期中的预测值

路龄	RQI	IRI
1	9.93	2.10
2	9.15	3.13
3	8.07	4.57
4	7.09	5.88
5	6.28	6.96
6	5.61	7.85
7	5.06	8.58
8	4.61	9.19
9	4.22	9.70
10	3.90	10.14
11	3.62	10.51
12	3.37	10.83
13	3.16	11.12
14	2.97	11.37
15	2.81	11.59

根据《公路沥青路面养护技术规范》(JTJ 073.2-2001) 的规定若高速公路或一级公路的行驶质量指数 (RQI) 评价为中及中以下时，应采取罩面等措施改善路面的平整度。具体的等级分类见表 4.27。

表 4.27 沥青路面行驶质量指数分类

等级 评价指标	优	良	中	次	差
行驶质量指数 RQI	≥ 8.5	$< 8.5 \sim \geq 7.0$	$< 7.0 \sim \geq 5.5$	$< 5.5 \sim \geq 4.0$	< 4.0

根据表 4.26 求得的 15 年 RQI 数值可知，沥青路面在第五年 RQI 指标降到中级，需采用罩面等改善措施。假设沥青路面每 5 年进行一次罩面，罩面处理后沥青路面行驶质量指数重新上升为 9，相应的 15 年沥青路面 RQI 数值和对应的 IRI 数值如表所示。

表 4.28 采取维修措施后，15 年沥青路面 RQI 与 IRI 预测值

路龄	RQI	IRI
1	9.93	2.10
2	9.15	3.13
3	8.07	4.57
4	7.09	5.88
5	6.28	6.96
6	8.94	3.42
7	8.24	4.35
8	7.27	5.65
9	6.38	6.82
10	5.65	7.80
11	8.94	3.42
12	8.24	4.35
13	7.27	5.65
14	6.38	6.82
15	5.65	7.80

对于连续配筋水泥混凝土路面，按照邵春华^[52]在其硕士论文中的推荐，直接取 $A=10.067$ ， $B=1.745$ ，将数据代入公式 4.4 后可求得 RQI 在 30 年的生命周期中的预测值。将 RQI 代入公式 4.6 可得，可得连续配筋混凝土路面 IRI 对应值。

表 4.29 连续配筋混凝土路面 RQI 和 IRI 在 30 年的生命周期中的预测值

路龄	RQI	IRI
1	10.00	0.67
2	10.00	0.67
3	9.97	0.70
4	9.88	0.83
5	9.70	1.06
6	9.46	1.38
7	9.19	1.75
8	8.89	2.15
9	8.58	2.56
10	8.27	2.97
11	7.97	3.37
12	7.69	3.75
13	7.41	4.12
14	7.15	4.47
15	6.90	4.80
16	6.66	5.11
17	6.44	5.41
18	6.23	5.69
19	6.03	5.96
20	5.85	6.21
21	5.67	6.44
22	5.50	6.67
23	5.34	6.88
24	5.19	7.08
25	5.05	7.27

26	4.91	7.45
27	4.78	7.62
28	4.66	7.79
29	4.54	7.94
30	4.43	8.09

根据《公路水泥混凝土路面养护技术规范》(JTJ 073.1-2001)的规定若高速公路或一级公路的行驶质量指数(RQI)评价为中及中以下时,应采取刻槽、罩面或加铺层等措施改善路面的平整度。具体的等级分类见表 4.30。

表 4.30 水泥路面行驶质量指数指数分类

等级 评价指标	优	良	中	次	差
行驶质量指数 RQI	≥8.5	7.0~8.4	4.5~6.9	2.0~4.4	<2.0

根据表 4.30 求得的 30 年 RQI 数值可知,沥青路面在第 16 年 RQI 指标降到中级,应采用刻槽、罩面或加铺层等改善措施。假设处理后连续配筋混凝土路面行驶质量指数重新上升为 9,相应的 30 年连续配筋混凝土路面 RQI 数值和对应的 IRI 数值如表 4.31 所示。

表 4.31 采取维修措施后, 30 年连续配筋混凝土路面 RQI 和 IRI 预测值

路龄	RQI	IRI
1	10.00	0.67
2	10.00	0.67
3	9.97	0.70
4	9.88	0.83
5	9.70	1.06
6	9.46	1.38
7	9.19	1.75
8	8.89	2.15
9	8.58	2.56
10	8.27	2.97

11	7.97	3.37
12	7.69	3.75
13	7.41	4.12
14	7.15	4.47
15	6.90	4.80
16	6.66	5.11
17	9.00	2.00
18	9.00	2.00
19	8.97	2.03
20	8.89	2.15
21	8.73	2.36
22	8.52	2.64
23	8.27	2.98
24	8.00	3.34
25	7.72	3.70
26	7.45	4.07
27	7.18	4.43
28	6.92	4.78
29	6.67	5.11
30	6.43	5.42

确定两种路面的 IRI 值后，代入表 4.24 的公式中，可得两种路面各车型每辆车运营期间的日百里油耗。

表 4.32 沥青路面各车型每辆车运营期间的日百里油耗（L/100km/日）

年份	小客	小货	中客	中货	大客	大货
2015	5.16	8.83	12.77	19.77	27.76	35.80
2016	5.09	10.54	14.25	17.96	30.98	41.06
2017	5.17	12.68	16.07	16.87	35.13	47.94

2018	5.31	14.37	17.51	16.48	38.48	53.54
2019	5.43	15.64	18.59	16.37	41.00	57.78
2020	5.10	11.00	14.64	17.65	31.86	42.51
2021	5.15	12.37	15.81	16.98	34.52	46.94
2022	5.28	14.09	17.27	16.52	37.91	52.59
2023	5.42	15.48	18.45	16.37	40.69	57.25
2024	5.54	16.54	19.35	16.36	42.81	60.82
2025	5.10	11.00	14.64	17.65	31.86	42.51
2026	5.15	12.37	15.81	16.98	34.52	46.94
2027	5.28	14.09	17.27	16.52	37.91	52.59
2028	5.42	15.48	18.45	16.37	40.69	57.25
2029	5.54	16.54	19.35	16.36	42.81	60.82

表 4.33 水泥混凝土路面各车型每辆车运营期间的日百里油耗（L/100km/日）

年份	小客	小货	中客	中货	大客	大货
2015	4.97	7.02	11.08	28.66	25.19	32.19
2016	4.96	7.02	11.07	28.63	25.18	32.17
2017	4.94	7.00	11.07	28.10	25.09	31.97
2018	4.90	7.01	11.11	26.52	24.92	31.56
2019	4.88	7.21	11.31	24.37	25.05	31.62
2020	4.93	7.64	11.72	22.38	25.69	32.52
2021	5.04	8.25	12.25	20.80	26.71	34.11
2022	5.18	8.92	12.85	19.64	27.93	36.08
2023	5.33	9.62	13.45	18.78	29.22	38.17
2024	5.49	10.29	14.03	18.16	30.49	40.26
2025	5.64	10.92	14.57	17.70	31.70	42.25
2026	5.78	11.50	15.07	17.36	32.83	44.13
2027	5.91	12.04	15.53	17.11	33.88	45.88

2028	6.03	12.54	15.96	16.92	34.85	47.49
2029	6.14	12.99	16.34	16.77	35.75	48.98
2030	6.25	13.41	16.70	16.66	36.57	50.35
2031	5.13	8.67	12.63	20.03	27.47	35.32
2032	5.13	8.67	12.63	20.02	27.47	35.33
2033	5.14	8.73	12.68	19.93	27.57	35.49
2034	5.18	8.92	12.85	19.64	27.93	36.07
2035	5.26	9.28	13.16	19.17	28.59	37.13
2036	5.37	9.75	13.57	18.64	29.48	38.59
2037	5.49	10.30	14.04	18.15	30.51	40.29
2038	5.62	10.87	14.53	17.74	31.61	42.10
2039	5.76	11.43	15.01	17.40	32.70	43.90
2040	5.89	11.98	15.48	17.14	33.75	45.65
2041	6.02	12.48	15.91	16.94	34.75	47.31
2042	6.13	12.96	16.31	16.78	35.68	48.87
2043	6.24	13.40	16.69	16.67	36.55	50.32
2044	6.35	13.80	17.03	16.58	37.35	51.66

由 2015 年交通量折合成小汽车为 6543 辆/日, 2020 年交通量为 9134 辆/日, 2030 年为 15020 辆/日, 可求得, 路面在运营前 5 年的年平均增长率为 6.9%, 在接下来的 10 年内年平均增长率为 5.1%。假设, 连续配筋混凝土路面在生命周期剩下的 15 年继续保持 5.1% 的增长率。同时, 假设车辆组成比例不变, 则可求得 2015 年到 2034 年 30 年的时间内每年每日各车型的交通量。其中, 沥青混凝土路面取前 15 年, 水泥混凝土取 30 年。

表 4.34 预测交通量

年份	小客	小货	中客	中货	大客	大货
2015	1797	801	874	408	631	335
2016	1921	856	934	436	675	358
2017	2054	915	999	466	721	383

2018	2195	979	1068	498	771	409
2019	2347	1046	1141	533	824	437
2020	2509	1118	1220	570	881	468
2021	2637	1175	1282	599	926	492
2022	2771	1235	1348	629	973	517
2023	2912	1298	1416	661	1023	543
2024	3061	1364	1489	695	1075	571
2025	3217	1434	1565	730	1130	600
2026	3381	1507	1644	768	1187	630
2027	3553	1584	1728	807	1248	662
2028	3735	1665	1816	848	1311	696
2029	3925	1750	1909	891	1378	732
2030	4125	1839	2006	937	1449	769
2031	4336	1933	2109	984	1522	808
2032	4557	2031	2216	1035	1600	850
2033	4789	2135	2329	1087	1682	893
2034	5034	2244	2448	1143	1767	938
2035	5290	2358	2573	1201	1858	986
2036	5560	2478	2704	1262	1952	1037
2037	5844	2605	2842	1327	2052	1089
2038	6142	2738	2987	1394	2157	1145
2039	6455	2877	3139	1466	2267	1203
2040	6784	3024	3300	1540	2382	1265
2041	7130	3178	3468	1619	2504	1329
2042	7494	3340	3645	1701	2631	1397
2043	7876	3511	3831	1788	2766	1468
2044	8278	3690	4026	1879	2907	1543

用某年每种车型的总交通量×每车型每辆车运营期间的日百里油耗可得每种车型在某年总的日百里油耗。结算结果汇总如表 4.35 和表 4.36 所示。

表 4.35 沥青路面每种车型总的日百里油耗

年份	小客	小货	中客	中货	大客	大货	合计
2015	9276.08	7074.00	11160.28	8067.06	17518.97	11993.29	65089.68
2016	9778.75	9027.99	13313.58	7834.47	20897.21	14704.63	75556.64
2017	10620.37	11604.48	16054.43	7866.08	25329.88	18354.48	89829.73
2018	11650.32	14063.53	18699.76	8213.58	29659.86	21912.32	104199.36
2019	12754.03	16358.03	21214.02	8719.71	33785.69	25275.76	118107.24
2020	12784.83	12300.25	17864.21	10054.04	28063.32	19881.46	100948.12
2021	13585.59	14537.88	20276.66	10164.27	31962.93	23071.52	113598.86
2022	14634.02	17399.00	23277.55	10396.14	36886.87	27168.54	129762.12
2023	15778.87	20096.02	26138.18	10826.34	41606.72	31080.60	145526.73
2024	16947.52	22568.19	28806.88	11367.39	46011.46	34702.07	160403.52
2025	16394.90	15773.49	22908.55	12893.01	35987.58	25495.40	129452.91
2026	17421.77	18642.95	26002.20	13034.36	40988.33	29586.24	145675.84
2027	18766.24	22311.97	29850.45	13331.70	47302.64	34840.14	166403.14
2028	20234.36	25770.55	33518.83	13883.38	53355.24	39856.86	186619.21
2029	21733.01	28940.79	36941.10	14577.21	59003.75	44500.92	205696.77
合计	222360.66	256469.12	346026.70	161228.74	548360.44	402424.22	1936869.88

表 4.36 水泥路面每种车型总的日百里油耗

年份	小客	小货	中客	中货	大客	大货	合计
2015	8923.80	5622.77	9679.61	11694.19	15893.28	10782.13	62595.79
2016	9537.11	6009.68	10347.05	12487.53	16985.75	11521.48	66888.60
2017	10153.54	6409.43	11056.87	13102.68	18088.99	12238.82	71050.33
2018	10754.76	6863.04	11861.19	13215.96	19210.00	12917.62	74822.58
2019	11460.66	7539.33	12911.39	12983.63	20645.65	13831.67	79372.32

2020	12379.89	8545.19	14294.70	12744.43	22628.68	15209.46	85802.36
2021	13294.54	9689.82	15714.47	12453.08	24729.09	16767.46	92648.46
2022	14359.15	11023.75	17319.36	12353.57	27181.24	18636.86	100873.94
2023	15535.35	12485.22	19054.32	12420.13	29883.80	20724.76	110103.58
2024	16797.84	14036.39	20886.62	12621.15	32772.16	22970.61	120084.77
2025	18132.30	15656.99	22799.60	12930.67	35810.57	25339.93	130670.05
2026	19531.70	17337.78	24786.54	13329.57	38981.99	27815.36	141782.95
2027	20993.60	19076.04	26846.57	13804.45	42280.75	30390.01	153391.43
2028	22518.36	20872.83	28982.22	14346.11	45708.00	33063.31	165490.81
2029	24108.07	22731.41	31197.95	14948.36	49268.98	35838.48	178093.25
2030	25765.90	24656.34	33499.46	15607.24	52971.43	38721.09	191221.46
2031	22232.94	16753.31	26627.20	19714.33	41818.54	28551.34	155697.65
2032	23369.80	17614.10	27991.28	20714.48	43960.38	30015.23	163665.26
2033	24617.17	18630.95	29531.97	21674.24	46371.75	31690.79	172516.87
2034	26080.27	20018.34	31454.55	22444.62	49365.49	33845.99	183209.26
2035	27818.39	21876.56	33853.25	23025.32	53101.50	36622.12	196297.14
2036	29830.74	24174.41	36696.39	23534.33	57553.91	40002.40	211792.19
2037	32085.59	26828.57	39904.63	24082.47	62613.30	43894.96	229409.53
2038	34545.21	29756.77	43401.60	24730.82	68162.92	48198.01	248795.33
2039	37178.89	32897.63	47131.82	25502.18	74112.03	52830.39	269652.94
2040	39966.28	36212.09	51061.27	26399.78	80401.67	57737.90	291779.00
2041	42896.23	39678.64	55172.49	27419.30	86999.29	62889.29	315055.24
2042	45964.49	43287.93	59459.49	28554.64	93891.34	68270.10	339427.98
2043	49171.64	47038.66	63923.73	29800.36	101077.20	73877.32	364888.91
2044	52521.54	50934.69	68571.55	31152.47	108564.81	79715.58	391460.64
总计	742525.74	634258.65	926019.14	559792.09	1461034.48	1034910.48	5358540.58

假设，在车辆中小客和小货使用的燃料类型主要为汽油。中客、中货、大客、大货使用

的燃料主要为柴油。则 1km 沥青路面运营阶段总的汽油消耗量为:

$$(222360.66+256469.12) \times 365 \times 1 \div 100 = 1747728.697\text{L}, \text{ 合 } 1265355.577\text{kg}。$$

1km 沥青路面运营阶段总的柴油消耗量为:

$$(346026.70+161228.74+548360.44+402424.22) \times 365 \times 1 \div 100 = 5321846.365\text{L},$$

合 4470350.947kg。

1km 连续配筋混凝土路面运营阶段总的汽油消耗量为:

$$(742525.74+634258.65) \times 365 \times 1 \div 100 = 5025263.024\text{L}, \text{ 合 } 3638290.429\text{kg}。$$

1km 连续配筋混凝土路面运营阶段总的柴油消耗量为:

$$(926019.14+559792.09+1461034.48+1034910.48) \times 365 \times 1 \div 100 = 14533410.09\text{L},$$

合 12208064.48kg。

根据与上述相同的计算方法,可求得假设路面平整度保持不变的情况下,1km 沥青路面运营阶段总的汽油消耗量为: 1394881.809L, 合 1009894.43kg。柴油消耗量为 4159099.453L, 合 3493643.541kg。1km 连续配筋混凝土路面运营阶段总的汽油消耗量为: 4372684.97L, 合 3165823.918kg; 柴油消耗量为: 13037973.22L, 合 10951897.5kg。则沥青路面由于 IRI 变化导致车辆增多的油耗为: 汽油 255461.147kg; 柴油 976707.406kg; 水泥路面由于 IRI 变化导致车辆增多的油耗为: 汽油 472466.511kg; 柴油 1256166.98kg。

4.3.3 路面养护维修时能耗与排放

路面养护对策应根据公路等级、交通量、分项路况评价结果确定。分项路况评价包括: 路面行驶状况、形式质量、路面强度和抗滑性能等方面。

在本文 4.3.2 中根据预测的 IRI 已确定沥青路面每 5 年进行一次罩面养护, 15 年的生命周期中共进行两次。期间, 日常养护与小修的能耗和排放相对较小, 而且计算繁琐, 在本文中不予考虑。薄层罩面是在原来的路面上加铺一层厚度为 4cm 左右的热拌沥青混合料。假设加铺的热拌沥青混合料为 SMA-13。参照沥青路面工程量计算方法, 加铺罩面用的原材料为:

表 4.37 沥青路面每次维修材料用量

材料类型	消耗量
沥青	131.3t
矿粉	233.1t

纤维	6.8t
剥落剂	2.8t
机制砂	169.7t
2.36-4.75mm 集料	90.5t
4.75-9.5mm 集料	751.4t
9.5-13.2 mm 集料	887.2t

参照沥青路面建设阶段能耗计算方法，每次加铺使用的机械总的台班数及总的燃料消耗和电力消耗如表所示：

表 4.38 沥青路面每次维修机械台班数和能源消耗数

设备	台班	重油（kg）	电力(kw·h)	柴油 (kg)
沥青拌合设备	1.6192	11627.15	7245.32	
装载机	4.5632			423.74
自卸汽车	13.7632			1061.28
摊铺机	2.0516			279.86
6~8t 光轮压路机	4.0296			221.06
12~15t 光轮压路机	4.0296			326.08
15t 以内振动压力机	3.9928			323.10
总计		11627.15	7245.32	2635.12

在本文 4.3.2 中根据预测的 IRI 已确定连续配筋水泥混凝土图路面在第 15 年进行一次加铺养护。期间，日常养护与小修的能耗和排放相对较小，而且计算繁琐，在本文中不予考虑。

本文拟采取水泥路面加铺沥青层的方式对水泥路面进行养护。将连续配筋混凝土路面当做基层，加沥青混凝土作为面层。加铺的沥青层厚为 12cm，包括 2cm 厚沥青砂+6cm 厚 Superpave-25+4cm 厚改性沥青 SMA）。

则加铺用的原材料为：

表 4.39 连续配筋混凝土路面每次维修所用原材料

材料类型	消耗量
沥青	368.6t
矿粉	690.2t

纤维	6.8t
剥落剂	3.2t
机制砂	1368.4t
2.36-4.75mm 集料	579.2t
4.75-9.5mm 集料	1458.3t
9.5-13.2 mm 集料	2058.3t
13.2-16mm 集料	2530.8t

加铺层施工使用的机械台班数及总的燃料消耗和电力消耗如表 4.40 所示：

表 4.40 施工使用的机械台班数及总的燃料消耗和电力消耗

设备	台班	重油（kg）	电力(kw·h)	柴油 (kg)
沥青拌合设备	4.86	34881.45	21735.96	
装载机	13.67			1270.18
自卸汽车	40.18			3195.28
摊铺机	7.11			839.86
光轮压路机	24.11			1640.68
振动压力机	3.9928			969.4
总计		34881.45	21735.96	7915.4

将路面运营养护期间能耗汇总并在 eBalance 软件中建模后，得出两种路面在运营养护期内的能耗与排放如表 4.41 和 4.42 所示。

表 4.41 两种路面运营养护期间能耗汇总

能耗分类		沥青路面	水泥路面
路面平整度变化增加 的车辆行驶油耗		255461.147kg 汽油+976707.406kg 柴油(合计 53749631.22MJ)	472466.511kg 汽油+1256166.98kg 柴油 (合计 75748639.64MJ)
路面养护 维修能耗	养护维修	23254.3kg 重油+14490.64kw·h 电+	34881.45 kg 重油+21735.96 kw·h 电
	机械	7270.26kg 柴油(合计 1702162.85MJ)	+7915.4 kg 柴油(合计 2134876.59MJ)
	材料	2091225.78MJ	3129461.61MJ
运营阶段总能耗		57543019.85	81012977.84

表 4.42 1km 路面运营阶段特征化的排放

	沥青路面(kg)	水泥路面(kg)
全球变暖	3937069.95	5495482.56
酸化效应	13246.43	29382.43
颗粒物	498.62	766.54

汇总以上数据，可分析得出两种路面在运营养护阶段各部分的环境负荷百分比，如图 4.14 和 4.15 所示。

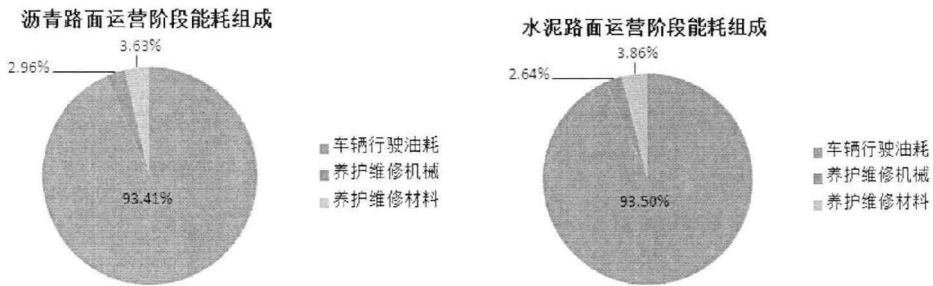


图 4.14 路面运营养护阶段各部分环境负荷

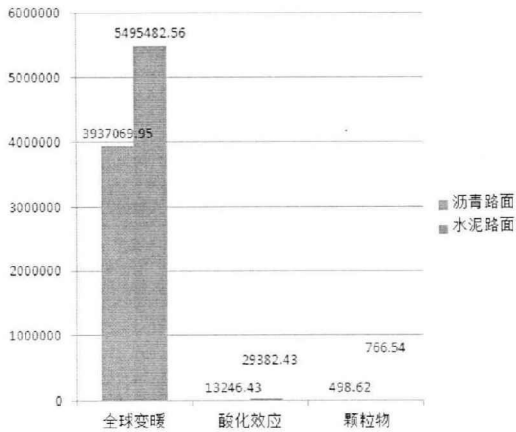


图 4.15 两种路面空气排放

由图 4.14 可知，两种路面在运营养护阶段，由于路面不平整度变化导致车辆增加的油耗远高于路面维修养护的时的能耗和排放。因此，两种路面在运营养护期间的能耗与排放主要来自于车辆行驶。保证路面状况良好，将不仅有利于车辆的稳态行驶，还可以避免频繁变速而增加车辆行驶的油耗。

4.4 路面结构拆除阶段清单数据收集与分析

路面生命周期结束时会被拆除。路面拆除阶段主要的能耗来自于拆除机械的燃油消耗。根据《公路工程预算定额》(JTG/TB06-02-2007)和《公路工程机械台班费用定额》(JTG/TB06-03-2007)可知,沥青路面和水泥路面拆除过程中每10m³路面使用的各机械的台班数以及每台班的耗油量。

表 4.43 每 10m³路面拆除使用的各机械的台班数以及每台班的耗油量

机械设备	台班		耗油量 (kg/台班)
	沥青面层	水泥混凝土面层	
破路机		2.45	9.97
3m ³ /min 以内机动空压机	0.76	1.15	24

已知沥青路面层体积为 4140m³,水泥混凝土路面体积为 6440m³。则两种路面拆除所用机械种类,机械台班数以及拆除过程中柴油消耗量如表 4.44 所示。

表 4.44 路面拆除所用机械种类,机械台班数以及拆除过程中柴油消耗量

	沥青面层	水泥混凝土面层
破路机	-	1577.8 台班
3m ³ /min 以内机动空压机	314.64 台班	740.6 台班
耗油量(L)	7527.36	33505.066

则两种路面结构拆除的能耗分别为 357555.6MJ 和 1591517.342MJ。特征化后的气体排放如表 4.45 所示。

表 4.44 1km 路面结构拆除阶段特征化的排放

	沥青路面(kg)	水泥路面(kg)
全球变暖	5599	24921.73
酸化效应	28.74	127.93
颗粒物	4.51	20.08

4.5 路面生命周期清单数据汇总分析

在上文中，已分别求出两种路面在原材料生产阶段、路面施工建设阶段、运营养护阶段和结构拆除阶段等四个阶段的能耗与排放。现将结果进行汇总并求得两种路面生命周期过程中总的能耗如表 4.45 所示。

表 4.45 路面生命周期各阶段能耗

生命周期阶段	沥青路面	水泥路面
原材料生产阶段	4325209.4MJ	27139868.78 MJ
路面施工建设阶段	3063891.85 MJ	776736.08 MJ
运营养护阶段	57543019.85 MJ	81012977.84 MJ
结构拆除阶段	357555.6 MJ	1591517.342 MJ
总计	65289676.7 MJ	110521100 MJ
折合成每年	4352645.113 MJ	3684036.667 MJ

表 4.46 路面生命周期总排放

	沥青路面(kg)	水泥路面(kg)
全球变暖	4097791.58	5921013.49
酸化效应	15642.56	42492.84
颗粒物	2154.89	7252.39

表 4.47 路面生命周期内折合成每年的排放

	沥青路面(kg)	水泥路面(kg)
全球变暖	273186.11	197367.12
酸化效应	1042.84	1416.43
颗粒物	143.66	241.75

根据以上汇总的数据，可计算得到两种路面生命周期各阶段能耗对总能耗的贡献率大小，以及两种路面排放的对比。计算结果用图 4.15 表示。

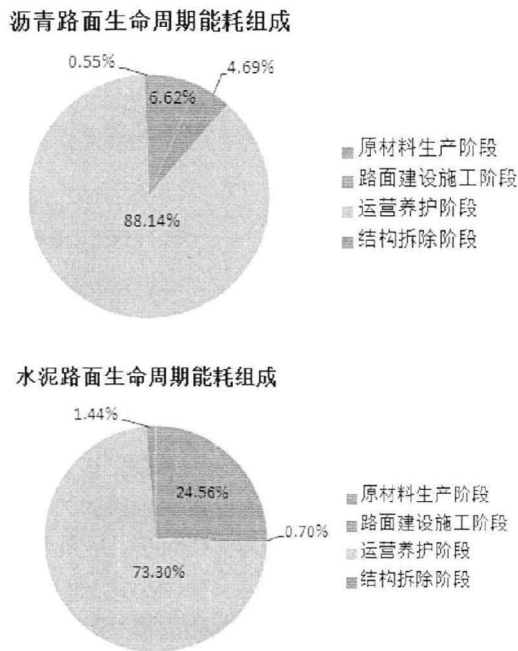


图 4.15 两种路面生命周期能耗组成

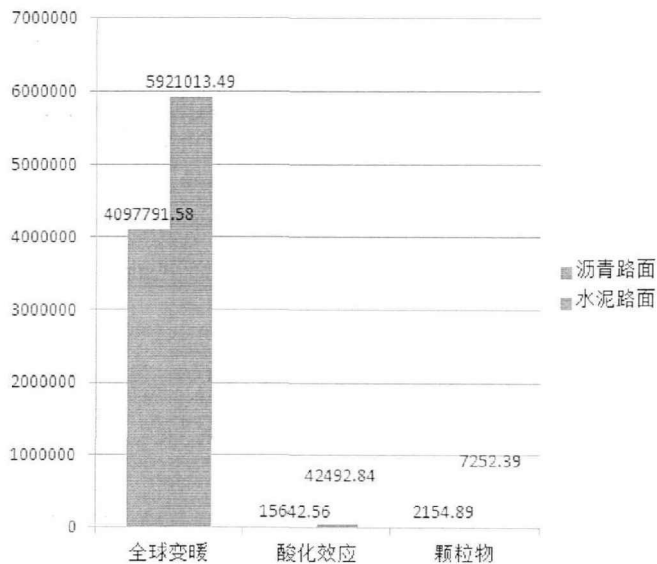
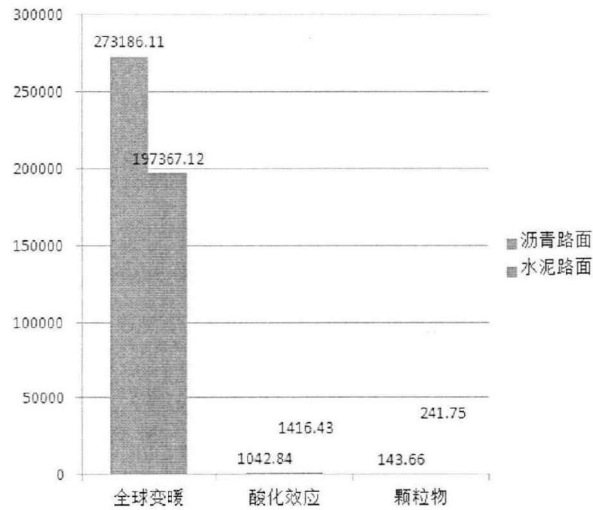


图 4.16 两种路面生命周期内气体排放



4.17 两种路面的年平均空气排放

通过对上述图表的分析，可以发现：

(1)连续配筋混凝土路面虽然在原材料生产阶段的能耗与排放远大于沥青路面，但在整个生命周期过程中连续配筋混凝土路面折算成每年的能耗和导致全球变暖的气体排放均小于沥青路面，这主要是由于连续配筋混凝土路面可以为车辆提供舒适的行车环境，从而降低由于路面状况变化导致的行驶车辆油耗增加。

(2)路面运营养护阶段的环境负荷在两种路面生命周期环境影响中都是最大的。因此，保证路面状况良好，将对路面的节能减排做出重要贡献。

(3)在两种路面的环境排放中，三种类别的排放量大小均为全球变暖>酸化效应>颗粒排放。而且，酸化效应和颗粒排放相比于全球变暖的排放往往相差两个和四个数量级。这说明在路面的整个生命周期内，温室气体的排放问题最为突出，所以应将减少温室气体排放作为减排的重点。

第五章 结论与展望

本文将生命周期评价(LCA)应用于路面环境影响的量化分析。研究了路面生命周期各阶段的能耗与排放计算方法并运用 eBalance 软件进行了分阶段的清单数据计算。结合计算得到的各阶段能耗与排放结果,提出了一些路面节能减排的措施的建议。本文的主要研究成果如下:

(1) 提出了路面环境影响评价的研究背景与研究意义,并分析了生命周期评价(LCA)应用于路面环境影响的量化分析的适用性。对国内外道路生命周期评价的研究成果进行了总结分析,探寻出生命周期评价在我国路面环境影响评价应用中的不足并明确本文的研究内容与方向。

(2) 确定了本文的研究目标与研究范围。本文的研究目标是运用生命周期评价方法对沥青混凝土路面和连续配筋水泥混凝土路面两种路面的环境影响进行量化对比分析。本文的研究范围为路面的整个生命过程,包括路面原材料的生产,路面施工,路面运营养护以及最终的废弃物处置等阶段。

(3) 研究确定生命周期每个阶段的能耗与排放的计算方法,并对每个生命阶段的输入和输出进行了清单分析。公路生命周期评价的输入数据为能源消耗,输出数据为各种气体排放。其中,原材料生产阶段的能耗包括各种原材料从开采到使用所有过程的能耗。路面施工阶段能耗包括各种施工机械消耗的液体燃料和电力以及混合料运输时运输车辆消耗的液体燃料。运营养护阶段的能耗主要包括由于路面平整度变化导致的行车车辆燃油增加量以及养护维修时施工机械运行的能耗和维修材料的能耗。结构拆除阶段的能耗为拆除时施工机械的燃料耗能。

(4) 本文选择沥青混凝土路面和连续配筋混凝土路面两种结构进行了路面生命周期能耗和排放的实例计算。经计算得,1km 沥青混凝土路面整个生命周期总的能耗为 65289676.7 MJ,折合成每年的能耗为 4352645.113 MJ,1km 连续配筋水泥混凝土路面整个生命周期总的能耗为 110521100 MJ,折合成每年的能耗为 3684036.667 MJ。可知,虽然连续配筋混凝土路面在整个生命周期中的能耗大于沥青混凝土路面,但由于连续配筋混凝土路面使用寿命长,折算成每年的能耗后连续配筋混凝土路面能耗低于沥青混凝土路面的能耗。从节能角度将,连续配筋混凝土路面绿色度高于沥青混凝土路面。这将为连续配筋混凝土路面在我国的推广在环境方面做出支持。

(5) 路面运营养护阶段的环境负荷在两种路面生命周期环境影响中都是最大的。在沥青混凝土路面和连续配筋混凝土路面总能耗中分别占 88.14%和 73.3%。因此, 保证路面状况良好, 不仅能保证车辆的稳态行驶还将对路面的节能减排做出重要贡献。

(6) 在两种路面的环境排放中, 三类别的排放量大小均为全球变暖>酸化效应>颗粒排放。而且, 酸化效应和颗粒排放相比于全球变暖的排放往往相差两个和四个数量级。这说明在路面的整个生命周期内, 温室气体的排放问题最为突出, 应将减少温室气体的排放作为减排的措施采取的重点。

本文通过运用生命周期评价法(LCA)对路面环境影响进行量化评价, 可以为路面相关的节能减排新技术的提出和应用提供数据依据, 并为我国路面生命周期分析未来的发展提供理论和数据基础。但本文仍有很多不足之处。一是数据收集过程中可能有遗漏。因为路面整个生命周期涉及面广, 运用的原材料及施工机械种类多。在清单数据收集过程中要涵盖所有的环境影响因素是不切实际的。因此, 本文只选择了各阶段中主要的影响因子。二是收集的数据可能存在误差, 这主要是因为我国的环境排放数据库还不够完善, 部分数据只能采取别的国家的数据, 这可能不符合我国的实际情况并产生误差。因此在以后的研究中还有以下几个方面可以加强:

(1) 建立完善的数据库。运用生命周期评价的方法量化路面的环境影响是一项复杂的工程, 将需要大量的基础数据。目前我国的基础数据库很不完善, 很多数据只能采用别的数据。因此, 建议逐步完善我国自有的基础数据库的建设, 为以后的公路生命周期评价提供数据支持。

(2) 对本文选定的三种环境排放影响类型之外的其他排放类型进行分析。因为时间和计算量的限制, 对于环境排放, 本文中仅对全球变暖、酸化效应和颗粒物三种目前常见并受到广泛关注的影响类型进行了量化分析。在以后的研究中可以增加对其他的环境排放如水污染, 固体废弃物污染等的研究。

(3) “路面状况-车速-油耗-排放”模型的建立是路面使用过程中能耗计算的关键。受到研究条件和研究时间的限制, 本文在分析国内学者的研究后, 采用的是平原微丘区的油耗模型。该模型并不一定适用于所有的情况。因此, 需进行进一步的研究以建立适用于不同地区的“路面状况-车速-油耗-排放”模型。

参考文献

- [1] 交通运输部. 2013年交通运输行业发展统计公报[R]., 2014.
- [2] Schmidt B. CO₂ Emission Reduction by Exploitation of Rolling Resistance Modelling of Pavements[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences. 2012(48): 311-320.
- [3] 尚春静, 张智慧, 李小冬. 高速公路生命周期能耗和大气排放研究[J]. 公路交通科技. 2010, 27(8): 149-154.
- [4] 中华人民共和国交通运输部. 《交通运输“十二五”发展规划》[R]., 2011.
- [5] Häkkinen T, Mäkelä K. Environmental Adaptation of Concrete Environmental Impact of Concrete and Asphalt Pavements[R]., 1996.
- [6] Horvath A, Hendrickson C. Comparison of environmental implications of asphalt and steel-reinforced concrete pavements[M]. TRANSPORTATION RESEARCH RECORD, 1998, 105-113.
- [7] Roudebush H W. Environmental Value Engineering Assessment of Concrete and Asphalt Pavement[J]. Portland Cement Association. 1999, 2088.
- [8] Berthiaume R, Bouchard C. Exergy analysis of the environmental impact of paving material manufacture[J]. TRANSACTIONS OF THE CANADIAN SOCIETY FOR MECHANICAL ENGINEERING. 1999, 23(1B): 187-196.
- [9] M M U, P E, K W. Life Cycle Assessment of Road Construction[R]. Finnish National Road Administration, 2000.
- [10] Stripple H. Life cycle assessment of road:a pilot study for inventory analysis[M]. Swedish National Road Administration, 2001.
- [11] Park K, Hwang Y, Seo S, et al. Quantitative assessment of environmental impacts on life cycle of highways[J]. JOURNAL OF CONSTRUCTION ENGINEERING AND MANAGEMENT-ASCE. 2003, 129(1): 25-31.
- [12] Zapata P, John A. Energy consumption of asphalt and reinforced concrete pavement materials and construction[J]. Journal of Infrastructure Systems. 2005, 1(11): 9-20.
- [13] Chan A W C. Economic and environmental evaluations of life cost cycle practice:A case study of Michigan DOT pavement project[J]. 2007.
- [14] Huang Y, Bird R, Bell M. A comparative study of the emissions by road maintenance works and

the disrupted traffic using life cycle assessment and micro-simulation[J]. TRANSPORTATION RESEARCH PART D-TRANSPORT AND ENVIRONMENT. 2009, 14(3): 197-204.

[15] Vidal R, Moliner E, Martinez G, et al. Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement[J]. RESOURCES CONSERVATION AND RECYCLING. 2013, 74: 101-114.

[16] 郑莉. 路面材料LCA及其信息化开发[D]. 长沙理工大学, 2007.

[17] 马丽萍. 材料生命周期评价基础之道路交通运输本地化研究[D]. 北京工业大学, 2007.

[18] 郑艳华. 生命周期评价法在公路建设项目环境影响分析中的应用[D]. 南京林业大学, 2009.

[19] 吕莎莎. 基于LCA磷石膏基层材料环境影响研究[D]. 华中科技大学, 2012.

[20] 杜丽. 基于生命周期评价方法半刚性基层施工过程中温室气体排放分析研究[D]. 长安大学, 2012.

[21] de H U. Towards a methodology for life cycle impact assessment[M]. Brussels: Society of Environmental Toxicology and Chemistry, 1996.

[22] ISO. 项目层次上对温室气体减排和清除增加的量化、监测和报告的规范及指南[R].

[23] EPA. Guidelines for Assessing the Quality of Life-Cycle Inventory Analysis[R]., 1995.

[24] 邓南圣, 吴峰. 工业生态学-理论与应用[J]. 2002.

[25] EPA. Life-cycle Impact Assessment: A Conceptual Framework, Key Issues, and Summart of Existing Methods[R]., 1992.

[26] 孙启宏. 生命周期评价在清洁生产领域的应用前景[J]. 环境科学研究. 2002, 15(4): 4-6.

[27] 周祖鹏, 刘夫云, 莫秋云. 两种简化生命周期评价方法及其应用[J]. 组合机床与自动化加工技术. 2014(10): 158-161.

[28] 席德立, 彭小燕. LCA中清单分析数据的获得[J]. 环境科学. 1997(05): 86-89.

[29] 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]. 华南理工大学, 2011.

[30] 张智慧, 邓超宏. 建设项目施工阶段环境影响评价研究[J]. 土木工程学报. 2003, 36(9): 12-18.

[31] Curran M A. Life Cycle Assessment: An international experience[J]. ENVIRONMENTAL PROGRESS. 2000, 19(2): 65-71.

[32] 黄维蓉. 沥青路面材料与施工技术[M]. 人民交通出版社, 2013.

[33] 洪竞科, 王要武, 常远. 生命周期评价理论及在建筑领域中的应用综述[J]. 工程管理学报. 2012, 26(1): 17-22.

- [34] 程敏, 施霞君. 建筑节能的全生命周期研究[J]. 生态经济. 2009(7): 118-120, 123.
- [35] 黄春林, 张建强, 沈淞涛. 生命周期评价综论[J]. 环境技术. 2004, 22(1): 29-32.
- [36] 杨博. 沥青路面节能减排量化分析方法及评价体系研究[D]. 长安大学, 2012.
- [37] 李光明. 应用全寿命分析法研究高速公路沥青路面结构[J]. 路基工程. 2010(04): 108-110.
- [38] 孙祖望. 沥青搅拌设备的节能减排[J]. 建设机械技术与管理. 2011, 24(6): 41-44.
- [39] 江燕青, 朱月阳. 连续式与间歇式沥青混合料搅拌设备的对比[J]. 工程机械与维修. 2005(5): 83-85.
- [40] 杨烜. 基于GREET的汽车代用燃料生命周期评价[D]. 长安大学, 2007.
- [41] 中华人民共和国交通部. 公路沥青路面施工技术规范[M]. 人民交通出版社, 2004.
- [42] 徐晓枫, 蓝伟生. 沥青混合料摊铺机选型原则和摊铺质量浅析[J]. 黑龙江交通科技. 2009, 32(5): 55-56.
- [43] 杨发林. 基于排放源的沥青面层施工过程温室气体排放研究[D]. 长安大学, 2012.
- [44] 杨朋, 张肖宁. 橡胶沥青混合料压实性能研究[J]. 公路工程. 2009, 34(4): 141-144.
- [45] 邵东野. 基于国际平整度指数 (IRI) 的沥青路面养护评价体系[D]. 长安大学, 2007.
- [46] 张文字, 孔永健, 魏建军. 沥青路面行驶质量指数预测模型[J]. 金陵科技学院学报. 2006(04): 41-44.
- [47] 周晓青, 孙立军. 国际平整度指数与行驶车速的关系[J]. 同济大学学报(自然科学版). 2005(10): 47-51.
- [48] 张金喜, 苏蕊葳, 王锋. 路面平整度与驾驶速度关系的实验研究[J]. 武汉理工大学学报. 2011(10): 59-63.
- [49] 贾洪飞, 隗志才, 张梟雄, 等. 高速公路后评价油耗指标的确定与对比[J]. 吉林大学学报(工学版). 2004(02): 298-301.
- [50] 张卫华, 王炜, 牛学勤, 等. 京石高速公路及其辅道汽车油耗比较分析[J]. 公路交通科技. 2003(03): 182-185.
- [51] 陈力维. 沥青路面运营期间能量消耗与气体排放量化分析研究[D]. 长安大学, 2012.
- [52] 邵春华. 耒 (阳) 宜 (章) 高速公路路面中长期性能及养护维修策略研究[D]. 长沙理工大学, 2010.

致谢

本论文是在我的导师钱吮智教授的亲切关怀和悉心指导下完成的。他严肃的科学态度，严谨的治学精神，精益求精的工作作风，深深地感染和激励着我。从课题的选择到论文的最终完成，钱老师都始终给予我细心的指导和不懈的支持。两年多来，钱老师不仅在学业上给我以精心指导，同时还在思想、生活上给我以无微不至的关怀，在此谨向钱老师致以诚挚的谢意。

其次，我要感谢廖公云老师，他治学严谨，诲人不倦。在钱老师不在国内的时间里，积极帮我解答论文中遇到的难题以及联系专业实践的老师，让我没有掉队并顺利完成各种学院答辩前审核。

此外，我要感谢课题组的师兄马辉、邓涵文，同门刘淑芬、丁贝、吴爽、朱腾阔，师妹查蓉馨，师弟黄毅等人对我给予的极大支持和帮助。他们在我论文写作遇到困难时一直鼓励我，并帮我指点迷津。他们无私的帮助对我的毕业论文的顺利完成起到了很大作用。再这样团结优秀的教研室里，和这样一群优秀的学生一起奋斗、努力，让我感觉很荣幸，很自豪。

最后感谢我的父母、姐姐、男友还有周围的亲朋好友，感谢他们为我的学业和生活提供了无私的支持，他们对我的关爱和支持是我发奋学习最大的动力，在这里请接受我诚挚的谢意！