

分类号 U416.2  
密 级 公开

单位代码 10618  
学 号 2130111056



重庆交通大学

# 硕士学位论文

## 基于 LCA 的沥青路面建设期能耗和 排放量化分析研究

研究生姓名: 高放

导师姓名及职称: 朱洪洲教授

申请学位类别 工学硕士 学位授予单位 重庆交通大学

一级学科名称 交通运输工程 论文提交日期 2016年4月16日

二级学科名称 道路与铁道工程 论文答辩日期 2016年6月2日

2016年6月16日

**Study on the Quantitative Analysis of  
Energy Consumption and Emissions During  
the Period of Asphalt Pavement  
Construction Based on LCA**

A Dissertation Submitted for the Degree of Master

**Candidate: Gao Fang**

**Supervisor: Prof. Zhu Hongzhou**

Chongqing Jiaotong University, Chongqing, China



## 摘 要

建立沥青路面能耗与排放量化评价体系,是实现沥青路面工程建设生态化发展的重要基础。本文基于生命周期评价方法(LCA),将沥青路面建设期划分为材料物化、运输和施工三个阶段,并给出了各阶段组成的定义及研究范围,采用试验测试和数据收集、分析等手段,进行了沥青路面原材料及施工机械及能源的清单分析,建立了沥青路面材料和施工机具的清单数据集,并在此基础上建立了沥青路面工程材料建设期三阶段的能耗与排放计算模型,量化了沥青路面建设期能耗清单。最后,对比研究了半刚性基层沥青路面和柔性基层沥青路面的六种不同路面结构组成形式的建设期能耗与碳排放情况,并以此为基础提出了沥青路面建设期节能减排对策及方法。

沥青路面材料能耗排放量化结果表明:沥青类路面工程材料整体的能耗要略高于基层材料,沥青类材料中SBS改性SMA的能耗最高,为690MJ/t,基层材料中二灰土能耗最大,为600MJ/t;基层材料生产阶段的碳排放要远大于沥青类材料,沥青混凝土类材料的碳排放量要稍大于沥青碎石材料。无机结合料类路面材料中二灰土排放量最大,约153kg CO<sub>2</sub>/t,沥青类材料中SBS改性SMA排放量最大,约42kg CO<sub>2</sub>/t;原材料运输产生的能耗与排放是单位质量路面工程材料运输阶段能耗与排放的主要来源,控制运输阶段沥青路面工程材料的能耗与排放应从减少原材料的运距为主;基层材料的施工能耗和排放明显小于沥青类材料,加热环节在施工阶段所占比重较大,加热产生的能耗和排放所占比重分别高达90%和80%;温拌的施工能耗相比热拌减少约19%,温拌的施工排放相比热拌减少约12%;

沥青路面典型结构能耗排放量化结果表明:三种柔性基层沥青路面的建设期总能耗均大于半刚性基层沥青路面,沥青路面六种结构建设期能耗组成中,物化阶段和施工阶段是耗能最大的两部分;三种半刚性基层沥青路面结构的碳排放总量均大于三种柔性基层沥青路面结构。而在碳排放量组成方面,六种沥青路面结构建设期物化阶段所产生的碳排放总量所占总排放量的比重均为最大,施工阶段次之,运输阶段产生的碳排放总量较小。

对比沥青路面建设期各单位厚度结构层能耗与排放可以得出:材料物化阶段是所有结构层能耗与排放的关键环节;施工阶段的能耗与排放在沥青结构层中也占着较大比例,应当优化沥青混凝土和沥青碎石混合料的施工工艺,降低机械燃油量。

**关键词:** 沥青路面; 建设期; 能耗; 碳排放; 量化分析

## ABSTRACT

Asphalt Pavement establish quantitative evaluation system of energy consumption and emissions is an important foundation to achieve asphalt pavement construction ecological development. Based on the Life Cycle Assessment (LCA), the asphalt pavement construction period is divided into physical and chemical materials, transportation, and construction in three stages, and gives the definition and scope of the various phases of the study, the use of experimental testing and data collection, analysis and other means carried a list of asphalt pavement construction machinery and raw materials and energy analysis, asphalt pavement materials and construction machinery inventory data collection, and on this basis to establish the energy consumption of asphalt pavement construction materials and construction of the three-stage emission calculation model quantify the energy consumption of asphalt pavement construction list. Finally, a comparative study of six different structures in the form of semi-rigid base asphalt pavement and flexible pavement asphalt pavement construction of energy consumption and carbon emissions, as the basis for a proposed asphalt pavement construction of energy conservation measures and methods .

Asphalt pavement material energy emission quantification results showed; energy bituminous pavement construction material as a whole to be slightly higher than the base material, the highest consumption of SBS modified asphalt SMA-based material for 690MJ / t, two ashes base material consumption maximum for 600MJ/t; carbon base material production stage is much larger than the pitch-based materials, carbon emissions from asphalt and concrete materials should be slightly larger than the bituminous gravel material. Inorganic Binder class paving two ashes largest emissions of about 153kg CO<sub>2</sub>/t, SBS modified bitumen-based material SMA largest emissions of about 42kg CO<sub>2</sub>/t; energy consumption and emissions generated by the transport of raw materials per unit mass Pavement Engineering the main source of the material transport stages of energy consumption and emissions, the control stage of transport asphalt pavement construction materials to reduce energy consumption and emissions should be the main haul raw materials; construction energy consumption and emissions significantly less than the base material of asphalt type material, heating part of the construction phase larger proportion, the proportion of energy consumption and emissions are generated by heating up to 90% and 80%; the construction of the thermal energy of warm mix mix compared to a decrease of approximately 19%, construction warm mix of emission reduction compared to hot mix about 12%;

Asphalt pavement typical structure of energy emission quantification results showed that: the total energy consumption of three kinds of construction material asphalt pavement were more than semi-rigid base asphalt pavement, asphalt pavement structure construction of six kinds of energy composition, physico-chemical and phase construction phase is consumed the greatest two parts; three kinds of half the total carbon emissions rigid base asphalt pavement structure were more than three kinds of flexible Base asphalt Pavement. In the composition of carbon emissions, carbon emissions of six kinds of asphalt pavement construction phase generated by the materialization of total emissions are the largest proportion, followed by the construction phase, the total amount of carbon emissions produced by the transport stage smaller .

Compare asphalt pavement construction unit thickness of each layer of the structure of energy consumption and emissions can be drawn: the material is the key to all stages of materialization layer structure of energy consumption and emissions; energy consumption and emissions in the construction phase of the asphalt layer structure is also occupied large the ratio should be optimized concrete construction technology and bituminous macadam mixture, reduce the mechanical fuel.

**KEY WORDS:**asphalt pavement; construction period; energy; carbon emissions; quantitative analysis

# 目 录

第一章 绪论 .....	1
1.1 研究背景及意义 .....	1
1.2 生命周期评价 (LCA) 概述 .....	4
1.3 路面生命周期评价国内外研究现状 .....	7
1.3.1 国外研究现状 .....	7
1.3.2 国内研究现状 .....	9
1.4 主要研究内容及研究路线 .....	11
1.4.1 主要研究内容 .....	11
1.4.2 研究路线 .....	12
第二章 沥青路面建设期 LCA 评价体系框架 .....	14
2.1 沥青路面建设期 LCA 的研究目的 .....	14
2.2 沥青路面建设期 LCA 的研究内容 .....	14
2.2.1 理论基础及概述 .....	14
2.2.2 沥青路面建设期产品系统 .....	14
2.2.3 功能单位 .....	15
2.2.4 系统边界 .....	15
2.2.5 系统模型 .....	16
2.2.6 基本假设 .....	17
2.2.7 LCIA 方法学和影响类型 .....	17
2.2.8 数据的种类和来源 .....	18
2.3 本章小结 .....	18
第三章 沥青路面原材料和施工机械的能耗及排放清单分析 .....	19

<b>3.1 清单分析的内容和方法</b> .....	<b>19</b>
3.1.1 清单分析内容 .....	19
3.1.2 清单分析方法 .....	19
3.1.3 数据的收集和处理 .....	20
<b>3.2 沥青路面要素的能耗及排放清单</b> .....	<b>21</b>
3.2.1 原材料 .....	21
3.2.2 机械设备 .....	28
3.2.3 能源 .....	21
<b>3.3 本章小结</b> .....	<b>32</b>
<b>第四章 沥青路面工程材料能耗及排放清单分析</b> .....	<b>33</b>
<b>4.1 材料物化阶段能耗与排放计算</b> .....	<b>33</b>
4.1.1 计算范围和边界 .....	33
4.1.2 计算模型 .....	33
<b>4.2 材料运输阶段能耗与排放计算</b> .....	<b>34</b>
4.2.1 计算范围与边界 .....	34
4.2.2 计算模型 .....	34
<b>4.3 施工阶段能耗与排放计算</b> .....	<b>34</b>
4.3.1 计算范围和边界 .....	34
4.3.2 计算模型 .....	35
<b>4.4 能耗及排放清单分析</b> .....	<b>36</b>
4.4.1 材料物化阶段能耗与排放结果 .....	36
4.4.2 材料运输阶段能耗与排放结果 .....	39
4.4.3 施工阶段能耗与排放结果 .....	42
4.4.4 建设期能耗与排放结果对比 .....	50
<b>4.5 本章小结</b> .....	<b>53</b>



<b>第五章 沥青路面典型结构建设期能耗排放量化对比研究.....</b>	<b>55</b>
<b>5.1 沥青路面典型结构建设期能耗及排放模型.....</b>	<b>55</b>
5.1.1 沥青路面典型结构建设期能耗模型 .....	55
5.1.2 沥青路面典型结构建设期碳排放模型 .....	55
<b>5.2 沥青路面典型结构建设期能耗及排放清单分析.....</b>	<b>56</b>
5.2.1 路面结构设计 .....	57
5.2.2 功能单位 .....	59
5.2.3 材料物化阶段能耗及排放 .....	59
5.2.4 运输阶段能耗及排放 .....	68
5.2.5 施工建设阶段能耗及排放 .....	70
<b>5.3 不同沥青路面结构能耗排放量化结果对比分析.....</b>	<b>79</b>
5.3.1 不同沥青路面结构能耗结果对比分析 .....	79
5.3.2 不同沥青路面结构排放结果对比分析 .....	80
5.3.3 不同沥青路面结构层能耗排放结果对比分析 .....	82
<b>5.4 本章小结 .....</b>	<b>84</b>
<b>第六章 结论 .....</b>	<b>86</b>
<b>6.1 结论 .....</b>	<b>86</b>
<b>6.2 展望 .....</b>	<b>87</b>
<b>参考文献.....</b>	<b>89</b>

## 第一章 绪论

## 1.1 研究背景及意义

近年来，能源枯竭、全球气候变暖等一系列环境问题突显。美国能源信息管理局（EIA）统计结果<sup>[1]</sup>显示，2010 年世界能源消耗量为  $524 \times 10^{15}$  Btu（折合标准煤约 189.5 亿吨），预计 2020 年将达  $630 \times 10^{15}$  Btu，2040 年达  $820 \times 10^{15}$  Btu；2010 年交通运输业能耗达  $101 \times 10^{15}$  Btu（表 1.1、图 1.1）（折合标准煤约 36.53 亿吨），占全球总能耗的近 20%，成为仅次于工业的第二大高能耗行业。

表 1.1 2010-2040 年世界各地交通运输业能耗

地区	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	年平均增长率 /%
	10 <sup>15</sup> Btu（英国热力单位）							
经合组织	57.9	56	55.9	54.8	54.5	54.8	55.5	-0.1
美洲	32.7	32.5	32.5	32	31.7	32	32.9	0
欧洲	18	16.3	16.2	15.8	15.7	15.8	15.7	-0.5
亚洲	7.1	7.2	7.1	7	7	7	7	-0.1
非经合组织	43.1	50.3	56.4	62.3	68.3	75.6	83.9	2.2
欧洲及欧亚大陆	6.7	8	8.5	8.9	9.5	10.1	10.6	1.5
亚洲	19.9	23.5	28	32.5	37	42.6	49.2	3.1
中东	6	7.4	8.1	8.3	8.6	9	9.5	1.5
非洲	3.8	4	4.1	4.4	4.5	4.6	4.8	0.8
中部及南美洲	6.6	7.3	7.7	8.1	8.8	9.3	9.8	1.3
世界（总和）	101	106.3	112.3	117.1	122.8	130.4	139.4	1.1

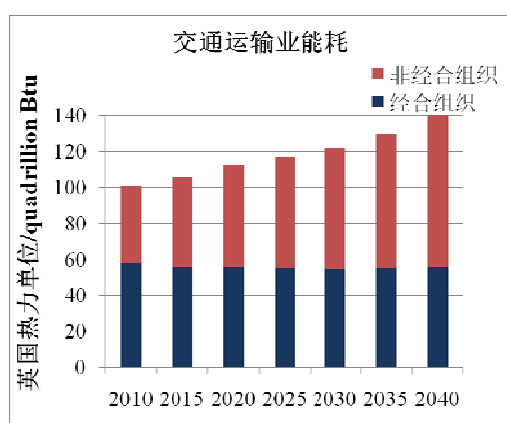


图 1.1 全球交通运输业能耗

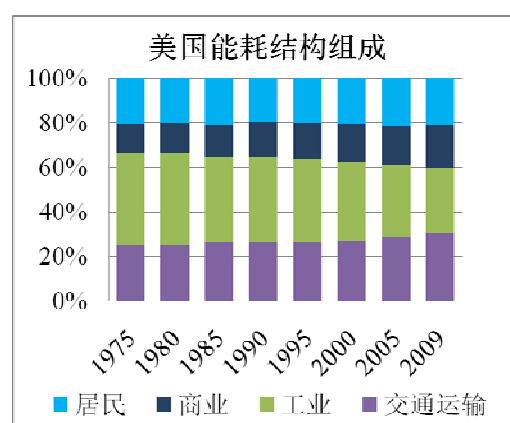


图 1.2 美国各部门能耗组成

据统计，1975-2009 年美国交通运输用能占全国能耗比重为 25%~29%，且逐年上升<sup>[2]</sup>（图 1.2）；1965-2007 年间，日本交通行业用能占全国能耗的 16.2%~24.4%<sup>[3]</sup>（图 1.3）；欧盟 28 国交通运输业能耗比重由 1990 年的 26.8% 增长至 2007

年的32.9%;1990-2012年中国交通运输业能耗比重由4.6%增长到8.7%<sup>[4]</sup>(图1.4)。与美国、日本等发达国家相比,中国交通运输业能耗占全国总能耗比重略小,但增长势头迅猛,1990年到2012年增长近一倍。

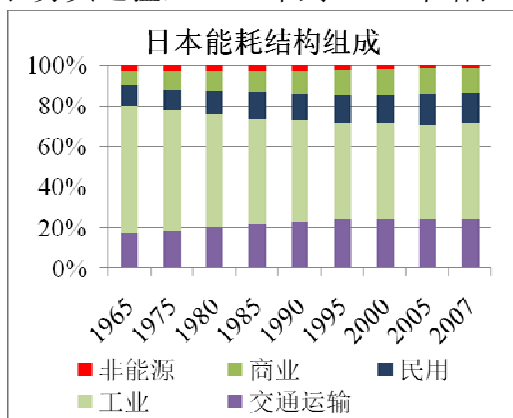


图 1.3 日本各部门能耗组成

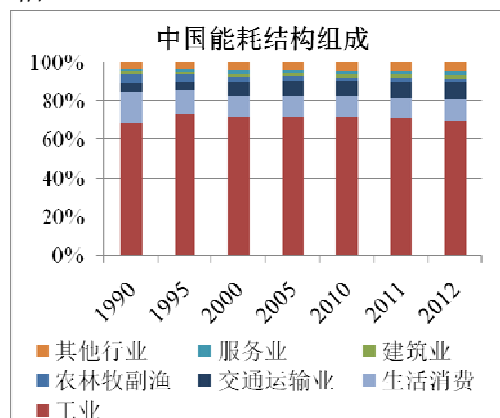


图 1.4 中国各部门能耗组成

交通运输作为全球第二大高能耗行业,势必带来高排放。根据国际能源署(IEA)研究报告<sup>[5]</sup>,2011年全球CO<sub>2</sub>排放总量达313亿吨,交通运输行业CO<sub>2</sub>排放约占22%(图1.5),成为仅次于发电供热行业的第二大CO<sub>2</sub>排放部门;1990年交通运输业CO<sub>2</sub>排放达45.74亿吨,2011年约为70亿吨,增长了53.04%;从运输方式来看,公路运输碳排放约占整个交通运输业的3/4(图1.6)。据中国能源统计年鉴统计<sup>[6]</sup>(如图1.7所示),2008年美国交通部门CO<sub>2</sub>排放共17.95亿吨,占全美CO<sub>2</sub>总排放的30.32%;日本交通行业CO<sub>2</sub>年均排放量维持在2.46亿吨左右,占全国CO<sub>2</sub>排放总量的20%左右;中国交通行业CO<sub>2</sub>排放呈持续快速增长趋势,从1990年的1.39亿吨增加到2011年的6.39亿吨,2002年以来CO<sub>2</sub>排放增速进一步加快,交通行业CO<sub>2</sub>排放约占全国CO<sub>2</sub>排放总量的6%<sup>[7]</sup>。

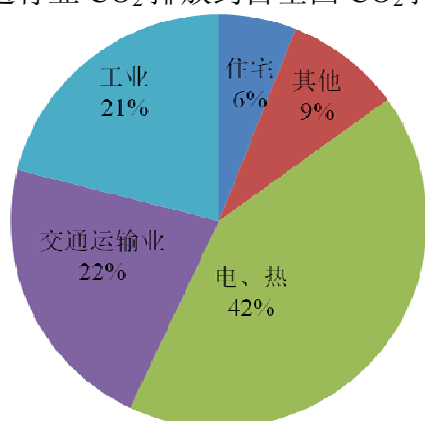


图 1.5 2011年各行业CO<sub>2</sub>排放比例

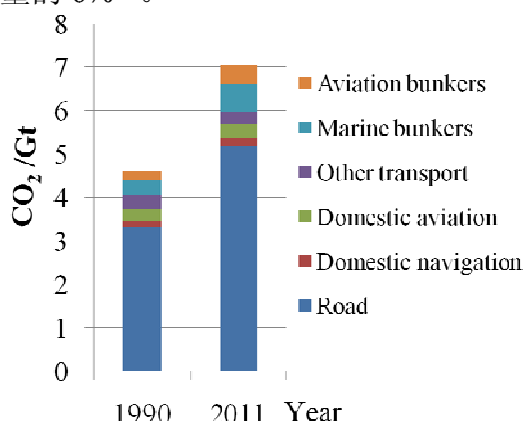


图 1.6 不同交通运输方式CO<sub>2</sub>排放量

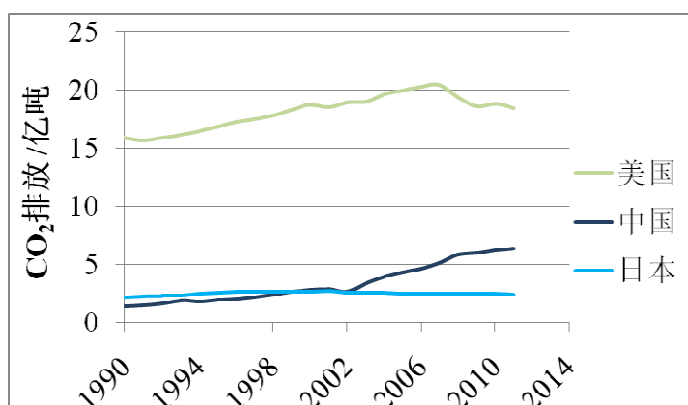


图 1.7 1990-2011 年美中日三国交通运输业 CO<sub>2</sub> 排放变化趋势

目前，世界各国交通运输业能耗及排放主要有两种计算方法：一是利用统计手段收集交通部门总的燃料消耗量，然后利用 IPCC 提供的排放因子<sup>[8]</sup>计算 CO<sub>2</sub> 排放；二是通过交通量（汽车保有量）、行驶里程、平均油耗等数据估算道路、铁路、航空等交通部门的燃料消耗，利用燃料消耗量和排放因子计算 CO<sub>2</sub> 排放。然而，交通行业能耗排放计算方法普遍存在以下问题：（1）世界各国收集的交通运输能耗排放数据仅考虑车辆运营，忽略了道路材料物化、施工建设、养护维修等过程；（2）油耗模型局限于车辆工程，忽略了路面状况（平整度、模量、坡度等）和衰变过程的影响。据调查资料显示，美国每年用于全国公路建设与养护的原材料投入大约为 3.5 亿吨<sup>[9]</sup>，而建设一条 1 公里长的标准双车道沥青路面，能耗约为  $7.0 \times 10^6 \text{MJ}$ <sup>[10]</sup>，相当于 241 吨标准煤。在中国建一条 1 公里长的标准双车道沥青路面大约需要消耗  $9.3 \times 10^6 \text{MJ}$  的能源，折合标准煤 317 吨，其中材料物化阶段约占 49.18%，施工阶段约占 30.18%，养护维修阶段约占 15%，结构拆除阶段约占 5.64%；CO<sub>2</sub> 排放量约为 1164.5t，材料物化阶段约占 72.2%，施工阶段约占 14.38%，养护维修阶段约占 10.08%，结构拆除阶段约占 3.34%<sup>[11]</sup>。

与美国、日本等发达国家相比，中国交通运输能耗大、排放高、增长速度快等问题引起了党和国家的高度重视。党的十八大强调，着力推进绿色发展、循环发展、低碳发展，努力建设美丽中国，实现中华民族永续发展。交通运输是国民经济和社会发展的主动脉，是国家节能减排和应对气候变化的重点领域之一。国家在应对气候变化的工作部署中，已明确将低碳交通作为战略重点。国务院办公厅在 2011 年对政府工作报告中提出交通运输部的唯一任务就是加快建设以低碳为特征的交通体系。全国交通运输工作会议上，张德江副总理强调要大力发展低碳交通运输，要认真组织、深入开展低碳交通运输体系研究，切实把低碳发展的理念落实到交通运输生产、生活、出行方式的各个环节中。

伴随全球经济一体化发展要求，服务于经济发展的公路交通运输行业取得了举世瞩目的成就。截至 2013 年底，全球公路网里程达 3544 万公里，中国公路网里程达 435 万公里，居世界第三位<sup>[12]</sup>。据统计<sup>[5]</sup>，交通运输业能耗排放近 3/4 来自公路交通运输。沥青路面由于行车舒适性好、噪音低、养护维修方便等优点成为各等级公路路面主要形式。在“低碳交通、绿色出行”指引下，公路建设运营过程中绿色循环低碳技术得以迅速推广，如橡胶沥青技术、温拌技术、再生技术等，实现了废旧材料循环利用，达到节能减排的效果。然而，绿色循环低碳环保技术的推广应用对绿色低碳交通运输体系的建立还远远不够，交通行业仍面临公路建设运营能耗排放计算方法、全生命周期各个环节比重、能耗排放影响因素、绿色循环低碳技术节能减排效果评价等诸多问题没有解决，缺乏定量的评价体系，导致低碳环保技术的开发与应用针对性不强、理论依据不充分。因此，为进一步完善绿色低碳交通运输体系，分析生命周期各个阶段能耗排放比重及影响因素，深入挖掘公路建设运营节能减排潜力，为节能减排技术开发提供技术指导，探索中国式低碳公路交通发展途径，使生产企业和管理部门对公路全生命周期节能减排问题引起重视，实现“全寿命、全过程、全线路”节能减排，建立以能耗和排放量分析为核心的沥青路面节能减排量化评价体系迫在眉睫。

针对高速公路沥青路面建设过程中的节能减排量化分析问题，本文参考应用生命周期理论，将高速公路沥青路面建设期界定为材料物化、运输和施工 3 个阶段，对沥青路面建设期能耗和排放进行量化研究。首先，建立沥青路面建设期 LCA 评价体系，确定沥青路面的材料和设备清单数据，提出沥青路面建设阶段能耗与排放量计算方法和详细计算过程；然后，量化分析沥青路面建设期各阶段的能耗和排放；最后，对比分析半刚性基层路面和柔性基层沥青路面建设期能耗与排放。明确能耗高、排放量大的分项工程和关键环节，为建设工程节能减排措施的应用提供科学的指导。从节能减排角度对路基路面材料、技术的研发以及生产和施工技术的合理优化提供指导。

## 1.2 生命周期评价（LCA）概述

生命周期评价（LCA）原型是“资源与环境状况分析”（Resources and Environmental Profile Analysis，简称 REPA），出现于上世纪六七十年代，最初应用于评价可口可乐公司饮料包装瓶在生产过程中的环境负荷<sup>[13]</sup>。1990 年“国际环境毒理学与化学学会”（SETAC）首次提出了 Life Cycle Assessment（LCA）概念。

1993年国际标准化组织（ISO）开始起草 ISO14000 国际标准，正式将生命周期评价纳入该标准体系。

ISO 于 1997 年颁布了 ISO14040（环境管理-生命周期评价-原则和框架）标准<sup>[14-17]</sup>，将生命周期评价（LCA）分为紧密相联、不断重复进行的四个步骤：目的和范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释 4 个部分（图 1.8）。

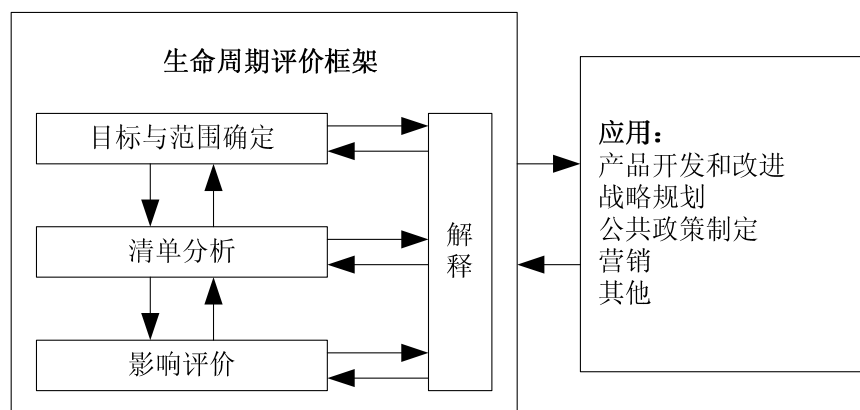


图 1.8 ISO 生命周期评价框架

### (1) 目标与范围的确定

确定研究的目标与范围是生命周期评价的第一步，它是清单分析、影响评价和结果解释的出发点和落脚点。目标就是确定生命周期评价的目的和意义，研究范围的确定取决于研究目标，范围界定主要内容包括系统功能、功能单位、系统边界、假设和限制条件、环境影响类型、数据种类和来源等<sup>[18]</sup>。

### (2) 清单分析

清单分析（LCI: Life Cycle Inventory）是以数据资料、计算模型为基础对一种产品、系统、工艺或活动生命周期内的输入（能耗与原材料消耗）、输出（环境排放，如废气、废水、固体废弃物以及其它环境释放物等）进行客观量化的过程，为 LCA 方法的核心。生命周期评价按清单分析方法分为三类<sup>[19]</sup>：基于流程的生命周期评价、基于经济投入产出分析的生命周期评价和综合性生命周期评价。

### (3) 影响评价

影响评价（LCIA: Life Cycle Impact Assessment）是建立在生命周期清单分析的基础上，根据生命周期清单分析数据与环境的相关性，评价各种环境问题造成的潜在环境影响的严重程度（图 1.9），即把清单分析结果（能耗排放数据）与环境影响类别（能源枯竭系数、温室效应、酸雨效应等）建立相关关系，进行特征化、标准化、加权处理，确定各类环境问题影响程度，是 LCA 方法的难点。

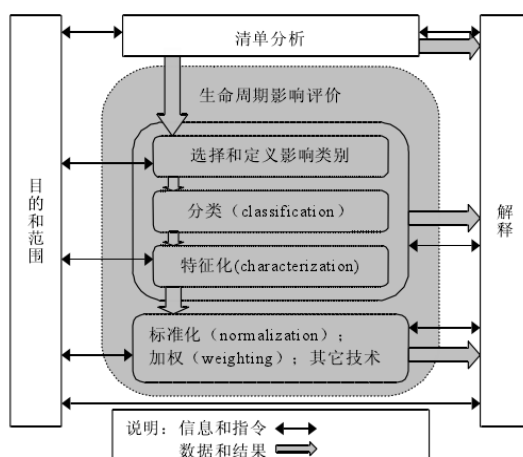


图 1.9 影响评价流程

影响评价部分具体分为以下 4 个步骤：

### ①选择和定义影响类别

目前国际上环境影响类别主要分为能源枯竭、温室效应、酸雨效应、臭氧层破坏、生态毒性、光化学烟雾形成、人体健康损害、颗粒物等。产生这些影响的作用范围和对应的环境负荷项目如表 1.2 所示。

表 1.2 环境影响类型及对应环境负荷项目

环境影响类型	作用范围	对应环境负荷项目
能源枯竭	全球	不可再生资源消耗，如煤、石油等
温室效应 (GWP)	全球	CO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CFCs, CH <sub>3</sub> Br
酸化效应 (AP)	区域	SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , HCl, HF, NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
健康危害	区域	SO <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, NMVOC
颗粒物	区域	PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>10</sub>

### ②分类

分类是将清单结果与环境影响类型联系起来并进行分组排列的一种定性的过程。当清单结果中污染物涉及的环境问题多于一种时，需要采用并联、串联或复合机制的方式将污染物分配至不同环境影响类型。实际研究中对于分类过程没有特殊要求，可以进行简化处理。

### ③特征化

特征化，即建立影响类型模型，并汇总同属一类的清单结果的过程。特征化的表示方式为：造成某种类型的环境影响变化或环境排放因子。特征化的结果表明了环境排放或资源消耗的状况。对每一种影响类型都应建立具体的模型来表示清单结果与因子间的关系。如对全球变暖，某物质的全球变暖潜力 (GWP) 被选

作特征化因子。IPCC 将 CO<sub>2</sub> 作为参照物，特征化因子表明其它物质的潜在影响相当于多少单位 CO<sub>2</sub> 的影响。

#### ④标准化和加权

标准化，即分析各因子对影响类型的相对贡献，是影响评价的可选分析过程。

加权评估是生命周期影响评价的可选分析过程。权重反映了不同影响的相对严重程度。加权过程是一个价值判断的过程，不同主体、不同研究目的采用的加权方法不同。

#### (4) 解释

结果解释阶段为：在生命周期的评价中，按照规定范围和目的的要求，归纳分析清单和影响评价的结果，进而得出结论和建议的过程。它将对产品、整个工艺和活动的生命周期之内的能耗、环境的排放机会和需求、原材料的使用等进行系统评估。这种研究分为定性和定量改进措施：产品结构的改变、原材料的重选、制造工艺及消费方式的改变和废弃物的管理等。对于决策过程，根据研究目标和范围的要求，向决策者提供所需的相关信息。生命周期解释的主要步骤包括：①以生命周期的评价和清单分析结果为基础辨识重大的环境问题；②以敏感性、一致性和完整性为原则评价生命周期和清单的研究结果；③得出解释结论、建议和最终报告。

### 1.3 路面生命周期评价国内外研究现状

#### 1.3.1 国外研究现状

国外已经对生命周期评价方法进行了大量的基础性研究，欧美发达国家和欧盟等国际组织均建立了各自的生命周期分析数据库，促进了各行业生命周期分析研究的开展。生命周期评价方法首次运用于道路工程领域始于二十世纪九十年代，芬兰学者运用 LCA 方法进行了路面环境影响比较分析<sup>[20]</sup>，随后，生命周期评价方法在道路工程中的应用得到进一步推广与发展。目前，国外研究人员将生命周期方法运用在道路工程行业中的主要方法有以下几种：基于流程的生命周期分析方法<sup>[20-26]</sup>、基于经济投入产出模型的生命周期分析方法<sup>[27]</sup>和综合性生命周期分析方法<sup>[28-32]</sup>三种。

1996 年，芬兰学者 Häkkinen and Mäkelä<sup>[20]</sup>采用流程的 LCA 法对 SMA 路面和传力杆水泥路面的环境影响进行了分析和比较。该研究选择 1km、日平均交通量 2 万辆、50 年使用寿命的 SMA 沥青路面和水泥路面为研究对象，将路面生命周期分为：材料生产、建设施工、运营、养护维修、废弃处理五个阶段。研究表明，根据养护方案的不同，水泥路面 CO<sub>2</sub> 排放比沥青路面多 40~60%，而沥青路面的



SO<sub>2</sub>排放比水泥路面高 40~60%；在能耗方面，若计入沥青本身蕴含的热值，沥青路面的非再生能源消耗大约是水泥路面的两倍，若不考虑热值，两者的能耗接近；相比道路材料生产、路面施工、养护修补而言，路面在运营过程中用户车辆能耗排放高得多。

1998年，美国的 Horvath 和 Hendrickson<sup>[27]</sup>采用卡内基梅隆大学的 EIO-LCA(经济学投入产出生命周期评估)模型，对热拌沥青混合料(HMA)和连续配筋水泥混凝土(CRCP)路面进行评价。结果表明，原材料准备和生产阶段，沥青路面的能耗相比水泥路面要高 40%，而水泥路面的其他环境排放指标值要高于沥青路面。研究认为综合考虑沥青路面的可再生能力，沥青路面相比水泥路面来说更为绿色环保。

2000年，Mroueh<sup>[21]</sup>采用基于流程的 LCA 法研究分析了路面结构中材料利用情况对环境的影响。研究调查了 7 种路面结构，分别采用粉煤灰、废弃水泥混凝土、高炉矿渣替代原材料。分析的环境类型包括：资源利用、占地、水污染、固体废物排放、气体排放以及噪声污染等。分析对象为芬兰公路，日交通量为 7000 辆，重车比例为 14%，分析周期为 50 年，分析阶段包括材料生产、路面施工和养护阶段。在养护阶段分析中，研究假设各种路面都采用相同的养护方案，这就等于假设每种路面结构都具有相同的性能变化曲线，这与实际情况明显不符。最后，研究采用专家权重系统归一化加权计算各种不同的环境负荷，形成了综合环境“得分”。研究结果表明，再生资源或废弃材料路面的环境友好性要优于采用新料的路面。

2001年，Stripple<sup>[22]</sup>采用基于流程的 LCA 方法，研究了热拌和冷拌沥青混合料路面与水泥混凝土路面在材料物化阶段、机械施工阶段以及路面使用阶段的环境影响。结果表明，在不考虑原料能(原材料所包含的不作为能源使用的燃烧热<sup>[33]</sup>)的情况下，计算 1km 路面 40 年使用期内能耗，沥青路面能耗约  $23 \times 10^6$  MJ，水泥路面  $27 \times 10^6$  MJ，沥青路面能耗明显低于水泥路面，但热拌和冷拌沥青路面两者区别不大。三个阶段中道路建设期 CO<sub>2</sub> 等气体排放最多，其次是养护阶段，最后是使用阶段。忽略水泥路面碳化作用(指水泥路面一定深度范围内吸收 CO<sub>2</sub>)，水泥混凝土路面 CO<sub>2</sub> 排放明显高于其他两种沥青路面。

Nisbet<sup>[23]</sup>采用基于流程的 LCA 方法研究并比较了城市道路和公路上的沥青路面与水泥路面的环境影响。环境类型包括：能源消耗、各种气体排放量(如 CO<sub>2</sub>、NO、SO<sub>2</sub>、CO、CH<sub>4</sub>、挥发性有机化合物和粉尘颗粒)以及自然资源消耗等。研究结果表明，水泥路面结构建设产生的大气排放量低(二氧化碳和氧化氮除外)。同时，研究对 10 种不同的因素进行了敏感性分析。其中，对沥青路面来说，沥青

的热值能对原始能计算至关重要。性敏感分析的其他要素包括：服务寿命（Useful Life）、路面设计、养护方案、水泥混合料配合比设计、沥青混合料配合比设计，粉煤灰利用、沥青路面再生利用及施工机械。

2003年，Park<sup>[28]</sup>首次将综合性生命周期评价（Hybrid LCA）应用于路面研究，将路面的寿命周期分为建筑材料制造、施工、维护修理和拆卸回收四个阶段。建筑材料制造阶段，该研究结合韩国的经济输入-输出方法与国家能源消耗平衡表进行分析，而路面生命周期的其他阶段，则采用基于流程的LCA分析。研究表明，在建筑材料的制造阶段，能耗最大；排放方面，材料制造阶段排放最高，占总排放的56.9%。Treloar<sup>[29]</sup>同样采用综合性生命周期分析方法，研究了全厚式沥青路面、素混凝土路面以及连续配筋混凝土路面等8种不同路面结构形式在材料物化阶段、机械施工阶段以及路面使用阶段的环境影响。研究结果表明，全厚式沥青路面的能耗最高，不设传力杆的水泥混凝土路面的能耗最低。

2005年，Zapata和Gambatese<sup>[24]</sup>针对Horvath与Stripple研究结论的争议，采用基于流程的生命周期分析方法，研究了热拌沥青路面与连续配筋水泥混凝土路面在材料物化阶段及施工阶段的能耗与排放。研究结果表明，热拌沥青混凝土路面两阶段的能耗较小，主要原因是沥青的提炼和生产过程所产生的能耗值要低于水泥。

2011年，Darrell Cass<sup>[31]</sup>采用实地测量的方法对美国一条州际干线公路大修工程所涉及的材料生产、运输和施工机械进行了数据收集，并进行了能耗与排放量化分析，建立了两个综合性生命周期分析模型。研究结果显示，该工程每英里单车道的二氧化碳排放当量值分别为787.19Mt和1383.28Mt，材料生产及机械加工过程所产生的碳排放占总排放的比重达到90%以上。

2014年，Qazi Aurangzeb<sup>[32]</sup>采用综合性生命周期分析方法，分析回收沥青路面混合料含量对环境的影响，包括能量消耗和温室气体排放。研究把生命周期分为材料生产、施工、维护和修复四个阶段，在建设和路面维护阶段使用基于流程的LCA法，在材料生产阶段使用基于输入-输出的分析方法。研究发现，施工阶段期间的能耗和排放只占总能耗的6%~8%，材料生产占大部分。此外，增加再生沥青（RAP）的使用，可显著降低能耗和排放，当加入30%~50%的RAP时，每公里路面宽度内CO<sub>2</sub>可减少38114kg~63524kg，采用30%、40%、50%的RAP，能耗可以相应减少26%、33%、40%。

### 1.3.2 国内研究现状

相比于国外对于路面生命周期评价的深入研究，路面生命周期评价在我国的研究尚处于起步阶段，研究成果并不多见，且大多集中在绿色循环低碳技术节能

减排效果评价和水泥混凝土路面生命周期分析和研究方面，且侧重于材料物化阶段和建设施工阶段，缺乏对沥青路面全寿命周期能耗排放量化分析和节能减排体系系统研究。

武汉理工大学刘顺妮<sup>[34]</sup>对硅酸盐水泥和混凝土进行了环境影响分析；清华大学的龚志起<sup>[35]</sup>利用生命周期评价方法(LCA)研究了几种建筑材料物化环境状况，主要分析了钢材、建筑玻璃、水泥、PVC 管材在生命周期物化阶段的环境影响；长沙理工大学郑莉<sup>[36]</sup>对路面材料水泥混凝土、再生水泥混凝土和粉煤灰水泥混凝土开展了寿命周期评价的研究。南京林业大学郑艳华<sup>[37]</sup>采用生命周期分析方法，研究了重庆某高速公路水泥混凝土路面在材料物化阶段、施工阶段、使用阶段以及拆除回收阶段的能耗和排放等环境影响，并提出相应的改进措施和方法；清华大学尚春静<sup>[38]</sup>采用综合性生命周期分析方法，具体研究了我国中西部地区标准 4 车道高速公路水泥混凝土路面在材料生产、路面施工、维修养护以及拆除回收 4 个阶段的能耗和排放，并给出了上述 4 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；华南理工大学潘美萍<sup>[39]</sup>采用生命周期分析方法，探讨了路面生命周期碳排放量评价的方法和技术框架，界定了路面生命周期碳排放的核算范围，明确了除使用阶段以外的各个生命周期阶段清单分析的具体内容；同济大学王贤卫<sup>[40]</sup>将高速公路建设界定为原材料生产、运输、施工建设 3 个阶段，分析了我国西南地区 4 条高速公路建设期 CO<sub>2</sub> 排放，着重研究了路基工程、路面工程、桥梁工程、隧道工程等单位工程 CO<sub>2</sub> 排放比例。长安大学杨博<sup>[41]</sup>采用基于流程的生命周期分析法，研究了沥青混合料生产过程、沥青路面建设过程以及沥青路面运营和使用过程中的能源消耗与气体排放。研究在定额法和排放因子法的基础上，采用理论计算和调查的方法，量化分析了沥青路面建设期能耗与排放；从沥青路面路面状况和沥青路面行驶状况角度出发，提出了沥青路面使用阶段车辆和维修养护阶段产生的能耗和排放的量化分析方法。并在分析能耗与排放的量化结果上，提出有效的沥青路面节能减排方法及建议。姜志威<sup>[42]</sup>对城市高架桥建造周期内的碳排放进行了分析，并计算了上海市某高架段的建材生产和机械施工的碳排放；李兴华<sup>[43]</sup>通过案例进行了公路隧道工程施工机械的碳排放计算；刘沐宇和欧阳丹<sup>[44]</sup>以一座桥梁为例计算了一座桥梁的生命周期碳排放；徐双<sup>[45]</sup>计算了某案例混凝土梁结构和钢-混组合梁结构的碳排放；东南大学的苏瑛<sup>[46]</sup>应用生命周期评价方法，研究包括从原材料生产到路堤修筑完成整个过程，普通路堤和聚苯乙烯泡沫塑料(EPS)两种不同路堤的环境影响。

综上所述，国外交通运输行业普遍采用基于流程、基于经济投入产出模型及综合性生命周期评价(LCA)方法进行能耗和排放研究，取得了丰硕的成果，主

要集中在水泥路面与沥青路面材料生产及施工阶段的能耗和排放，建立了部分材料生命周期评价能耗排放因子基础数据库；与国外的道路工程生命周期分析相比，受制于我国生命周期分析方法研究的发展水平，目前国内仅完成了钢铁、水泥、铝、工程塑料、建筑涂料、陶瓷等六大类典型、量大、面广的代表性材料的生命周期研究，道路交通 LCA 研究较少，仅有的一些研究也局限于水泥混凝土路面的生命周期分析研究，针对沥青路面生命周期分析研究较少。与国外路面 LCA 研究相比存在以下不足：

①交通运输行业未建立适合我国行业发展水平和工业生产水平的生命周期清单分析基础数据库，道路材料生命周期清单分析大多基于国外的能耗排放数据。目前，国内针对道路行业进行 LCA 及节能减排量化评价体系研究主要采用美国及 IPCC 提供的能耗和排放因子数据库，缺少本地化的能耗排放因子基础数据库。

②针对沥青路面环境影响 LCA 研究较少，且主要集中于材料物化阶段及建设施工阶段，沥青路面建设期整体的研究较少。

③国内交通运输行业采用 LCA 进行环境负荷影响评价，分析结果往往停留在清单分析上，测算了能耗排放数据，缺乏后续影响评价研究，导致 LCA 体系不完整。

④沥青路面缺乏节能减排量化评价体系，节能减排新技术、新材料开发针对性不强。

与国内目前沥青路面生命周期分析研究不对称的是，沥青路面是我国各等级公路，尤其是高速公路路面的主要形式，我国在沥青路面设计、施工和养护等方面已经积累了相当多的经验，在今后相当长的时期内，新建公路路面、运营养护仍将以沥青路面为主。因此，在目前资源与环境问题日益严峻的背景下，加快建立道路行业全生命周期能耗及排放量化评价体系、深入挖掘生命周期各阶段节能减排潜力、积极探索中国式低碳交通发展道路任重道远。

## 1.4 主要研究内容及研究路线

### 1.4.1 主要研究内容

#### (1) 建立基于 LCA 方法的沥青路面建设期评价体系框架

定义沥青路面建设期生命周期评价的研究目标及范围，将沥青路面建设期分为：原材料生产、原材料运输、施工建设 3 个阶段，划分建设期各阶段边界范围。明确沥青路面建设期内环境影响类型及相关排放污染物类别，确定沥青路面建设期内的能源消耗与环境排放清单。

## (2) 确定沥青路面建设材料和机械设备清单数据

分别从原材料生产、材料运输和机械施工 3 个阶段,对沥青路面清单数据进行分类收集、计算,明确沥青、水泥、改性沥青、集料、石灰、添加剂等道路材料的生产过程能耗及排放因子;调查各施工机械设备能耗参数,结合施工机械现场油耗测试,综合确定机械设备能耗及排放因子;确定适合我国沥青路面建设的材料、设备清单数据。

## (3) 沥青路面建设期能耗及排放量化分析研究

分析沥青路面稳定材料类基层、粒料基层等基层及沥青混合料面层的施工工艺、设备和机具组成,提出沥青路面原材料生产、运输和施工阶段的能耗与排放计算模型及计算方法;采用路面材料、机械设备能耗排放数据,根据计算模型和方法计算单位“功能单位”(为输入输出数据归一化而提出的基准)石灰土、石灰碎石、水泥土、水泥碎石、二灰土、二灰碎石、级配碎石、沥青混凝土、SBS 改性 SMA 及沥青碎石混合料等筑路材料生产、运输和施工阶段的能耗及排放。

## (4) 不同沥青路面结构建设期能耗与排放量化分析研究

建立路面工程能耗和排放计算模型,针对目前我国沥青路面典型结构,根据沥青路面原材料组成、施工工艺过程、机具组合等参数,以路面工程清单数据为基础,对不同沥青路面建材进行清单分析,计算不同沥青路面结构在建设期各阶段的能耗和排放,并分析对比不同结构间的差异,为高速公路沥青路面建设选取绿色建材和低碳优化的路面结构提供依据和参考。

### 1.4.2 研究路线

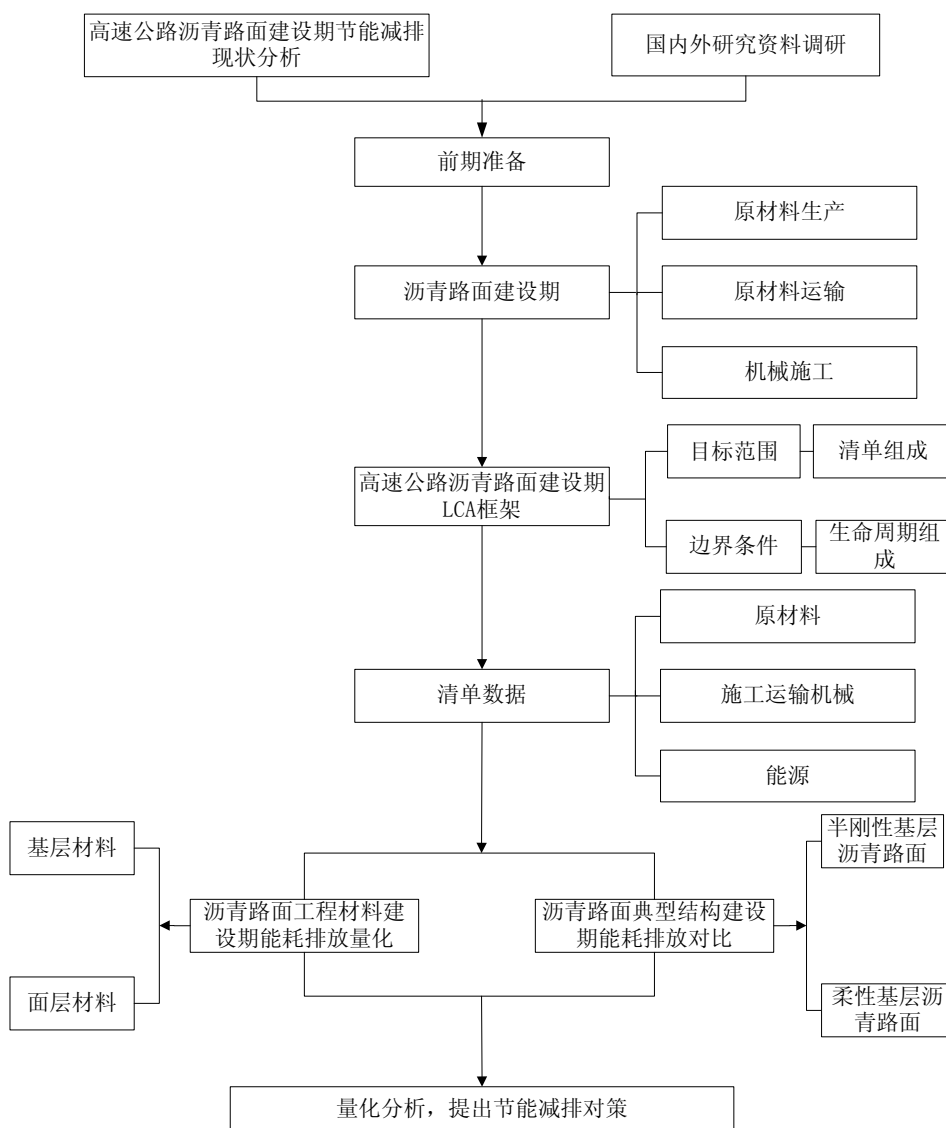


图 1.10 技术路线图

## 第二章 沥青路面建设期 LCA 评价体系框架

### 2.1 沥青路面建设期 LCA 的研究目的

应用 LCA 进行沥青路面分析时首先需要对研究目的进行定义。定义的内容包括<sup>[47]</sup>：1) 应用意图；2) 开展研究的理由；3) 研究结果的受众；4) 结果是否用于向公众发布对比论断。

本研究目的是对沥青路面建设期过程中的能耗与温室气体排放进行分析、计算与评价。具体的研究目标可分解为：

①建立沥青路面建设期过程中能耗和温室气体排放（以下简称排放）有关的原材料及机械设备清单数据集。

②同功能单位条件下，计算沥青路面在原材料生产阶段能耗与排放；

③沥青路面运输阶段能耗与排放分析，包括原材料生产完运输至工地及材料加工完运输至施工现场等过程；

④沥青路面施工阶段能耗与排放分析，包括沥青路面材料的加工、摊铺、碾压等过程；

⑤沥青路面典型结构能耗与排放对比分析，包括三种柔性基层沥青路面和三种半刚性基层沥青路面。

研究结果主要为与沥青路面建设和研究有关的单位、部门和个人提供一种基于 LCA 的环境分析方法，提供一种认识沥青路面建设期能耗和排放之间关系的途径，为城市道路和公路沥青路面建设的决策、设计和施工，提供与能耗和排放相关的分析数据及评价依据。同时，对现有的沥青路面建设技术进行与能耗和排放相关的分析、比较与评价。

### 2.2 沥青路面建设期 LCA 的研究内容

#### 2.2.1 理论基础及概述

根据国家标准《环境管理生命周期评价要求与指南（GB/T 24044-2008）》中的规定，LCA 的研究范围包括：1) 所研究的产品系统；2) 产品系统的功能；3) 功能单位；4) 系统边界；5) 分配程序；6) LCIA 的方法学与影响类型；7) 解释；8) 数据要求；9) 假设；10) 价值选择和可选要求；11) 局限性；12) 数据质量要求。本章将按照规范要求，对上述主要内容进行详细分析。

#### 2.2.2 沥青路面建设期产品系统及功能

本文研究的产品系统为沥青路面系统，沥青路面包含路基顶面以上所有的路面结构和材料，由垫层、底基层、基层、面层及层间处治材料组成。其功能主要是为路面上行驶的车辆提供稳定可靠、舒适安全的基础支撑。

根据生命周期评价法（LCA）的概念，产品的生命周期涵盖产品生产到消亡的整个过程，其中，产品生产过程是为生产和产品而进行的一系列准备、生产和制造活动，产品消亡过程则包括产品的废弃和处置等活动。本文只研究沥青路面建设阶段的能耗与排放，根据沥青路面建设期的阶段特点，将沥青路面建设期分为三个主要阶段：

1) 材料物化阶段

主要包括路面原材料的生产过程，所研究的原材料清单为：水泥的生产、道路沥青和 SBS 改性沥青的生产、石料的开采和加工、木质素纤维、矿粉、石灰、粉煤灰等材料的生产；机械设备清单为：卡车、无机结合料拌和及摊铺设备、沥青混合料拌合及摊铺设备。

2) 运输阶段

包括原材料生产完运输至工地及材料加工完运输至施工现场等过程。

3) 施工阶段

包括沥青路面材料的加工、摊铺、碾压等过程，以及沥青类材料的加热、拌和，以及混合料摊铺和碾压过程中机械设备的能耗和排放。

### 2.2.3 功能单位

沥青路面的功能是满足车辆行驶需求，是连续的带状构造物，其设计参数，如车道宽度、车道数、路面结构组合、材料层厚度组合与交通量、气候环境有关。定义功能单位的目的是为输入和输出数据的归一化（量化）提供基准。简而言之功能单位就是使比较的双方具有相同的功能，反映在沥青路面上是具有相同的交通和环境承载力。本文定义沥青路面建设期功能单位为单位质量 1t 的沥青路面材料。

### 2.2.4 系统边界

系统边界决定 LCA 中所包含的单元过程，限定环境评价的分析深度。大多数工业产品所涉及的生产部门十分庞杂，生产过程也是十分复杂甚至是保密的，过分追求分析的全面性和广泛性易导致分析深度过大，不仅数据难以获取，复杂的数据处理也大大降低结果的可靠性，因此合理选择系统边界是保证评价结果可靠的关键步骤。理论上需确定三类边界条件：系统与环境的边界；直接和间接生产活动过程之间的边界（如工厂的建造，运输工具的制造）；研究系统与其他系统之间的边界。

第一类边界由分析的目标及环境类型所决定，本研究的第一类边界为能耗与温室气体。第二类边界是决定分析深度在主要边界，为减小研究范围，本文不考虑机具设备的生产与折旧，主要考虑材料生产和运输过程中所消耗的能源和排放，



如在分析沥青生产能耗和排放时不考虑炼油厂设备的生产，但考虑生产单位质量沥青时炼油厂所需的能耗以及对应的排放。第三类边界主要用于多系统分析，边界划分过程中，不同系统间难免存在交叉，为避免同一基准流，或输入输出的能耗和排放的重复计算，应详细定义系统间的边界。例如同时分析沥青路面建设和电力系统，就需要确定两者的计算边界，否则电能的能耗与排放在两者中将重复计算。由于本研究仅分析沥青路面系统，与其他系统的交叉不会引起计算结果的重复计算，只是计算范围对计算结果大小的影响。

边界设定是 LCA 研究的关键，在同一研究中个，若边界设定混乱，将严重影响分析的可靠性，在不同研究中，不一致的研究边界将导致研究的不可比较性。

根据三类边界类型、评价目标以及研究条件，设定沥青路面生命周期评价的边界条件见表 2.1。

表 2.1 沥青路面建设期 LCA 的边界条件

分析内容	边界条件
机具设备	运输、运行能耗与排放，不包括生产和折旧
原材料	原料开采、运输、加工
工业废弃材料	原料运输、加工
循环利用材料	可再利用原料加工（如铣刨）、运输
能耗	不考虑原料能；化石能源生产能耗与排放为其使用的 10%

### 2.2.5 系统模型

根据表 2.1 中的边界条件和沥青路面建设期的三个阶段，建立沥青路面系统的生命周期分析模型如图 2.1 所示。

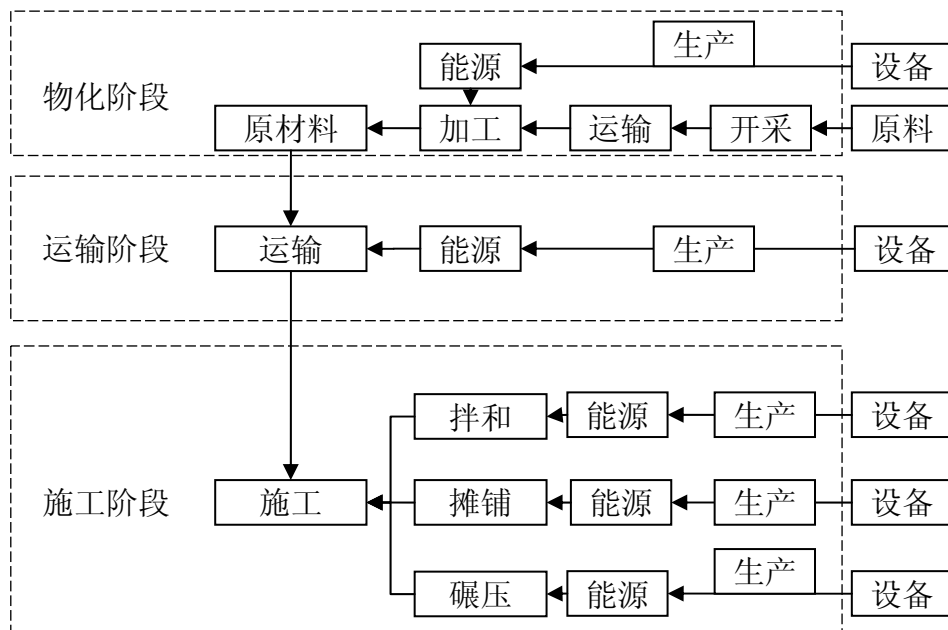


图 2.1 沥青路面建设期的系统分析模型

建立系统模型有利于展现组成系统的各过程之间的相互关系，明确各主要的分析对象，更重要的是可以保证所研究系统的完整性，不易造成遗漏，同时有助于为进一步研究提供支撑依据。系统模型以模拟基本流和产品流的输入输出，即在系统过程中消耗了什么物质，排放了什么物质。在设定的边界条件下，可知，沥青路面系统的主要输入是原材料和直接能源。而原材料仅考虑其加工所消耗的能源，不考虑其原料能，因此，沥青路面系统的主要输入是生产原材料的能源与其他直接能源。

### 2.2.6 基本假设

#### 1) 运输距离

运距是车辆运输中必须要考虑的因素，运距的长短直接关系到车辆油耗和排放，但是不同工程，不同地域，材料和运输条件的不同都将影响运距，因此运距的假设存在大量的不确定性，为考虑这些不确定性，需要对运距进行假设，使运距接近实际情况，并在较大范围内变化，在此假设最大运距为最小运距的 5~10 倍。

#### 2) 能耗计算

能耗计算中有四类能量：一次能、燃前能、原料能和内嵌能。一次能是指系统所需的化石类燃料的完全燃烧释放出的能量，包含燃料的燃前能；燃前能是用于化石类燃料或材料提炼、生产和运输的化石燃料能量，也被称为间接原始能（indirect primary）或上游能（upstream energy）；原料能是系统中的化石烃类材料（非燃料）完全燃烧释放出的能量，包括燃前能，这类材料在系统中并不以燃料形式利用，最典型的的就是沥青材料。内嵌能是一次能量和原料能量的总和。

如果在计算中考虑沥青的原料能也就意味着假设沥青在使用中是完全燃烧，这与实际情况不符，虽然沥青可以燃烧，但目前几乎没有沥青燃烧的应用案例，沥青的主要用途仍是作为建筑材料使用，但应考虑沥青生产加工过程的能耗与排放，因此，能耗分析中仅考虑沥青的燃前能而不考虑沥青的原料能。同样，本研究所有材料的原料能均不考虑。

### 2.2.7 LCIA 方法学和影响类型

本研究分析的环境类型为能耗与温室气体的排放量，其中能耗以 MJ 为单位计算。温室气体包括：CO<sub>2</sub>，NO<sub>2</sub>，CH<sub>4</sub>，CFCs 等。表 2.2 列出的部分污染物的环境影响特征化因子（全球变暖潜能值）来自于自然科学研究结果，目前已在世界范围内得到了广泛应用<sup>[48]</sup>。

表 2.2 污染物的环境影响特征化因子(kg/kg)

温室气体类型	20 年	100 年	500 年
甲烷 CH <sub>4</sub>	72	25	7.6
一氧化二氮 N <sub>2</sub> O	289	298	153

氟利昂 CFC-12	11000	10900	5200
碳氟化合物 HFC-134a	3830	1430	435
六氟化硫 SF <sub>6</sub>	16300	22800	32600
四氟甲烷 CF <sub>4</sub>	5210	7390	11200

研究采用温室气体 100 年特征化因子，进行温室气体的特征化（归一化）计算，将不同的温室气体换算为当量 CO<sub>2</sub> 排放量。

### 2.2.8 数据的种类和来源

一般，LCA 中所选择的清单数据取决于研究的目的和范围，主要来自系统边界内与各活动过程相关的生产场所，或通过其他渠道或计算得出。大部分清单数据都是通过测量、计算和估算得出的。本研究的基础数据主要取至 IPCC2006，中国统计年鉴或结合两者计算而得（如电力）；原材料的生产数据来自相应的生产规范，如沥青、水泥、石灰，以及生产商的能源消耗统计（如木质素纤维），机械设备能耗来自生产商提供的能耗参数或施工企业的生产数据，这些数据都结合基础数据换算为单位产能或产量条件下的能耗与排放。少数数据来自国内外参考文献，如 SBS 等。

## 2.3 本章小结

- 1) 提出了路面 LCA 的研究目的：对沥青路面建设期过程中的能耗与温室气体排放进行分析、计算与评价；
- 2) 明确了沥青路面建设期组成的三个阶段：原材料生产、原材料运输和施工建设；
- 3) 提出了沥青路面建设期分析的系统边界；
- 4) 提出了沥青路面建设期分析的系统模型。

## 第三章 沥青路面原材料和施工机械的能耗及排放清单分析

清单分析是对一种产品、工艺和活动在其生命周期内的能耗与原材料消耗，以及对环境的排放进行以资料为基础的客观量化过程，贯穿于产品的整个生命周期，是环境影响评价的基础。本章将清单分析的对象分为能源、沥青路面原材料以及施工机械三类，其中能源既包括沥青路面建设过程中直接用能，也包括原材料和机械设备的生产用能和运输耗能。

### 3.1 清单分析的内容和方法

#### 3.1.1 清单分析内容

清单分析的主要内容是根据设定的研究范围边界和产品生命周期中包含的各活动阶段或流程，将产品生命周期拆分为简单的物流或能流，通过数据收集，计算简单过程流的能耗和排放，得到计算单位功能产品所需的基本组成要素的能耗与排放清单。其中最为复杂的是数据收集、换算和计算，即便是简单的单元流，其对应数据都可能是无法直接获取，需要通过各种其他数据进行组合、分配并计算处理得到。以电力为例，电力生产主要分火电、水电和核电，其中火电的能耗与排放最大，而火力发电需要的燃料包括石油、煤和天然气等等，那么计算一个国家生产单位千瓦时电力所需要的数据包括：火电发电量占总发电量的比例，火电生产中各种燃料的消耗量或消耗比例，以及消耗单位燃料的能耗和排放等等。可以将电力生产拆分为更低一级的单元流，但整体计算过程涉及的数据量和数据类型依然不变。

故此，清单分析由两方面组成：一是生命周期过程流的划分和确定，即清单分析方法；二是数据的收集和处理，得到过程流中组成要素的环境数据。

#### 3.1.2 清单分析方法

清单分析的方法包括过程法、投入产出法和混合前两种方法的混合法。

##### 1) 过程法

过程法(P-LCA)的目标，是对生命周期系统范围内的每个非连续的离散过程中的消耗和排放进行量化。通过累计各个离散过程的数据计算整个生命周期的投入、排放以及对环境的影响。从功能角度而言，这一方法是由分至总地分析刻画产品对环境的影响。过程法最大的特点是“事无巨细”，研究中需要收集海量数据，分析过程详细而复杂，一旦数据确定，分析结果存在唯一性，但同时，收集的数据量越大则结果中存在的误差也越大。

##### 2) 投入-产出法

相对过程法，投入产出法（IO-LCA）是以各产业部门综合数据为基础的由总至分的方法。该法基于经济分析中的投入产出法，通过跟踪产业部门中不同部门间货物和服务的流向流量，确定产业部门在生产一个单位产品中的直接和间接经济投入。我国的投入产出表由 135 个产业组成，每 5 年发布一次。投入产出法的最大优点在于能够分析整个供应链而没有截断误差，然而又不可避免的产生了集合误差、分配误差和数据误差。这些误差都是将数据从单个或多个总项分配、整合到分项过程中形成的。一般，该方法可以作为过程法的补充。

### 3) 混合法

过程法和投入产出法都各具优缺点，并不矛盾，而且具有相对的优势，同时应用这两种方法将增加分析的可靠性<sup>[49]</sup>。混合法将这两者进行结合，达到扬长避短的效果。混合法的精确性取决于各项目的约束条件和数据有效性，一般的步骤是采用投入产出法填补过程法的空缺<sup>[50]</sup>。从经验角度而言，采用过程法分析对结果影响较大的直接过程，而采用投入产出法分析间接的需回溯的过程。这样就发挥了过程法具有特殊性而投入产出法具有广泛性的优点，削弱了这两种方法在单独使用时的截断误差和集合误差。

### 3.1.3 数据的收集和处理

数据的收集和处理是清单分析中最为关键的，也是最为复杂和费时费力的部分，一般而言，所需的分析数据分为两大类，企业类和社会类<sup>[51]</sup>。

企业数据主要是通过企业提供的的基本生产和工作参数来计算，由于技术保密的需要，大多时候是无法提供准确数据的，例如车辆的油耗曲线，而且不同企业的生产工艺和技术水平的差异，也使得数据具有较大波动性，不仅如此，随着使用环境的变化，数据也存在较大差异，例如，挖掘机的能耗就受操作人员熟练度、挖掘对象的困难度等因素的印象，其实际消耗与企业给定的消耗有一定差别。

产品的社会数据是指来自社会的原材料和商品能源所携带的清单数据，以及产品出厂后通过社会流通领域，进入消费、使用阶段直至废弃后处置这些阶段所包含的清单数据。产品生产的企业数据则是表征企业将购进的原材料加工制作成产品过程中涉及的消耗和排放状况。社会类数据涵盖面广，误差大，不同的产业之间由于统计口径不同，结果也不同。

同时这两类数据都具有时效性和地域性，这都是由整体的技术发展水平决定的。由于大部分能够收集到的数据并未以 LCA 所需的形式给出，因此还要进行进一步的计算处理。一般地，处理方法有 3 种：产值法、产量法和行业污染系数法。

企业数据

#### 1) 产值法

产值法即是利用材料所属行业的总产值和相应的总排污数据得到典型污染物的产值排污系数（污染物排放量/单位产值），再根据企业单位产品所消耗的原材料成本进行单位产品的原材料加工生产阶段的污染计算。这是一种简易而粗糙的计算办法，统计资料均从全国典型企业的典型工况下获得，能够体现社会生产的平均水平。

### 2) 产量法

产量法是利用行业产量统计值和污染统计值计算出产量污染系数（污染物排放量/单位产量）。相较于产值污染系数法,利用产值计算不受市场价格的差别和波动的影响,较容易实施.理论上,产值污染系数法和产量污染系数法应有较好的一致性,然而,在实际的运用中却可能由于统计口径的不同而带来较大的偏差。

### 3) 行业法

各行业部门的典型排放数据是根据该行业的技术特点和总的技术现状而提出的,可以代表全行业实际的污染排放水平;这些数据比较规范,避免了不同行业、产品间的模糊对比,具有较好的确定性。

在实践中,污染的排放量是较难统计的,一般便于统计的对象主要是能源的消耗量,可通过单位能源消耗所形成的排放计算总排放,这样就可以利用上述方法进行数据处理。

本章在第 2 章确定的目标、研究范围以及设定的边界和假设的基础上,以过程法为主要方法,对沥青路面建设期各阶段的组成要素进行能耗和碳排放数据的收集和处理,形成沥青路面建设期要素清单。

## 3.2 沥青路面要素的能耗及排放清单

### 3.2.1 能源

煤、汽油、柴油、燃料油、天然气、电力等能源材料能耗排放清单数据,主要包括两部分:一是能源材料在生产过程中的能耗排放;二是能源材料在消耗使用时所产生的能耗排放,参考《中国能源统计年鉴》<sup>[7]</sup>基础能源数据,并整理计算,结果如下:

①煤、汽油、柴油、燃料油、天然气、电力生产过程能耗排放清单数据见表 3.1。

表 3.1 能源材料生产过程能耗及温室气体排放清单数据

清单数据	原煤/kg	汽油/kg	柴油/kg	燃料油/kg	天然气/m <sup>3</sup>	电力/kWh
能耗/MJ	20.9	56.18	55.75	54.47	52.74	8.0
CO <sub>2</sub> /kg	6.19×10 <sup>-3</sup>	0.22	0.22	0.21	7.48×10 <sup>-2</sup>	1.065

CH <sub>4</sub> /kg	9.32×10 <sup>-3</sup>	2.17×10 <sup>-4</sup>	2.15×10 <sup>-4</sup>	2.11×10 <sup>-4</sup>	7.32×10 <sup>-6</sup>	1.62×10 <sup>-5</sup>
N <sub>2</sub> O/kg	4.29×10 <sup>-5</sup>	8.48×10 <sup>-4</sup>	8.40×10 <sup>-4</sup>	8.23×10 <sup>-4</sup>	1.87×10 <sup>-4</sup>	1.18×10 <sup>-5</sup>

②煤、汽油、柴油、燃料油、天然气、电力在消耗使用时所产生的能耗排放清单数据见表 3.2。

表 3.2 能源材料使用过程能耗及温室气体排放清单数据

清单数据	原煤/kg	汽油/kg	柴油/kg	燃料油/kg	天然气/m <sup>3</sup>	电力/kWh
能量/MJ	20.9	43.07	42.65	41.83	38.9	3.6
CO <sub>2</sub> /kg	1.96	3.07	3.19	3.13	2.69	0
CH <sub>4</sub> /kg	8.01×10 <sup>-5</sup>	1.32×10 <sup>-4</sup>	1.29×10 <sup>-4</sup>	1.21×10 <sup>-4</sup>	4.8×10 <sup>-5</sup>	0
N <sub>2</sub> O/kg	1.6×10 <sup>-5</sup>	2.66×10 <sup>-5</sup>	2.58×10 <sup>-5</sup>	2.42×10 <sup>-5</sup>	4.8×10 <sup>-6</sup>	0

注：电力是一种能源载体，由其他能源转化而来，属于清洁能源，使用过程中能耗排放不重复计算。

③把①②汇总后，得到每消耗 1 功能单位煤、汽油、柴油、燃料油（kg）、天然气（m<sup>3</sup>）、电力（kWh）所产生的能耗排放清单数据见表 3.3。

表 3.3 功能单位能源材料能耗及温室气体排放清单数据

清单数据	原煤/kg	汽油/kg	柴油/kg	燃料油/kg	天然气/m <sup>3</sup>	电力/kWh
能量/MJ	41.8	99.25	98.4	96.3	91.64	11.60
CO <sub>2</sub> /kg	1.97	3.29	3.41	3.34	2.76	1.065
CH <sub>4</sub> /kg	9.4×10 <sup>-3</sup>	3.49×10 <sup>-4</sup>	3.44×10 <sup>-4</sup>	3.32×10 <sup>-4</sup>	5.53×10 <sup>-5</sup>	1.62×10 <sup>-5</sup>
N <sub>2</sub> O/kg	5.89×10 <sup>-5</sup>	8.75×10 <sup>-4</sup>	8.66×10 <sup>-4</sup>	8.47×10 <sup>-4</sup>	1.92×10 <sup>-4</sup>	1.18×10 <sup>-5</sup>
CO <sub>2</sub> eq/kg	2.19	3.57	3.69	3.61	2.82	1.07

## 3.2.2 原材料

### 1.水泥

根据《通用硅酸盐水泥》（GB 175-2007）、《水泥单位产品能源消耗限额》（GB16780-2007），水泥生产过程中主要消耗煤和电力资源。硅酸盐水泥的生产分为三个阶段：石灰质原料、粘土质原料与少量校正原料经破碎后，按一定比例配合、磨细，并配合为成分合适、质量均匀的生料，称为生料的制备；生料在水泥窑内煅烧至部分熔融所得的以硅酸钙为主要成分的硅酸盐水泥熟料，称为熟料煅烧；熟料加适量石膏，有时还加适量混合材料或外加剂共同磨细为水泥，称为水泥粉磨。水泥生产系统边界见图 3.1，1t 水泥的能耗与排放值见表 3.4，表 3.5。

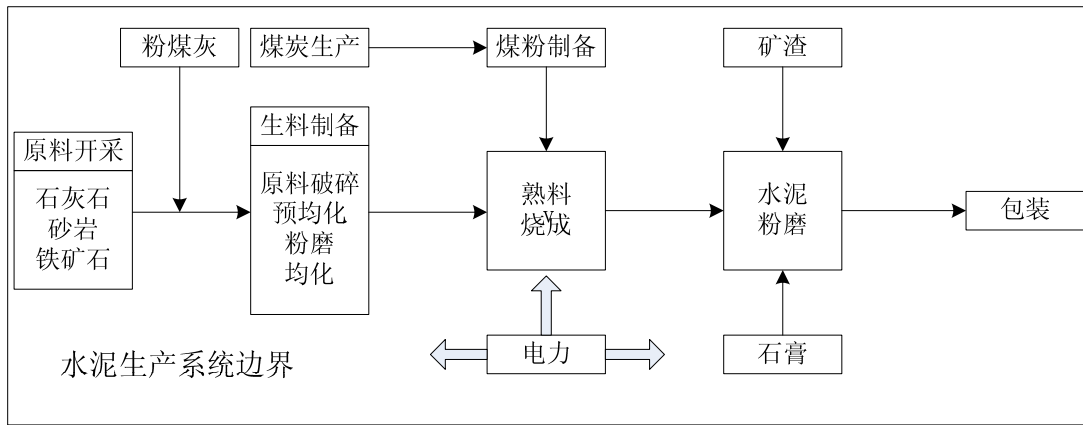


图 3.1 水泥生产系统边界

表 3.4 1t 水泥能耗<sup>[35]</sup>

	P.I.52.5		P.O.42.5		P.S.32.5	
	电耗/KJ	热耗/KJ	电耗/KJ	热耗/KJ	电耗/KJ	热耗/KJ
原材料开采	100118	—	87375	—	61957	—
生料制备	123737	—	107988	—	76573	—
煤粉制备	13673	—	11932	—	8461	—
熟料烧成	97691	3146042	85257	2745617	60455	1946889
熟料粉磨	137410	—	119920.5	—	85034.3	—
矿渣粉磨	—	—	20208.5	—	60393.3	—
石膏制备	2600.4	—	2554.8	—	2553.2	—
合计	475229.4	—	435236.8	—	355426.8	—
<b>1t 水泥能耗</b>	<b>3621271</b>		<b>3180854</b>		<b>2302316</b>	

表 3.5 1t 水泥温室气体排放<sup>[35]</sup>

排放物		CO <sub>2</sub> /g	CH <sub>4</sub> /g	N <sub>2</sub> O/g
工艺过程	P.I.52.5	835550	818	902
	P.O.42.5	729200	689	787
	P.S.32.5	517100	479	558
电力消耗产生排放	P.I.52.5	150648	624	688.6
	P.O.42.5	137970	563	630.6
	P.S.32.5	112670	458	515
煤消耗产生排放	P.I.52.5	2814	5.7	6.7
	P.O.42.5	2456	5.4	5.8
	P.S.32.5	1741	5.2	4.1

## 2.集料



沥青路面路用集料要求坚硬、洁净、棱角性好等特点，目前集料碎石的生产主要采用两段式或三段式，生产设备包括振动给料机、颚式破碎机、反击式破碎机、振动筛和输送皮带等。本文以三段闭路流程筛分工艺为代表性生产方法，分析集料的生产能耗与排放，不考虑石料开采和运输至加工厂的过程，不考虑粗细集料以及矿粉的生产差别。

三段闭路流程筛分工艺为：振动给料机给料→颚式破碎机破碎→皮带传输筛分→反击式破碎机破碎→皮带传输→筛分→再次反击式破碎机破碎→皮带传输→筛分。统计某品牌各型号颚式破碎机、反击式破碎机、皮带输送机 and 振动筛的平均工作量和电机功率，得到各种设备的生产能耗见表 3.6，其中石料的松方密度为  $1.6\text{t}/\text{m}^3$ 。根据电能清单计算集料生产清单，见表 3.7。

表 3.6 集料生产电耗（三段式）

设备类型	设备数（台）	单机平均生产能耗（kWh/m <sup>3</sup> ）	单机平均生产能耗（kWh/t）	1 松方集料生产能耗（kWh/m <sup>3</sup> ）	1t 集料生产能耗（kWh/t）
振动给料机	1	0.110	0.068	0.110	0.068
颚式破碎机	1	1.150	0.720	1.150	0.720
反击式破碎机	2	1.600	1	3.200	2
皮带输送机	3	0.030	0.019	0.090	0.060
筛分机	3	0.200	0.125	0.600	0.380
总计				5.150	3.218

表 3.7 集料生产能耗与排放

分析项目	单位	1 kWh 综合电能	1m <sup>3</sup> 集料	1 t 集料
电能	kWh	1.0	5.150	3.218
CO <sub>2</sub>	g	1065.5	5487.3	3428.8
CH <sub>4</sub>	g	0.0162	0.08343	0.05213
N <sub>2</sub> O	g	0.0118	0.06077	0.03797
总排放	g	1070.6	5513.6	3445.2
能耗	MJ	11.6	59.74	37.33

### 3. 沥青

原油提炼沥青的生产能耗参考《清洁生产标准-石油炼制业（沥青）》（HJ 443-2008），该标准适用于以石油为原料用连续氧化法（养护沥青装置）和溶剂法。其中清洁等级三级为我国沥青生产能耗的基本水平，取表 3.8 中清洁等级三级的平均值代表我国沥青制炼的平均水平，得沥青生产的平均能耗为 34kg 标油/t 原油，

按能耗将标油换算为标准煤，1kg 标油=1.43kg 标准煤，由标准煤的排放换算标油的排放。最后累计运输和生产能耗与排放得到道路石油沥青的清单见表 3.9。

表 3.8 沥青生产综合能耗 (kg 标油/t 原油)

清洁等级	一级	二级	三级
氧化沥青装置	≤20	≤25	≤30
溶剂脱沥青装置	24 (丁烷)	30 (丁烷)	36 (丁烷)
	28 (丙烷)	32 (丙烷)	38 (丙烷)

表 3.9 道路石油沥青的能耗与排放清单

项目	单位	道路石油沥青
道路石油沥青	t	1.0
CO <sub>2</sub>	g	439803.7
N <sub>2</sub> O	g	0.007
CH <sub>4</sub>	g	0.005
总排放	g	439805.9
总能耗	MJ	4649.2

#### 4.SBS 改性沥青

为改善沥青主要路用性能而在基质沥青中加入改性剂得到的沥青为改性沥青。目前常用的改性剂包括丁苯橡胶 (SBR)、合成橡胶 (SBS) 以及聚氯乙烯等。成品改性沥青的生产包含一系列的生产设备，包括沥青过滤、输送和计量系统，聚合物改性剂输送和计量系统，沥青和聚合物改性剂的溶混罐，胶体磨式研磨机等。由于现场改性的相融性不稳定，一般 SBS 改性沥青由生产商直接提供成品，现以中石化某公司 SBS 改性沥青的生产消耗为例，见表 3.10，计算生产单位质量成品 SBS 改性沥青的能耗，见表 3.11。

表 3.10 生产单位质量 SBS 改性沥青的消耗

产量 (Mg)	耗煤 (kg)	耗电 (kWh)	单位煤耗 (kg/t)	单位电耗(kWh/t)
198.644	49840	12532	25.09	63.09

表 3.11 生产 1t SBS 改性沥青的能耗与排放

项目	消耗量	CO <sub>2</sub> /g	N <sub>2</sub> O/g	CH <sub>4</sub> /g	CO <sub>2</sub> eq/g	能耗/MJ
沥青	945kg	415614.5	—	—	415614.5	4393.5
SBS <sup>[22]</sup>	55kg	—	—	—	60500	4715.15
煤耗	25.09kg	69472	1.1	0.7	69818.3	735.1
电耗	63.1kwh	67221.2	1.0	0.7	67543.7	731.8
合计					613478.6	10575.5

## 5.木质素纤维

木质素纤维作为稳定剂广泛添加于 SMA 沥青混合料中,用于提高混合料性能,吸附沥青,减少由沥青含量过高引起的析漏。根据对重庆部分木质素纤维生产企业的调查,1t 絮状木质素纤维的生产能耗与排放见表 3.12。

表 3.12 1t 絮状木质素纤维的能耗与排放

项目	单位	电能	木质素纤维
木质素纤维	t		1.0
电能	kWh	1.0	166.7
CO <sub>2</sub>	g	1065.5	177583.3
N <sub>2</sub> O	g	0.0162	2.7
CH <sub>4</sub>	g	0.0118	2.0
总排放	g	1070.6	178433.3
能耗	MJ	11.6	1933.3

## 6.石料

砂石—在工程中用量最大的材料,用于砌筑各种工程结构的石料和用于沥青混合料、水泥混凝土等的集料,在沥青混合料中,集料的体积占 92%~96%,因此集料的性质对路面结构的性能有较大影响。砂石材料主要包括岩石经自然风化而成的砾石(卵石)和砂、天然岩石或工业废渣经人工轧制成的碎石、人工砂等。砂石的生产一般包括岩石(砂)开采、运输、破碎和筛分等,其物化能耗包含所有过程的能量消耗的总值。本研究省略了爆破剂使用以及爆破剂的生产带来的环境负荷,也不考虑筛分过程产生的能耗和环境排放。在参考国内外各项资料基础上,石料的能耗与碳排放清单采用瑞典环境研究所提供的参考值,见表 3.13,表 3.14。

表 3.13 1t 碎石的能耗与排放

材料类型	能量 MJ/t	CO <sub>2</sub> 当量 kg/t	数据来源
碎石	30	2.5	Athena&IVL
	24	—	Häkkinen and Mäkelä, 1996
	22.2	—	Berthiaume and Bouchard, 1999
人工骨料	38.18	—	Stripple, 2001
	52	—	Häkkinen and Mäkelä, 1996

表 3.14 1m<sup>3</sup> 石料的能耗与排放<sup>[39]</sup>

项目	单位	能耗/MJ	CO <sub>2</sub> 当量/kg
碎石	m <sup>3</sup>	46.500	3.87
砂砾	m <sup>3</sup>	61.088	15.9
石屑	m <sup>3</sup>	55.361	14.4

### 7.矿粉

矿粉是沥青混合料的重要组成部分，在沥青混合料中起到填充作用，目的是减小沥青混凝土的空隙。矿粉和沥青共同形成沥青胶浆，提高了沥青混凝土的强度和稳定性。矿粉生产设备即粉磨机主要消耗电能，采用能耗法，将电能转化为化石燃料消耗量进行温室气体排放量计算。计算公式如下。

$$G_i = M_i \times EF_{ij}$$

式中：

$G_i$ —i 类温室气体排放量 (kg)；

$M_i$ —粉磨机电能消耗 i 类化石燃料燃烧量 (kg)；

$EF_{ij}$ —与 i 类化石燃料相对应的 j 类温室气体排放因子。

本文选用蔺瑞玉<sup>[53]</sup>研究案例中矿粉处理设备数据，设备参数见表 3.15：

表 3.15 LM 立式辊磨机设备参数

型号	处理能力	功率
LM 立式辊磨机	30t/h	200kw

根据温室气体计算模型及设备参数可得到 1t 矿粉生产能耗量和温室气体排放量，见表 3.16。

表 3.16 1t 矿粉的能耗与排放

材料类型	能耗 MJ/t	CO <sub>2</sub> 当量 kg/t
矿粉	77.849	7.355

### 8.粉煤灰

粉煤灰是火力发电厂碳粉燃烧形成的外观相似颗粒较细的不均匀多相物质。二灰稳定土是通过粉煤灰与石灰发生“火山灰”反应形成具有一定粘结力的胶凝材料。路用粉煤灰加工以粉煤灰磨细为主，当粉煤灰含水量过大（一般情况>6%）时，需加热烘干后磨细。路用粉煤灰生产流程分为，原料运输，磨细加工。调查国内某品牌粉煤灰加工设备，细度为 200 目的粉煤灰单位产量能耗为 16kWh/Mg，根据单位综合电力的能耗与排放计算，粉煤灰加工能耗与排放见表 3.17。

表 3.17 粉煤灰能耗与排放

项目	单位	1kWh 电能	能耗与排放
电能	kWh	1.0	16.0
热值	MJ	11.6	185.6
CO <sub>2</sub>	g	1065.5	17048
N <sub>2</sub> O	g	0.0162	0.2592
CH <sub>4</sub>	g	0.0118	0.1888
当量 CO <sub>2</sub>	g	1070.6	17129.6

## 9.生石灰

生石灰是重要的土建材料，一般采用机械化、半机械化立窑以及回转窑、沸腾炉等设备进行生产。燃料包括煤、焦炭、重油或液化气等。目前，我国并没有相关的国家标准规定石灰生产的能耗，天津市地方标准《生石灰单位产量综合能耗计算方法及限额》中要求生石灰生产能耗不大于 147kg 标准煤/吨，以此标准代表石灰生产的能耗水平，将标准煤换算为等量的炼焦煤，计算生产单位质量生石灰的能耗与排放清单，见表 3.18。

表 3.18 石灰生产清单

能源类型	单位	标准煤	生产排放	分解排放	生石灰
生石灰	t	—	—	—	1.0
标准煤	kg	1.0	147	—	—
CO <sub>2</sub>	g	2768.9	407028.3	784771.8	1191800.1
CH <sub>4</sub>	g	0.0439	6.453	—	6.453
N <sub>2</sub> O	g	0.0293	4.307	—	4.307
总排放	g	2782.7	409056.9	784771.8	1193828.7
能耗	MJ	29.3	4307.1	—	4307.1

## 3.2.3 机械设备

### 1.卡车

载重货车的能耗与排放采用文献<sup>[54]</sup>的数据，分析所用的车型为黄河 JN1181，载重 10t，总重 17.5t，平均运行速度 23km/h<sup>[55]</sup>，油耗 38.75L<sup>[56]</sup>，仅考虑车辆使用和燃油生产两个阶段。在来回一趟中，满载去空载回，空载能耗以满载的 70%计<sup>[22]</sup>，根据柴油的能耗与排放清单，计算得到载重货车运输 1t 货物每公里的能耗与排放清单见表 3.19。

表 3.19 载重货车的能耗与排放清单

输入输出项目	单位	1 升燃料	1t·km
卡车运输	t·km	—	1.0
柴油	L	1.0	0.033
CO <sub>2eq</sub>	kg	3.69	0.122
总能耗	MJ	98.4	3.247

### 2.无机结合料拌和设备

无机结合料厂拌设备是用来拌制石灰土、二灰土、水泥稳定碎石等各种稳定土混合料的专用设备，可以根据工程设计要求，集中拌制各种不同级配的稳定土混合料，属大型成套设备，其组成包括骨料配料机组、结合料配料系统、供水系统、拌和机、输送机和计量控制系统等。动力能源为电能，生产量以单位时间产料质量 (t/h) 或产料体积计 (m<sup>3</sup>/h)。无机结合料厂拌设备的清单分析仅考虑运

行过程中的电能消耗与排放，以单位产量的能耗和排放系数表示。根据设备设计参数及电能能耗与排放清单，计算不同型号无机结合料厂拌设备的电耗系数，见表 3.20，取各型号电耗系数均值，换算为能耗与排放清单，见表 3.21。

表 3.20 无机结合料厂拌设备的能耗和排放系数

型号	生产率 (Mg/h)	整机功率 (kW)	电耗系数 <sup>1</sup> (kWh/Mg)
WBC300	300	90	0.30
WBC400	400	120	0.30
WBC200B	200	70	0.35

表 3.21 无机结合料拌和设备的能耗与排放清单

清单项目	单位	综合电能	稳定土材料
工作量	t	—	1.0
综合电能	kWh	1.0	0.32
CO <sub>2</sub>	g	1065.5	337.4
N <sub>2</sub> O	g	1.62E-02	5.12E-03
CH <sub>4</sub>	g	1.18E-02	3.75E-03
总排放	g	1070.6	339.0
总能耗	MJ	11.6	3.7

### 3. 沥青混合料拌和设备

沥青混合料拌和设备主要用于生产具有一定配合比的成品沥青混合料，根据工艺流程不同，可分为强制间歇式和连续滚筒式两种，国内主要采用前者进行沥青混合料生产。强制间歇式拌和设备主要由冷矿料储存及配料装置、冷矿料输送机、冷矿料烘干加热系统、热矿料提升机，以及各类计量称重装置等组成。所需能源包括电能、燃油、天然气等，电能主要用于机械系统的运转，其他能源主要用于集料、沥青等原材料的加热烘干。电能消耗主要与机械运行效率和产量有关，相对于单位产量电能消耗较为固定。而燃油等其他能源的加热能耗则与加热温度、原材料含水量以及混合料产量等有关。对于普通沥青混合料，集料的加热温度在 140~160℃之间，沥青加热温度在 170~180℃之间，改性沥青混合料生产温度相对提高 10~20℃左右，而温拌沥青混合料则可相对降低 10~20℃，这些对加热装置的能耗有较大影响。根据上述特点，清单分析中将沥青混合料拌和设备的能耗分为耗电设备与加热设备两部分，耗电设备的能耗与排放系数根据设备总功率换算，其电耗系数见表 3.22。

表 3.22 沥青混合料拌和设备耗电设备的电耗系数

型号	设备总功率 (kW)	生产能力 (Mg/h)	电耗系数 (kWh/Mg)
LQC240	645	240	2.69
LQC160	456	160	2.85
LQC800	268	80	3.35
均值			2.96

根据电耗系数，计算沥青混合料拌和设备中耗电设备的能耗与排放清单，见表 3.23。

表 3.23 沥青混合料拌和设备耗电设备能耗与排放清单

项目	单位	综合电能	沥青混合料拌和设备（耗电）
工作量	t	—	1.0
综合电能	kWh	1	2.96
总排放	kg	1.07	3.17
总能耗	MJ	11.6	34.34

#### 4. 沥青混合料摊铺设备

沥青混合料摊铺机主要用于沥青混合料的摊铺，也可用于摊铺碾压水泥混凝土和稳定土材料。由柴油机及其动力传动系统、行走机构、熨平装置、调平系统和接收料斗等组成。主要的能源动力为柴油、加热装置采用的电能、柴油或丙烷气。沥青混合料摊铺机的运行参数包括：运行速度、摊铺宽度和摊铺厚度，某品牌摊铺机的工作参数和油耗见表 3.24。假设不同摊铺厚度条件下的摊铺机油耗相同，摊铺速度设为 240m/h，采用柴油加热，以摊铺单位面积的能耗和排放表征沥青混合料摊铺机的能耗和排放系数，见表 3.25。

表 3.24 沥青混合料摊铺机的工作参数与油耗

项目	单位	参数
型号	—	DT1600
摊铺宽度	m	11
摊铺速度	m/min	2.5~3.5
刮板供料能力	t/h	250~320
油耗	L/h	25
加热能耗	kg/t	5kg/次（天然气）

注：熨平板加热为每工作日1次，一个工作日为8h。

表 3.25 沥青混合料摊铺机的能耗与排放

燃料类型	单位	柴油	天然气	油耗		加热能耗		沥青混合料摊铺机	
				较大	较小	较大	较小	较大	较小
柴油	L	1.0	—	0.1	0.1	—	—	—	—
天然气	kg	—	1.0	—	—	0.0	0.0	—	—
净发热量	MJ	35.7	47.3	3.6	2.8	0.6	0.5	4.2	3.3
CO <sub>2</sub>	g	2644.6	2984.6	264.5	206.6	37.3	29.1	301.8	235.8
N <sub>2</sub> O	g	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00006	0.00005	0.00226	0.00176
CH <sub>4</sub>	g	0.1	0.0	0.0	0.0	0.00059	0.00046	0.01159	0.00906
生产排放 (CO <sub>2</sub> )	g	264.4	298.5	26.4	20.7	3.7	2.9	30.2	23.6
生产能耗	MJ	3.6	4.7	0.4	0.3	0.1	0.0	0.4	0.3

当量 CO2	g	2917.8	3283.1	291.8	228.0	41.0	32.1	332.8	260.0
总能耗	MJ	39.3	54.6	3.9	3.1	0.7	0.5	4.6	3.6

### 5. 自卸汽车

自卸汽车在道路工程施工中，主要用于运输砂石、土和混合料等筑路材料。以松装体积作为运输的计量单位，即松方，松方是材料在未压实前处于松散状态下的体积，单位记为  $m^3$ 。讨论自卸车的能耗与排放时，以自卸车运输单位体积材料通过单位距离的能耗及排放为计量标准，即每松方千米的能耗与排放。决定自卸车油耗的因素包括车辆性能、行驶条件、操作人员熟练度和习惯以及运输距离等。在此以两种型号自卸车的平均油耗为标准，假定三种不同的运输工况：优工况、一般工况、差工况，经现场调查载重 10t 的自卸车在三种工况条件下的柴油油耗分别为：1. 优工况 40L/100km、2. 一般工况 50L/100km、3. 差工况 60L/100km。并假设在来回一趟中，满载去空载回，空载的单位能耗以满载的 70%计<sup>[22]</sup>，由此可计算得到自卸车运输单位体积材料通过单位距离的能耗及排放见表 3.26。

表 3.26 自卸汽车运行清单

项目	单位	柴油清单	良好工况	一般工况	差工况
工作量	$m^3 \cdot km$	—	1.0	1.0	1.0
柴油	L	1	0.034	0.043	0.051
CO <sub>2eq</sub>	kg	3.69	0.125	0.159	0.188
总能耗	MJ	98.4	3.346	4.231	5.018

### 6. 无机结合料摊铺机

无机结合料摊铺机，由动力系统、传动系统、液压系统、电器系统等组成，可用于摊铺各类稳定土、稳定碎石等稳定类材料。清单分析中仅考虑摊铺机在施工应用中燃油及燃油生产的能耗及排放，不考虑生产摊铺机设备的能耗及排放。摊铺机的工作参数包括，摊铺厚度，摊铺宽度、摊铺速度和单位时间生产率等。在此以摊铺单位面积的能耗排放表征稳定土摊铺机的能耗及排放系数，并作出如下假设：1. 摊铺厚度在 0~200mm 间的能耗和排放系数是相同的；2. 摊铺机的摊铺速度为 240m/h；3. 燃油均为柴油，使用中完全燃烧充分氧化。选取 DT1600 型号无机结合料摊铺机，运行参数见表 3.27，计算无机结合料摊铺机运行能耗及排放见表 3.28。

表 3.27 无机结合料摊铺机的运行参数

项目	单位	参数
型号	—	DT1600
摊铺宽度	m	11.85
摊铺速度	m/min	2.5~3.0
供料能力	t/h	600~700



油耗	L/h	30
最大油耗系数	L/t	0.05
最小油耗系数	L/t	0.043

表 3.28 无机结合料摊铺机的能耗及排放

项目	单位	柴油清单	稳定材料摊铺机	
			最大	最小
工作量	t		1.0	1.0
柴油	L	1	—	—
CO <sub>2</sub>	g	2644.6	132.2	113.3
N <sub>2</sub> O	g	0.022	0.001	0.001
CH <sub>4</sub>	g	0.11	0.006	0.005
生产排放	g	264.438	13.2	11.3
生产能耗	MJ	3.6	0.18	0.15
总排放	g	2917.8	145.9	125.0
总能耗	MJ	39.3	2.0	1.7

### 3.3 本章小结

本章采用文献调研，数据分析等方法，对沥青路面清单数据进行分类收集、计算。根据设定的研究范围、边界条件和沥青路面生命周期中包含的各活动阶段或流程进行分析。

(1) 建立了煤、汽油、柴油、燃料油、天然气、电力等能源的能耗及当量 CO<sub>2</sub> 排放清单；

(2) 建立了水泥、集料、沥青、SBS 改性沥青、木质素纤维、石料、矿粉、粉煤灰、生石灰等沥青路面原材料的能耗及当量 CO<sub>2</sub> 排放清单；

(3) 建立了卡车、无机结合料拌和及摊铺设备、沥青混合料拌合及摊铺设备等施工运输机具的能耗及当量 CO<sub>2</sub> 排放清单，为沥青路面的生命周期分析奠定了数据基础。

## 第四章 沥青路面建设期能耗及排放量化分析

在清单分析的基础上，本章通过划定沥青路面材料物化、运输和机械施工三个阶段的分析范围和边界，分析路面工程材料的组成、物理参数及施工工艺，提出沥青路面建设期三个阶段的能耗与排放分析模型和计算方法，计算并分析沥青路面在建设期三个阶段的能耗与排放组成、差别及特征。

### 4.1 材料物化阶段能耗与排放计算

#### 4.1.1 计算范围和边界

沥青路面建设用原材料的准备程序可大致分为三个过程，原材料原料的开采和运输，原料加工成建设用原材料，原材料运输至工地，根据第三章设定的边界条件，原材料生产阶段的能耗与排放即为原料加工的能耗与排放，不考虑原料的开采和运输。原材料由产地运至工地的运输过程归入运输阶段，原材料生产阶段的能耗与排放实际是由原料的加工过程能耗与排放决定，原材料生产阶段的能耗与排放计算范围和边界如图 4.1 所示。



图 4.1 原材料生产阶段的边界与范围

#### 4.1.2 计算模型

原材料生产阶段的能耗与排放主要取决于单位原材料的能耗与排放清单和原材料的用量，本章中的计算模型主要在于确定并计算原材料的用量，在一般情况下，原材料用量可根据《公路工程预算定额》和工程量清单进行计算，计算模型如图 4.2 所示。

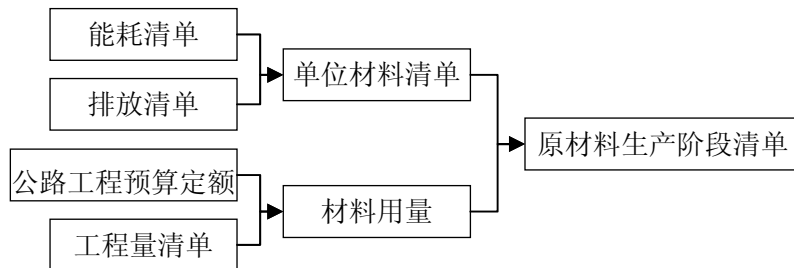


图 4.2 原材料生产阶段的能耗与排放计算模型

原材料的能耗与排放可分别根据式 (4.1) 和式 (4.2) 计算。

$$EC_{\text{原材料}} = \sum Q_{\text{原材料}} \cdot FC_{\text{原材料}} \quad (4.1)$$

$$m_{\text{原材料}} = \sum Q_{\text{原材料}} \cdot FE_{\text{原材料}} \quad (4.2)$$

式中：EC 为能耗 (Energy Consumption)，MJ；m 为 CO<sub>2</sub> 排放量 (mass of CO<sub>2</sub> emission)，t (吨)；Q 为原材料用量；FC 为单位原材料的能耗系数，MJ/单位用量；FE 为单位原材料的 CO<sub>2</sub> 排放系数，t/单位用量。

大多数原材料材料的计量单位为质量，以 t 计，均可根据路面和材料的设计参数计算得到。另一部分材料在采集生产过程中以其他方式进行计量，如集料土，一般以松方体积计算，为方便能耗和排放的计算，需利用膨胀系数或单位松方质量参数，将路面设计参数值转换为集料土生产的计量值。一般，土的膨胀系数取值为 1.6，即 1 松方土的质量为 1.6t。

## 4.2 材料运输阶段能耗与排放计算

### 4.2.1 计算范围与边界

材料运输阶段定义为：原材料生产完运输至工地及材料加工完运输至施工现场的过程，如图 5.3 所示。

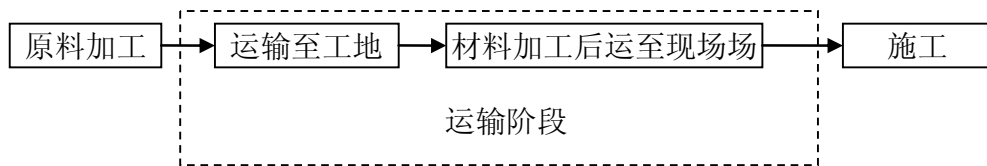


图 4.3 材料运输阶段的边界与范围

### 4.2.2 计算模型

材料运输阶段的能耗与排放，主要是确定运输机械或设备的工作量，再通过清单换算为运输的能耗与排放。根据《公路工程预算定额》和工程量清单可得运输阶段使用的机械种类及台班数，并结合《公路工程机械台班费用定额》以及 3.2 节所列出的各能源能耗排放清单，可得运输阶段能耗与排放清单。

用于运输的机械设备能耗与排放按式 4.4 和式 4.5 计算。

$$EC = FC \cdot Q_i \cdot D_i \quad (4.4)$$

$$m = FE \cdot Q_i \cdot D_i \quad (4.5)$$

式中：FC 为机械设备的能耗因子，MJ·t<sup>-1</sup>·km<sup>-1</sup>；FE 为机械设备的排放因子，g·t<sup>-1</sup>·km<sup>-1</sup>；Q 为机械设备工作量，D 为运距，km；其他符号意义同前。

## 4.3 施工阶段能耗与排放计算

### 4.3.1 计算范围和边界

由第三章所设定的研究范围可知，本文的研究对象主要包括由垫层至沥青表面层的所有结构和功能层，不包含与道路相关的其他辅助设施，如标志、标线、

护栏等。沥青路面施工阶段定义为：原材料拌合、混合料摊铺、碾压成型的整个过程，如图 4.4 所示。

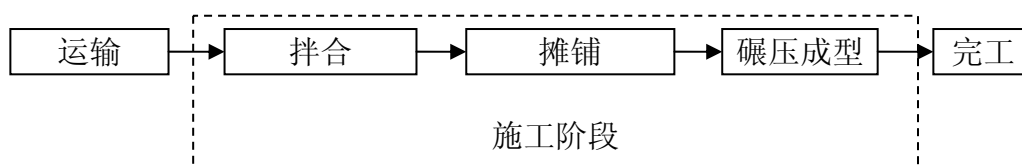


图 4.4 施工阶段的边界与范围

### 4.3.2 计算模型

施工阶段的能耗与排放，主要是确定施工机械或设备的工作量，再通过清单换算为施工的能耗与排放。机械设备的工作量通过《公路工程预算定额》及工程量清单计算，结合施工工艺要求基本可计算出各类施工机械设备的工作量。施工阶段的能耗与排放计算模型如图 4.5 所示。

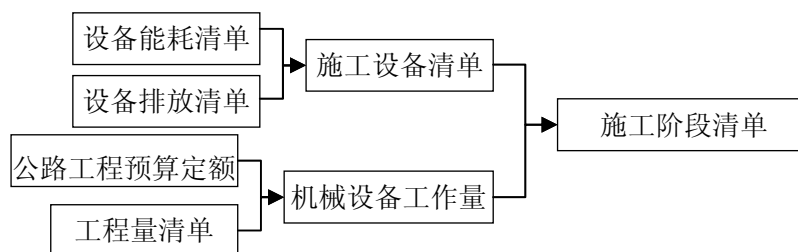


图 4.5 施工阶段能耗与排放计算模型

施工设备的能耗与排放根据式 (4.6) 和式 (4.7) 计算。

$$EC_{\text{机械设备}} = \sum Q_{\text{机械设备}} \cdot FC_{\text{机械设备}} \quad (4.6)$$

$$m_{\text{机械设备}} = \sum Q_{\text{机械设备}} \cdot FE_{\text{机械设备}} \quad (4.7)$$

式中：EC 为能耗 (Energy Consumption)，MJ；m 为 CO<sub>2</sub> 排放量 (mass of CO<sub>2</sub> emission)，t；Q 为机械设备工作量；FC 为单位工作量机械设备的能耗系数，MJ/单位工作量；FE 为单位工作量机械设备的 CO<sub>2</sub> 排放系数，t/单位工作量。

其中，对于沥青混合料加热设备，相比常温拌和的材料，热（温）拌沥青混合料生产过程中涉及到加热过程，将热（温）拌沥青混合料的生产分为机械过程和加热过程，机械过程按照式 (4.6) 和式 (4.7) 计算其能耗与排放，加热过程设备能耗采用理论计算。假定加热燃料为柴油，根据热传递和能量守恒定律，分别按式 (4.8) 和式 (4.9) 计算生产单位质量沥青混合料所需的能耗与排放，计算参数见表 4.1。

$$EC = FC \cdot \sum m_{\text{原材料}} c_{\text{原材料}} \Delta T_{\text{原材料}} \cdot (CV_{\text{油}} \cdot P \cdot K)^{-1} \quad (4.8)$$

$$m = FE \cdot \sum m_{\text{原材料}} c_{\text{原材料}} \Delta T_{\text{原材料}} \cdot (CV_{\text{油}} \cdot P \cdot K)^{-1} \quad (4.9)$$

式中：FC 为柴油的能耗因子， $\text{MJ}\cdot\text{L}^{-1}$ ；FE 为柴油的排放因子， $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ；CV 为每升柴油净发热值， $\text{MJ}\cdot\text{L}^{-1}$ ；P 为柴油燃烧热效率，%；K 为传热效率；m 为原材料质量，按材料占单位质量混合料的百分比例计算，kg；c 为原材料比热容， $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$ ； $\Delta T$  为材料由初始温度加热至拌和温度时的温度差， $^{\circ}\text{C}$ 。

计算假设集料内的水分在  $130^{\circ}\text{C}$  时完全蒸发<sup>[57]</sup>，且集料和沥青加热装置的传热效率相同。主要计算参数见表 4.1。

表 4.1 沥青混合料加热能耗理论计算参数

参数	单位	参数值
集料比热容 <sup>[58]</sup>	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	920.0
水比热容	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	4200.0
沥青比热容 <sup>[59]</sup>	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	1340.0
沥青含量	%	5.0
集料含水量	%	4.0
柴油热值	$\text{MJ}/\text{L}$	35.7
发热效率	%	90.0
传热效率	%	70.0
初始温度	$^{\circ}\text{C}$	25.0

## 4.4 能耗及排放清单分析

### 4.4.1 材料物化阶段能耗与排放结果

沥青路面建设过程较为复杂，为方便计算比较，本节所研究的几种基层材料均采用厂拌方式。根据 4.1 节确定的材料生产阶段计算模型，结合《公路工程预算定额》<sup>[60]</sup>和工程量清单，材料消耗清单结果如表 4.2 和表 4.3 所示，计算生产单位质量 1t 各种基层材料和面层材料的能耗与排放值，结果分别如表 4.4 和表 4.5 所示。

表 4.2 1t 基层材料材料消耗清单

材料类型	单位	石灰土	水泥稳定碎石	二灰土	二灰稳定碎石	级配碎石
水泥	t	—	0.045	—	—	—
碎石	$\text{m}^3$	—	0.591	—	0.542	1
生石灰	t	0.094	—	0.124	0.052	—
粉煤灰	t	—	—	0.361	0.156	—
水	t	—	0.056	—	0.091	—
土	$\text{m}^3$	0.762	—	0.445	—	—

表 4.3 1t 面层材料材料消耗清单

材料类型	单位	粗粒式沥	中粒式沥	细粒式沥	砂粒式沥	SBS 改性	特粗粒式	粗粒式
		青砣	青砣	青砣	青砣	SMA	ATB	ATB
石油沥青	t	0.045	0.048	0.052	0.060	—	0.034	0.036
改性沥青	t	—	—	—	—	0.061	—	—
矿粉	m <sup>3</sup>	0.041	0.050	0.055	0.069	0.105	0.020	0.023
石屑	m <sup>3</sup>	0.071	0.096	0.111	0.229	0.054	0.049	0.057
碎石	m <sup>3</sup>	0.435	0.363	0.308	0.000	0.472	0.534	0.515
砂	m <sup>3</sup>	0.125	0.165	0.200	0.380	0.051	0.068	0.075
木质素纤维	t	—	—	—	—	0.003	—	—

表 4.4 生产 1t 基层材料的能耗与排放

材料类型	能耗/MJ	排放 CO <sub>2eq</sub> (kg)
石灰土	403.304	111.597
水泥稳定碎石	131.704	46.558
二灰土	599.264	153.481
二灰稳定碎石	278.328	66.735
级配碎石	47.502	3.953

表 4.5 生产 1t 面层材料的能耗与排放

材料类型		能耗/MJ	排放 CO <sub>2eq</sub> (kg)
沥青混凝土 混合料	粗粒式	243.076	24.685
	中粒式	259.880	26.946
	细粒式	279.271	29.302
	砂粒式	318.166	36.043
	SMA(SBS 改性)	690.880	42.366
沥青碎石混 合料	特粗粒式	191.070	18.930
	粗粒式	202.736	20.188

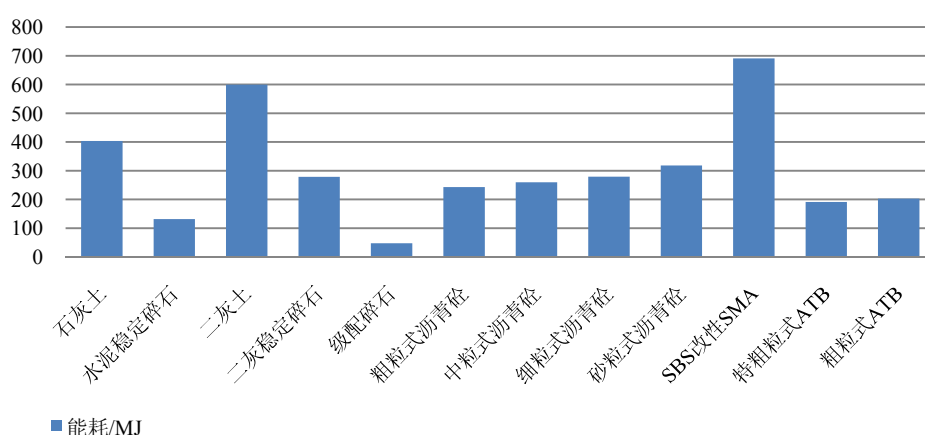


图 4.6 生产 1t 路面原材料的能耗对比图

### (1) 原材料物化阶段能耗分析

路面材料的生产能耗与排放，与其原材料的能耗与排放紧密相关，由图 4.6 可以看出，因此，沥青类路面工程材料整体的能耗要略高于基层材料，原因是沥青生产能耗高于生石灰和水泥。

对于沥青类路面工程材料，由于单位质量沥青混凝土材料中沥青用量要高于沥青碎石混合料，故前者的能耗要略高于后者；且当两者的级配越细时，能耗越大。其中，SBS 改性 SMA 的生产能耗则最高，为 690MJ/t，一方面由于 SBS 添加剂的生产能耗极大，1kg SBS 的能耗达到 85.7MJ，每 t SBS 改性沥青（SBS 掺量 5.5%）中 SBS 的生产能耗高于沥青生产能耗，这就使 SBS 改性沥青的生产能耗比普通沥青近一倍多，故其拌制的混合料能耗极大。

对于基层材料，二灰土的能耗在基层材料中最高，约为 600MJ/t，在所有材料中能耗仅次于 SBS 改性 SMA 路面，石灰土和二灰稳定碎石路面材料紧接其后，级配碎石的能耗在所有基层材料中最低，仅为 47MJ/t。

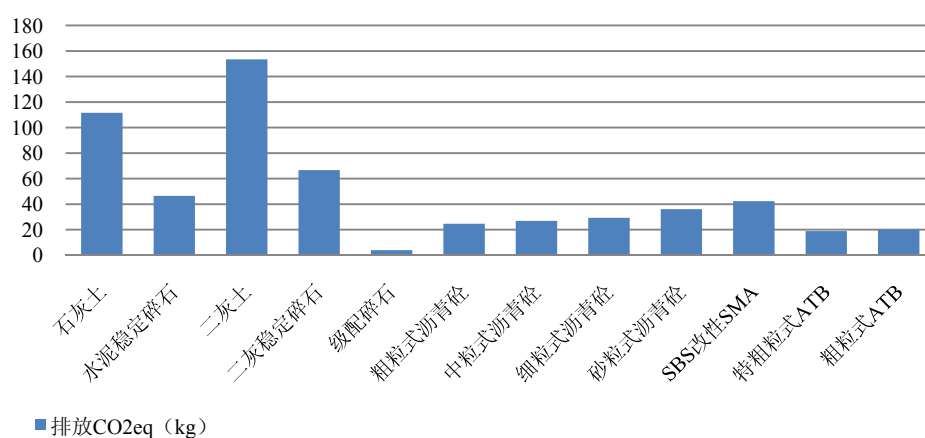


图 4.7 生产 1t 路面原材料的排放对比图

## 2) 原材料物化阶段碳排放分析

与能耗结果不同,由图 4.7 可见,基层材料生产阶段的碳排放要远大于沥青类材料,原因是:生石灰由于在热解过程中自身会排放大量的  $\text{CO}_2$ ,故在众多原材料中的  $\text{CO}_2$  排放量最高,而水泥原料中由于含有约 75% 的生石灰,导致水泥材料的排放量也很大,仅次于生石灰。所以,基层材料中生石灰掺量比例越高的路面工程材料其排放量也就越大。二灰土中生石灰的掺量最大,同时工业废渣(粉煤灰)的利用并不能带来  $\text{CO}_2$  排放的减少,故二灰土的排放量较大,约为 153kg。其后分别是石灰土、二灰稳定碎石和水泥稳定碎石。而级配碎石中的原材料主要是碎石,故其碳排放量最低,约 3.9kg  $\text{CO}_2/\text{t}$  左右。

沥青类工程材料的原材料生产排放明显低于基层材料,各类沥青类工程材料的  $\text{CO}_2$  排放差别不大,其中沥青混凝土类材料的碳排放量要稍大于沥青碎石材料。沥青类材料的  $\text{CO}_2$  排放量主要取决于沥青用量,由图 4.7 可知,沥青混合料级配越细,所产生的碳排放量越大,其中单位质量 SBS 改性 SMA 路面产生的碳排放最大,约为 42kg。

由碳排放分析结果可得,要减少原材料生产阶段碳排放,在基层材料的选择中应选择石灰和水泥掺量较小的材料,或尽可能减少石灰和水泥的用量,在沥青面层中应选择沥青用量较小的混合料或尽量减少沥青结合料的用量。

### 4.4.2 材料运输阶段能耗与排放结果

材料运输阶段定义为:原材料生产完运输至工地及材料加工完运输至施工现场的过程,为便于分析,计算铺筑单位质量(1t)筑路材料的运输能耗与排放。并对材料往返运距做如下假设:

#### 1. 原材料往返运距

原材料运距受周边环境、工程地点、经济水平以及地区工业化水平的影响较大,运距在相对较大的范围波动。对各原材料的往返运距假设见表 4.6 所示。

表 4.6 各原材料往返运距

材料	集料	粉煤灰	石灰、水泥	碎石	沥青、改性沥青	添加剂
运距(km)	10~100	10~100	50~300	20~200	30~200	100~500

#### 2. 工程材料往返运距

工程材料运距是将已经加工好的筑路材料(如稳定碎石、混凝土等)运至施工现场的距离,一般情况下,筑路材料的加工地点会设置于施工现场附近,当设计里程较长时,为减少运输成本应设置多个材料加工点,故此,大部分工程的工程材料往返运距均在 5~15km 之间。

根据假定的运输距离以及各运输机械的能耗和碳排放清单,计算单位质量 1t 路面工程材料的运输阶段能耗与排放值,结果如表 4.7~4.10 所示



表 4.7 单位质量 1t 基层材料运输阶段能耗值(MJ)

材料类型		原材料运输	工程材料运输
石灰土	较小值	47.462	12.357
	较大值	413.809	37.071
水泥稳定碎石	较小值	57.295	9.291
	较大值	543.770	27.872
二灰土	较小值	50.579	14.066
	较大值	425.524	42.197
二灰稳定碎石	较小值	59.360	10.325
	较大值	559.836	30.974
级配碎石	较小值	86.443	9.328
	较大值	864.434	27.983

表 4.8 单位质量 1t 面层材料运输阶段能耗值(MJ)

材料类型		原材料运输	工程材料运输		
沥青混凝土混合料	粗粒式	较小值	24.609	8.945	
		较大值	493.318	26.835	
	中粒式	较小值	31.359	8.972	
		较大值	464.839	26.915	
	细粒式	较小值	36.992	8.998	
		较大值	443.698	26.995	
	砂粒式	较小值	65.984	9.002	
		较大值	318.730	27.006	
	SMA(SBS 改性)	较小值	19.108	8.991	
		较大值	522.840	26.972	
	沥青碎石混合料	特粗粒式	较小值	14.630	9.266
			较大值	529.482	27.799
粗粒式		较小值	16.209	9.266	
		较大值	522.753	27.799	

表 4.9 单位质量 1t 基层材料运输阶段排放值 CO<sub>2eq</sub> (kg)

材料类型		原材料运输	工程材料运输
石灰土	较小值	1.783	0.464
	较大值	15.550	1.393
水泥稳定碎石	较小值	2.153	0.349
	较大值	20.434	1.047
二灰土	较小值	1.901	0.529
	较大值	15.990	1.586
二灰稳定碎石	较小值	2.231	0.388
	较大值	21.038	1.164
级配碎石	较小值	3.248	0.351
	较大值	32.485	1.052

表 4.10 单位质量 1 面层材料运输阶段排放值 CO<sub>2eq</sub> (kg)

材料类型		原材料运输	工程材料运输	
沥青混凝土混合料	粗粒式	较小值	0.925	0.336
		较大值	18.539	1.008
	中粒式	较小值	1.178	0.337
		较大值	17.468	1.011
	细粒式	较小值	1.390	0.338
		较大值	16.674	1.014
	砂粒式	较小值	2.480	0.338
		较大值	11.977	1.015
SMA(SBS 改性)	较小值	0.718	0.338	
	较大值	19.648	1.014	
沥青碎石混合料	特粗粒式	较小值	0.550	0.348
		较大值	19.898	1.045
	粗粒式	较小值	0.609	0.348
		较大值	19.645	1.045

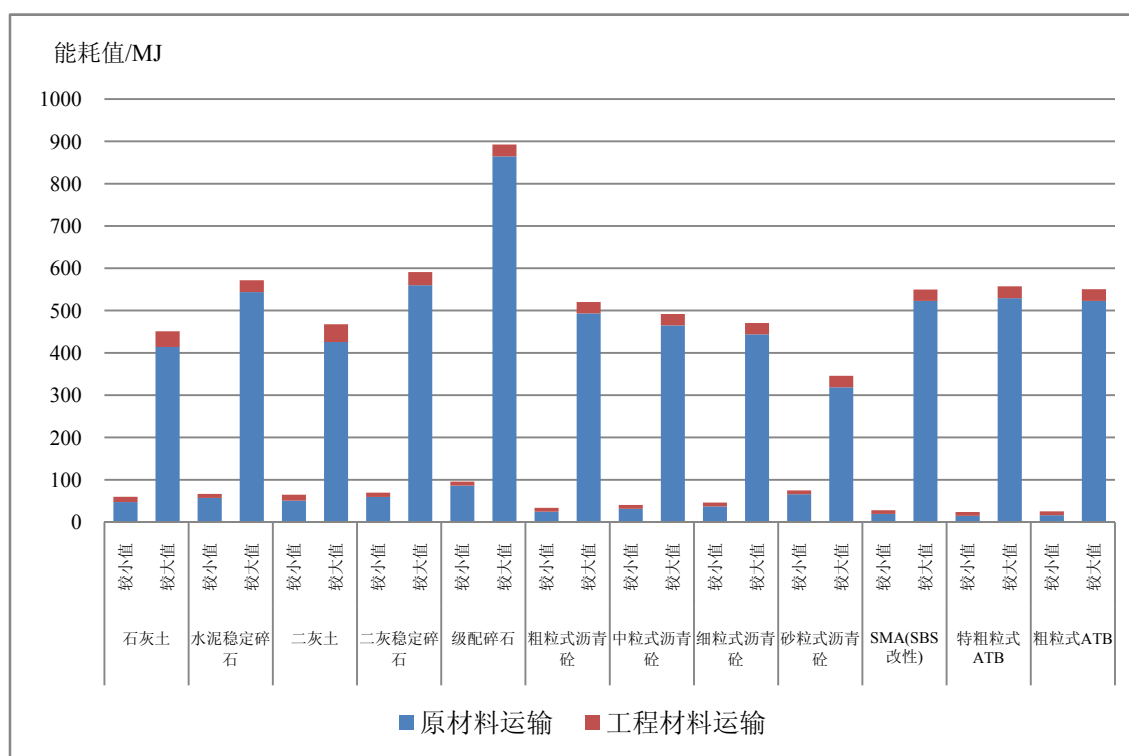


图 4.8 1t 路面工程材料运输阶段的能耗对比图

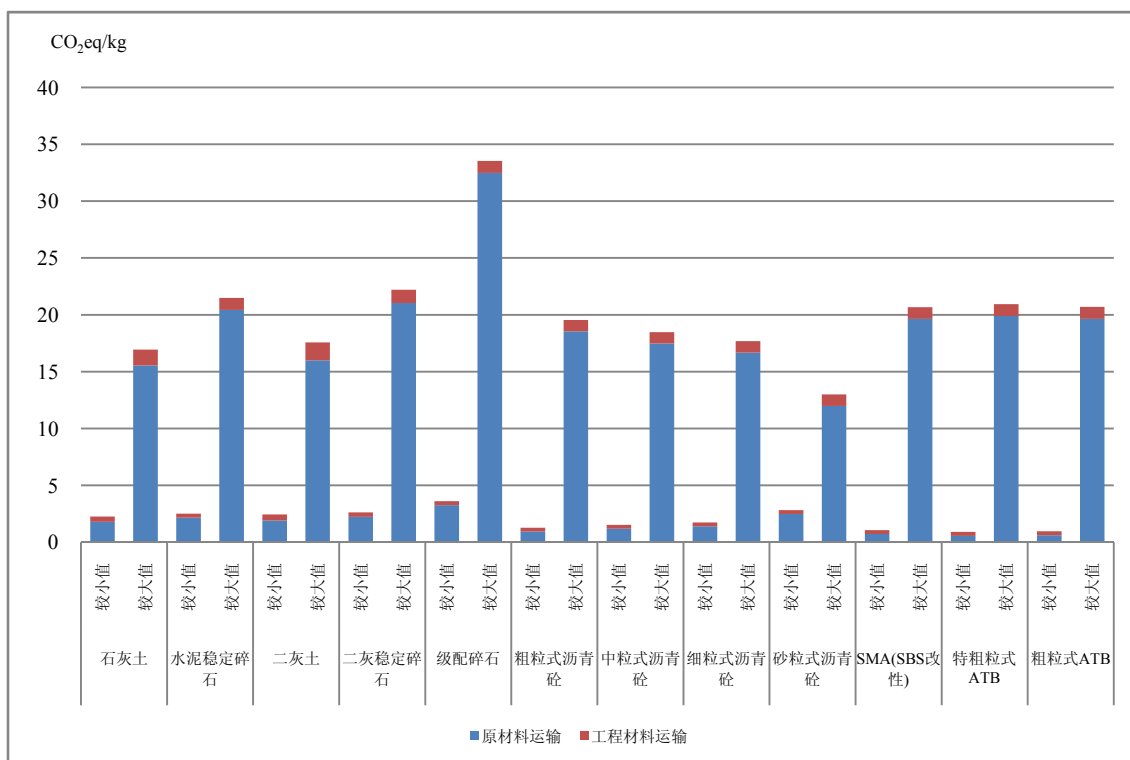


图 4.9 1t 路面工程材料运输阶段的碳排放对比图

由图 4.8 和 4.9 可以看出，原材料运输产生的能耗与排放是单位质量路面工程材料运输阶段能耗与排放的主要来源，且原材料运输所产生的能耗与碳排放随着运输距离的增大呈剧烈增长趋势，原因是本研究对于距离的假设中，最大距离为最小距离的 10 倍，使得运距变化对于计算结果产生了很大影响，故控制运输阶段沥青路面工程材料的能耗与排放应从减少原材料的运距为主。

当运输距离较小时，各种材料的能耗与排放总量较小，且差距较小；当运输距离较大时，各种材料产生的能耗与排放总量则较大，其中碎石材料用量较多的几种材料产生的能耗与排放偏大，其中级配碎石能耗与排放总量最大，其后分别为二灰稳定碎石、水泥稳定碎石以及沥青碎石材料。砂粒式沥青混凝土材料由于碎石用量较低，产生的能耗与排放量为所有材料中最低。

#### 4.4.3 施工阶段能耗与排放结果

沥青路面的施工包括工程材料的生产加工，摊铺及碾压，其中材料的生产加工涉及到沥青及混合料的加热环节，为方便计算，对于沥青材料的加热与拌合温度、拌合时间作如下假设：

##### (1) 加热与拌和温度

热拌沥青混凝土在生产准备过程中需要对原材料进行加热，加热一般采用重油，加热温度对重油的消耗和排放有重大影响。原材料的加热温度主要取决于结

合料类型,加热温度可通过粘温曲线确定,集料加热温度相比结合料高 10~30℃<sup>[61]</sup>。我国规范规定的沥青混合料原材料加热温度见表 4.11。

表 4.11 沥青混合料原材料加热温度 (°C)

结合料类型	石油沥青			改性沥青		
	50 号	70 号	90 号	SBS 类	SBR 类	EVA 类
沥青加热温度	160~170	155~165	150~160	≤175	-	≤175
集料加热温度	比沥青温度高 10~30			190~220	200~210	185~195

为便于计算和比较,给定各沥青混合料的集料和沥青加热温度见表 4.12。

表 4.12 各类沥青混合料原材料加热温度

混合料类型	普通 AC	SMA (SBS 改性)	沥青稳定 碎石	温拌普通 AC	温拌 SMA(SBS 改性)	温拌沥青 稳定碎石
集料温度	180	190	180	140	150	140
沥青温度	160	170	160	130	140	130

加热设备能耗采用理论计算,根据热传递和能量守恒定律,按式(4.1)计算生产单位质量沥青混合料所需的油耗。

## (2) 拌和时间

沥青混合料拌和时间对电机能耗有一定影响,单位质量混合料的拌和时间越长,电机能耗越大。一般而言,普通热拌沥青混合料的拌和时间在 35~45s 左右<sup>[62][63]</sup>,而采用温拌沥青混凝土的拌和时间相比需延长 15~25s 左右<sup>[64][65]</sup>。生产单位质量混凝土的拌机耗电量增加约 50%。以容量为 1000kg,有效容积 60%,电机功率 30kw 的搅拌器为例,拌和单位质量普通热拌沥青混合料的耗电量为 0.6kWh/t,生产温拌沥青混合料的耗电量约为 0.9kWh/t。

根据上述给定的参数和假设,根据《公路工程预算定额》和工程量清单得到单位质量基层材料和面层材料的机械消耗清单,见表 4.14,表 4.15。根据 4.3 节确定的施工阶段计算模型,并结合施工机械设备的能耗与当量 CO<sub>2</sub> 排放清单,计算单位质量 1t 路面工程材料施工阶段的能耗与当量 CO<sub>2</sub> 排放,结果如见表 4.14~表 4.17 所示。

表 4.14 1t 基层材料施工阶段能耗及当量 CO<sub>2</sub> 排放结果

材料类型		机械类型	台班数	柴油/kg	电/kwh	能耗/MJ	CO <sub>2eq</sub> /kg
石灰土	拌合	235kw 内稳定土拌和机	1.129E-03	0.167	—	16.415	0.616
	摊铺	120kw 以内自行式平地机	1.441E-03	0.118	—	11.644	0.437
	碾压	6-8t 光轮压路机	1.051E-03	0.020	—	2.000	0.075
		12-15t 光轮压路机	4.945E-03	0.200	—	19.689	0.738
	合计						49.748
水泥稳定碎石	拌合	300t/h 以内稳定土厂拌设备	7.027E-04	—	0.379	4.838	0.842
	摊铺	12.5m 以内稳定土摊铺机	5.270E-04	0.072	—	7.074	0.265
	碾压	6-8t 光轮压路机	4.099E-04	0.008	—	0.780	0.029
		12-15t 光轮压路机	3.718E-03	0.150	—	14.804	0.555
	合计						27.495
二灰土	拌合	235kw 内稳定土拌和机	1.285E-03	0.190	—	18.685	0.701
	摊铺	120kw 以内自行式平地机	2.261E-03	0.186	—	18.270	0.685
	碾压	6-8t 光轮压路机	1.817E-03	0.035	—	3.457	0.130
		12-15t 光轮压路机	5.629E-03	0.228	—	22.412	0.840
	合计						62.824
二灰稳定碎石	拌合	300t/h 以内稳定土厂拌设备	7.158E-04	—	0.386	4.928	0.857
	摊铺	12.5m 以内稳定土摊铺机	5.857E-04	0.080	—	7.861	0.295
	碾压	6-8t 光轮压路机	4.555E-04	0.009	—	0.866	0.032
		12-15t 光轮压路机	4.132E-03	0.167	—	16.451	0.617
	合计						30.107
级配碎石	拌合	300t/h 以内稳定土厂拌设备	7.027E-04	—	0.379	4.838	0.842
	摊铺	120kw 以内自行式平地机	2.375E-03	0.195	—	19.197	0.720
	碾压	6-8t 光轮压路机	5.452E-04	0.011	—	1.037	0.039
		12-15t 光轮压路机	4.245E-03	0.172	—	16.899	0.634
	合计						41.970

## 第四章 沥青路面工程材料能耗及排放清单分析

表 4.15 1t 沥青面层材料施工阶段机械消耗清单

机械设备	粗粒式沥青砼		中粒式沥青砼		细粒式沥青砼		砂粒式沥青砼		SMA (SBS 改性)		特粗粒式 ATB		粗粒式 ATB	
	台班	柴油/kg	台班	柴油/kg	台班	柴油/kg	台班	柴油/kg	台班	柴油/kg	台班	柴油/kg	台班	柴油/kg
12.5m 以内 沥青混合料 摊铺机	6.131E-04	8.363E-02	6.192E-04	8.446E-02	6.253E-04	8.529E-02	6.255E-04	8.533E-02	7.565E-04	1.032E-01	6.132E-04	8.365E-02	6.132E-04	8.365E-02
6-8t 光轮压 路机	1.209E-03	2.338E-02	1.217E-03	2.353E-02	1.234E-03	2.384E-02	1.230E-03	2.377E-02	1.861E-03	3.598E-02	1.209E-03	2.337E-02	1.209E-03	2.337E-02
12-15t 光轮 压路机	1.810E-03	7.322E-02	1.828E-03	7.395E-02	1.850E-03	7.486E-02	1.847E-03	7.472E-02	2.235E-03	9.045E-02	1.809E-03	7.319E-02	1.809E-03	7.319E-02
16-20t 轮胎 压路机	3.510E-04	1.484E-02	3.562E-04	1.507E-02	3.615E-04	1.529E-02	3.617E-04	1.530E-02	—	—	—	—	—	—
20-25t 轮胎 压路机	8.245E-04	4.147E-02	8.312E-04	4.180E-02	8.379E-04	4.214E-02	8.383E-04	4.216E-02	—	—	—	—	—	—
15t 以内振动 压路机	—	—	—	—	—	—	—	—	1.844E-03	1.493E-01	—	—	—	—
9-16t 轮胎压 路机	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.178E-03	3.972E-02	1.178E-03	3.972E-02

表 4.16 1t 热拌沥青材料施工阶段能耗及当量 CO<sub>2</sub> 排放结果

材料类型	材料类型	能耗/MJ	CO <sub>2eq</sub> /kg
粗粒式沥青砼	加热	232.218	8.708
	拌合	7.656	1.332
	摊铺	8.230	0.309
	碾压	15.046	0.564
	合计	263.149	10.913
中粒式沥青砼	加热	232.313	8.712
	拌合	7.656	1.332
	摊铺	8.311	0.312
	碾压	15.188	0.570
	合计	263.468	10.925
细粒式沥青砼	加热	232.426	8.716
	拌合	7.656	1.332
	摊铺	8.393	0.315
	碾压	15.364	0.576
	合计	263.839	10.939
砂粒式沥青砼	加热	232.637	8.724
	拌合	7.656	1.332
	摊铺	8.396	0.315
	碾压	15.345	0.575
	合计	264.035	10.946
SMA(SBS 改性)	加热	246.240	9.234
	拌合	7.656	1.332
	摊铺	10.154	0.381
	碾压	27.127	1.017
	合计	291.177	11.964
特粗粒式 ATB	加热	231.912	8.697
	拌合	7.656	1.332
	摊铺	8.231	0.309
	碾压	13.410	0.503
	合计	261.209	10.840
粗粒式 ATB	加热	231.981	8.699
	拌合	7.656	1.332
	摊铺	8.231	0.309
	碾压	13.410	0.503
	合计	261.278	10.843

表 4.17 1t 温拌沥青材料施工阶段能耗及当量 CO<sub>2</sub> 排放结果

材料类型	材料类型	能耗/MJ	CO <sub>2eq</sub> /kg
粗粒式沥青砼	加热	178.970	6.711
	拌合	11.484	1.998
	摊铺	8.230	0.309
	碾压	15.046	0.564
	合计	213.730	9.582
中粒式沥青砼	加热	179.050	6.714
	拌合	11.484	1.998
	摊铺	8.311	0.312
	碾压	15.188	0.570
	合计	214.033	9.594
细粒式沥青砼	加热	179.145	6.718
	拌合	11.484	1.998
	摊铺	8.393	0.315
	碾压	15.364	0.576
	合计	214.385	9.607
砂粒式沥青砼	加热	179.321	6.725
	拌合	11.484	1.998
	摊铺	8.396	0.315
	碾压	15.345	0.575
	合计	214.546	9.613
SMA(SBS 改性)	加热	192.924	7.235
	拌合	11.484	1.998
	摊铺	10.154	0.381
	碾压	27.127	1.017
	合计	241.689	10.631
特粗粒式 ATB	加热	178.714	6.702
	拌合	11.484	1.998
	摊铺	8.231	0.309
	碾压	13.410	0.503
	合计	211.840	9.511
粗粒式 ATB	加热	178.773	6.704
	拌合	11.484	1.998
	摊铺	8.231	0.309
	碾压	13.410	0.503
	合计	211.898	9.514



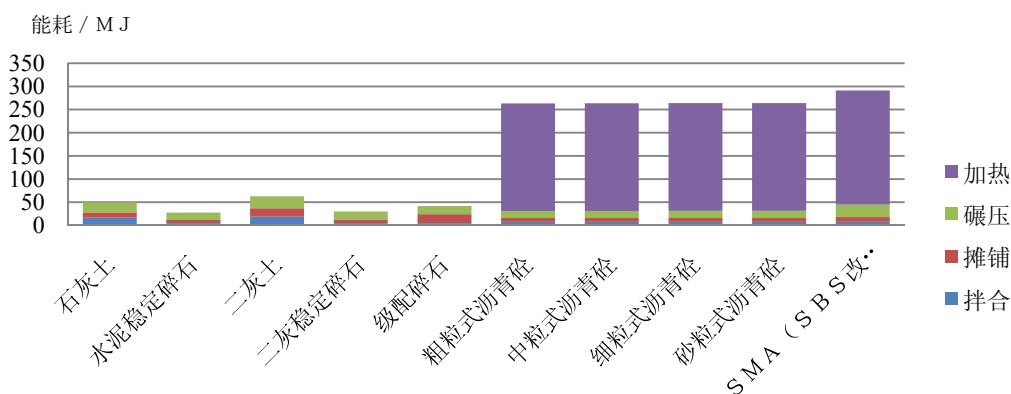


图 4.10 路面工程材料施工阶段能耗对比

(1) 施工阶段能耗分析

将基层材料与热拌沥青混合料施工的能耗计算结果汇总于图 4.10 中。由图 4.10 可见，基层材料的施工能耗明显小于沥青类材料，其中水泥碎石能耗最小，约为 27MJ，二灰土能耗最大，为 62MJ。而沥青类材料施工能耗的普遍在 265MJ/t 左右，其中 SBS 改性 SMA 材料能耗最大，为 291MJ/t。沥青类材料的施工能耗之所以整体较大，主要是由于相比基层材料施工，其增加了原材料的加热环节，而加热环节在施工阶段所占比重较大。

加热能耗是沥青混合料施工排放的主要组成，相比基层材料施工，沥青混合料原材料的加热过程是基层材料施工所没有的，两类材料的能耗区别主要是由于加热消耗的能耗引起的，两类材料施工能耗的差值基本等于加热能耗，如图 4.10 所示。石灰土和普通沥青混合料的能耗值，分别为约 28MJ 和 263MJ，而后者的加热能耗为 232MJ，近似为二者的差值，拌合、摊铺和碾压所产生的差值较小。加热能耗在沥青类材料施工总能耗中所占比重高达 90%左右。

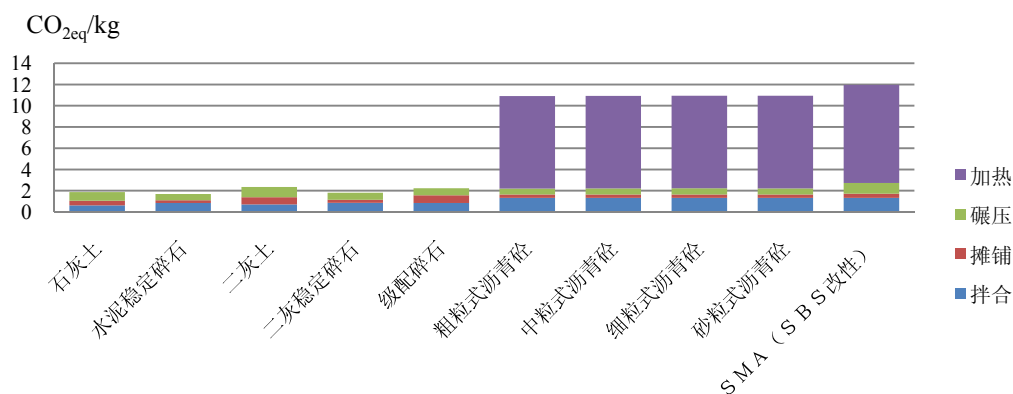


图 4.11 路面工程材料施工阶段碳排放对比

(2) 施工阶段 CO<sub>2</sub> 排放分析

将基层材料与热拌沥青混合料施工的  $\text{CO}_2$  排放计算结果汇总于图 4.11 中。由图 4.10 可见，与能耗结果相似，基层材料的施工排放明显小于沥青混合料，排放量分布于  $2\text{kg/t}$  左右。而沥青混合料施工排放的排放值普遍在  $11\text{kgCO}_2/\text{t}$  左右，其中 SBS 改性 SMA 材料排放量最大，为  $12\text{kgCO}_2/\text{t}$ 。沥青混合料的施工排放整体较大，原因同样是其增加了原材料的加热环节，材料加热引起的排放占到施工总排放高达 80% 以上。

加热排放是沥青混合料施工排放的主要组成，相比基层材料施工，沥青混合料原材料的加热过程是基层材料施工所没有的，两类材料的排放区别主要是由于加热排放引起的，两类材料施工排放的差值基本等于加热排放，如图 4.11 所示。以石灰土和普通沥青混合料的排放值为例，两者的施工排放分别为约  $1.866\text{kg}$  和  $10.913\text{kg}$ ，而后者的加热能耗为  $8.708\text{kg}$ ，占到二者差值的 96%，而拌合、摊铺和碾压所产生的差值较小。

### (3) 沥青类材料热拌与温拌能耗排放对比

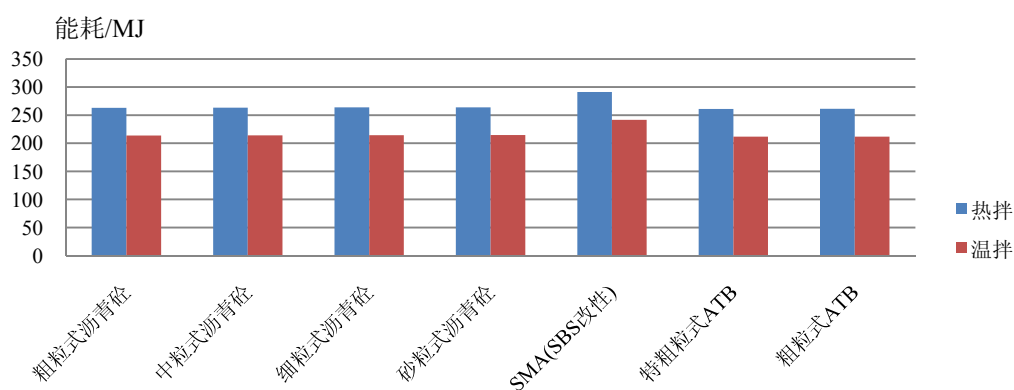


图 4.12 沥青类材料热拌与温拌能耗对比

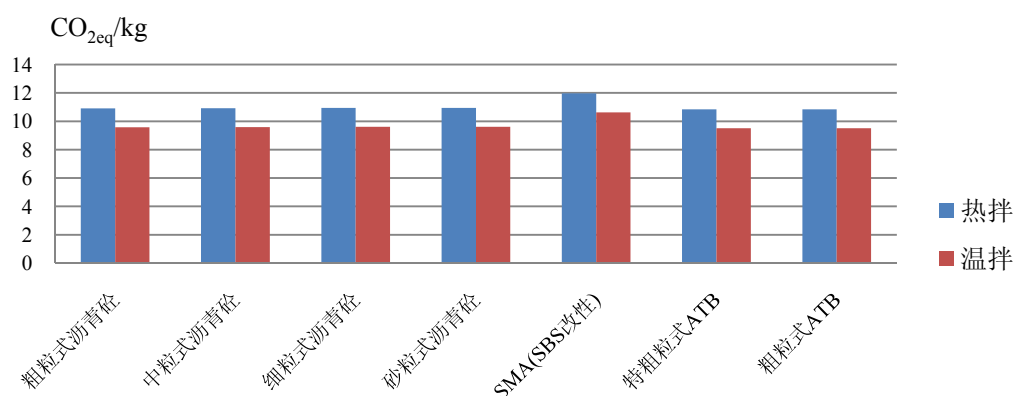


图 4.13 沥青类材料热拌与温拌碳排放对比

根据表 4.16、4.17，将沥青类材料施工阶段热拌与温拌的能耗与排放结果汇总于图 4.12，4.13。由图 4.12，4.13 可知：

由于温拌施工相比热拌施工，结合料和集料的加热温度都相应要低 20~30℃，节约了加热燃料的消耗，温拌的加热能耗相比热拌减少约 19%，温拌的加热排放相比热拌减少约 12%，各种节类材料温拌的节能率和减排率结果见表 4.18。

表 4.18 温拌工艺的节能减排效果

材料类型	粗粒式沥青砼	中粒式沥青砼	粗粒式沥青砼	砂粒式沥青砼	SBS 改性 SMA	特粗粒式 ATB	粗粒式 ATB
节能/MJ	49.42	49.44	49.45	49.49	49.49	49.37	49.38
节能率/%	18.78	18.76	18.74	18.74	17.00	18.90	18.90
减排量/kg	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33
减排率/%	12.20	12.18	12.18	12.18	11.14	12.26	12.26

#### 4.4.4 建设期能耗与排放结果对比

将沥青路面工程材料建设期物化阶段，运输阶段和施工阶段的能耗与排放结果汇总于图 4.14~图 4.17。

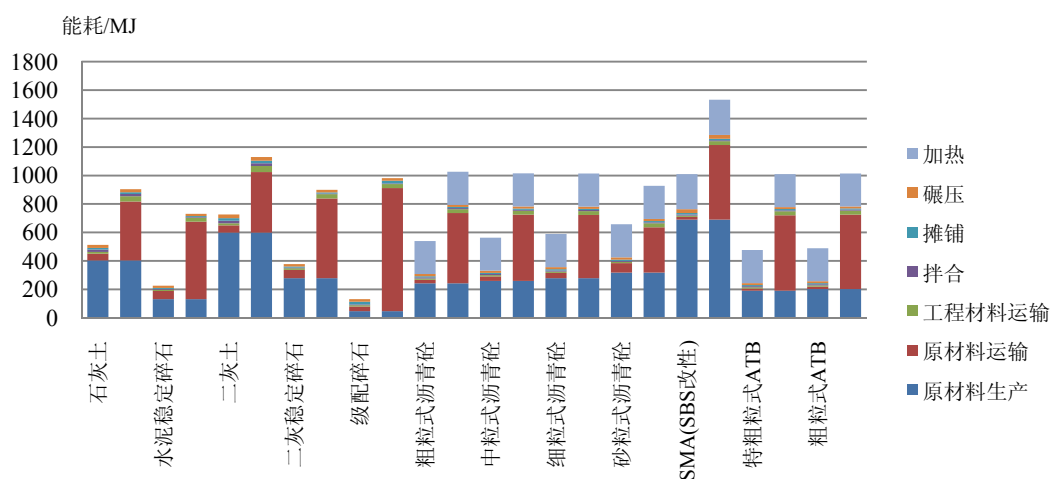


图 4.14 路面工程材料建设期三阶段能耗对比

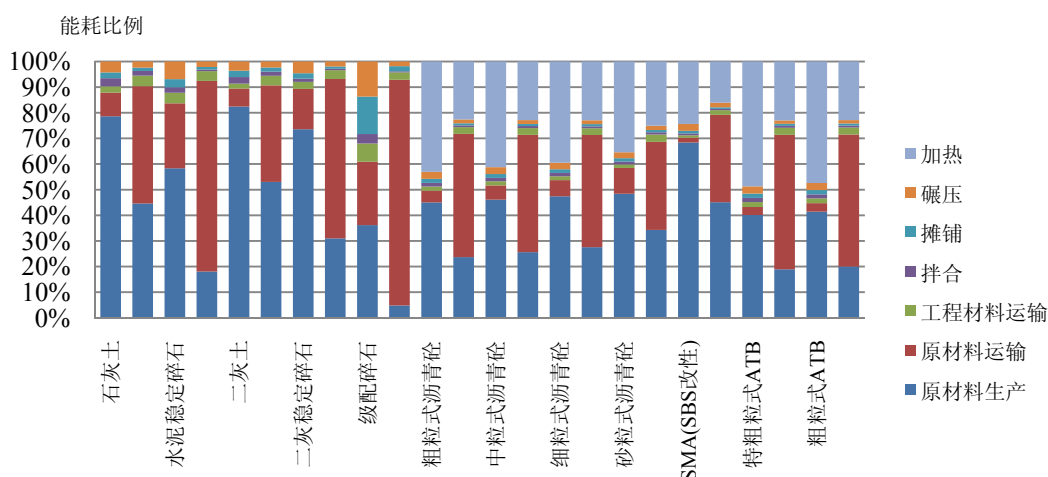


图 4.15 路面工程材料建设期三阶段能耗分布比例

### (1)能耗分析

从总体上看，沥青类材料建设期总能耗要大于基层材料，其中基层材料中除了二灰土与级配碎石外，能耗较小值均分布在 200~500MJ，能耗较大值均分布在 700~900MJ。沥青类材料中除了 SBS 改性 SMA 材料以外，能耗较小值均分布在 450~650MJ，能耗较大均分布在 900~1000MJ。

基层材料相对于沥青材料，能耗值范围相对宽泛，但就能耗组成来说，原材料生产阶段所产生的能耗所占总能耗比重较大，当运输距离较小时，原材料生产阶段所占比重均在 60%以上；当运输距离较大时，原材料运输阶段和原材料生产阶段是建设期主要能耗来源。二灰土材料在所有基层材料中能耗最大，其中较小值约为 680MJ，较大值近 1200MJ，甚至大于沥青类材料建设期能耗，原因在于原材料生产阶段生石灰材料所产生的能耗较大，且原材料阶段能耗所占比重高达 80%，见图 4.14。而级配碎石的能耗分布较为特殊，由于碎石的生产能耗和排放极小，故运输能耗在其中能够占到大部分，特别是长距离运输能耗可占到 80%以上。故此，高排放原材料（如生石灰、水泥）用量和原材料运输距离是影响基层材料总能耗的两个关键因素，在满足基层设计要求的同时减少高能耗材料的使用，同时控制缩短原材料的运输距离，是减少基层材料能耗的重要手段。此外，由于基层材料在组成上可选择的掺量比例变化较大，也就导致基层材料的能耗值存在较大范围的浮动。

对于沥青类材料，SBS 改性 SMA 材料产生的能耗最大，主要是其沥青用量较大，且改性沥青的能耗是所有材料中最大的，致使原材料生产阶段能耗接近其他沥青类材料的两倍。

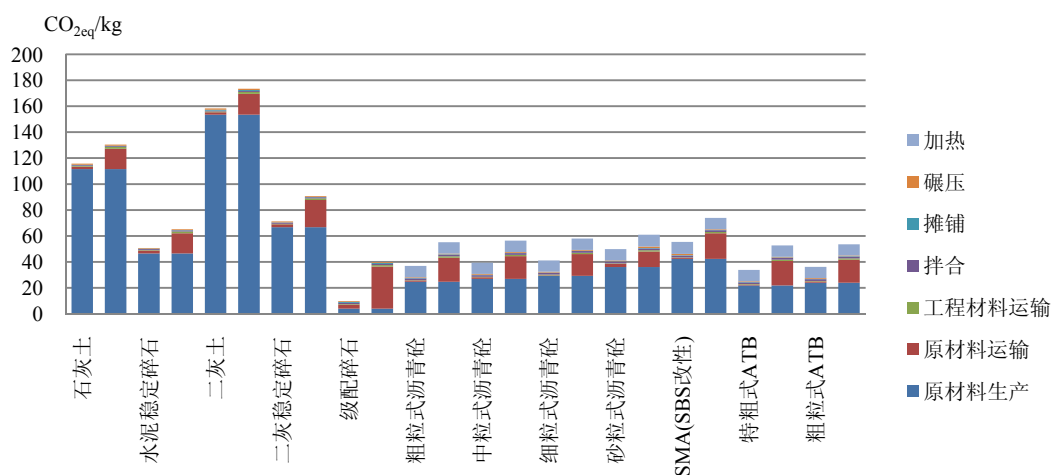


图 4.16 路面工程材料建设期三阶段碳排放对比

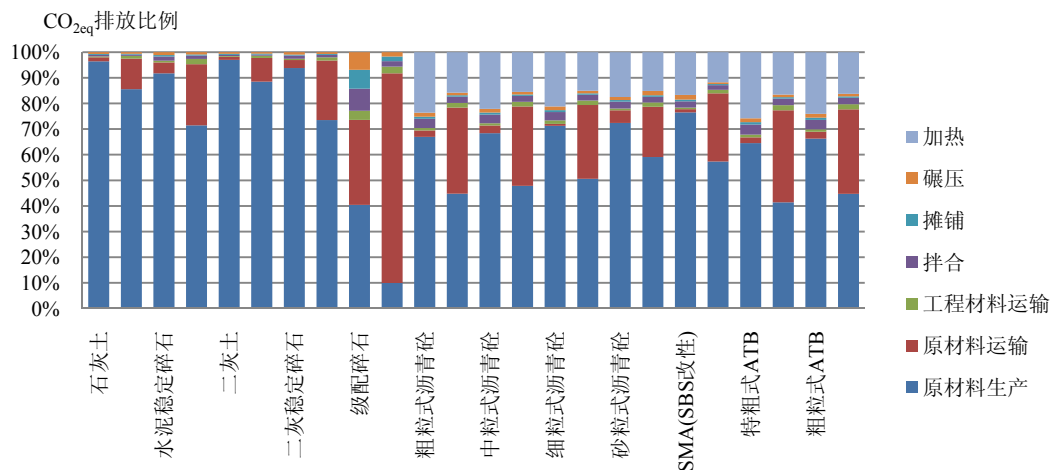


图 4.17 路面工程材料建设期三阶段碳排放分布比例

## (2) 排放分析

与能耗结果不同，除了级配碎石外，所有基层材料建设期碳排放量均大于沥青类材料。基层材料碳排放较小值分布在 50~160kg，较大值分布在 60~180kg；沥青类材料碳排放较小值分布在 40~60kg，较大值分布在 55~80kg。基层材料的排放量值范围相比沥青类材料，更加宽泛。但就排放量的组成而言，基层材料的排放主要以原材料生产阶段的排放为主，如图 4.17 所示，生产阶段的排放量（较小值）占建设期总排放量的 85%以上，部分材料该比例超过 95%，如二灰土达到近 97%。故此，高排放原材料（如生石灰、水泥）用量是影响基层材料总排放的关键，在满足基层设计要求的同时减少高排放材料的使用是减少基层材料排放的重要手段。

对于沥青类材料，短距离运输时，建设期总排放主要由原材料生产阶段和施工加热阶段组成，其中原材料生产阶段所占比重为 60%~75%；长距离运输时，建设期总排放主要由原材料生产阶段、原材料运输及施工加热阶段组成，其中三个阶段所占比重分别为 40%、30%和 20%左右。

级配碎石的排放分布较为特殊，由于碎石的生产排放极小，故运输排放在其中能够占到大部分，特别是长距离运输排放量可占到 80%左右。

## 4.5 本章小结

本章划定了沥青路面在原材料生产、材料运输及施工阶段的能耗与排放计算边界和范围，提出了对应的计算模型，根据常用路面材料设计参数，结合《公路工程预算定额》和工程量清单，分别计算主要沥青路面材料在建设期生产阶段、运输阶段及施工阶段的能耗与 CO<sub>2</sub> 排放。相应的研究内容和结论如下：

1) 原材料生产阶段的计算范围定义为原料加工阶段，不包含原料的开采运输；材料运输阶段计算范围定义为：原材料生产完运输至工地及材料加工完运输至施工现场的过程；沥青路面施工阶段计算范围定义为：原材料拌合、混合料摊铺、碾压成型的整个过程

2) 提出沥青路面原材料建设期三阶段的能耗与排放计算模型及计算方法；

3) 原材料能耗分析结果表明，由于沥青生产能耗大于生石灰和水泥材料，沥青类路面工程材料整体的能耗要略高于基层材料，沥青类材料中 SBS 改性 SMA 的能耗最高，为 690MJ/t，基层材料中二灰土能耗最大，为 600MJ/t；原材料生产阶段排放计算结果表明，由于生石灰和水泥材料的排放量大于沥青，基层材料生产阶段的碳排放要远大于沥青类材料，沥青混凝土类材料的碳排放量要稍大于沥青碎石材料。无机结合料类路面材料中二灰土排放量最大，约 153kg CO<sub>2</sub>/t，沥青类材料中 SBS 改性 SMA 排放量最大，约 42kg CO<sub>2</sub>/t；

4) 减少原材料生产阶段的能耗和碳排放，在基层材料的选择中应选择石灰和水泥掺量较小的材料，或尽可能减少石灰和水泥的用量，在沥青面层中应选择沥青用量较小的混合料或尽量减少沥青结合料的用量；

5) 运输阶段计算结果表明：原材料运输产生的能耗与排放是单位质量路面工程材料运输阶段能耗与排放的主要来源，且原材料运输所产生的能耗与碳排放随着运输距离的增大呈剧烈增长趋势，控制运输阶段沥青路面工程材料的能耗与排放应从减少原材料的运距为主。

7) 施工阶段能耗与排放分析结果表明，基层材料的施工能耗和排放明显小于沥青类材料，主要是由于相比基层材料施工，其增加了原材料的加热环节，而加

热环节在施工阶段所占比重较大，加热产生的能耗和排放所占比重分别高达 90% 和 80%。

9)温拌的施工能耗相比热拌减少约 19%，温拌的施工排放相比热拌减少约 12%。

## 第五章 沥青路面典型结构建设期能耗排放量化对比研究

### 5.1 沥青路面典型结构建设期能耗及排放模型

#### 5.1.1 沥青路面典型结构建设期能耗模型

沥青路面作为一个复杂的产品系统，和普通产品相比有较大的不同。在其每个寿命周期阶段中，能源使用非常复杂。沥青路面建设期各阶段的研究范围界定见表 5.1，本文只研究界定范围内的能源消耗。能源结构的复杂性会增加沥青路面建设期能源消耗系统的分析难度，但由于本研究的主要关注对象为各阶段能源消费的数量，而不是能源结构或是其他物理特征及其相应的潜在环境影响，因此，在具体研究中并不会引入能源结构，只取我国几种代表能源进行消费数量的统计，主要能源清单详见 3.2.3 节。

表 5.1. 沥青路面建设期各阶段研究范围界定

阶段	分析内容	边界条件
材料物化	道路材料	原材料开采、运输、生产加工
	工业废弃材料	材料运输、加工，不考虑开采过程
	循环利用材料	可再利用原料收集、加工、运输
	机械设备	运输、运行能耗与排放，不包括生产和折旧
运输	机械运输	道路材料运至施工现场、施工现场材料周转
建设施工	建设施工	机械设备施工活动包括材料加工、拌合、铺筑及中间环节，不考虑人员活动影响

沥青路面建设期的能耗计算模型，包括沥青路面系统在整个建设期各个阶段的能源消耗之和（见式 5-1），即筑路材料物化、运输、施工三个生命周期阶段以及与公路系统相关运输活动的能源消耗。

$$E = E_m + E_t + E_c \quad (5-1)$$

其中：

$E_m$ —沥青路面建设期材料物化阶段所消耗的能源总量

$E_t$ —沥青路面建设期运输阶段所消耗的能源总量

$E_c$ —沥青路面建设期施工阶段所消耗的能源总量

#### 5.1.2 沥青路面典型结构建设期碳排放模型

沥青路面建设期各阶段，能量消耗中燃料燃烧，材料的物化与运输，施工机械使用等都产生了严重的环境污染，它涉及到温室效应、大气污染、水污染、燃料开采中土地占有与破坏、废弃物燃烧等。但因目前寿命周期评价中环境影响评价部分发展尚不完善，而且争议较大，本研究的环境排放只研究温室气体，而忽略其他环境影响。温室气体（GHG），大气层中自然存在的和由于人类活动产生



的能够吸收和散发由地球表面、大气层和云层所产生的、波长在红外光谱内的辐射的气态成份。主要包括：二氧化碳（CO<sub>2</sub>）、甲烷（CH<sub>4</sub>）、氧化亚氮（N<sub>2</sub>O）、氢氟碳化物（HFC<sub>s</sub>）、全氟碳化物（PFC<sub>s</sub>）和六氟化硫（SF<sub>6</sub>）。

宏观认识上，交通运输系统碳排放的驱动力主要归结于各种交通出行方式，以及各类交通工具的能耗，常常忽略了道路本身作为社会产品存在而产生的碳排放。目前，我国高等级公路沥青路面结构形式主要为半刚性基层的沥青路面和柔性基层沥青路面，在沥青路面建设过程采用大量高耗能和高碳密度的原材料和产品，例如沥青，水泥，石料和各种添加剂等，并在材料生产、运输、道路施工的过程中消耗了众多的能源，且产生大量的排放。高速公路沥青路面建设期的碳排放，是指该产品系统在与周围环境交互作用的过程中，由于消耗各种资源和能量向外界环境所产生的温室气体排放量。沥青路面建设期各阶段的研究范围界定如表 5.1.1 所示，本文只研究界定范围内的温室气体排放。。

沥青路面建设期碳排放模型，即为各阶段产生的温室气体换算成二氧化碳当量后的总和，如式 5-2 所示。

$$G = G_m + G_t + G_c \quad (5-2)$$

其中：

$G_m$ —沥青路面建设期材料物化阶段各环节产生的 CO<sub>2</sub> 当量

$G_t$ —沥青路面建设期运输阶段产生的 CO<sub>2</sub> 当量

$G_c$ —沥青路面建设期施工阶段各环节产生的 CO<sub>2</sub> 当量

## 5.2 沥青路面典型结构建设期能耗及排放清单分析

因各地自然条件和实际使用要求的不同，沥青路面的具体结构类型和结构层厚度也有所差异，为便于研究，本文依托成渝高速公路复线（重庆境）工程，选取的高速公路基本路面概况如下：设计时速 120km/h、路基宽度 37.5m，双向 6 车道，行车道宽度 3.75m，设计使用年限为 15 年。成渝复线单幅沥青路面结构示意图见图 5.1 所示。并根据高速公路 15 年运营服务及累计当量轴次进行路面结构设计，并对不同的路面结构进行沥青路面建设期的环境负荷比较。

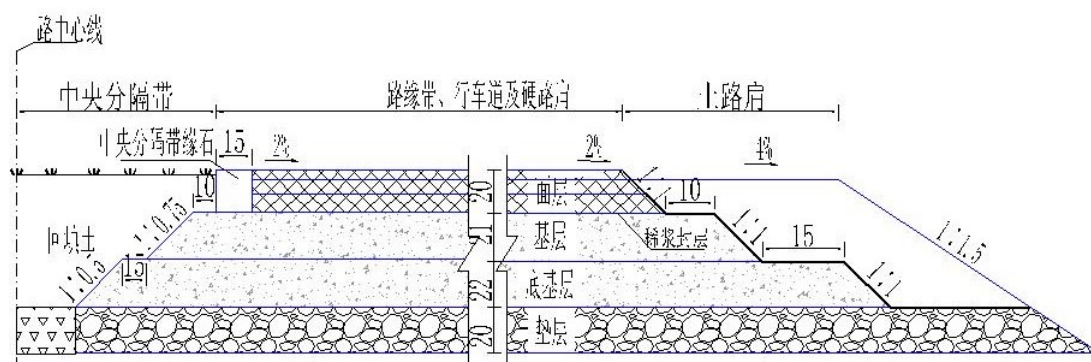


图 5.1 成渝复线单幅沥青路面结构示意图

### 5.2.1 路面结构设计

#### 1. 交通量

路面设计以路段交通量预测结果并适当考虑超载、重载情况，根据交通部行业标准《公路沥青路面设计规范》（JTG D50-2006）<sup>[66]</sup>进行。

(1) 路面竣工后第一年（2014年）日平均当量轴次：

沥青混凝土： $N=5745$  次/日（以设计弯沉值及沥青层层底拉应力为设计指标时）， $N'=53247$  次/日（以半刚性基层层底拉应力为设计指标时）；

(2) 设计年限内一个车道上累计当量轴次：

沥青混凝土： $N_e=1.702425E+07$  次（以设计弯沉值及沥青层层底拉应力为设计指标时），属于重交通等级。

#### 2. 设计弯沉值

$$l_d=600N_e^{-0.2}A_cA_sA_b \quad (1)$$

式中： $l_d$ ——设计弯沉值（0.01mm）；

$N_e$ ——设计年限内一个车道累计当量轴次（次/车道）；

$A_c$ ——公路等级系数，高速公路、一级公路为 1.0，二级公路为 1.1，三、四级公路为 1.2；

$A_s$ ——面层类型系数，沥青混凝土面层为 1.0，热拌和冷拌沥青碎石、沥青贯入式路面（含上拌下贯式路面）、沥青表面处治为 1.1；

$A_b$ ——路面结构类型系数，半刚性基层沥青路面为 1.0，柔性基层沥青路面为 1.6。

根据公路等级、设计年限内累计标准当量轴次、面层及基层类型，按式(1)计算确定设计弯沉值，结果如表 5.2 所示。

表 5.2 设计弯沉值

路面类型	设计弯沉 $l_d/0.01\text{mm}$
半刚性基层沥青路面	21.5
柔性基层沥青路面	34.4

## 3.初拟路面结构

表 5.3 初拟路面结构

路面结构	上面层	中面层	下面层	基层	底基层	垫层
半刚性基层 沥青路面	4cmSBS 改性 SMA-13	6cmAC-20	10cmATB-25	?cm 水泥稳定碎 石	22cm 水泥稳 定碎石	20cm 水泥稳 定碎石
	4cmSBS 改性 SMA-13	6cmAC-20	8cmATB-25	?cm 水泥稳定碎 石	22cm 水泥稳 定碎石	20cm 水泥稳 定碎石
	4cmSBS 改性 SMA-13	6cmAC-20	10cmATB-25	?cm 水泥稳定碎 石	22cm 水泥稳 定碎石	20cm 级配碎 石
柔性基层沥 青路面	4cmSBS 改性 SMA-13	—	6cmAC-20	?cm 沥青稳定碎 石 ATB-25	20cm 水泥稳 定碎石	30cm 级配碎 石
	5cmSBS 改性 SMA-13	—	7cmAC-20	?cm 沥青稳定碎 石 ATB-25	20cm 水泥稳 定碎石	30cm 级配碎 石
	4cmSBS 改性 SMA-13	—	6cmAC-20	?cm 沥青稳定碎 石 ATB-25	20cm 二灰稳 定碎石	30cm 级配碎 石

## 4.路面结构参数

依据《成渝高速公路复线（重庆境）初设总说明》，并参阅《公路沥青路面设计规范》（JTG D50-2006），得到沥青路面路基和结构层结构参数如表 5.4 所示。

表 5.4 路基和结构层参数

材料名称	抗压回弹模量（MPa）		15℃劈裂强度（MPa）
	20℃	15℃	
AC-13	1400	2000	1.4
SMA-13	1400	1800	1.6
AC-20	1200	1800	1
ATB-25	1200	1400	0.8
水泥稳定碎石	1500（弯沉）	3600（拉应力）	0.5
二灰稳定碎石	1500（弯沉）	3600（拉应力）	0.6
级配碎石	400		
路基回弹模量	45		

## 5.拟定路面结构

根据初拟路面结构，结合沥青路面路基和结构层结构参数，采用 HPDS 路面结构设计软件进行未知层厚度设计，并参照《公路沥青路面设计规范》（JTG D50-2006），拟定最终需要计算的六种路面结构，如表 5.5 所示。

表 5.5 拟定的路面结构

路面结构	结构编号	上面层	中面层	下面层	基层	底基层	垫层
半刚性基 层沥青路	结构一	4cmSBS 改 性 SMA-13	6cmAC-20	10cmATB- 25	21cm 水泥 稳定碎石	22cm 水泥 稳定碎石	20cm 水泥 稳定碎石

面	结构二	4cmSBS 改性 SMA-13	6cmAC-20	8cmATB-2 5	23cm 水泥 稳定碎石	22cm 水泥 稳定碎石	20cm 水泥 稳定碎石
	结构三	4cmSBS 改性 SMA-13	6cmAC-20	10cmATB- 25	21cm 水泥 稳定碎石	22cm 水泥 稳定碎石	20cm 级配 碎石
柔性基层 沥青路面	结构四	4cmSBS 改性 SMA-13	—	6cmAC-20	20cm 沥青 稳定碎石 ATB-25	20cm 水泥 稳定碎石	30cm 级配 碎石
	结构五	5cmSBS 改性 SMA-13	—	7cmAC-20	18cm 沥青 稳定碎石 ATB-25	20cm 水泥 稳定碎石	30cm 级配 碎石
	结构六	4cmSBS 改性 SMA-13	—	6cmAC-20	20cm 沥青 稳定碎石 ATB-25	20cm 二灰 稳定碎石	30cm 级配 碎石

### 5.2.2 功能单位

功能单位的确定是整个寿命周期评价的基石，它将产品系统的输入和输出进行标准化，建立起一个横向比较的度量单位。在清单分析中，所有的数据的收集获取都应与系统的功能单位相联系，尤其是具有统一功能的产品或系统。

本文研究主要是比较高速公路不同的路面结构，在路面建设期不同的阶段，能耗使用和温室气体排放方面的差异。为了能更好的反映不同路面结构的寿命周期能耗情况，也为了有利于研究比较，取 1km 双向六车道高速公路的半幅路面作为 1 个基本单元，输入的能量形式采用高速公路全寿命周期内 1 基本单元路面所消耗的能量，具体能耗表示 MJ/基本单元。输出的物质质量形式为高速公路全寿命周期内 1 基本单元路面所排放的温室气体量，具体排放表示为 t/基本单元。然而各路面结构规模不一，物化阶段材料、机械的使用量相差很大，直接导致能耗和碳排放量差别很大；而不同路面结构设计年限不同，而且在不同时期养护维修措施也各不相同，评价年限对评价结果影响很大，因此仅给出高速公路总的能耗值和碳排放量缺乏可比性，需要建立一个横向比较的平台。用单位使用年限（每年）1 个基本单元的高速公路路面的能耗和碳排放量作为评价指标可以有效消除由于高速公路规模、设计年限不同带来的影响，可使评价结果之间具有一致性和可比性。因此，本文高速公路路面建设期的寿命周期环境负荷分析的功能单位为 1 基本单元高速公路路面的年能耗值和年碳排放量。

### 5.2.3 材料物化阶段能耗及排放

材料物化阶段是考虑材料在生产和利用前的全部上游活动和过程产生的环境负荷的总和，以碳排放量和总能耗表征。根据工程量清单和《公路工程预算定额》涉及的材料消耗进行主要材料的确认，对于以上六种沥青路面来说主要的材料包

括：沥青、集料、填料、外加剂、水泥、碎石、水和周转材料等。

物化阶段的能耗分析统一以 1 功能单位的材料消耗量产生的直接和间接能耗值表示。3.2 节已列出主要材料单位体积（质量）的能耗和排放清单，根据工程量清单和《公路工程预算定额》<sup>[67]</sup>，计算得到 1 功能单位六种典型沥青路面各层的材料消耗清单数量，可得到物化阶段 1 功能单位六种沥青路面结构的主要材料能耗和排放清单如表 5.6~5.11 所示。

表 5.6 1 功能单位典型沥青路面结构材料消耗清单（结构 1）

结构层	材料名称	单位	数量	物化能耗/MJ	CO <sub>2eq</sub> /kg
4cm SMA-13 (SBS 改性)	改性沥青	t	64.944	686815.272	39843.144
	矿粉	t	111.033	8643.808017	816.647715
	石屑	m <sup>3</sup>	261.18	14459.18598	3760.992
	碎石	m <sup>3</sup>	56.952	2648.268	220.40424
	砂	m <sup>3</sup>	53.721	3281.708448	854.1639
	纤维	t	3.305	6389.5565	589.7220565
	合计			722237.8	46085.07
6cm AC-20	石油沥青	t	76.5885	356075.2542	33683.6223
	矿粉	t	79.461	6185.959389	584.435655
	石屑	m <sup>3</sup>	153.057	8473.388577	2204.0208
	碎石	m <sup>3</sup>	576.984	26829.756	2232.92808
	砂	m <sup>3</sup>	263.109	16072.80259	4183.4331
	合计			413637.2	42888.44
10cm ATB-25	石油沥青	t	119.089	553668.5788	52375.3422
	矿粉	t	108.117	8416.800333	795.200535
	石屑	m <sup>3</sup>	189.146	10471.31171	2723.7024
	碎石	m <sup>3</sup>	1156.77	53789.805	4476.6999
	砂	m <sup>3</sup>	333.743	20387.69238	5306.5137
	合计			646734.2	65677.46
21cm 5%水泥掺量的水泥稳定碎石	32.5 级水泥	t	263.891	607560.4716	259985.4132
	水	m <sup>3</sup>	303.75	765.45	0.090882
	碎石	m <sup>3</sup>	3470.175	161363.1375	13429.57725
	合计			769689.1	273415.1
22cm 5%水泥掺量的水泥稳定碎石	32.5 级水泥	t	276.458	636493.6767	272366.4216
	水	m <sup>3</sup>	315	793.8	0.094248
	碎石	m <sup>3</sup>	3635.438	169047.867	14069.14506
	合计			806335.3	286435.7
20cm 5%水泥掺量的水泥稳定碎石	32.5 级水泥	t	251.325	578629.5687	247605.39
	水	m <sup>3</sup>	292.5	737.1	0.087516
	碎石	m <sup>3</sup>	3304.913	153678.4545	12790.01331
	合计			733045.1	260395.5

表 5.7 1 功能单位典型沥青路面结构材料消耗清单 (结构 2)

结构层	材料名称	单位	数量	物化能耗/MJ	CO <sub>2eq</sub> /kg
4cm SMA-13 (SBS 改性)	改性沥青	t	64.944	686815.272	39843.144
	矿粉	t	111.033	8643.808017	816.647715
	石屑	m <sup>3</sup>	261.18	14459.18598	3760.992
	碎石	m <sup>3</sup>	56.952	2648.268	220.40424
	砂	m <sup>3</sup>	53.721	3281.708448	854.1639
	纤维	t	3.305	6389.5565	589.7220565
	合计			722237.8	46085.07
6cm AC-20	石油沥青	t	76.5885	356075.2542	33683.6223
	矿粉	t	79.461	6185.959389	584.435655
	石屑	m <sup>3</sup>	153.057	8473.388577	2204.0208
	碎石	m <sup>3</sup>	576.984	26829.756	2232.92808
	砂	m <sup>3</sup>	263.109	16072.80259	4183.4331
	合计			413637.2	42888.44
8cm ATB-25	石油沥青	t	95.2712	442934.863	41900.27376
	矿粉	t	86.4936	6733.440266	636.160428
	石屑	m <sup>3</sup>	151.3168	8377.049365	2178.96192
	碎石	m <sup>3</sup>	925.416	43031.844	3581.35992
	砂	m <sup>3</sup>	266.9944	16310.15391	4245.21096
	合计			517387.4	52541.97
23cm 5%水泥掺量的水泥稳定碎石	32.5 级水泥	t	289.024	665424.5796	284746.4448
	水	m <sup>3</sup>	326.25	822.15	0.097614
	碎石	m <sup>3</sup>	3800.7	176732.55	14708.709
	合计			842979.3	299455.3
22cm 5%水泥掺量的水泥稳定碎石	32.5 级水泥	t	276.458	636493.6767	272366.4216
	水	m <sup>3</sup>	315	793.8	0.094248
	碎石	m <sup>3</sup>	3635.438	169047.867	14069.14506
	合计			842979.3	299455.3
20cm 5%水泥掺量的水泥稳定碎石	32.5 级水泥	t	251.325	578629.5687	247605.39
	水	m <sup>3</sup>	292.5	737.1	0.087516
	碎石	m <sup>3</sup>	3304.913	153678.4545	12790.01331
	合计			733045.1	260395.5

表 5.8 1 功能单位典型沥青路面结构材料消耗清单 (结构 3)

结构层	材料名称	单位	数量	物化能耗/MJ	CO <sub>2eq</sub> /kg
4cm SMA-13 (SBS 改性)	改性沥青	t	64.944	686815.27	39843.144
	矿粉	t	111.033	8643.808	816.64772
	石屑	m <sup>3</sup>	261.18	14459.186	3760.992
	碎石	m <sup>3</sup>	56.952	2648.268	220.40424
	砂	m <sup>3</sup>	53.721	3281.7084	854.1639

	纤维	t	3.305	6389.5565	589.72206
	合计			722237.8	46085.07
6cm AC-20	石油沥青	t	76.5885	356075.25	33683.622
	矿粉	t	79.461	6185.9594	584.43566
	石屑	m <sup>3</sup>	153.057	8473.3886	2204.0208
	碎石	m <sup>3</sup>	576.984	26829.756	2232.9281
	砂	m <sup>3</sup>	263.109	16072.803	4183.4331
	合计			413637.2	42888.44
10cm ATB-25	石油沥青	t	119.089	553668.58	52375.342
	矿粉	t	108.117	8416.8003	795.20054
	石屑	m <sup>3</sup>	189.146	10471.312	2723.7024
	碎石	m <sup>3</sup>	1156.77	53789.805	4476.6999
	砂	m <sup>3</sup>	333.743	20387.692	5306.5137
	合计			646734.2	65677.46
21cm 5%水泥掺量的水泥稳定碎石	32.5 级水泥	t	263.891	607560.47	259985.41
	水	m <sup>3</sup>	303.75	765.45	0.090882
	碎石	m <sup>3</sup>	3470.175	161363.14	13429.577
	合计			769689.1	273415.1
22cm 5%水泥掺量的水泥稳定碎石	32.5 级水泥	t	276.458	636493.68	272366.42
	水	m <sup>3</sup>	315	793.8	0.094248
	碎石	m <sup>3</sup>	3635.438	169047.87	14069.145
	合计			806335.3	286435.7
20cm 级配碎石	碎石	m <sup>3</sup>	2799.675	130184.89	10834.742

表 5.9 1 功能单位典型沥青路面结构材料消耗清单 (结构 4)

结构层	材料名称	单位	数量	物化能耗/MJ	CO <sub>2eq</sub> /kg
4cm SMA-13 (SBS 改性)	改性沥青	t	64.944	686815.272	39843.144
	矿粉	t	111.033	8643.808017	816.647715
	石屑	m <sup>3</sup>	261.18	14459.18598	3760.992
	碎石	m <sup>3</sup>	56.952	2648.268	220.40424
	砂	m <sup>3</sup>	53.721	3281.708448	854.1639
	纤维	t	3.305	6389.5565	589.7220565
	合计			722237.8	46085.07
6cm AC-20	石油沥青	t	76.5885	356075.2542	33683.6223
	矿粉	t	79.461	6185.959389	584.435655
	石屑	m <sup>3</sup>	153.057	8473.388577	2204.0208
	碎石	m <sup>3</sup>	576.984	26829.756	2232.92808
	砂	m <sup>3</sup>	263.109	16072.80259	4183.4331
	合计			413637.2	42888.44
20cm 沥青稳定	石油沥青	t	187.027	869525.9284	82254.4746
	矿粉	t	116.696	9084.666904	858.29908

碎石 ATB-25	石屑	m <sup>3</sup>	294.03	16277.79483	4234.032
	碎石	m <sup>3</sup>	2646.36	123055.74	10241.4132
	砂	m <sup>3</sup>	384.593	23494.01718	6115.0287
	合计			1041438	103703.2
20cm 5%水泥掺量的水泥稳定碎石	32.5 级水泥	t	251.325	578629.5687	247605.39
	水	m <sup>3</sup>	292.5	737.1	0.087516
	碎石	m <sup>3</sup>	3304.913	153678.4545	12790.01331
	合计			733045.1	260395.5
30cm 级配碎石	碎石	m <sup>3</sup>	4199.513	195277.3545	16252.11531

表 5.10 1 功能单位典型沥青路面结构材料消耗清单 (结构 5)

结构层	材料名称	单位	数量	物化能耗/MJ	CO <sub>2eq</sub> /kg
5cm SMA-13 (SBS 改性)	改性沥青	t	81.18	858519.09	49803.93
	矿粉	t	138.7913	10804.764	1020.81
	石屑	m <sup>3</sup>	326.475	18073.982	4701.24
	碎石	m <sup>3</sup>	71.19	3310.335	275.5053
	砂	m <sup>3</sup>	67.15125	4102.1356	1067.7049
	纤维	t	4.13125	7986.9456	737.15257
	合计			902797.3	57606.34
7cm AC-20	石油沥青	t	89.35325	415421.13	39297.559
	矿粉	t	92.7045	7216.9526	681.8416
	石屑	m <sup>3</sup>	178.5665	9885.62	2571.3576
	碎石	m <sup>3</sup>	673.148	31301.382	2605.0828
	砂	m <sup>3</sup>	306.9605	18751.603	4880.672
	合计			482576.7	50036.51
18cm 沥青稳定碎 ATB-25	石油沥青	t	168.3243	782573.34	74029.027
	矿粉	t	105.0264	8176.2002	772.46917
	石屑	m <sup>3</sup>	264.627	14650.015	3810.6288
	碎石	m <sup>3</sup>	2381.724	110750.17	9217.2719
	砂	m <sup>3</sup>	346.1337	21144.615	5503.5258
	合计			937294.3	93332.92
20cm 5%水泥掺量的水泥稳定碎石	32.5 级水泥	t	251.325	578629.57	247605.39
	水	m <sup>3</sup>	292.5	737.1	0.087516
	碎石	m <sup>3</sup>	3304.913	153678.45	12790.013
	合计			733045.1	260395.5
30cm 级配碎石	碎石	m <sup>3</sup>	4199.513	195277.35	16252.115

表 5.11 1 功能单位典型沥青路面结构材料消耗清单 (结构 6)

结构层	材料名称	单位	数量	物化能耗/MJ	CO <sub>2eq</sub> /kg
4cm SMA-13 (SBS 改性)	改性沥青	t	64.944	686815.272	39843.144
	矿粉	t	111.033	8643.808017	816.647715



	石屑	m <sup>3</sup>	261.18	14459.18598	3760.992
	碎石	m <sup>3</sup>	56.952	2648.268	220.40424
	砂	m <sup>3</sup>	53.721	3281.708448	854.1639
	纤维	t	3.305	6389.5565	589.7220565
	合计			722237.8	46085.07
6cm AC-20	石油沥青	t	76.5885	356075.2542	33683.6223
	矿粉	t	79.461	6185.959389	584.435655
	石屑	m <sup>3</sup>	153.057	8473.388577	2204.0208
	碎石	m <sup>3</sup>	576.984	26829.756	2232.92808
	砂	m <sup>3</sup>	263.109	16072.80259	4183.4331
合计			413637.2	42888.44	
20cm 沥青稳定碎石 ATB-25	石油沥青	t	187.027	869525.9284	82254.4746
	矿粉	t	116.696	9084.666904	858.29908
	石屑	m <sup>3</sup>	294.03	16277.79483	4234.032
	碎石	m <sup>3</sup>	2646.36	123055.74	10241.4132
	砂	m <sup>3</sup>	384.593	23494.01718	6115.0287
合计			1041438	103703.2	
20cm 二灰稳定碎石	生石灰	t	239.816	1032911.494	285812.7328
	水	m <sup>3</sup>	427.5	1077.3	0.127908
	碎石	m <sup>3</sup>	2497.95	116154.675	9667.0665
	粉煤灰	m <sup>3</sup>	959.063	140621.6533	12978.4088
合计			1290765	308458.3	
30cm 级配碎石	碎石	m <sup>3</sup>	4199.513	195277.3545	16252.11531

根据表 5.6-5.11 的六种路面结构材料消耗清单,对比分析六种路面结构在物化阶段各材料产生的能耗大小,六种结构物化阶段能耗总量和各材料能耗组成分布情况分别如图 5.2、5.3 所示。

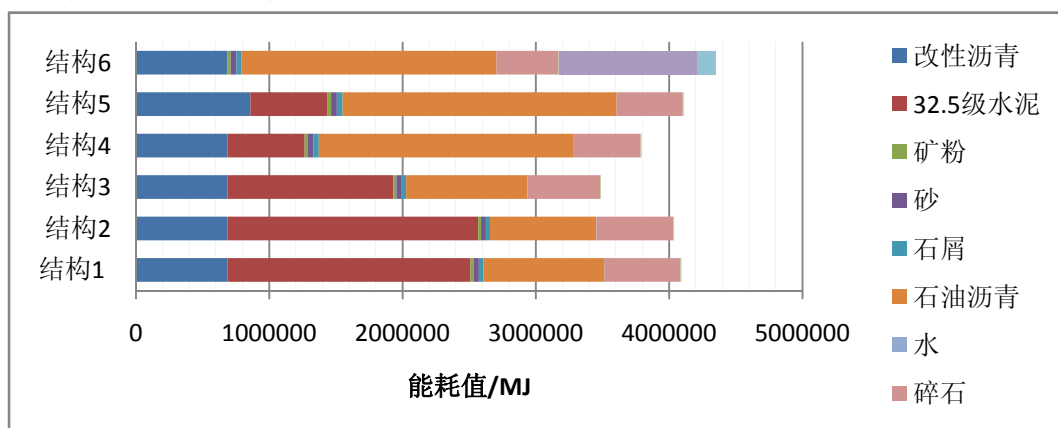


图 5.2 材料物化阶段六种路面结构能耗对比

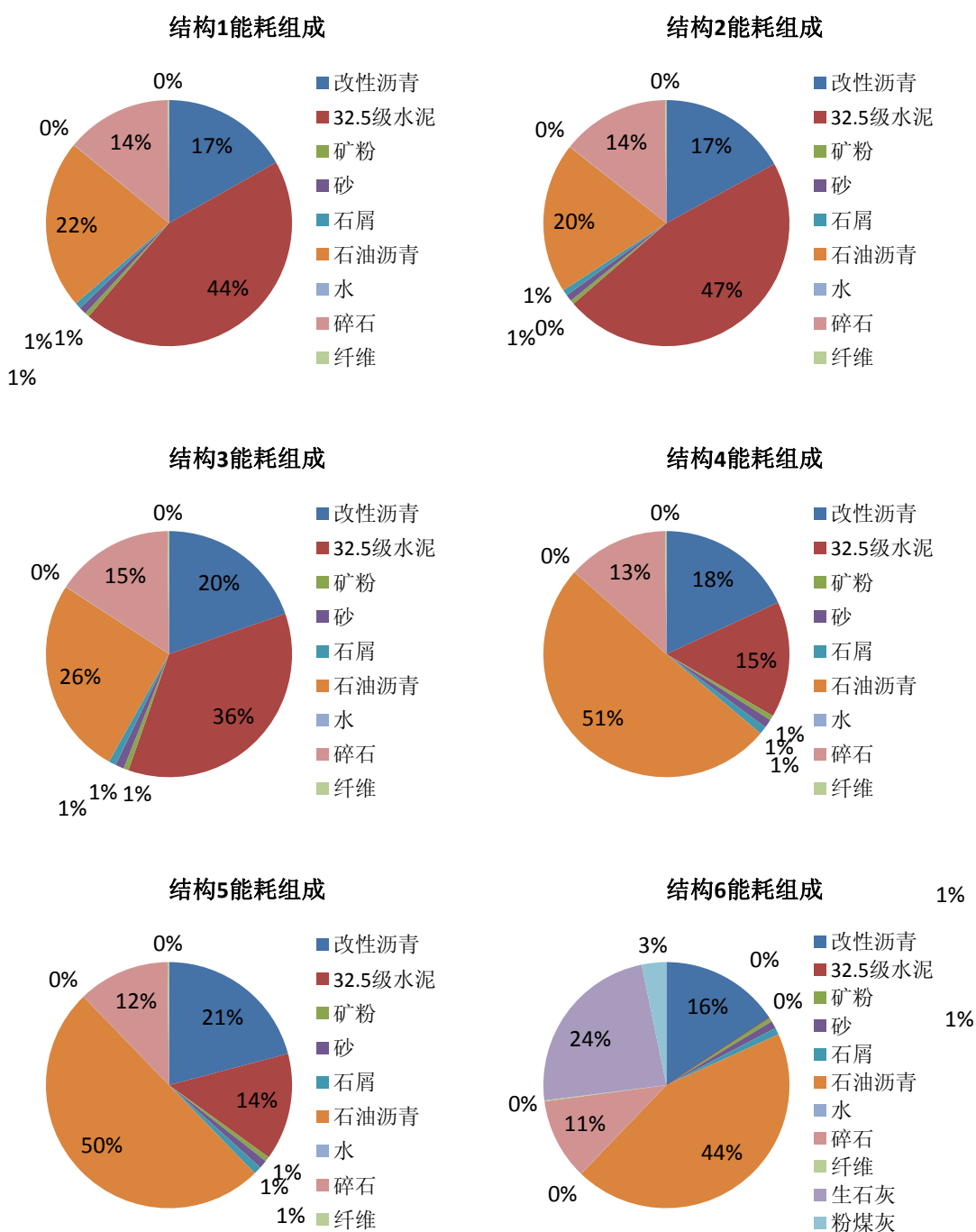


图 5.3 六种结构材料物化阶段能耗组成

由图 5.2,5.3 所示,从总体上来看,结构 5,结构 6 两种柔性基层沥青路面的材料能耗要大于半刚性基层沥青路面,主要原因是沥青材料的高能耗值,而两种柔性基层沥青材料使用量较大,分别占总能耗消耗的 71%和 60%。

对于三种柔性基层沥青路面,其中二灰稳定碎石柔性基层沥青路面(结构 6)材料总能耗值最高,为 4350170MJ,其中石灰、粉煤灰能耗量较大,为 1290765MJ,

占总能耗量的 35%，而结构 5 材料物化阶段总能耗值较高的原因是 SMA-13 改性沥青层厚度高于其他五种结构，能量消耗值为 902797.3MJ，占总能耗值比重 21%。

对于三种半刚性基层结构沥青路面，总能耗值相对较小是由于 32.5 水泥材料的能耗值所占比例较大，分别为 44%、47%、36%，而水泥的能耗值要远小于沥青材料。其中，结构 3 材料总能耗值为 3488818MJ，为 6 种结构中最低，是由于其减少了水泥稳定碎石层厚度，替换成级配碎石层，从而减少了水泥的使用量，大大减少了总能耗。

根据表 5.6-5.11 的六种路面结构材料消耗清单，对比分析六种路面结构在物化阶段各材料产生的 CO<sub>2</sub> 当量大小，六种结构物化阶段能耗总量和各材料产生的 CO<sub>2</sub> 当量组成分布情况分别如图 5.4、5.5 所示。

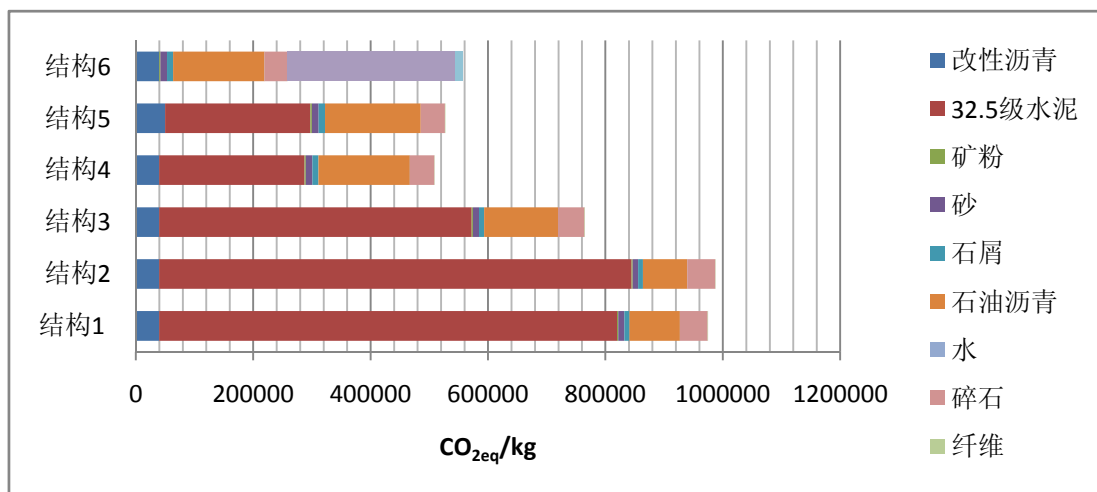
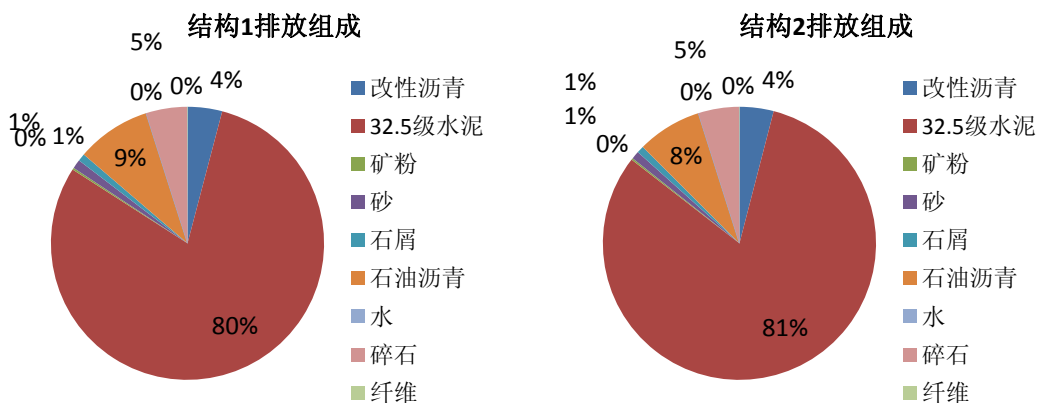


图 5.4 材料物化阶段六种路面结构碳排放对比



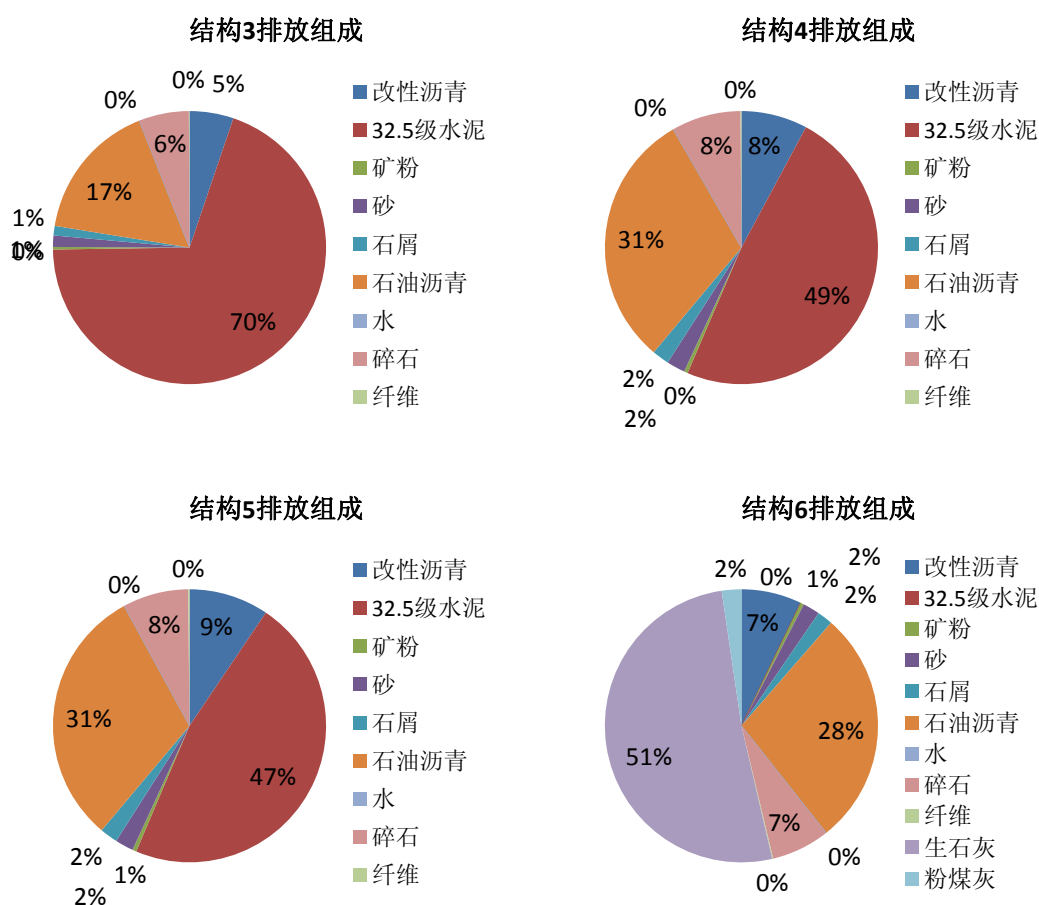


图 5.5 六种结构材料物化阶段碳排放组成

由图 5.4,5.5 所示,从总体上看,三种半刚性基层沥青路面的碳排放总量要远大于三种柔性基层沥青路面,主要原因是因为水泥在生产过程产生的碳排放量要远高于比沥青,虽然沥青的能耗大于水泥,但生产过程产生的碳排放量较为有限,而三种半刚性基层沥青路面均使用水泥稳定碎石,水泥使用量远大于柔性基层沥青路面。其中结构 2 的碳排放总量最大,为 804718kg,是结构 4 的 1.94 倍,究其原因是结构 2 中水泥材料产生的碳排放量最大,为 987801kg,占总排放量比重高达 81%。

对于三种柔性基层沥青路面,结构 6 虽然没有使用高排放值的水泥材料,但是生石灰的碳排放值较高,产生的总碳排放量为 285812kg,占总排放量比重高达 51%,产生的碳排放总量也是三种柔性基层沥青路面中最大的。

对于三种半刚性基层沥青路面,结构 3 相比结构 1,2,用级配碎石层替换了水稳碎石层,从而大大减少了水泥使用量,产生的碳排放总量仅为 725336kg,为三种半刚性基层沥青路面中最小。

综上所述，沥青路面建设期材料物化阶段沥青、水泥以及生石灰产生的环境负荷影响较大，其中改性沥青所产生能耗值最大，生石灰和水泥产生的碳排放量要远远高于其他材料，而石料在每种结构中虽然使用量最大，但是由于其生产过程中能耗值和排放量较少，故 1 功能单位所产生的总能耗和排放量较低。可见，要降低沥青路面建设期物化阶段的能耗与碳排放量，必须优化水泥、沥青等能源密集型材料的生产工艺，减少能耗与碳排放量，加大对各种劣质、低品位原材料在沥青路面中的资源化利用，加快沥青路面的绿色化进程。或是研究开发低能耗、低碳型的绿色材料筑建环保路面。然而寻找低能耗的绿色材料是一个长远的过程，目前的实施还存在各方面困难，可以考虑在高耗能材料中掺入添加剂来减少用量，或是回收利用的方法来降低其环境负荷，推进沥青路面材料的绿色化进程。

### 5.2.4 运输阶段能耗及排放

沥青路面建设期运输阶段主要为路面原材料和路面工程材料的运输。运输过程大部分建造活动是用工程机械实现的，使用机械必然消耗动力燃料和能源，故运输阶段的能耗分析主要针对机械运输过程的能耗。由第四章研究成果可知，运距对于原材料运输阶段影响很大，本章对原材料运输阶段取较小距离，见表 4.4，并假定场内基层水稳拌和楼距施工现场的平均运距 10km，料场及沥青混合料拌和楼距施工现场的平均运距为 15km，则根据《公路工程预算定额》和工程量清单可得运输阶段使用的机械种类及台班数，并结合《公路工程机械台班费用定额》<sup>[67]</sup>以及 4.1.3 节所列出的各能源能耗排放清单，得到 1 功能单位六种沥青路面结构的运输机械台班消耗清单，结果如表 5.12 所示。

表 5.12 功能单位典型沥青路面结构运输阶段机械台班消耗清单

结构	机械名称	台班消耗数量	燃料类型				能耗	CO <sub>2eq</sub>
			柴油	汽油	重油	电		
			kg	kg	kg	kWh	MJ	kg
结构 1	3m <sup>3</sup> 以内轮胎式装载机	27.42	3157.59				310707.56	11651.53
	5t 以内自卸汽车	3.23		134.78			13377.66	481.19
	15t 以内自卸汽车	57.03	11821.21				1163207.11	43620.26
	合计						1487292.33	55752.98
结构 2	3m <sup>3</sup> 以内轮胎式装载机	27.554	3172.88				312211.61	11707.93
	5t 以内自卸汽车	2.92		121.58			12066.85	434.04
	15t 以内自卸汽车	51.33	11686.33				1149934.87	43122.55
							1474213.33	55264.52

结构 3	3m <sup>3</sup> 以内轮胎式装载机	20.33	2341.47				230400.80	8640.03
	5t 以内自卸汽车	3.23		134.78			13377.66	481.19
	15t 以内自卸汽车	57.03	9297.73				914897.53	34308.65
	合计						1158675.99	43429.87
结构 4	3m <sup>3</sup> 以内轮胎式装载机	15.03	1731.31				170361.37	6388.55
	5t 以内自卸汽车	4.82		200.82			19931.69	716.93
	15t 以内自卸汽车	85.55	8331.88				819857.49	30744.65
	合计						1010150.55	37850.13
结构 5	3m <sup>3</sup> 以内轮胎式装载机	15.61	1797.62				176886.57	6633.24
	5t 以内自卸汽车	4.83		201.38			19987.47	718.94
	15t 以内自卸汽车	85.55	8331.86				819855.15	30744.56
	合计						1016729	38096.74
结构 6	3m <sup>3</sup> 以内轮胎式装载机	14.47	1666.54				163987.82	6149.54
	5t 以内自卸汽车	4.82		200.82			19931.69	716.93
	15t 以内自卸汽车	85.55	8331.88				819857.49	30744.65
	合计						1003777	37611.12

根据表 5.12 的六种路面结构运输阶段能耗排放清单, 对比分析六种路面结构在运输阶段产生的能耗及排放大小, 结果如图 5.5、5.6 所示。

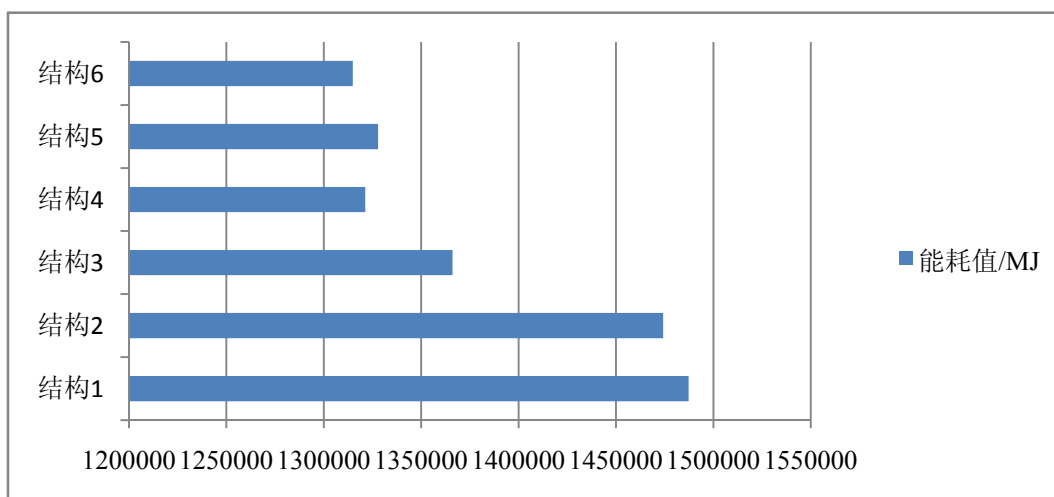


图 5.6 运输阶段六种结构能耗对比

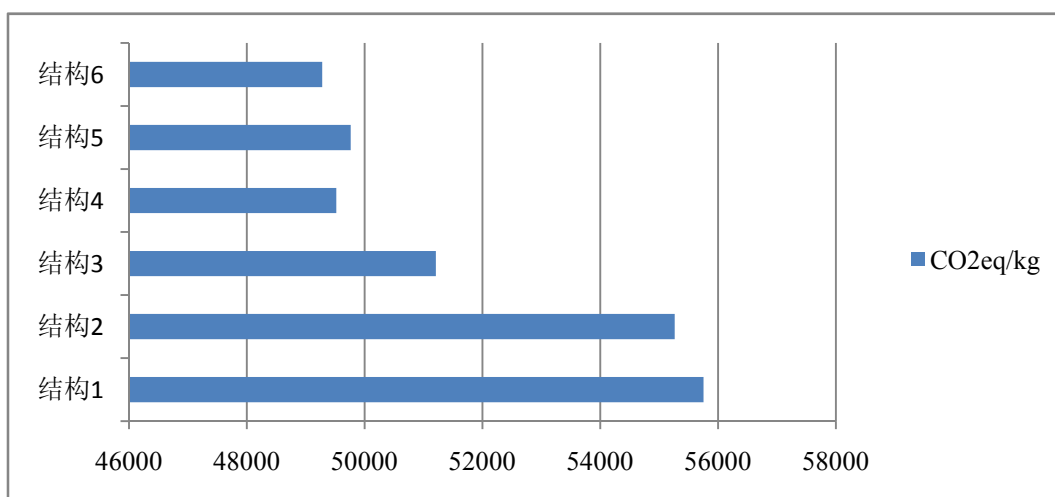


图 5.7 运输阶段六种结构碳排放对比

由图 5.6,5.7 可知, 三种半刚性基层沥青路面结构的能耗及排放要大于三种柔性基层沥青路面结构, 但是从能耗和排放总量数值来看, 总体差距不大, 其中结构 1 能耗和排放总量最大, 分别为 1487292MJ 和 55752kg, 结构 6 能耗和排放总量最小, 分别为 1314915MJ 和 49278kg, 其中结构 1 相比结构 6, 能耗总量高 11.5%, 碳排放总量高 11.6%, 差距较小。且六种沥青路面结构运输阶段能耗与碳排放量总量与物化阶段相比数值相差较大, 故可得到运输阶段并不是影响六种沥青路面结构能耗和排放的主要因素。

### 5.2.5 施工建设阶段能耗及排放

沥青路面结构的施工内容包括垫层、基层和面层的施工, 主要的施工工艺有三种: 洒铺法、路拌法和厂拌法。目前高等级路面主要采用厂拌法, 其施工程序为: 材料和设备的准备—混合料的拌制—混合料的运输—混合料的摊铺—混合料的压实成型—施工接缝的处理—路面的质量检测。具体能耗因具体施工方案不同而不同。本研究根据《公路工程预算定额》和工程量清单可得六种沥青路面结构施工阶段使用的机械种类及台班数, 并结合《公路工程机械台班费用定额》以及 4.1.3 节所列出的各能源能耗排放清单, 得到 1 功能单位六种沥青路面结构的施工机械台班消耗清单, 结果如表 5.13 所示。

表 5.13 1 功能单位典型沥青路面结构施工阶段机械台班消耗清单 (结构 1-6)

结构 1	机械名称	台班消耗数量	燃料类型				能耗	CO <sub>2</sub> eq
			柴油	汽油	重油	电		
			kg	kg	kg	kWh	MJ	kg
4cm	320t/h 以内沥青拌和设备	0.71	—	—	6764.31	4180.79	704750.30	33700.53
SMA-13	12.5m 以内沥青混合料摊铺机	0.22	30.08	—	—	—	2959.72	110.99

## 第五章 沥青路面典型结构建设期能耗排放量化对比研究

	6t~8t 光轮压路机	1.97	38.10	—	—	—	3748.98	140.59
	12t~15t 光轮压路机	2.37	95.77	—	—	—	9423.65	353.39
	15t 以内振动压路机	1.95	158.04	—	—	—	15550.82	583.16
6cm AC-20	320t/h 以内沥青拌和设备	0.90	—	—	8660.04	5352.48	902259.94	43145.26
	12.5m 以内沥青混合料摊铺机	0.99	134.43	—	—	—	13228.11	496.05
	6t~8t 光轮压路机	1.94	37.45	—	—	—	3684.88	138.18
	12t~15t 光轮压路机	2.91	117.71	—	—	—	11582.69	434.35
	16t~20t 轮胎压路机	0.57	23.98	—	—	—	2359.48	88.48
	20t~25t 轮胎压路机	1.32	66.53	—	—	—	6546.91	245.51
10cm ATB-25	320t/h 以内沥青拌和设备	1.44	—	—	13787.14	8521.36	1436433.73	68688.98
	12.5m 以内沥青混合料摊铺机	1.62	220.98	—	—	—	21744.85	815.43
	6t~8t 光轮压路机	3.18	61.54	—	—	—	6055.82	227.09
	12t~15t 光轮压路机	4.77	192.99	—	—	—	18990.63	712.15
	9t~16t 轮胎压路机	3.11	104.67	—	—	—	10299.48	386.23
21cm 5%水泥 掺量的 水泥稳 定碎石	300t/h 以内稳定土厂拌设备	4.05	—	—	—	2185.22	27883.38	4851.18
	90kw 以内自行式平地机	46.13	2783.64	—	—	—	273910.55	10271.65
	6t~8t 光轮压路机	1.58	30.44	—	—	—	2995.76	112.34
	12t~15t 光轮压路机	14.29	578.07	—	—	—	56882.31	2133.09
	12.5m 以内稳定土摊铺机	2.03	276.23	—	—	—	27181.06	1019.29
	6000L 以内洒水汽车	3.49	147.97	—	—	—	14560.70	546.03
22cm 5%水泥 掺量的 水泥稳 定碎石	300t/h 以内稳定土厂拌设备	4.28	—	—	—	2306.62	29432.46	5120.69
	90kw 以内自行式平地机	46.13	2783.64	—	—	—	273910.55	10271.65
	6t~8t 光轮压路机	1.58	30.44	—	—	—	2995.76	112.34
	12t~15t 光轮压路机	14.29	578.07	—	—	—	56882.31	2133.09
	12.5m 以内稳定土摊铺机	2.03	276.23	—	—	—	27181.06	1019.29
	6000L 以内洒水汽车	3.49	147.97	—	—	—	14560.70	546.03
20cm 5%水泥 掺量的 水泥稳	300t/h 以内稳定土厂拌设备	3.83	—	—	—	2063.82	26334.30	4581.67
	90kw 以内自行式平地机	46.13	2783.64	—	—	—	273910.55	10271.65



定碎石	6t~8t 光轮压路机	1.58	30.44	—	—	—	2995.76	112.34
	12t~15t 光轮压路机	14.29	578.07	—	—	—	56882.31	2133.09
	12.5m 以内稳定土摊铺机	2.03	276.23	—	—	—	27181.06	1019.29
	6000L 以内洒水汽车	3.49	147.97	—	—	—	14560.70	546.03
合计							4379861.27	207067.09

结构 2	机械名称	台班消耗数量	燃料类型				能耗	CO <sub>2</sub> eq
			柴油	汽油	重油	电		
			kg	kg	kg	kWh	MJ	kg
4cm SMA-13	320t/h 以内沥青拌和设备	0.71	—	—	6764.31	4180.79	704750.30	33700.53
	12.5m 以内沥青混合料摊铺机	0.22	30.08	—	—	—	2959.72	110.99
	6t~8t 光轮压路机	1.97	38.10	—	—	—	3748.98	140.59
	12t~15t 光轮压路机	2.37	95.77	—	—	—	9423.65	353.39
	15t 以内振动压路机	1.95	158.04	—	—	—	15550.82	583.16
6cm AC-20	320t/h 以内沥青拌和设备	0.90	—	—	8660.04	5352.48	902259.94	43145.26
	12.5m 以内沥青混合料摊铺机	0.99	134.43	—	—	—	13228.11	496.05
	6t~8t 光轮压路机	1.94	37.45	—	—	—	3684.88	138.18
	12t~15t 光轮压路机	2.91	117.71	—	—	—	11582.69	434.35
	16t~20t 轮胎压路机	0.57	23.98	—	—	—	2359.48	88.48
	20t~25t 轮胎压路机	1.32	66.53	—	—	—	6546.91	245.51
8cm ATB-25	320t/h 以内沥青拌和设备	1.15	—	—	11029.71	6817.09	1149146.98	54951.18
	12.5m 以内沥青混合料摊铺机	1.30	176.79	—	—	—	17395.88	652.35
	6t~8t 光轮压路机	2.55	49.23	—	—	—	4844.65	181.67
	12t~15t 光轮压路机	3.82	154.40	—	—	—	15192.50	569.72
	9t~16t 轮胎压路机	2.48	83.74	—	—	—	8239.59	308.98
23cm 5%水泥 掺量的 水泥稳定 碎石	300t/h 以内稳定土厂拌设备	4.50	—	—	—	2428.02	30981.54	5390.20
	90kw 以内自行式平地机	50.52	3048.75	—	—	—	299997.26	11249.90
	6t~8t 光轮压路机	1.73	33.34	—	—	—	3281.07	123.04
	12t~15t 光轮压路机	15.65	633.13	—	—	—	62299.67	2336.24
	12.5m 以内稳定土摊铺机	2.22	302.54	—	—	—	29769.73	1116.36

第五章 沥青路面典型结构建设期能耗排放量化对比研究

	6000L 以内洒水汽车	3.82	162.07	—	—	—	15947.44	598.03
22cm 5%水泥 掺量的 水泥稳 定碎石	300t/h 以内稳定土厂 拌设备	4.28	—	—	—	2306.62	29432.46	5120.69
	90kw 以内自行式平 地机	46.13	2783.64	—	—	—	273910.55	10271.65
	6t~8t 光轮压路机	1.58	30.44	—	—	—	2995.76	112.34
	12t~15t 光轮压路机	14.29	578.07	—	—	—	56882.31	2133.09
	12.5m 以内稳定土摊 铺机	2.03	276.23	—	—	—	27181.06	1019.29
	6000L 以内洒水汽车	3.49	147.97	—	—	—	14560.70	546.03
20cm 5%水泥 掺量的 水泥稳 定碎石	300t/h 以内稳定土厂 拌设备	3.83	—	—	—	2063.82	26334.30	4581.67
	90kw 以内自行式平 地机	46.13	2783.64	—	—	—	273910.55	10271.65
	6t~8t 光轮压路机	1.58	30.44	—	—	—	2995.76	112.34
	12t~15t 光轮压路机	14.29	578.07	—	—	—	56882.31	2133.09
	12.5m 以内稳定土摊 铺机	2.03	276.23	—	—	—	27181.06	1019.29
	6000L 以内洒水汽车	3.49	147.97	—	—	—	14560.70	546.03
合计							4120019.32	194781.31

结构 3	机械名称	台班消 耗数量	燃料类型				能耗	CO <sub>2</sub> eq
			柴油	汽油	重油	电		
			kg	kg	kg	kWh	MJ	kg
4cm SMA-13	320t/h 以内沥青拌和 设备	0.71	—	—	6764.31	4180.79	704750.30	33700.53
	12.5m 以内沥青混合 料摊铺机	0.22	30.08	—	—	—	2959.72	110.99
	6t~8t 光轮压路机	1.97	38.10	—	—	—	3748.98	140.59
	12t~15t 光轮压路机	2.37	95.77	—	—	—	9423.65	353.39
	15t 以内振动压路机	1.95	158.04	—	—	—	15550.82	583.16
6cm AC-20	320t/h 以内沥青拌和 设备	0.90	—	—	8660.04	5352.48	902259.94	43145.26
	12.5m 以内沥青混合 料摊铺机	0.99	134.43	—	—	—	13228.11	496.05
	6t~8t 光轮压路机	1.94	37.45	—	—	—	3684.88	138.18
	12t~15t 光轮压路机	2.91	117.71	—	—	—	11582.69	434.35
	16t~20t 轮胎压路机	0.57	23.98	—	—	—	2359.48	88.48
	20t~25t 轮胎压路机	1.32	66.53	—	—	—	6546.91	245.51
10cm	320t/h 以内沥青拌和	1.44	—	—	13787.14	8521.36	1436433.73	68688.98

ATB-25	设备							
	12.5m 以内沥青混合料摊铺机	1.62	220.98	—	—	—	21744.85	815.43
	6t~8t 光轮压路机	3.18	61.54	—	—	—	6055.82	227.09
	12t~15t 光轮压路机	4.77	192.99	—	—	—	18990.63	712.15
	9t~16t 轮胎压路机	3.11	104.67	—	—	—	10299.48	386.23
21cm 5%水泥 掺量的 水泥稳 定碎石	300t/h 以内稳定土厂拌设备	4.05	—	—	—	2185.22	27883.38	4851.18
	90kw 以内自行式平地机	46.13	2783.64	—	—	—	273910.55	10271.65
	6t~8t 光轮压路机	1.58	30.44	—	—	—	2995.76	112.34
	12t~15t 光轮压路机	14.29	578.07	—	—	—	56882.31	2133.09
	12.5m 以内稳定土摊铺机	2.03	276.23	—	—	—	27181.06	1019.29
	6000L 以内洒水汽车	3.49	147.97	—	—	—	14560.70	546.03
22cm 5%水泥 掺量的 水泥稳 定碎石	300t/h 以内稳定土厂拌设备	4.28	—	—	—	2306.62	29432.46	5120.69
	90kw 以内自行式平地机	46.13	2783.64	—	—	—	273910.55	10271.65
	6t~8t 光轮压路机	1.58	30.44	—	—	—	2995.76	112.34
	12t~15t 光轮压路机	14.29	578.07	—	—	—	56882.31	2133.09
	12.5m 以内稳定土摊铺机	2.03	276.23	—	—	—	27181.06	1019.29
	6000L 以内洒水汽车	3.49	147.97	—	—	—	14560.70	546.03
20cm 级 配碎石	120kw 以内自行式平地机	6.86	563.62	—	—	—	55459.93	2079.75
	6t~8t 光轮压路机	1.58	30.44	—	—	—	2995.76	112.34
	12t~15t 光轮压路机	12.26	496.14	—	—	—	48820.25	1830.76
	6000L 以内洒水汽车	4.95	210.03	—	—	—	20666.80	775.01
合计							4105939.33	193200.88

结构 4	机械名称	台班消耗数量	燃料类型				能耗	CO <sub>2</sub> eq
			柴油	汽油	重油	电		
			kg	kg	kg	kWh	MJ	kg
4cm SMA-13	320t/h 以内沥青拌和设备	0.71	—	—	6764.31	4180.79	704750.30	33700.53
	12.5m 以内沥青混合料摊铺机	0.22	30.08	—	—	—	2959.72	110.99
	6t~8t 光轮压路机	1.97	38.10	—	—	—	3748.98	140.59
	12t~15t 光轮压路机	2.37	95.77	—	—	—	9423.65	353.39

第五章 沥青路面典型结构建设期能耗排放量化对比研究

	15t 以内振动压路机	1.95	158.04	—	—	—	15550.82	583.16
6cm AC-20	320t/h 以内沥青拌和设备	0.90	—	—	8660.04	5352.48	902259.94	43145.26
	12.5m 以内沥青混合料摊铺机	0.99	134.43	—	—	—	13228.11	496.05
	6t~8t 光轮压路机	1.94	37.45	—	—	—	3684.88	138.18
	12t~15t 光轮压路机	2.91	117.71	—	—	—	11582.69	434.35
	16t~20t 轮胎压路机	0.57	23.98	—	—	—	2359.48	88.48
	20t~25t 轮胎压路机	1.32	66.53	—	—	—	6546.91	245.51
20cm ATB-25	320t/h 以内沥青拌和设备	2.93	—	—	28005.12	17309.01	2917756.01	139524.48
	12.5m 以内沥青混合料摊铺机	3.15	429.69	—	—	—	42281.64	1585.56
	6t~8t 光轮压路机	6.21	120.04	—	—	—	11811.87	442.95
	12t~15t 光轮压路机	9.29	375.97	—	—	—	36995.90	1387.35
	9t~16t 轮胎压路机	6.05	204.03	—	—	—	20076.53	752.87
20cm 5%水泥 掺量的 水泥稳定 碎石	300t/h 以内稳定土厂拌设备	3.83	—	—	—	2063.82	26334.30	4581.67
	90kw 以内自行式平地机	46.13	2783.64	—	—	—	273910.55	10271.65
	6t~8t 光轮压路机	1.58	30.44	—	—	—	2995.76	112.34
	12t~15t 光轮压路机	14.29	578.07	—	—	—	56882.31	2133.09
	12.5m 以内稳定土摊铺机	2.03	276.23	—	—	—	27181.06	1019.29
	6000L 以内洒水汽车	3.49	147.97	—	—	—	14560.70	546.03
30cm 级 配碎石	120kw 以内自行式平地机	10.29	845.43	—	—	—	83189.89	3119.62
	6t~8t 光轮压路机	2.36	45.67	—	—	—	4493.65	168.51
	12t~15t 光轮压路机	18.39	744.21	—	—	—	73230.37	2746.14
	6000L 以内洒水汽车	7.20	305.50	—	—	—	30060.81	1127.28
合计							5297856.83	248955.31

结构 5	机械名称	台班消耗数量	燃料类型				能耗	CO <sub>2</sub> eq
			柴油	汽油	重油	电		
			kg	kg	kg	kWh	MJ	kg
5cm SMA-13	320t/h 以内沥青拌和设备	0.59	—	—	5636.93	3483.99	587291.92	28083.77
	12.5m 以内沥青混合料摊铺机	0.18	25.07	—	—	—	2466.43	92.49
	6t~8t 光轮压路机	1.64	31.75	—	—	—	3124.15	117.16

	12t~15t 光轮压路机	1.97	79.81	—	—	—	7853.04	294.49
	15t 以内振动压路机	1.63	131.70	—	—	—	12959.01	485.96
7cm AC-20	320t/h 以内沥青拌和设备	1.06	—	—	10103.39	6244.56	1052636.59	50336.14
	12.5m 以内沥青混合料摊铺机	1.15	156.84	—	—	—	15432.80	578.73
	6t~8t 光轮压路机	2.26	43.69	—	—	—	4299.03	161.21
	12t~15t 光轮压路机	3.39	137.33	—	—	—	13513.14	506.74
	16t~20t 轮胎压路机	0.66	27.97	—	—	—	2752.72	103.23
	20t~25t 轮胎压路机	1.54	77.62	—	—	—	7638.07	286.43
18cm ATB-25	320t/h 以内沥青拌和设备	2.63	—	—	25204.61	15578.11	2625980.41	125572.04
	12.5m 以内沥青混合料摊铺机	2.84	386.72	—	—	—	38053.48	1427.01
	6t~8t 光轮压路机	5.59	108.04	—	—	—	10630.68	398.65
	12t~15t 光轮压路机	8.36	338.38	—	—	—	33296.31	1248.61
	9t~16t 轮胎压路机	5.45	183.63	—	—	—	18068.88	677.58
20cm 5%水泥 掺量的 水泥稳定 碎石	300t/h 以内稳定土厂拌设备	3.83	—	—	—	2063.82	26334.30	4581.67
	90kw 以内自行式平地机	46.13	2783.64	—	—	—	273910.55	10271.65
	6t~8t 光轮压路机	1.58	30.44	—	—	—	2995.76	112.34
	12t~15t 光轮压路机	14.29	578.07	—	—	—	56882.31	2133.09
	12.5m 以内稳定土摊铺机	2.03	276.23	—	—	—	27181.06	1019.29
	6000L 以内洒水汽车	3.49	147.97	—	—	—	14560.70	546.03
30cm 级 配碎石	120kw 以内自行式平地机	10.29	845.43	—	—	—	83189.89	3119.62
	6t~8t 光轮压路机	2.36	45.67	—	—	—	4493.65	168.51
	12t~15t 光轮压路机	18.39	744.21	—	—	—	73230.37	2746.14
	6000L 以内洒水汽车	7.20	305.50	—	—	—	30060.81	1127.28
合计							5028836.06	236195.86

结构 6	机械名称	台班消耗数量	燃料类型				能耗	CO <sub>2</sub> eq
			柴油	汽油	重油	电		
			kg	kg	kg	kWh	MJ	kg
4cm SMA-13	320t/h 以内沥青拌和设备	0.71	—	—	6764.31	4180.79	704750.30	33700.53
	12.5m 以内沥青混合料摊铺机	0.22	30.08	—	—	—	2959.72	110.99

第五章 沥青路面典型结构建设期能耗排放量化对比研究

	6t~8t 光轮压路机	1.97	38.10	—	—	—	3748.98	140.59
	12t~15t 光轮压路机	2.37	95.77	—	—	—	9423.65	353.39
	15t 以内振动压路机	1.95	158.04	—	—	—	15550.82	583.16
6cm AC-20	320t/h 以内沥青拌和设备	0.90	—	—	8660.04	5352.48	902259.94	43145.26
	12.5m 以内沥青混合料摊铺机	0.99	134.43	—	—	—	13228.11	496.05
	6t~8t 光轮压路机	1.94	37.45	—	—	—	3684.88	138.18
	12t~15t 光轮压路机	2.91	117.71	—	—	—	11582.69	434.35
	16t~20t 轮胎压路机	0.57	23.98	—	—	—	2359.48	88.48
	20t~25t 轮胎压路机	1.32	66.53	—	—	—	6546.91	245.51
20cm ATB-25	320t/h 以内沥青拌和设备	2.93	—	—	28005.12	17309.01	2917756.01	139524.48
	12.5m 以内沥青混合料摊铺机	3.15	429.69	—	—	—	42281.64	1585.56
	6t~8t 光轮压路机	6.21	120.04	—	—	—	11811.87	442.95
	12t~15t 光轮压路机	9.29	375.97	—	—	—	36995.90	1387.35
	9t~16t 轮胎压路机	6.05	204.03	—	—	—	20076.53	752.87
20cm 二灰稳定碎石	300t/h 以内稳定土厂拌设备	3.04	—	—	—	1638.91	20912.54	3638.39
	90kw 以内自行式平地机	46.13	2783.64	—	—	—	273910.55	10271.65
	6t~8t 光轮压路机	1.58	30.44	—	—	—	2995.76	112.34
	12t~15t 光轮压路机	14.29	578.07	—	—	—	56882.31	2133.09
	12.5m 以内稳定土摊铺机	2.03	276.23	—	—	—	27181.06	1019.29
	6000L 以内洒水汽车	3.49	147.97	—	—	—	14560.70	546.03
30cm 级 配碎石	120kw 以内自行式平地机	10.29	845.43	—	—	—	83189.89	3119.62
	6t~8t 光轮压路机	2.36	45.67	—	—	—	4493.65	168.51
	12t~15t 光轮压路机	18.39	744.21	—	—	—	73230.37	2746.14
	6000L 以内洒水汽车	7.20	305.50	—	—	—	30060.81	1127.28
合计							5292435.06	248012.02

根据表 5.13 的六种路面结构施工阶段能耗排放清单，对比分析六种路面结构在施工阶段产生的能耗及排放大小，结果如图 5.8、5.9 所示。

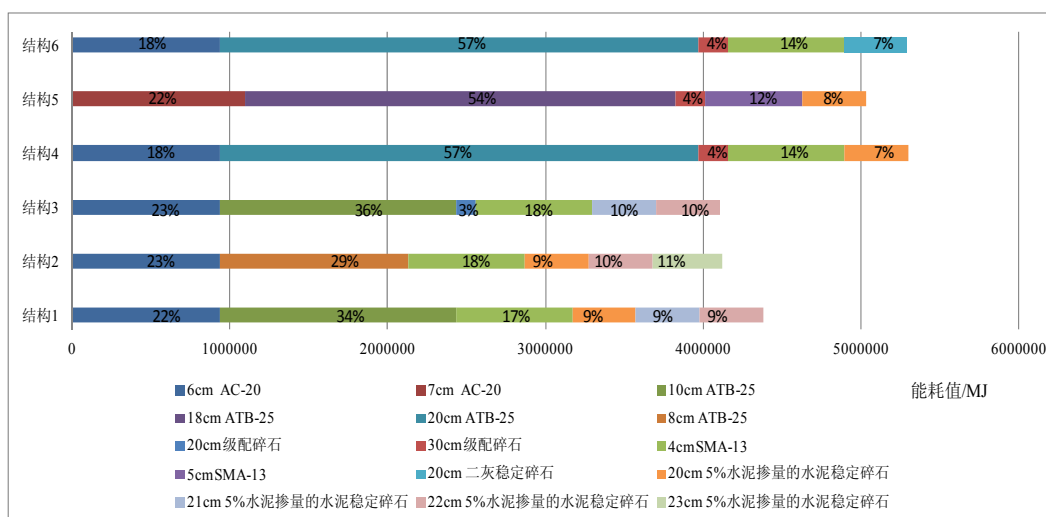


图 5.8 施工阶段六种结构能耗对比

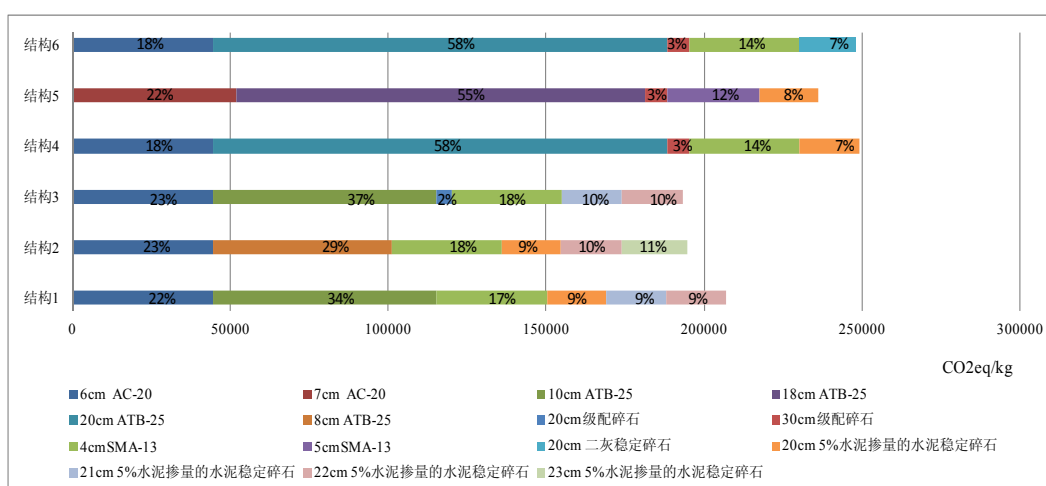


图 5.9 施工阶段六种结构碳排放对比

由图 5.8、5.9 可知，柔性基层沥青路面的能耗和碳排放总量要远大于半刚性基层沥青路面。

从各结构层看，对于柔性基层沥青路面，沥青混凝土结构层及沥青稳定碎石结构层的能耗和碳排放量占总能耗和总碳排放量的比重高达近 90%，其中沥青稳定碎石结构层比重接近 60%。对于半刚性基层沥青路面，沥青混凝土结构层的能耗和碳排放量占总能耗和总碳排放量的比重接近 80%，水泥稳定碎石层所占比重约为 9%左右。其中，柔性基层沥青路面结构 4 的能耗和二氧化碳排放当量最大，分别高达 5297857MJ 和 248955kg，分别是半刚性基层沥青路面结构 3 的 1.29 倍和 1.28 倍。

主要原因在于沥青路面的施工过程，沥青混合料需要高温拌和，石料和沥青必须进行加温处理，沥青路面的摊铺过程也要保证一定的施工温度，施工过程消耗了大量的能量。而柔性基层沥青路面相比半刚性基层沥青路面，沥青碎石层的

加入使得沥青混合料使用量较大，拌合和摊铺过程均为高能耗环节，相比而言，半刚性基层施工工艺简单，对温度没有太苛刻的要求，施工过程的能耗和碳排放总量比柔性基层沥青路面小得多。

由上可知，沥青混凝土以及沥青稳定碎石混合料在施工阶段的能耗和碳排放总量要远高于其他结构层，因此改进沥青混凝土及沥青碎石混合料的施工工艺，提高施工机械的燃油利用率，对于改善沥青路面施工阶段的高能耗、高排放具有重要的意义。

### 5.3 不同沥青路面结构能耗排放量化结果对比分析

#### 5.3.1 不同沥青路面结构能耗结果对比分析

综合上述沥青路面建设期材料物化、运输和施工三个阶段的能耗值，可得六种高速公路沥青路面结构建设期的总能耗及各阶段能耗组成，结果如图 5.10、5.11 所示。

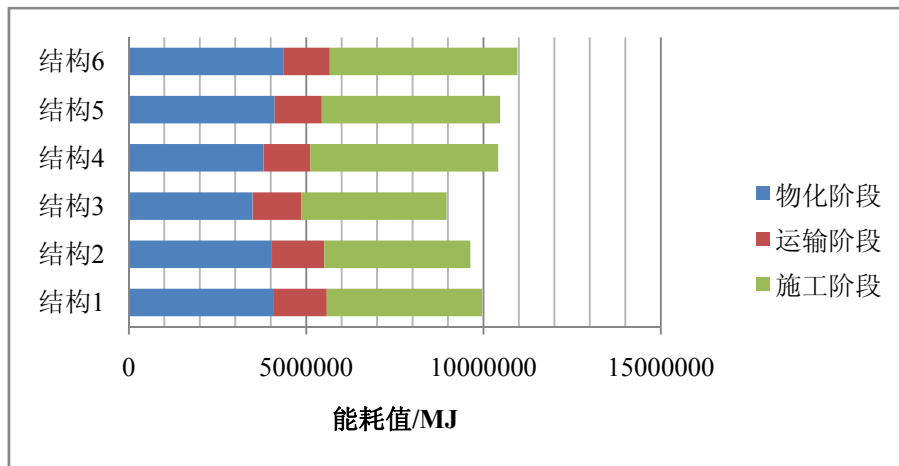
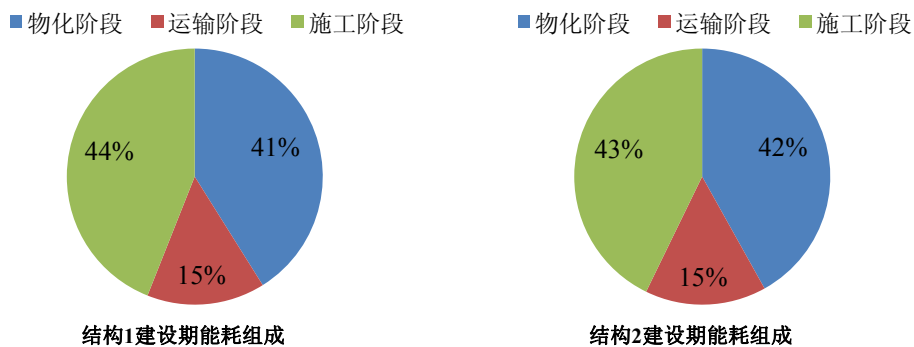


图 5.10 高速公路沥青路面建设期六种路面结构能耗对比





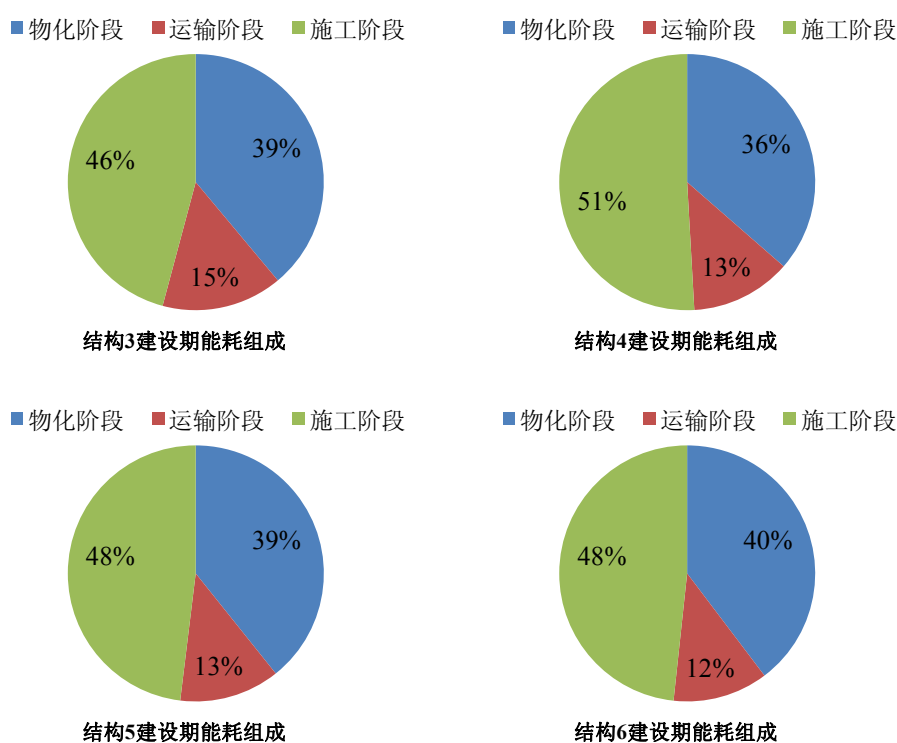


图 5.11 高速公路沥青路面建设期六种路面结构能耗组成

由图 5.10 可知，三种柔性基层沥青路面的建设期总能耗均大于半刚性基层沥青路面，其中结构 6 的总能耗最大，为 10957521MJ，结构 3 的总能耗最小，为 8960859MJ，原因是柔性基层沥青路面结构 6 中二灰稳定碎石层和沥青稳定碎石层在物化阶段和施工阶段均消耗了大量的能耗，使得结构 6 在物化阶段及施工阶段中的能耗消耗均为 6 种结构中最大，而半刚性基层沥青路面结构三中，使用级配碎石层替代了水泥稳定碎石层，从而大大减少了建设期三阶段的能耗值。

由图 5.11 可知，所选高速公路沥青路面六种结构建设期能耗组成中，物化阶段和施工阶段是耗能最大的两部分，占总能耗的比重均在 85%以上，而运输阶段所占比重较小，仅为 15%以下。对于半刚性基层结构 1、结构 2，物化阶段和施工阶段所占总能耗的比重相差不多，降低其能耗应从物化阶段材料的生产和使用着手，必须优化水泥、沥青等能源密集型材料的生产工艺，减少能耗与碳排放量，同时改进沥青路面施工工艺，提高施工机械的燃料利用率。对于半刚性沥青路面结构 3 以及 3 种柔性基层沥青路面结构，施工阶段能耗所占总能耗比重接近 50%，故减少其能量消耗值应从施工阶段着手，改进沥青混凝土及沥青碎石混合料的施工工艺，提高施工机械的燃油利用率对于沥青路面的绿色化进程具有重要意义。

### 5.3.2 不同沥青路面结构排放结果对比分析

综合上述沥青路面建设期材料物化、运输和施工三个阶段的碳排放值，可得六种高速公路沥青路面结构建设期的碳排放总量及各阶段碳排放组成，结果如图 5.12、5.13 所示。

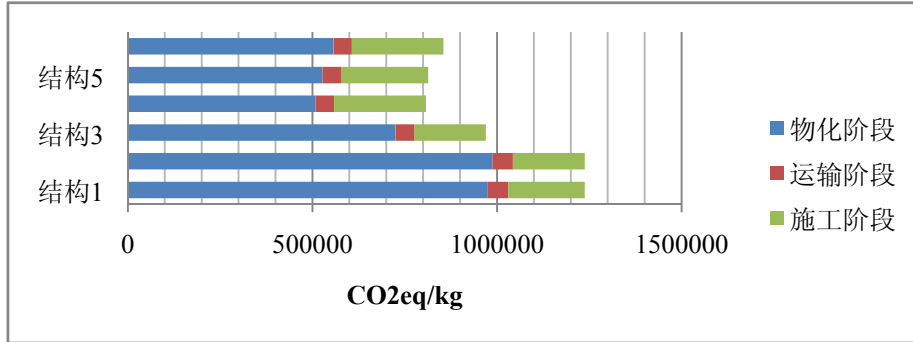


图 5.12 高速公路沥青路面建设期六种路面结构碳排放对比

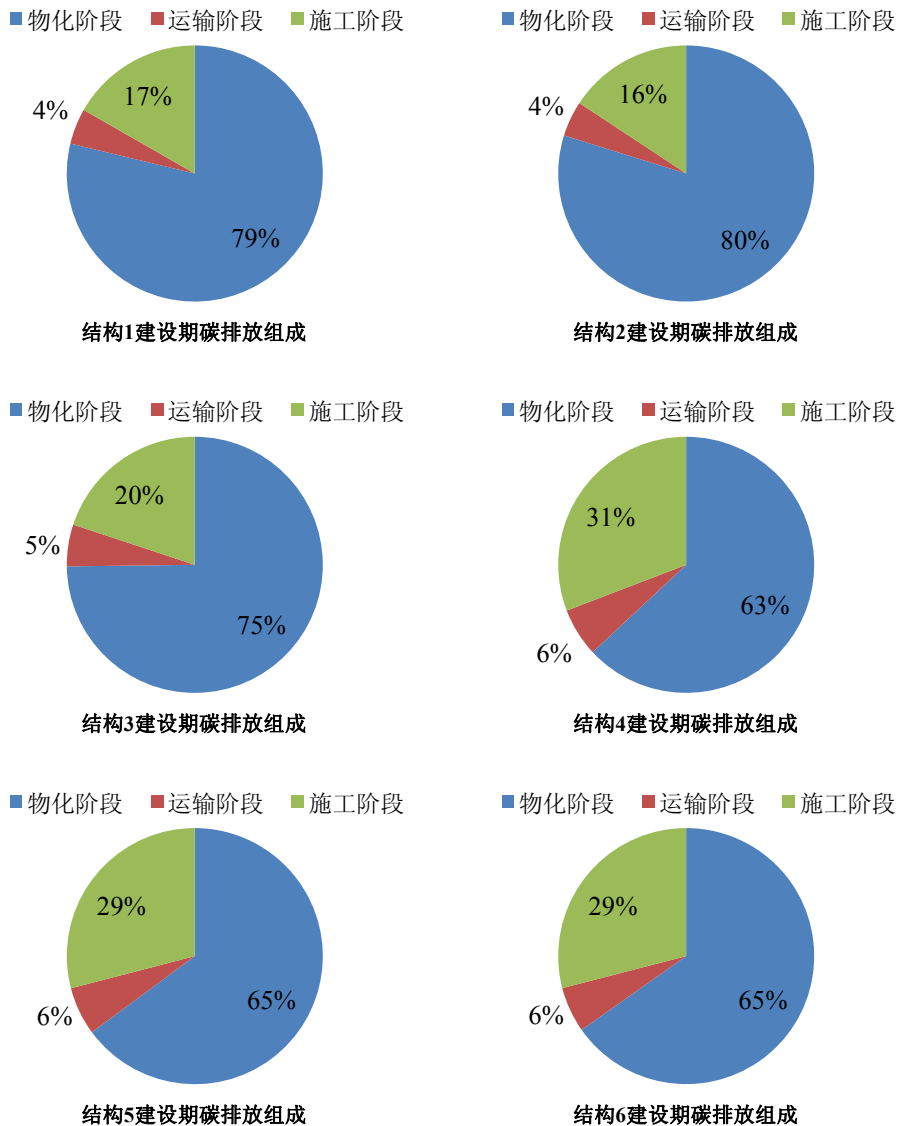


图 5.13 高速公路沥青路面建设期六种路面结构碳排放组成

由上图可知，从高速公路六种路面沥青路面结构建设期碳排放量结果对比中可见，三种半刚性基层沥青路面结构的碳排放总量均大于三种柔性基层沥青路面结构。其中结构 2 的碳排放总量最大，为 1237848kg，结构 4 的碳排放总量最小，为 807641kg，两者相差 1.5 倍之多。

而在碳排放量组成方面，六种沥青路面结构建设期物化阶段所产生的碳排放总量所占总排放量的比重均为最大，施工阶段次之，运输阶段产生的碳排放总量较小。其中三种半刚性基层沥青路面结构中物化阶段所占比重高达 75%以上，施工阶段所占比重约为 20%，三种柔性基层沥青路面结构中物化阶段所占比重也达到 65%左右，施工阶段所占比重约为 30%。同时，物化阶段所产生的碳排放总量也是三阶段中最大，其中结构 2 物化阶段产生的碳排放量最大，为 987802kg，结构 4 物化阶段产生的碳排放量最小，为 509168kg，两者相差 1.9 倍。

产生这种结果主要是因为水泥在生产过程产生的碳排放量要远高于比沥青，虽然沥青的能耗大于水泥，但生产过程产生的碳排放量较为有限，而三种半刚性基层沥青路面均使用水泥稳定碎石，水泥使用量远大于柔性基层沥青路面，致使半刚性基层沥青路面物化阶段产生大量的碳排放，且排放总量远大于施工阶段和运输阶段。

### 5.3.3 不同沥青路面结构层能耗排放结果对比分析

前面几节对比分析了六种沥青路面结构建设期三阶段的能耗和碳排放，但是为单独考虑各结构层的能耗与排放。根据上述所得六种沥青路面结构建设期三阶段的能耗和碳排放数据，通过计算可得各单位厚度（1cm）结构层的能耗和碳排放量，结果如图 5.14、5.15 所示。

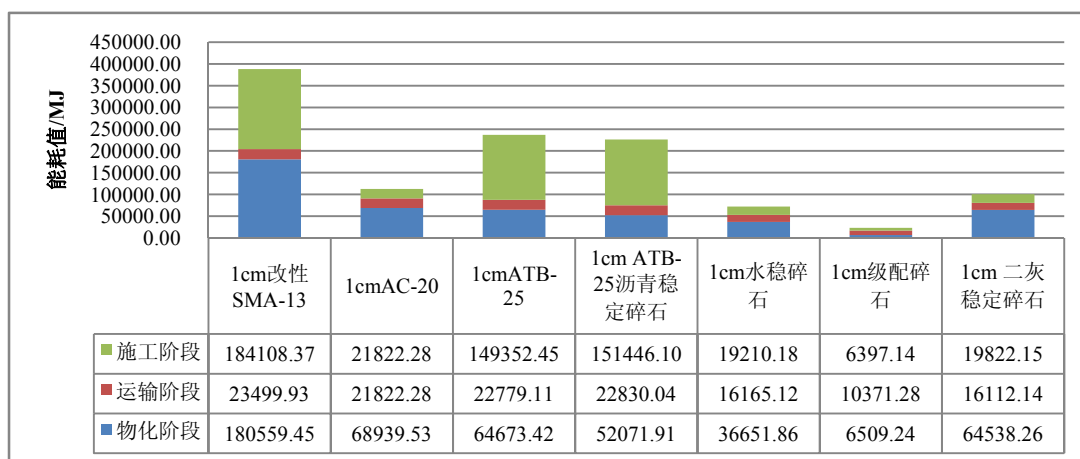


图 5.14 高速公路沥青路面建设期各单位结构层能耗对比

由图 5.14 可知,从总体来看,沥青路面建设期中,单位厚度的沥青结构层所消耗的能量是所有结构层中最大的,其中改性沥青 SMA-13 层能耗最大,为 388167.75MJ,粗粒式沥青混凝土 ATB-25 层次之,沥青稳定碎石 ATB-25 层稍小于沥青砼 ATB-25 层,而中粒式沥青砼 AC-16 能耗最小,仅为 112584.08MJ。对于三种底基层结构,单位厚度的二灰稳定碎石层建设期产生的能耗相对较大,为 100472.54MJ,水稳碎石层次之,级配碎石层所产生的能耗则是所有结构层中最少的,仅为 23277.67MJ。

就单位厚度各结构层物化阶段能耗来说,改性 SMA-13 层所产生的能耗最大,为 180559.45MJ,原因是改性沥青的高能耗导致结构层总体能耗消耗较大。AC-20 沥青砼层产生的能耗为 68939.53MJ,大于粗粒式沥青混凝土 ATB-25 层及沥青稳定碎石 ATB-25 层,原因是其石油沥青使用量较大。同样由于生石灰材料的高能耗特性到时二灰稳定碎石层的能耗也较高,为 64538.26MJ,而级配碎石层所产生的能耗较小,仅为 6509.24MJ。就单位厚度各结构层施工阶段能耗来说,改性 SMA-13 层、粗粒式沥青混凝土 ATB-25 层及沥青稳定碎石 ATB-25 层产生的能耗要远大于其他结构层,主要原因是三种结构层沥青混合料使用量较大,施工过程消耗燃油量多。级配碎石层施工工艺较为简单,产生的能耗也最小。而单位厚度各结构层运输阶段产生的能耗占总能耗比重很小。

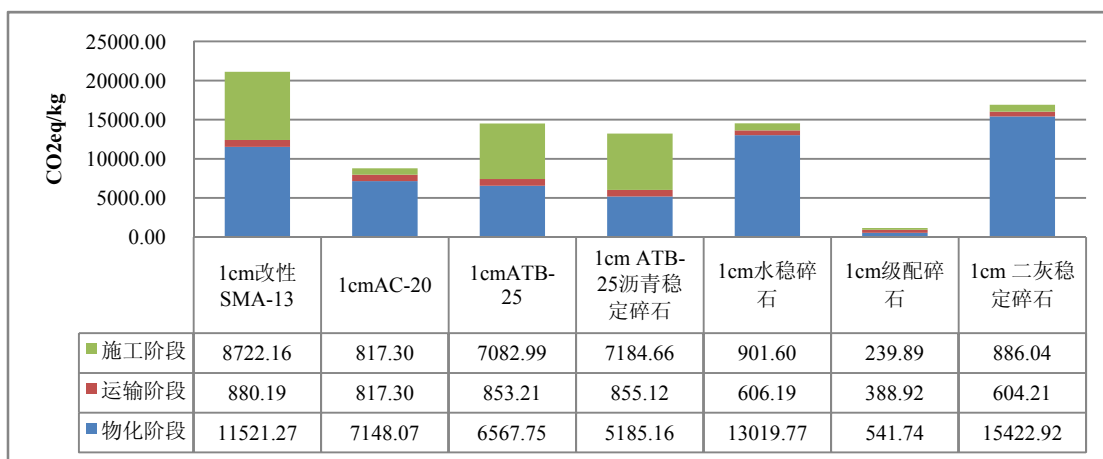


图 5.15 高速公路沥青路面建设期各单位结构层碳排放对比

由图 5.15 可知,与各单位结构层能耗消耗情况不同,各单位结构层的碳排放并没有呈现明显的规律。其中,1cm 改性 SMA-13 层产生的碳排放量最大,为 21123.63kg,物化阶段碳排放量所占总排放比重为 55%,施工阶段所占比重为 41%。1cm 二灰稳定碎石层碳排放量也较大,为 16913.16kg,排放来源来自物化阶段,此阶段所占总排放量比重高达 91%,原因是生石灰材料生产过程中会产生大量的碳排放。而水泥材料物化阶段高排放的特性致使单位厚度水稳碎石层的碳排放总

量也较大,为 14527.56kg。1cm 粗粒式沥青混凝土 ATB-25 层及沥青稳定碎石 ATB-25 层的碳排放主要来自物化阶段和施工阶段,两者所占总排放的比重相差不多。1cmAC-20 层的排放量相对较小,原因是其施工阶段所产生的排放较少,主要排放来源为物化阶段。1cm 级配碎石层建设期三个阶段产生的排放量都很少,碳排放总量仅为 1170.55kg。

综上所述,对比沥青路面建设期各单位厚度结构层能耗与排放可以得到以下结论:

1、材料物化阶段是所有结构层能耗与排放的关键环节,故应当优化改性沥青、沥青、水泥、生石灰等密集型材料的生产工艺,研究开发低能耗、低排放的沥青改性剂和添加剂等绿色环保型材料,可以考虑在沥青水泥等高能耗排放材料中参加添加剂减少其用量,加大资源回收利用,从而推进沥青路面的绿色化进程;

2、施工阶段的能耗与排放在沥青结构层中也占着较大比例,应当优化沥青混凝土和沥青碎石混合料的施工工艺,降低机械燃油量;

3、由于沥青材料能耗排放较大,在进行路面结构设计过程中,在满足设计要求的前提下,可以适当增加水稳层厚度,减小沥青层厚度;中面层 AC-16 的能耗与排放相对于上面层改性 SMA-13、下面层 ATB-25 较小,在路面设计过程中,可以适当增加中面层厚度。

4、由于级配碎石基层无结合料,是几种路面结构层能耗排放最小的,在满足路面设计要求的前提下,可以适当增加级配碎石层的厚度,或者替代其他类型的基层结构。

## 5.4 本章小结

本章提出了沥青路面典型结构建设期能耗及碳排放计算模型,运用 HPDS 路面结构设计软件确定了六种沥青路面的结构层组成形式及厚度,在此基础上,结合《公路工程预算定额》和工程量清单,分别计算各种路面结构建设期生产阶段、运输阶段及施工阶段的能耗与 CO<sub>2</sub> 排放。相应的研究内容和结论如下:

(1) 材料物化阶段:结构 5,结构 6 两种柔性基层沥青路面的材料能耗要大于半刚性基层沥青路面,主要原因是沥青材料的高能耗值,而两种柔性基层沥青材料使用量较大,分别占总能耗消耗的 71%和 60%。三种半刚性基层沥青路面的碳排放总量要远大于三种柔性基层沥青路面,主要原因是因为水泥在生产过程产生的碳排放量要远高于比沥青;

(2) 运输阶段：半刚性基层沥青路面结构的能耗及排放要大于三种柔性基层沥青路面结构，但六种沥青路面结构运输阶段能耗与碳排放量总量与物化阶段相比数值相差较大，运输阶段并不是影响六种沥青路面结构能耗和排放的主要因素；

(3) 施工阶段：柔性基层沥青路面的能耗和碳排放总量要远大于半刚性基层沥青路面。主要是由于沥青混凝土以及沥青稳定碎石混合料在施工阶段的能耗和碳排放总量要远高于其他结构层，因此改进沥青混凝土及沥青碎石混合料的施工工艺，提高施工机械的燃油利用率，对于改善沥青路面施工阶段的高能耗、高排放具有重要的意义。

(4) 从总体上看，三种柔性基层沥青路面的建设期总能耗均大于半刚性基层沥青路面，沥青路面六种结构建设期能耗组成中，物化阶段和施工阶段是耗能最大的两部分；，三种半刚性基层沥青路面结构的碳排放总量均大于三种柔性基层沥青路面结构。而在碳排放量组成方面，六种沥青路面结构建设期物化阶段所产生的碳排放总量所占总排放量的比重均为最大，施工阶段次之，运输阶段产生的碳排放总量较小。

(5) 对比沥青路面建设期各单位厚度结构层能耗与排放可以得出：材料物化阶段是所有结构层能耗与排放的关键环节；施工阶段的能耗与排放在沥青结构层中也占着较大比例，应当优化沥青混凝土和沥青碎石混合料的施工工艺，降低机械燃油量。

## 第六章 结论

### 6.1 结论

本文基于生命周期评价方法将沥青路面建设期分为材料物化、运输和施工三个阶段，采用试验测试和数据收集、分析等手段，建立了沥青路面材料和施工机具的清单数据集，并在此基础上建立了沥青路面工程材料建设期三阶段的能耗与排放计算模型，量化了沥青路面建设期能耗清单。最后，对比研究了半刚性基层沥青路面和柔性基层沥青路面的六种不同路面结构组成形式的建设期能耗与碳排放情况，得出的主要结论如下：

(1) 提出了路面 LCA 的研究目的；明确了沥青路面生命周期组成的四个阶段：原材料生产、路面施工、道路运营和养护；提出了沥青路面建设期分析的系统边界和系统模型；

(2) 采用文献调研，数据分析等方法，对沥青路面工程材料清单数据进行分类收集、计算根据设定的研究范围、边界条件和沥青路面生命周期中包含的各活动阶段或流程进行分析，建立了以沥青路面原材料、施工运输机具及能源的近 20 余项材料和设备的能耗及碳排放清单；

(3) 划定了沥青路面在原材料生产和施工阶段的能耗与排放计算边界和范围，提出沥青路面原材料建设期三阶段的能耗与排放计算模型及计算方法，根据常用路面材料设计参数，结合《公路工程预算定额》和工程量清单，分别计算主要沥青路面材料在建设期生产阶段、运输阶段及施工阶段的能耗与 CO<sub>2</sub> 排放；

(4) 原材料能耗分析结果表明，由于沥青生产能耗大于生石灰和水泥材料，沥青类路面工程材料整体的能耗要略高于基层材料，沥青类材料中 SBS 改性 SMA 的能耗最高，为 690MJ/t，基层材料中二灰土能耗最大，为 600MJ/t；原材料生产阶段排放计算结果表明，由于生石灰和水泥材料的排放量大于沥青，基层材料生产阶段的碳排放要远大于沥青类材料，沥青混凝土类材料的碳排放量要稍大于沥青碎石材料。无机结合料类路面材料中二灰土排放量最大，约 153kg CO<sub>2</sub>/t，沥青类材料中 SBS 改性 SMA 排放量最大，约 42kg CO<sub>2</sub>/t；减少原材料生产阶段的能耗和碳排放，在基层材料的选择中应选择石灰和水泥掺量较小的材料，或尽可能减少石灰和水泥的用量，在沥青面层中应选择沥青用量较小的混合料或尽量减少沥青结合料的用量；

(5) 运输阶段计算结果表明：原材料运输产生的能耗与排放是单位质量路面工程材料运输阶段能耗与排放的主要来源，且原材料运输所产生的能耗与碳排放

随着运输距离的增大呈剧烈增长趋势，控制运输阶段沥青路面工程材料的能耗与排放应从减少原材料的运距为主；

(6) 施工阶段能耗与排放分析结果表明，基层材料的施工能耗和排放明显小于沥青类材料，主要是由于相比基层材料施工，其增加了原材料的加热环节，而加热环节在施工阶段所占比重较大，加热产生的能耗和排放所占比重分别高达 90% 和 80%；

(7) 温拌的施工能耗相比热拌减少约 19%，温拌的施工排放相比热拌减少约 12%；

(8) 提出了沥青路面典型结构建设期能耗及碳排放计算模型，运用 HPDS 路面结构设计软件确定了六种沥青路面的结构层组成形式及厚度。材料物化阶段：结构 5，结构 6 两种柔性基层沥青路面的材料能耗要大于半刚性基层沥青路面，主要原因是沥青材料的高能耗值，而两种柔性基层沥青材料使用量较大，分别占总能耗消耗的 71% 和 60%。三种半刚性基层沥青路面的碳排放总量要远大于三种柔性基层沥青路面；运输阶段：半刚性基层沥青路面结构的能耗及排放要大于三种柔性基层沥青路面结构，但六种沥青路面结构运输阶段能耗与碳排放量总量与物化阶段相比数值相差较大，运输阶段并不是影响六种沥青路面结构能耗和排放的主要因素；施工阶段：柔性基层沥青路面的能耗和碳排放总量要远大于半刚性基层沥青路面；

(9) 从总体上看，三种柔性基层沥青路面的建设期总能耗均大于半刚性基层沥青路面，沥青路面六种结构建设期能耗组成中，物化阶段和施工阶段是耗能最大的两部分；三种半刚性基层沥青路面结构的碳排放总量均大于三种柔性基层沥青路面结构。而在碳排放量组成方面，六种沥青路面结构建设期物化阶段所产生的碳排放总量所占总排放量的比重均为最大，施工阶段次之，运输阶段产生的碳排放总量较小；

(10) 对比沥青路面建设期各单位厚度结构层能耗与排放可以得出：材料物化阶段是所有结构层能耗与排放的关键环节；施工阶段的能耗与排放在沥青结构层中也占着较大比例，应当优化沥青混凝土和沥青碎石混合料的施工工艺，降低机械燃油量。

## 6.2 展望

(1) 本文仅将研究主题定位于沥青路面，沥青路面是高速公路的组成部分之一，完整的道路生命周期不仅包括路面，还应包括路基，标志标线等道路基础及辅助设施，进一步的研究期望以本文给出的沥青路面生命周期能耗与排放的研究



方法和研究体系为基础，将研究范围在横向上扩展到整个道路工程，在纵向上扩展到更多的环境污染类型，包括酸雨气体、重金属排放、光化学污染物等方面；

(2) 本文仅将研究范围界定于沥青路面建设期材料生产、材料运输以及机械施工阶段，未涉及到沥青路面运营期以及路面养护阶段，进一步的研究展望将研究范围扩展为沥青路面整个生命周期，形成完整的沥青路面全寿命周期环境影响量化与评价体系；

(3) 本文对沥青路面建设期的能耗与排放的测算仅停留在理论计算与总体设计上，未对实际应用进行软件开发，后续研究可以在理论计算的基础上开发出完整的一套沥青路面环境影响量化软件系统。

## 致谢

时光荏苒，岁月匆匆，三年的硕士生涯即将结束。此刻，谨向在硕士学习和论文写作过程中，对我给予莫大关心和帮助的老师，同学和朋友们致以最诚挚的谢意，衷心的感谢你们。

本文是在导师朱洪洲教授的悉心指导下完成的，从论文的选题、具体实施以及论文盲审定稿，都离不开导师的指导与帮助。三年的硕士学习生活，我深深体会到您渊博的知识、严谨的治学态度、高尚的情操，您对我的鼓励、鞭策与教诲让我终身受益，在论文完成之际谨向您致以衷心的感谢和深深的敬意，祝您身体健康，万事如意。

非常有幸成为唐伯明课题组的一员，三年里唐老师胸襟博大的学者风范、开阔的学术视野以及幽默风趣的谈话艺术，给我留下了深刻的印象，让我在学习和今后的工作中都受益匪浅，你是我的偶像！非常感谢刘唐志老师给予我学习和工作上的指导和帮助，尽心尽力为学生着想的高尚情操让我铭记终身，感恩！非常感谢邹晓翎老师、曹雪娟老师、何丽红老师、郭鹏老师三年里对于我的指导与帮助，衷心祝愿你们工作顺利。

特别感谢段萌萌博士，感谢你对我的关心、支持与照顾！由衷感谢王腾师兄三年里对于我学习、生活上的帮助与关怀，衷心祝愿你家庭幸福，学业顺利！感谢卢章天、李海洋、屈允永、苏雪松、李彬、梅朝、赵桂香、刘晓凤、徐姣、陶盼盼等同门的帮助，祝你们前程似锦！感谢课题组毕业的师兄师姐，感谢师弟师妹，感谢课题组这个大家庭给我带来的美好时光。

感谢我的室友和同学们，感谢室友们在我生活上给我提供的帮助，使我们共同欢乐的学习与进步。在此深深的祝福你们，忠心的祝愿你们生活越来越美好，事业越来越顺利。

我能顺利的完成学业，离不开我家人的支持，特别是我的父母，是他们的默默付出与奉献，才使我走到了今天，由衷的感谢他们，祝他们健健康康，快快乐乐。

感谢在百忙之中评阅我硕士论文和参加答辩的各位评委专家们，感谢各位的批评指正才使我的论文更臻完善。

## 参考文献

- [1] U.S. Energy Information Administration (EIA). International Energy Outlook 2013[M]. Washington: EIA Publication, 2013,7.
- [2] Oak Ridge National Laboratory. USA Transportation Energy Data Book (Edition 29) [R]. 2010.
- [3] The Energy Data and Modeling Center (EDMC). Handbook of Energy and Economic Statistics in Japan[R]. 2008.
- [4] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2014[M]. 中国统计出版社, 2014.
- [5] International Energy Agency (IEA). CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion 2013[M]. Paris: IEA Publication, 2013, 10.
- [6] US Environmental Protection Agency. Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks: 1990-2011 [R]. 2013.
- [7] 国家统计局能源司. 中国能源统计年鉴 2013[M]. 北京中国统计出版社, 2013.
- [8] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [R]. Geneva: IPCC, 2006.
- [9] Nicholas Joseph Santero. Pavements and the Environment: A Life-Cycle Assessment Approach[D]. Berkeley: University of California, Berkeley, 2009.
- [10] Jincheol Lee, Tuncer B. Edil, Craig H. Benson, et al. USE of BE2ST In-Highways for Green Highway Construction Rating in Wisconsin[A]. N Weinstein. Green Streets and Highways 2010: An Interactive Conference on the State of the Art and How to Achieve Sustainable Outcomes[C]. ASCE, 2010: 480-494.
- [11] 潘美萍. 基于 LCA 的高速公路能耗与碳排放计算方法研究及应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [12] Central Intelligence Agency. The World Factbook[DB/OL]. <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/rankorder/2085rank.html>, 2013.
- [13] EPA. Guidelines for Assessing the Quality of Life-cycle Inventory Analysis. EPA 530-R-95-010, PB95-191: 235, 1995.
- [14] ISO International Standard 14040.Environmental management–Life cycle assessment–Principles and framework. International Organization for Standard organization (ISO),Geneva,1997.
- [15] ISO International Standard 14041.Environmental management–Life cycle assessment– Goal and scope definition and Inventory analysis. International Organization for Standard organization(ISO), Geneva,1998.
- [16] ISO International Standard 14042.Environmental management–Life cycle assessment– Life cycle Impact assessment. International Organization for Standard organization (ISO),Geneva,2000.
- [17] ISO International Standard 14043.Environmental management–Life cycle assessment–Life cycle Interpretation. International Organization for Standard organization (ISO),Geneva,2000.
- [18] GB/T 24041, 环境管理-生命周期评价-目的与范围的确定和清单分析[S], 2000.
- [19] Roger Fay, Graham Treloar and Usha Iyer-Raniga. Life-cycle energy analysis of buildings: a case study, Building Research and Information, 2000: 28(1), 31-41.
- [20] Häkkinen, T. and Mäkelä, K., Environmental Impact of Concrete and Asphalt Pavements, in Environment- al adaption of concrete. Technical Research Center of Finland. Research Notes 1752. 1996.
- [21] Mroueh, U.M., Eskola, P., Laine-Ylijoki, J., Wellman, K., Mäkelä, E., Juvankoski, M., and Ruotoistenmäki, A., Life cycle assessment of road construction. Finnish National Road Administration. Finnra Reports 17/2000. 2000.
- [22] Stripple, H., Life Cycle Inventory of Asphalt Pavements. IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd. 2001.
- [23] Nisbet, M.A., Marceau, M.L., VanGeem, M.G., and Gajda, J., Environmental Life Cycle Inventory of Portland Cement Concrete and Asphalt Concrete Pavements. Portland Cement Association. PCA R&D Serial No. 2489. 2001.
- [24] Zapata, P. and Gambatese, J.A., Energy Consumption of Asphalt and Reinforced Concrete Pavement Materials and Construction. Journal of Infrastructure Systems. Vol. 11, No. 1, pp. 9-20. 2005.

- [25] International Organization for Standardization, Environmental Management-Life Cycle Assessment- Requirement and Guidelines. ISO 14044:2006(E). 2006.
- [26] Ting Wang, In-Sung Lee, Alissa Kendall, et al. Life cycle energy consumption and GHG emission from pavement rehabilitation with different rolling resistance[J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 33(2012): 86-96.
- [27] Horvath, A. and Hendrickson, C., Comparison of Environmental Implications of Asphalt and Steel-Reinforced Concrete Pavements. Transportation Research Record. Vol. 1626, pp. 105-113. 1998.
- [28] Park, K., Hwang, Y., Seo, S., and Seo, H., Quantitative Assessment of Environmental Impacts on Life Cycle of Highways. Journal of Construction Engineering and Management. Vol. 129, No. 1, pp. 25-31. 2003.
- [29] Treloar, G.J., Love, P.E.D., and Crawford, R.H., Hybrid Life-Cycle Inventory for Road Construction and Use. Journal of Construction Engineering and Management. Vol. 130, No. 1, pp. 43-49. 2004.
- [30] H. Zhang, M.D. Lepech, G.A. Keoleian, et al. Dynamic Life-Cycle Modeling of Pavement Overlay Systems: Capturing the Impacts of Users, Construction, and Roadway Deterioration[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2010, 16(4): 299-309
- [31] D. Cass, A. Mukherjee. Calculation of Greenhouse Gas Emissions for Highway Construction Operations by Using a Hybrid Life-Cycle Assessment Approach: Case Study for Pavement Operations[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2011,137(11): 1015-1025.
- [32] Qazi Aurangzeb, Imad L. Al-Qadi. Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content. Resources[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2014, Volume 83: 77-86.
- [33] 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.
- [34] 刘顺妮. 水泥-混凝土体系环境影响评价及应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2002.
- [35] 龚志起. 建筑材料寿命周期中物化环境状况的定量评价研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [36] 郑莉. 路面材料 LCA 及其信息化开发[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2007.
- [37] 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: 南京林业大学, 2009.
- [38] 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.
- [39] 潘美萍. 基于 LCA 的高速公路能耗与碳排放计算方法研究及应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [40] Xianwei WANG, Lingsheng Wu, Dongyuan Yang. Carbon Dioxide Emissions from Highway Construction: Case Study in Southwest China[C]. Transportation Research Board, 2013.
- [41] 杨博. 沥青路面节能减排量化分析方法及评价体系研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- [42] 姜志威, 蒋海里, 刘晓苹, et al. 城市高架桥建造周期内 CO<sub>2</sub> 排放量计算研究[J]. 中国市政工程, 2012.
- [43] Li X, Liu J, Xu H, et al. Calculation of endogenous carbon dioxide emission during highway tunnel construction: A case study[C]. //Water Resource and Environmental Protection (ISWREP), 2011 International Symposium on. IEEE, 2011:2260 - 2264.
- [44] 刘沐宇, 欧阳丹. 桥梁工程生命周期碳排放计算方法[J]. 土木建筑与环境工程, 2011.
- [45] 徐双. 不同结构材料的桥梁生命周期碳排放研究[D]. 武汉理工大学.
- [46] 苏璜. 两种不同材料公路路堤生命周期评价与比较 [D]. 东南大学, 2005.
- [47] GB/T 24044-2008/ISO 14044:2006, 环境管理生命周期评价要求与指南[S].
- [48] Jeroen B.Guinée, Marieke Gorrée, Reinout Heijungs, et al. Life cycle assessment: An operational guide to the ISO standards. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001
- [49] Hendrickson, C.T., Lave, L.B., and Matthews, H.S., Environmental Life Cycle Assessment of Goods and Services. Washington, DC: Resources for the Future. 2006.
- [50] Treloor, G.J., Love, P.E.D., Faniran, O.O., and Iyer-Raniga, U., A hybrid life cycle assessment method for construction. Construction Management and Economics. Vol. 18, No. 1, pp. 5-9. 2000.
- [51] 席德立, 彭小燕. LCA 中清单分析数据的获得[J]. 环境科学, 1997(9): 84-87

- [52] Dorchie P, Chappat M, Bilal J. Environmental Road of the Future: Analysis of Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions[C]// Fiftieth Annual Conference of the Canadian Technical Asphalt Association (CTAA)2005.
- [53] 蔺瑞玉. 沥青路面建设过程温室气体排放评价体系研究[D]. 长安大学, 2014.
- [54] 马丽萍,王志宏,龚先政等.城市道路两种货车运输的生命周期清单分析[C]//2006 北京国际材料周暨中国材料研讨会.2006:3-8
- [55] 郝吉明,傅立新,贺克斌.城市机动车排放污染控制——国际经验分析与中国的研究成果[M]. 北京:中国环境科学出版社,2000.
- [56] 王炜,项乔君,常玉林,李铁柱.城市交通系统能源与环境影晌分析方法[M].北京:科学出版社,2002.
- [57] 秦永春,黄颂昌,徐剑,李峰,. 温拌沥青混合料节能减排效果的测试与分析[J].公路交通科技, 2009, (8).33-37
- [58] 和庆. 沥青混合料碳排放计算模型与评价体系研究[D]. 长安大学, 2013.
- [59] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].北京: 高等教育出版社,2006
- [60] JTG/T B06-02-2007 公路工程预算定额(上下)[M]. 人民交通出版社, 2010.
- [61] JTG F40-2004,公路沥青路面施工技术规范.北京:中华人民共和国交通部,2004
- [62] 中国公路学会筑路机械学会,沥青路面施工机械与机械化施工[M].北京:人民交通出版社,1999
- [63] 张润.路基路面施工及组织管理[M].北京:人民交通出版社,2002
- [64] 郑春斌. 橡胶沥青混凝土面层施工技术探讨[J]. 交通标准化,2011,(24).
- [65] 李刚. 橡胶沥青混合料生产与施工控制[J]. 能源与节能,2011,(10).
- [66] JTG D50-2006,沥青路面设计规范[S]. 北京:中华人民共和国交通部,2006
- [67] JTG/T B06-03-2007 公路工程机械台班费用定额[M]. 人民交通出版社, 2011.

## 攻读学位期间取得的研究成果

### 一、在学期间发表的学术论文

- [1] 高放, 王腾, 朱洪洲, 叶剑可. 填料与地面结合方式对高路堤的影响分析[J]. 中外公路(中文核心), 2015.6;
- [2] 缪存雀, 陈亮, 叶剑可, 高放. 雁楠公路高路堤结构设计及整体稳定性分析[J]. 公路工程(中文核心), 2015.6。

### 二、在学期间参与的科研项目

- [1] 2013.9-2013.12 重庆交通大学、重庆市公路局交通部西部交通建设科技项目《低碳环保技术在农村公路建设中的推广应用》, 主要研究人员之一, 主要参与项目调研、试验及研究报告撰写等工作;
- [2] 2013.12-2014.2 交通运输部西部科技项目《缓解热岛效应的热反射沥青铺装技术研究与应用》, 辅研人员之一, 主要负责项目后期的研究报告撰写, 参与了项目结题验收工作;
- [3] 2013.12-2014.7 浙江省交通运输厅科技计划项目《巨粒土高填方路基修筑关键技术研究与应用》, 主要研究人员之一, 主要负责项目的理论研究、研究报告撰写, 并参与了项目组织验收;
- [4] 2014.11 至今重庆市交通科学技术项目《高速公路低碳化建设和运营的关键技术研究及示范》, 主要研究人员之一, 参与了项目的现场调研、资料收集对接, 负责项目主要章节以及《成渝高速公路复线工程低碳优化施工指导意见》撰写工作。