

单位代码: 10359
学 号: 2014170544

分 类 号: U414
密 级: 公开



合肥工业大学
Hefei University of Technology

硕士学位论文

MASTER DEGREE THESIS

论文题目: 高速公路维修改造工程能耗及排放评价模型及方法

学位类别: 专业硕士

学科专业:
(工程领域) 建筑与土木工程

作者姓名: 沈艺奇

导师姓名: 扈惠敏 副教授

完成时间: 2017年4月

单位代码： 10359

密 级： 公 开

学 号： 2014170544

分类号： U414

合肥工业大学

Hefei University of Technology

硕士学位论文

MASTER'S DISSERTATION

论文题目： 高速公路维修改造工程能耗及排放
评价模型及方法

学位类别： 专业硕士

专业名称： 建筑与土木工程

作者姓名： 沈艺奇

导师姓名： 扈惠敏 副教授

完成时间： 2017年04月

合 肥 工 业 大 学

专业硕士学位论文

高速公路维修改造工程能耗及排放
评价模型及方法

作者姓名：_____ 沈艺奇 _____

指导教师：_____ 扈惠敏 副教授 _____

_____ 孙业香 教授级高工 _____

专业名称：_____ 建筑与土木工程 _____

研究方向：_____ 道路与桥梁工程 _____

2017 年 04 月

A Dissertation Submitted for the Degree of Master

**Evaluation Model and Method for Energy
Consumption and Emissions of Freeway
Reconstructed Project**

By

Shen Yiqi

Hefei University of Technology

Hefei, Anhui, P.R.China

April, 2017

合肥工业大学

本论文经答辩委员会全体委员审查，确认符合合肥工业大学专业硕士学位论文质量要求。

答辩委员会签名：（工作单位、职称）

主席：

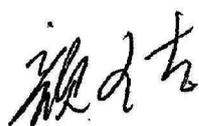
安徽省交通控股集团有限公司 教授级高工

委员：



合肥工业大学

教授



合肥工业大学

教授



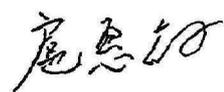
合肥工业大学

教授



合肥工业大学

副教授

导师：

合肥工业大学

副教授

致 谢

三年时光飞逝，我的研究生生活即将圆满结束，在此我想对我的母校，我的老师，我的家人和我的同学们表达我由衷的谢意！

首先，我要特别感谢我的导师扈惠敏老师。在我整个研究生生涯中，扈老师倾注了很多心血和汗水，无论是在毕业论文的选题、结构和资料的收集方面，还是在论文的研究方法以及成文定稿方面，我都得到了扈老师用心的指导，我深深感受到扈老师严谨的学术态度和认真的做事风格，让我倍受鼓舞。除了学业，在生活中，扈老师同样给予了我无私的关怀，让身在异乡的我十分温暖。祝福我们的扈老师，祝愿您身体健康，事业顺利，家庭幸福！

同时，我要感谢合肥工业大学的王建国老师、周焕林老师等在研究生阶段为我们授业解惑的老师，是你们用渊博的知识指引我不断前行。

还要感谢我的师兄弟们，感谢张明、王凯、桑伟宁、魏刚强、周辉、谢康协助我进行论文资料的收集。因为有了你们不辞辛苦的帮助，才有我论文的充实和完善。

在论文数据采集过程中我得到不少校外人员的帮助，在此特别感谢依托大修工程 01、02 和 03 标段的全体员工们，感谢你们在我进行数据调研时提供的帮助。

感谢我的父母和家人对我无私的养育和支持。

感谢在百忙中抽出时间对本文进行评审并提出宝贵意见的各位专家、教授。

最后，感谢所有关心和帮助过我的亲人、老师、同学和朋友，愿你们一生平安、永远幸福！

作者：沈艺奇

2017 年 4 月

摘要

能源消耗及其产生的排放引起的生态环境恶化越来越受到全社会的关注。在交通运输部积极推动绿色公路的环境下,厂拌乳化沥青冷再生、水泥再生土、高聚物注浆等具有节能减排效果的技术在安徽省高速公路改建工程中开始大规模应用。本文依托实际工程,采用全寿命周期分析方法,在现场数据调查的基础上,对改建工程各技术方案的能耗、排放进行量化分析,并提出沥青路面改建工程节能减排评价指标及模型。

本课题研究内容如下:(1)沥青路面改建工程节能、减排分析与评价模型框架;(2)原材料生产期能源消耗与排放量化分析;(3)沥青路面改建工程施工期能耗与排放量化分析;(4)改建工程节能减排技术应用及效果分析;(5)沥青路面改建工程节能减排评价指标及评价体系。通过实地工程调研、数据分析得出以下主要结论:(1)依据生命周期分析方法,建立在沥青路面建设或改建工程中运用清单分析法的流程,结合绿色公路的要求及改建工程特点,明确了能耗、排放的量化计算方法,建立了适用于沥青路面改建工程节能减排量化与评价的基本模型框架。(2)1t再生集料生产能耗在0.51-0.66kgce之间,约为新集料能耗(0.86-1.29)的50%。依托改建工程项目共使用再生集料309814.1t,实现了废旧沥青面层材料的100%再生利用,由此节约新集料约300519.7t。(3)在沥青面层施工期的各个环节,沥青混合料拌和能耗与排放比重最大,分别为77.4%和82.1%,为施工过程中降低能耗与排放的关键环节。(4)1km冷再生基层结构层施工期的能耗和排放仅为大粒径沥青碎石基层的8.8%、7.8%。考虑原材料生产及施工期两个阶段,冷再生基层的能耗与排放是大粒径沥青碎石基层的60.9%、59.9%。1km冷再生基层比大粒径沥青碎石基层减少能耗、排放分别为7997.2kgce、22427.1kg。依托改建工程累计节约能耗 1.88×10^6 kgce、减少排放 5.39×10^6 kg,冷再生基层节能减排效果显著。(5)以“节材、节能、减排”为核心,确定沥青路面改建工程节能减排二级评价指标体系,提出基于绿色理念的节能减排综合量化评价方法。课题研究结果将有利于进一步推动节能减排技术的应用。

关键词: 高速公路; 改建工程; 能耗与排放; 节能减排技术; 量化分析; 评价指标

ABSTRACT

The deterioration of ecological environment caused by energy consumption and emissions has aroused more and more attention by the whole society. With the guidance of “Green Road” which is actively promoted by Ministry of Transport, cold mix emulsified bitumen asphalt recycling technology, regeneration of soil cement, polymer grouting and other energy-saving and emissions reduction technology have been widely applied in freeway construction projects in Anhui Province. Based on the reconstruction project, this paper will use the method of Full Life Cycle Analysis. By the on-site data investigation, the quantitative analysis of energy consumption and emissions of the technical scheme of reconstruction project will be examined. Moreover, the evaluation index and model of energy-saving and emissions reduction of asphalt pavement reconstruction project is put forward.

The research contents are as follows: (1) Energy saving and emissions reduction analysis and evaluation model of asphalt pavement reconstruction project; (2) Quantitative analysis of energy consumption and emissions of raw material production period; (3) Quantitative analysis of energy consumption and emissions during construction period of asphalt pavement reconstruction; (4) Emissions reduction technology application and effect analysis; (5) energy saving and emissions reduction evaluation index and evaluation system of asphalt pavement reconstruction project. Through on-site investigation and data analysis, the following conclusions were drawn: (1) On the basis of Full Life Cycle Analysis, the process of using the inventory analysis method in the asphalt pavement construction or reconstruction project is established. Combined with the requirements of the green freeway and the characteristics of the reconstruction project, the quantitative calculation method of energy consumption and emissions is clarified, and the basic model framework for energy-saving and emissions reduction of asphalt pavement reconstruction project is established. (2) It recycled aggregate production energy consumption is between 0.51-0.66kgce, which occupies about 50% of the new aggregate energy consumption (0.86-1.29). Based on the reconstruction project, a total number of 309814.1t of recycled aggregate is used to realize 100% recycling of waste asphalt pavement material, thus saving about 300519.7t of new aggregate. (3) During the construction of asphalt layer, the proportion of energy consumption and discharge of asphalt mixture are the largest, which occupies 77.4% and 82.1%, respectively, and

considered as the key to reduce energy consumption and emissions. (4)The energy consumption and emissions of the 1km cold recycled base structural layer are only 8.8% and 7.8% of those in the large grain pitch gravel base. Considering the two stages of raw material production and construction period, the energy consumption and emissions of cold recycled base are 60.9% and 59.9% of those in the large-stone asphalt macadam grassroots. The energy consumption and emissions of 1km cold recycled base are less than those in the large-stone asphalt macadam grassroots for 7997.2kgce, 22427.1kg. Relying on the total energy savings of 1.88×10^6 kgce and emissions reduction of 5.39×10^6 kg, energy-saving and emissions reduction effect of cold recycling base is significant. (5)With the core of "material saving, energy saving and emissions reduction", secondary evaluation index system of energy-saving and emissions reduction for the asphalt pavement reconstruction project is established, and the green concept of comprehensive quantitative evaluation method of energy saving and emissions reduction is proposed. The research results will further promote the application of energy-saving and emissions reduction technology.

Keywords: Freeway; Reconstruction project; Energy consumption and emissions; Energy-saving and emissions reduction technology; Quantitative analysis; Evaluation index

目 录

| | |
|----------------------------|----|
| 第一章 绪论 | 1 |
| 1.1 研究背景与意义 | 1 |
| 1.1.1 研究背景 | 1 |
| 1.1.2 研究意义 | 2 |
| 1.2 依托工程 | 3 |
| 1.2.1 交通量及交通组成 | 3 |
| 1.2.2 病害特征 | 4 |
| 1.2.3 依托工程改建维修方案 | 6 |
| 1.3 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 研究内容与技术路线 | 11 |
| 1.4.1 研究内容 | 11 |
| 1.4.2 技术路线 | 12 |
| 第二章 沥青路面改建工程节能、减排分析与评价模型框架 | 13 |
| 2.1 研究方法理论基础 | 13 |
| 2.2 沥青路面改建工程节能、减排分析与评价流程 | 13 |
| 2.2.1 分析研究目的与范围 | 14 |
| 2.2.2 清单分析 | 14 |
| 2.2.3 节能减排效果评价 | 21 |
| 2.3 本章小结 | 21 |
| 第三章 原材料生产期能源消耗与排放量化分析 | 23 |
| 3.1 工程基础资料及数据 | 23 |
| 3.1.1 改建方案及工程量 | 23 |
| 3.1.2 原材料类型及混合料配合比 | 26 |
| 3.2 沥青生产 | 30 |
| 3.2.1 能耗及排放量化计算模型 | 30 |
| 3.2.2 沥青生产能耗类型及排放源 | 31 |
| 3.2.3 沥青生产能耗及排放计算 | 31 |
| 3.3 集料生产 | 37 |
| 3.3.1 集料生产工艺流程 | 37 |
| 3.3.2 集料生产能耗 | 40 |

| | | |
|------------|---------------------------|------------|
| 3.3.3 | 集料生产温室气体排放计算方法及排放统计 | 45 |
| 3.3.4 | 矿粉与水泥 | 46 |
| 3.4 | 沥青混合料再生集料生产 | 48 |
| 3.4.1 | 再生集料加工工艺流程 | 48 |
| 3.4.2 | 再生集料生产能耗 | 48 |
| 3.4.3 | 再生集料生产温室气体排放计算方法及排放统计 | 51 |
| 3.5 | 依托改建工程原材料能耗与排放总量计算 | 52 |
| 3.5.1 | 原材料运输能耗与排放 | 52 |
| 3.5.2 | 考虑成品运输的原材料能耗与排放 | 57 |
| 3.5.3 | 分项工程原材料能耗、排放汇总表 | 58 |
| 3.6 | 本章小结 | 63 |
| 第四章 | 沥青路面改建工程施工期能耗与排放分析 | 64 |
| 4.1 | 沥青面层施工期能耗与排放 | 64 |
| 4.1.1 | 拌和 | 64 |
| 4.1.3 | 碾压 | 74 |
| 4.1.4 | 运输 | 79 |
| 4.1.5 | 原沥青面层铣刨 | 81 |
| 4.1.6 | 沥青面层施工期能耗与排放汇总 | 82 |
| 4.2 | 冷再生基层施工期能耗与排放 | 85 |
| 4.2.1 | 拌和 | 85 |
| 4.2.2 | 摊铺 | 87 |
| 4.2.3 | 碾压 | 88 |
| 4.2.4 | 运输 | 90 |
| 4.2.5 | 原水稳上基层铣刨 | 90 |
| 4.2.6 | 冷再生上基层施工能耗、排放汇总 | 91 |
| 4.3 | 大粒径沥青碎石基层施工期能耗与排放 | 92 |
| 4.3.1 | 拌和 | 92 |
| 4.3.2 | 摊铺 | 93 |
| 4.3.3 | 碾压 | 94 |
| 4.3.4 | 运输 | 96 |
| 4.4 | 本章小结 | 98 |
| 第五章 | 节能减排技术应用及效果分析 | 100 |
| 5.1 | 沥青路面改建工程再生利用技术 | 100 |
| 5.1.1 | 沥青面层再生 | 100 |

| | |
|----------------------------------|------------|
| 5.1.2 水泥冷再生石灰土底基层····· | 107 |
| 5.2 高聚物注浆技术····· | 112 |
| 5.2.1 高聚物注浆工艺····· | 112 |
| 5.2.2 高聚物注浆应用效果····· | 114 |
| 5.2.3 高聚物注浆材料能耗及排放····· | 116 |
| 5.3 温拌沥青技术····· | 117 |
| 5.3.1 技术概述····· | 117 |
| 5.3.2 温拌技术-泡沫沥青····· | 118 |
| 5.3.3 温拌沥青节能减排效果评价····· | 118 |
| 5.4 沥青路面施工节能减排工艺措施····· | 120 |
| 5.4.1 拌合站设置····· | 120 |
| 5.4.2 拌合站节能改造····· | 121 |
| 5.5 本章小结····· | 122 |
| 第六章 沥青路面节能减排绿色养护评价体系····· | 124 |
| 6.1 节能减排绿色养护评价指标····· | 124 |
| 6.1.1 指标选取原则····· | 124 |
| 6.1.2 评价指标····· | 125 |
| 6.2 评价方法····· | 128 |
| 6.3 本章小结····· | 132 |
| 第七章 结论与建议····· | 134 |
| 参考文献····· | 137 |
| 攻读硕士学位期间发表的论文····· | 139 |

插图清单

| | |
|--|-----|
| 图 1-1 京台高速公路蚌埠至合肥段交通组成..... | 3 |
| 图 1-2 沥青面层及铣刨后水稳基层纵向裂缝..... | 5 |
| 图 1-3 路面横向裂缝..... | 5 |
| 图 1-4 路面唧浆病害..... | 6 |
| 图 1-5 铣刨重铺技术方案..... | 6 |
| 图 1-7 技术路线框图..... | 12 |
| 图 1-6 技术路线框图..... | 12 |
| 图 2-1 LCA 评价过程..... | 13 |
| 图 2-2 基于流程的冷再生基层单元划分..... | 16 |
| 图 3-1 改建工程路面设计方案..... | 24 |
| 图 3-2 石料爆破流程中的耗能、气体排放源..... | 38 |
| 图 3-3 集料生产工艺示意图..... | 39 |
| 图 3-4 依托改建工程石灰岩集料破碎加工..... | 40 |
| 图 4-1 间歇式拌和楼生产工艺简图..... | 64 |
| 图 4-2 沥青中面层摊铺、碾压施工..... | 70 |
| 图 4-3 摊铺现场沥青混合料自身气体排放检测..... | 71 |
| 图 4-4 旧路面铣刨..... | 81 |
| 图 4-5 冷再生混合料拌合站..... | 86 |
| 图 4-6 冷再生基层碾压施工..... | 88 |
| 图 4-7 大粒径沥青碎石摊铺..... | 94 |
| 图 5-1 热再生路段路况良好（2014 年）..... | 101 |
| 图 5-2 厂拌热再生路段路况良好（2016 年）..... | 101 |
| 图 5-3 K928+501-K930-696 冷再生路段路况良好..... | 104 |
| 图 5-4 桥头搭板处裂缝..... | 104 |
| 图 5-5 路面坑槽..... | 105 |
| 图 5-6 K929+200 冷再生路段路面坑槽..... | 105 |
| 图 5-7 冷再生路段路况良好..... | 106 |
| 图 5-8 石灰土底基层、路基纵缝..... | 107 |
| 图 5-9 路拌法施工水泥再生石灰土的工艺流程..... | 109 |
| 图 5-10 再生水泥土施工(撒布水泥)..... | 109 |
| 图 5-11 再生水泥土施工(就地拌和)..... | 110 |
| 图 5-12 水泥再生石灰土底基层路段路况良好..... | 111 |

| | |
|-------------------------|-----|
| 图 5-13 横缝注浆孔布置示意图..... | 113 |
| 图 5-14 纵缝注浆孔布置示意图..... | 113 |
| 图 5-15 高聚物注浆现场施工..... | 113 |
| 图 5-16 高聚物注浆路段路况良好..... | 116 |

表格清单

| | |
|---|----|
| 表 1-1 京台高速公路蚌埠至合肥段路面病害统计..... | 4 |
| 表 1-2 BE ² ST 评价系统评价指标及标准..... | 9 |
| 表 2-1 燃料净发热值数据..... | 17 |
| 表 2-2 几种能源的平均低位发热值及折算标准煤系数..... | 18 |
| 表 2-3 气体排放影响类别、影响因子及特征因子..... | 18 |
| 表 2-4 温室气体排放因子..... | 20 |
| 表 2-5 CO ₂ 当量排放因子..... | 21 |
| 表 3-1 原路面结构型式..... | 23 |
| 表 3-2 三个标段各结构层工程量及每公里材料用量..... | 25 |
| 表 3-3 三个标段各结构层材料总量..... | 25 |
| 表 3-4 沥青路面改建工程原材料类型..... | 26 |
| 表 3-5 01 标合料配合比..... | 27 |
| 表 3-6 02 标混合料配合比..... | 27 |
| 表 3-7 03 标混合料配合比..... | 28 |
| 表 3-8 各结构层 1km 单幅路面原材料用量统计表..... | 29 |
| 表 3-9 沥青生产能耗类型..... | 31 |
| 表 3-10 1t 普通沥青生产能耗..... | 32 |
| 表 3-11 生产 1t 普通沥青标准煤耗..... | 32 |
| 表 3-12 生产 1t 普通沥青温室气体排放量..... | 32 |
| 表 3-13 1t 改性沥青生产能耗..... | 33 |
| 表 3-14 生产 1tSBS 改性沥青标准煤耗..... | 33 |
| 表 3-15 生产 1tSBS 改性沥青温室气体排放量..... | 33 |
| 表 3-16 厂拌冷再生沥青混合料用改性乳化沥青质量要求..... | 34 |
| 表 3-17 1t 乳化沥青生产能耗..... | 34 |
| 表 3-18 生产 1t 乳化沥青标准煤耗..... | 35 |
| 表 3-19 生产 1t 乳化沥青温室气体排放量..... | 35 |
| 表 3-20 1t 改性乳化沥青生产能耗..... | 36 |
| 表 3-21 生产 1t 改性乳化沥青标准煤耗..... | 36 |
| 表 3-22 生产 1t 改性乳化沥青温室气体排放量..... | 36 |
| 表 3-23 依托改建工程 1t 沥青类材料能耗及排放汇总表..... | 37 |
| 表 3-24 炸药爆破时气体排放状况表..... | 38 |
| 表 3-25 集料生产过程中能耗类型..... | 40 |

| | |
|--------------------------------------|----|
| 表 3-26 炸药用量及玄武岩开采量调查表..... | 41 |
| 表 3-27 炸药用量及石灰岩开采量调查表..... | 41 |
| 表 3-28 开采 1t 玄武岩或石灰岩块石的炸药消耗量..... | 41 |
| 表 3-29 运输自卸汽车基本参数及油耗表..... | 42 |
| 表 3-30 破碎机基本参数表..... | 42 |
| 表 3-31 破碎机日产量及能耗（玄武岩）..... | 43 |
| 表 3-32 破碎机日产量及能耗（石灰岩）..... | 43 |
| 表 3-33 破碎、加工 1t 集料的电耗..... | 43 |
| 表 3-34 装载机基本参数及油耗表..... | 43 |
| 表 3-35 生产 1t 石料的能耗..... | 44 |
| 表 3-36 生产 1t 集料温室气体排放量..... | 45 |
| 表 3-37 依托改建工程生产 1t 集料能耗及排放汇总表..... | 46 |
| 表 3-38 2004 年我国每吨水泥生产排放..... | 47 |
| 表 3-39 2004 年我国每吨水泥生产能耗和排放..... | 47 |
| 表 3-40 再生集料（铣刨料）质量技术要求..... | 48 |
| 表 3-41 再生集料二次破碎筛分设备基本参数..... | 49 |
| 表 3-42 二次破碎筛分设备每工作日产量及能耗..... | 49 |
| 表 3-43 再生集料生产装载机基本参数表..... | 49 |
| 表 3-44 铣刨料运输自卸汽车基本参数及油耗表..... | 50 |
| 表 3-45 各标段自卸汽车满载或空载时每百公里的平均燃油消耗..... | 50 |
| 表 3-46 1t 再生集料的能耗..... | 51 |
| 表 3-47 生产 1t 再生集料温室气体排放量..... | 52 |
| 表 3-48 依托改建工程再生集料（1t）生产能耗及排放汇总表..... | 52 |
| 表 3-49 原材料运距..... | 53 |
| 表 3-50 运输 1t 原材料自卸汽车的燃油消耗..... | 53 |
| 表 3-51 运输 1t 原材料的标准煤消耗值..... | 54 |
| 表 3-52 运输 1t 原材料温室气体排放量..... | 55 |
| 表 3-53 运输 1t 原材料的能耗和排放汇总..... | 56 |
| 表 3-54 每生产 1t 原材料能耗和排放汇总..... | 57 |
| 表 3-55 上面层单幅每公里能耗与排放..... | 59 |
| 表 3-56 中面层单幅每公里能耗与排放..... | 59 |
| 表 3-57 下面层单幅每公里能耗与排放..... | 60 |
| 表 3-58 冷再生基层单幅每公里能耗与排放..... | 60 |
| 表 3-59 大粒径碎石基层单幅路面每公里能耗与排放汇总..... | 61 |

| | |
|--|----|
| 表 3-60 水泥稳定碎石基层单幅路面每公里能耗与排放..... | 62 |
| 表 3-61 各结构层每公里材料能耗与排放汇总表..... | 62 |
| 表 4-1 拌和过程中排放源及能耗类型..... | 65 |
| 表 4-2 沥青拌合站设备基本参数表..... | 65 |
| 表 4-3 沥青拌合站上面层产量与能耗调查表..... | 66 |
| 表 4-4 沥青拌合站中面层产量与能耗调查表..... | 66 |
| 表 4-5 沥青拌合站下面层产量与能耗调查表..... | 66 |
| 表 4-6 沥青拌合站拌合 1t 沥青混合料能耗汇总表..... | 67 |
| 表 4-7 生产 1t 沥青混合料温室气体排放 CO ₂ 当量..... | 68 |
| 表 4-8 沥青面层单幅路面 1km 混合料拌合的能耗和温室气体排放..... | 69 |
| 表 4-9 沥青摊铺机基本参数表..... | 70 |
| 表 4-10 沥青混合料摊铺过程中自身温室气体排放检测结果..... | 71 |
| 表 4-11 沥青面层摊铺机燃油消耗调查表..... | 73 |
| 表 4-12 单位长度面层 (1km) 施工摊铺机能耗..... | 73 |
| 表 4-13 摊铺 1km 单幅路面温室气体排放量..... | 73 |
| 表 4-14 依托改建工程摊铺 1km 单幅路面的能耗及排放汇总表..... | 74 |
| 表 4-15 压路机碾压速度 (m/min) | 74 |
| 表 4-16 01 标沥青面层碾压工艺..... | 74 |
| 表 4-17 02 标沥青面层碾压工艺..... | 75 |
| 表 4-18 03 标沥青面层碾压工艺..... | 76 |
| 表 4-19 压路机基本参数..... | 76 |
| 表 4-20 01 标沥青面层压路机燃油消耗调查表..... | 77 |
| 表 4-21 02 标沥青面层压路机燃油消耗调查表..... | 77 |
| 表 4-22 03 标沥青面层压路机燃油消耗调查表..... | 77 |
| 表 4-23 各标段每碾压 1km 单幅沥青路面能耗..... | 78 |
| 表 4-24 碾压 1km 单幅路面温室气体排放 CO ₂ 当量..... | 79 |
| 表 4-25 依托改建工程中 1km 单幅沥青路面碾压能耗及排放汇总表..... | 79 |
| 表 4-26 运输自卸汽车基本参数及油耗表..... | 80 |
| 表 4-27 自卸汽车运输 1t 混合料能耗..... | 80 |
| 表 4-28 沥青面层单幅路面 1km 混合料运输的能耗及排放汇总表..... | 81 |
| 表 4-29 铣刨机基本参数表..... | 82 |
| 表 4-30 铣刨机铣刨沥青面层油耗..... | 82 |
| 表 4-31 沥青面层单幅路面 1km 的能耗和排放量..... | 83 |
| 表 4-32 沥青面层施工期各环节能耗及排放比重..... | 85 |

| | |
|---|-----|
| 表 4-33 生产 1t 冷再生混合料温室气体排放 CO ₂ 当量..... | 86 |
| 表 4-34 冷再生上基层单幅路面 1km 混合料拌和的能耗和温室气体排放..... | 86 |
| 表 4-35 冷再生摊铺机基本参数表..... | 87 |
| 表 4-36 冷再生上基层摊铺机燃油消耗量..... | 87 |
| 表 4-37 冷再生上基层压路机设备组合..... | 88 |
| 表 4-38 压路机碾压速度 (m/min) | 89 |
| 表 4-39 冷再生上基层压路机燃油消耗量..... | 90 |
| 表 4-40 1km 单幅冷再生上基层压实工序能耗及排放..... | 90 |
| 表 4-41 冷再生上基层单幅路面 1km 运输的能耗及排放汇总表..... | 90 |
| 表 4-42 1 台铣刨机每个工作日铣刨水稳上基层油耗调查表..... | 91 |
| 表 4-43 冷再生基层施工期 (单幅路面 1km) 能耗和排放量..... | 91 |
| 表 4-44 沥青拌合站大粒径沥青碎石产量与能耗..... | 92 |
| 表 4-45 拌合 1t 大粒径沥青碎石混合料的能耗、排放..... | 93 |
| 表 4-46 单幅路面 1km 大粒径沥青碎石拌合的能耗及排放量..... | 93 |
| 表 4-47 大粒径沥青碎石上基层摊铺机燃油消耗调查表..... | 94 |
| 表 4-48 摊铺 1km 单幅大粒径沥青碎石基层的能耗和排放..... | 94 |
| 表 4-49 大粒径沥青碎石上基层碾压工艺..... | 95 |
| 表 4-50 大粒径沥青碎石上基层压路机燃油消耗量..... | 95 |
| 表 4-51 压实 1km 单幅 LSPM-30 上基层的能耗及排放量..... | 96 |
| 表 4-52 单幅路面 1km 大粒径沥青碎石材料运输的能耗及排放..... | 96 |
| 表 4-53 大粒径沥青碎石施工期 (单幅路面 1km) 的能耗和排放量..... | 97 |
| 表 4-54 结构层每公里施工能耗与排放汇总表..... | 97 |
| 表 4-55 各结构层每公里整体能耗与排放汇总表..... | 98 |
| 表 5-1 厂拌热再生和普通热拌沥青混合料施工期能耗对比..... | 102 |
| 表 5-2 厂拌热再生和普通热拌沥青混合料施工期环境排放对比..... | 102 |
| 表 5-3 水泥再生石灰土底基层路段..... | 108 |
| 表 5-4 水泥再生石灰土的颗粒组成..... | 109 |
| 表 5-5 水泥再生石灰土的抗压强度标准..... | 109 |
| 表 5-6 水泥再生土的能耗与排放..... | 112 |
| 表 5-7 高聚物注浆路段一览表..... | 114 |
| 表 5-8 国内硬泡聚氨酯板功能单位生命周期能源消耗及排放..... | 117 |
| 表 5-9 高聚物注浆技术材料能耗及排放统计表..... | 117 |
| 表 5-10 沥青拌合站设备参数及能耗调查..... | 119 |
| 表 5-11 单幅每公里沥青面层沥青混合料拌合过程中的能耗与排放..... | 119 |

| | |
|-----------------------------------|-----|
| 表 5-12 沥青混合料拌合过程中温室气体排放统计表..... | 120 |
| 表 5-13 沥青热拌与温拌拌合楼排放数据比较..... | 120 |
| 表 5-14 沥青混合料改变能源种类的节能减排效果..... | 121 |
| 表 6-1 沥青路面改建（大修）工程节能减排评价指标体系..... | 127 |
| 表 6-2 各一级指标权重..... | 130 |
| 表 6-3 资源节约指标计分标准..... | 130 |
| 表 6-4 节能低碳指标计分标准..... | 131 |
| 表 6-5 绿色管理指标计分标准..... | 132 |
| 表 6-6 路面质量状态计分标准..... | 132 |

第一章 绪论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 研究背景

能源对推动经济社会的发展至关重要。步入工业化时代后，以煤、石油和天然气等为代表的化石类燃料已成为人类生活与社会发展必不可少的物质资源，随着我国经济的飞速发展和人口的急剧增长，对能源的需求量大大增加，能源消耗加剧、传统能源资源逐渐减少，已无法满足国民经济发展的需要。此外，能源消耗及其产生的排放引起的生态环境恶化也越来越受到国际社会的关注。

实测数据显示，人类活动导致大气中的温室气体浓度产生了全球规模的改变，其中最主要的为CO₂（其全球平均浓度已从工业化前的280ppm升高到了1992年的356ppm）、CH₄（其浓度已从工业化前的0.7ppm升高到了1992年的1.72ppm）和CF₄（其总浓度已由零迅速升高到了1994年的约1ppm），且温室气体浓度还在继续增加。这会对人类的生存与发展造成巨大的威胁：海平面上涨淹没沿海低洼地区及海拔较低的海岛；自然灾害愈加频繁而且日趋严重；气温升高，病菌、病毒的繁殖与变异速度加快，威胁人类健康；物种灭绝加速，人类生存受到威胁；经济损失巨大，需采取的延缓措施代价高昂。为此遏制气候变暖、拯救地球家园，已经成为现今人类社会必须共同面对的重大挑战。

“降低能耗 低碳发展”现已成为全球的发展目标。但各行各业的发展使得能源消耗和温室气体排放不可避免。道路施工建设，除考虑传统的经济、技术指标，环境影响和可持续性受到的关注逐渐增加。2009年我国能源消费总量为306647万吨标准煤，其中工业和交通运输业中的能源消耗占我国同期能源消费总量的79.2%。由能源平衡表可知，目前我国交通运输部门以消费全国1/2的煤油，1/3的汽油和1/4的柴油成为我国油品消费大户。

美国的M.V.Chester, A.Horvath估算出，考虑道路建设、维修情况下的总能耗比单独考虑车辆运行的能耗高出10%以上。现阶段的GHG排放随着道路拓宽、车辆保有量的增加还会有所上升，虽然未来会有新能源替代，但通过改善车辆自身性能和燃料性质而降低能耗和GHG排放的措施实施起来收效较缓，因此，重点考虑上述10%的能耗，通过采取相应的措施减低道路建设、维护阶段的能耗是可以实现的。

我国温室气体排放量巨大，减缓温室气体排放是我国能源战略调整的重要方向。交通运输业排放的污染物和温室气体约占我国全社会排放总量的8%，是耗能大户，也是节能减排的重点领域。

1.1.2 研究意义

在公路建设或养护过程中，对碎石、沥青等建材资源依赖性较强且消耗巨大，路面施工过程中混合料拌和、运输、摊铺与碾压时的能耗与排放不容忽视。

2016年交通部办公厅下发文件（交办公路2016[93]号），交通运输部关于实施绿色公路建设的指导意见，文件要求：践行绿色交通，完成《交通部节能环保十三五发展规划》目标，推进绿色公路建设。绿色公路的指导思想为建设以质量优良为前提，以资源节约、生态环保、节能高效、服务提升为特征的绿色公路，实现公路建设可持续发展。

响应交通运输部实施绿色公路建设要求，对高速公路维修改建工程的材耗、能耗及排放进行量化分析及评价，在决策和施工过程中，积极推进节能环保技术，降低能耗、减少温室气体排放，有助于改善生态环境、实现公路建设的可持续发展。课题具体研究意义如下：

（1）在道路维修改造过程中，会消耗大量土石、水泥、沥青等，这些原材料均为不可再生，其采集过程会破坏山体，对自然环境产生恶劣影响。研究高速公路维修改造工程中的节能减排措施便于协调交通运输对资源的依赖与资源短缺之间的矛盾，实现交通运输的可持续性发展。

（2）通过对高速公路维修改造全过程的研究，确定了沥青路面维修改造过程中所有环节的排放源和温室气体排放量以及影响温室气体排放的各种因素。该研究有利于加快我国交通运输温室气体研究步伐，丰富和发展了公路行业温室气体的研究理论，拓宽我国对温室气体排放的研究范围，使我国温室气体研究更充实和具有针对性。

（3）我国高速公路建设面广、线长，需进行维修改造的路面类型、施工工艺不尽相同。目前为止，我国尚无专门针对高速公路维修改造工程的温室气体节能减排体系，因而难以对具体的改造工程排放情况做出客观、全面的比较和评价，无法引导和促进高速公路维修改造工程节能减排技术的发展与进步。本研究可为维修改造工程施工技术方案的选择及节能环保措施的选择提供依据，建立节能减排评价模型及方法。

（4）随着国家实施节能减排政策和发展低碳经济，在现有高速公路维修改造工程中引入节能减排的评价方法，可使其与现行低碳经济的发展目标一致，从而符合环境、经济和社会可持续发展的要求。

目前，我国在沥青路面高速公路维修改造领域也开始重视节能、减排问题，逐步推广目标的可实现低碳环保的温拌技术和废旧材料循环再利用技术等，尽量做到节约资源，减少温室气体排放，也取得了较好的经济、社会效益。但尚无沥青路面维修改造过程能耗与排放的定量分析，缺少养护或大修等维修改造过程温

室气体的排放特征与排放量情况相应的测定方法与评价体系，导致沥青路面节能减排技术的开发与应用具有较强的局限性、节能减排效果难以定量评价等问题。因此，为了完善道路环保建设，加快沥青路面养护大修等维修改造过程节能减排工作的实施，系统研究沥青路面养护或改造过程中能耗、气体排放评价方法与评价体系，在当前时代背景下显得尤为重要和迫切。

本文以京台高速公路合肥至蚌埠段沥青路面改建工程为依托，依据绿色公路建设理念，建立高速公路沥青路面维修改造工程节能、减排分析评价模型框架；对原材料生产期、沥青路面施工期的能耗、排放进行量化分析，提出沥青路面改建（养护）工程能耗及排放评价指标体系及节能减排综合评价方法，对比不同技术措施、不同施工环节的能耗及排放量，明确节能减排重点，提出节能减排措施；从节能减排角度对高速公路改建（养护）工程的技术决策、管理、实施及评价提供指导。

1.2 依托工程

本课题依托工程为京台高速公路蚌埠至合肥段，是国道主干线北京至福州公路的重要路段，也是安徽省“十字”形南北高速贯通线中的重要组成部分，起讫点为京台高速公路 K901+077（蚌埠仁和集）-K1006+454（路口枢纽），全长 105.377km，于 2001 年竣工通车。

1.2.1 交通量及交通组成

京台高速公路蚌埠至合肥段交通量大，且重载车比例较高，重型车辆构成情况如图 1-1 所示。根据实测，单轴双轮组最大轴重达到了 30 吨，双轴双轮组最大轴重达到了 40 吨，三轴双轮组最大轴载达到了 62 吨。单轴双轮组、双轴双轮组和三轴双轮组的超限比例即超载率分别为 37%、50%、77%，三轴双轮组的超载现象最为严重。

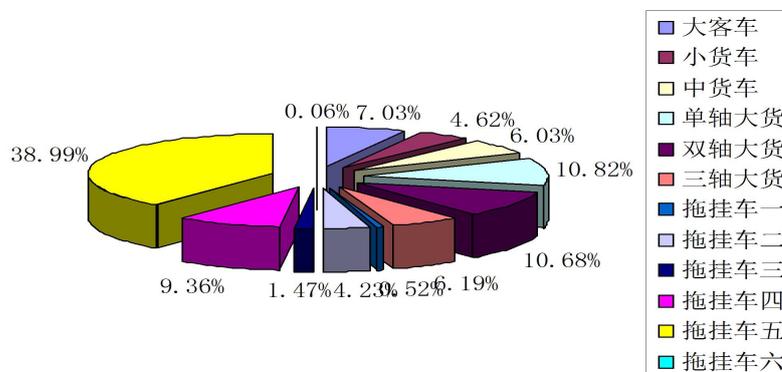


图 1-1 京台高速公路蚌埠至合肥段交通组成

Fig 1-1 The traffic composition for Bengbu to Hefei section of G3 Beijing-Taipei Expressway

1.2.2 病害特征

在重载交通和环境等因素作用下，京台高速公路路面结构逐渐出现纵向裂缝、横向裂缝、坑槽、车辙、唧浆等病害。其中最主要病害形式为纵向裂缝和横向裂缝，部分路段裂缝严重。根据现场调查，纵向裂缝主要集中于行车道，横向裂缝主要集中于超高道（行车道已维修量比例较大），各种病害分布列于表 1-1 中。

表 1-1 京台高速公路蚌埠至合肥段路面病害统计

Tab 1-1 The pavement distress statistics for Bengbu to Hefei section
of G3 Beijing-Taipei Expressway

| 分幅 | 行车道 | | | | | 超车道 | | | | |
|----|---------------|---------------|----------------------|----------------------|-----------------------------|---------------|---------------|----------------------|----------------------|-----------------------------|
| | 横向 裂缝 m | 纵向 裂缝 m | 坑槽 m ² | 网裂 m ² | 唧浆及 沉陷 m ² | 横向 裂缝 m | 纵向 裂缝 m | 坑槽 m ² | 网裂 m ² | 唧浆及 沉陷 m ² |
| 右幅 | 2216 | 8736 | 3235 | 946 | 298 | 10036 | 2064 | 3937 | 3112 | 80 |
| 左幅 | 3338 | 7915 | 8423 | 2864 | 1166 | 8319 | 820 | 1906 | 476 | 156 |
| 合计 | 5554 | 16651 | 11658 | 3810 | 1464 | 18355 | 2884 | 5843 | 3588 | 236 |





图 1-2 沥青面层及铣刨后水稳基层纵向裂缝

Fig 1-2 Longitudinal cracks of asphalt surface and cement-stabilized macadam base after milling

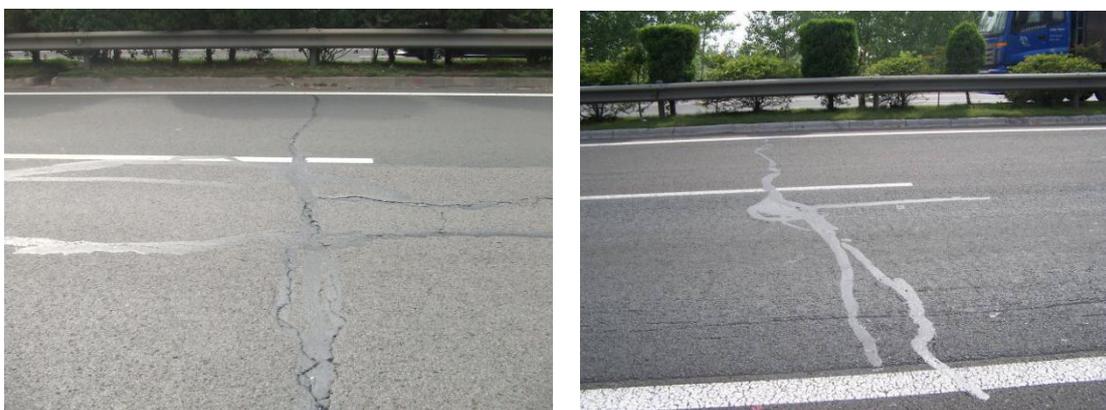


图 1-3 路面横向裂缝

Fig 1-3 Transverse cracks





图 1-4 路面唧浆病害

Fig 1-4 Mud-pumping diseases

1.2.3 依托工程改建维修方案

依托改建工程项目主要针对路面层状况较差路段进行铣刨重铺，纵向裂缝严重且沉陷路段上基层也需铣刨重铺（方案 A、方案 B），其余路段基层视基层评价结果和现场状况综合确定是否需要铣刨。对于存在局部功能性病害但结构层状况良好的路段，先修复处理病害，然后采用精铣刨拉毛工艺处理路面，最后进行直接加铺的维修方案。

| |
|-----------------------|
| 4cmSBS 改性沥青混凝土 SMA-13 |
| 6cmSBS 改性沥青混凝土 AC-20C |
| 8cm 普通沥青混凝土 AC-25C |
| 15cm 乳化沥青冷再生混合料 |
| 铣刨修复后原水泥稳定碎石下基层 |

方案 A

| |
|---------------------------|
| 4cmSBS 改性沥青混凝土 SMA-13 |
| 6cmSBS 改性沥青混凝土 AC-20C |
| 8cm 普通沥青混凝土 AC-25C |
| 15cm 大粒径沥青碎石(LSPM-30)基层重铺 |
| 铣刨修复后原水泥稳定碎石下基层 |

方案 B

图 1-5 铣刨重铺技术方案

Fig 1-5 Technical plan of milling and relaying

在该改建项目中还应用了高聚物注浆技术、温拌沥青技术、石灰土再生及水泥稳定碎石再生技术等。

1.3 国内外研究现状

现今，国内外主要使用生命周期分析方法和运用生命周期理念进行沥青路面节能减排量化研究，且研究主要针对新建道路，主要研究方向是对沥青路面能耗和排放进行量化分析和建立节能减排量化分析的评价体系两个方面。

1.3.1 国外研究现状

(1) 运用生命周期方法对沥青路面建设进行评价分析

为了对温室气体排放进行准确评价，国外最早在温室气体研究领域使用生命周期分析方法。国际环境毒理学与化学学会（SETAC）于1990年主持召开了有关生命周期评价的国际研讨会，首次提出了“生命周期评价”的概念。随着生命周期分析方法在能源与温室气体排放分析预测中的应用日趋成熟，很多国家开始将这种方法应用于公路建设的环境影响分析。目前国外研究人员在沥青路面生命周期分析中所采用的研究方法包括：基于流程的生命周期分析方法、基于输入-输出模型的生命周期分析方法和综合性生命周期分析方法。

进在生命周期分析中需要划分合理的阶段。沥青路面在使用寿命期限内的各种工程活动都属于其生命周期阶段，细化为具体的阶段后包括设计、材料生产、施工等。目前，还没有统一的标准规定沥青路面生命周期的阶段该如何划分，通常是根据分析研究问题的目的和要求合理划分。目前主要的划分方式是将沥青（水泥）路面生命周期划分为材料生产阶段、施工阶段、使用阶段（包括养护阶段）以及寿命周期末四个主要阶段，并以此进行生命周期能耗与排放的量化研究。

Håkan Stripple^[1]采用生命周期评价方法分析瑞典的水泥路面和沥青路面整个生命周期过程（建设、维修、拆除和建筑废料回收）的能源消耗与温室气体排放情况，建立了两种路面的评价模型，得出公路运营期为40年时沥青路面每公里在建设和维修期的能耗为23TJ，水泥混凝土路面为27TJ。

Häkkinen 和 Mäkelä^[2]应用生命周期分析方法（Process LCA），以芬兰国家调查统计数据为基础，计算比较了设计年限50年内，沥青玛蹄脂碎石路面与水泥混凝土路面的材料生产阶段、施工阶段以及运营阶段能耗与排放，得出运营阶段产生的排放大约是其他阶段排放量总量的2倍，水泥混凝土路面CO₂排放量比沥青路面高40%~60%，沥青路面能耗约是水泥混凝土路面的2倍。

Pablo Zapata 和 John A.Gambatese^[3]基于生命周期法研究了连续配筋混凝土路面和沥青路面建设过程的能耗情况。沥青混凝土路面建设中的能耗主要集中在混合料拌合、集料加热（约占总能耗48%）以及沥青生产（约占40%）三个部分。

Park 等^[4]应用综合性生命周期分析方法将国家能源消耗平衡表与韩国的经济投入-产出模型相结合,分析了路面生命周期材料生产阶段(原材料生产,施工,维修和回收阶段)各部分的能源消耗量以及所使用能源对环境产生的影响。结果显示原材料生产阶段能源消耗最多,相当于每单位(即1公里的四车道高速公路)消耗 1525.8 吨油当量。能耗量大小排序为原材料生产>维修阶段>施工和再生。

Hanson Christopher 和 Noland Robert^[5]给出了在生产热拌,温拌及冷拌沥青混合料温度要求下的温室气体排放估算方法。比较热拌沥青混合料,温拌沥青混合料和水泥混凝土结果显示,温拌沥青混合料的温室气体排放量可能仅相当于水泥混凝土生命周期温室气体排放量的 34%,相当于热拌沥青混凝土温室气体排放量的 76%。

Raja Chowdhury 等^[6]应用基于流程的生命周期分析方法,研究了比较新集料、再生集料、粉煤灰以及高炉底灰用于路面建设所产生的环境影响,认为再生料在降低能耗、减少气体排放和对环境友好等方面更有优势。

(2) 沥青路面能耗和排放评价体系及指标

在沥青路面节能减排量化分析的基础上,建立能耗与排放的评价体系也是目前国内外研究的重点内容之一。

Darrell Cass 等^[7]对一条位于密歇根州西南部的州际干线公路大修工程的能耗及环境影响采用综合性生命周期分析方法进行了量化分析,大修工程所涉及的材料生产、运输以及施工机械运转等各项数据均为实地测得。由分析的不同对象采用不同的分析方法量化能耗与环境影响,由此建立了两个综合性生命周期分析模型,上述两个模型的分析结果表明,该大修工程每英里车道的 CO₂ 排放分别为 787.19 兆吨和 1383.28 兆吨,材料、燃料及机械加工生产过程产生的 CO₂ 排放为总排放的 90%以上。

以 Arpad Horvath 教授为首的科研小组开发了 PaLATE^[8],这是一个严格按照 ISO 14040 标准确定生命周期分析步骤,采用综合性生命周期分析方法的路面环境与经济效益生命周期分析评价系统,它考虑了路面建设的材料生产阶段、施工阶段、养护维修阶段以及使用寿命终止阶段的能源消耗和气体排放。

美国威斯康星大学再生资源研究中心的 Lee Jincheol 等开发了针对公路建设项目的道路建设环境与生态可持续评价系统 BE²ST (Building Environmentally and Economically Sustainable Transportation Infrastructure-Freeways)。BE²ST 以道路工程建设项目为评价对象,根据可持续性发展的 4R 原则 (Reduce-Recover-Reuse-Recycle, 即减量化、回收化、再利用、再循环)和可持续发展国际研究中心提出的贝拉吉奥原则^[9],在综合考虑施工方、管理方及使用方等各方面要求的基础上,选择健康安全、温室气体排放、能源消耗、水资源消耗、材料循环利用以

及生命周期成本作为评价指标，并采用会议讨论的方式确定了各个评价指标的标准值。

表 1-2 BE²ST 评价系统评价指标及标准

Tab 1-2 Evaluation index and criterion of BE²ST evaluation system

| 评价指标 | 健康安全 | 温室气体 排放 | 能源消耗 | 水资源 消耗 | 材料循环 利用 | 生命周期 成本 |
|------|------------------|--------------|-------------|-----------------|-----------------|------------------|
| 评价标准 | 有害材料用 量减少 10% | 排放量减少 24% | 能耗降低 10% | 水资源消耗 降低 10% | 材料循环利 用率 20% | 生命周期成 本减少 10% |

2007 年美国华盛顿大学 Martina Soderlund 在硕士学位论文《可持续性道路设计-环境影响评价模型》^[10] 中从可持续发展角度系统研究了道路环境影响评价，并建立了量化分析评价模型，该模型即为 Greenroads 道路环境影响评价体系的雏形。在此基础上，华盛顿大学的科研小组进行了进一步深入的研究，并于 2008 年与美国西图集团 (CH2M HILL Cos., Ltd) 合作，提出了 Greenroads 评价指标体系。

1.3.2 国内研究现状

(1) 运用生命周期方法对沥青路面建设进行评价分析

我国最初在土木工程领域引入生命周期评价法，主要应用于建筑领域。目前，在公路建设中的相关文献较少，已做的研究多用于水泥路面生命周期评价，而用于沥青路面的很少。

尚春静等^[11]用原材料生产和加工、公路施工、公路运营养护、拆除回收四个阶段划分公路生命周期过程进行公路环境分析，定量计算了高速公路生命周期的能耗和气体排放，结果显示能耗量由多到少依次是：建筑材料生产阶段、公路建造阶段、养护阶段、拆除废弃阶段。公路生命周期按 20 年计算，1 功能单位高速公路共消耗 2512.89t 标准煤，排放的温室气体 CO₂2197.83t、NO_x14.94t。

潘美萍^[12]将高速公路全寿命周期分为四个阶段（材料物化阶段、建设施工阶段、运营管理阶段和结构拆除阶段），建立了高速公路能源消耗和 CO₂ 排放的计算模型，归纳整合了高速公路相关产品的能耗和碳排放清单。对高速公路全寿命周期的四阶段进行清单分析，用于量化分析不同高速公路（半刚性基层沥青路面 I、柔性基层沥青路面 II 和水泥混凝土路面 III）在寿命在生命周期各阶段的能源消耗和温室气体排放，以此为基础尝试提出高速公路在节能减排方面的改进措施。

2012 年杨博^[13]等人以生命周期为分析视角，采用文献调查与现场调查相结合的方式，调查了沥青混合料生产过程、沥青路面建设过程、运营使用过程的能耗及气体排放情况，分析影响沥青路面能耗与排放的关键工序，建立节能减排基本框架。

(2) 沥青路面能耗和排放评价体系及指标

四川大学在借鉴国外成果的基础上,研发了 eBalance 评价系统,该系统不仅支持国外常见的环境影响分析,还提供了中国本地化的资源特征化因子、归一化基准值和节能减排权重因子,让普通的 LCA 与中国的节能减排政策目标联系在一起,提升了 LCA 在本国的工作价值,推动 LCA 在国内应用的发挥。

长安大学杨博、张争奇^[13]遵循科学性、约束性和激励性原则选取沥青路面节能减排评价指标,分别提出 I 水平和 II 水平评价指标的基准值,建立沥青路面节能减排评价指标体系。同时,以 Excel 为平台,设计开发实用简便的沥青路面节能减排分析评价系统 E³SAP。

长安大学蔺瑞玉、沙爱民^[14],提出了沥青面层和半刚性基层建设过程温室气体排放总量模型,基于评价指标、测算方法和模型构建了沥青路面建设过程温室气体排放评价体系。评价体系边界涵盖路面工程建设中沥青混凝土面层、半刚性基层温室气体直接排放和能源间接排放涉及的所有生产阶段和施工环节。评价体系框架包含目标层、准则层、一级指标层、二级指标层和变量层,变量层即每一指标对应的评价影响因素。提出了沥青路面温室气体排放总量评价标准的确定方法,根据不同等级道路路面材料用量的差异性确定了温室气体排放公路等级系数。

重庆交通大学王婷婷、郭小宏^[15],以重庆某高速公路为实例,基于“绿色道路”评价系统和绿色施工评价体系提出绿色养护理念,从技术角度、环境影响、资源再利用、交通与运营影响构建绿色养护评价体系,综合评价现有的预防性养护技术,为合理选择养护措施提供参考依据。

商东旭,史纪村^[16],选取包括资源利用评价指标(RUI)、能源消耗评价指标(ECI)、环境污染指标(EPI)和交通影响指标(TII)的沥青路面养护工程节能减排评价指标,确定了沥青路面养护工程节能减排评价指标判定标准以及沥青路面养护工程节能减排一级评价指标和二级评价指标的权重,建立了沥青路面养护工程节能减排综合评价方法及其评价流程。

长安大学齐乐^[17],铜鼓分析宝汉高速汉中至陕川界路面施工现场过程中能耗与排放,提出了沥青面层施工阶段可控的节能降排评估指标体系,采用专家打分的方法确定施工过程中沥青面层节能降排评估指标系统中各个指标的比重,提出了路面面层施工过程中节能降排措施。

长安大学陈力维^[18]分析了沥青道路运营期间的能耗,采取实例分析和实验研究的方法,得到沥青路面运营期间“路面状况—速度—能耗”的模型,从环境影响和经济调节的角度,提出环境影响综合分析和经济指标分析方法。

从国内外关于沥青路面节能减排量化分析研究现状可以看出,国内外对于沥青路面节能减排量化分析与评价已经开展了大量工作,并取得了较多可借鉴的研

究成果。但相对而言，沥青路面节能减排分析与评价研究尚属于较新的研究领域，仍需要进一步的完善研究。本课题重点从以下方面开展研究：（1）大修工程节能减排量化分析，以前的研究侧重于新建沥青路面工程，本课题关注沥青路面改造维修工程，对原材料生产、面层基层施工期的能耗及排放进行量化分析，评价厂拌冷再生基层、基（底）层材料水泥现场再生、温拌沥青、高聚物注浆等工艺的节能减排效果；（2）节能减排量化分析数据规范化采集，数据是量化分析的根本，有些研究多依赖资料调研，和实体工程存在脱离，本课题依托实体工程，充分调研，使选取的数据科学合理，为节能减排分析提供科学依据；（3）探讨沥青路面改建维修工程节能减排效果评价的指标及方法，基于绿色公路理念，充分考虑大修工程的特点，合理选择评价指标，评价标准，采取多指标体系建立沥青路面大修工程节能减排分析评价体系，为沥青路面大修工程节能减排决策及实施效果评价提供依据与方法。

1.4 研究内容与技术路线

1.4.1 研究内容

本课题研究内容包括以下五个部分：

（1）沥青路面改建工程节能、减排分析与评价模型框架。

建立在沥青路面建设或改建工程中运用清单分析法的流程，提出基础数据采集内容及数据采集原则，结合依托实体工程，对沥青路面改建工程沥青面层、冷再生基层和大粒径碎石基层清单单元进行划分。依据生命周期分析方法，结合绿色公路的要求及改建工程自身特点，明确了能耗、排放的量化计算方法，建立适用于沥青路面改建工程节能减排量化分析评价的基本模型框架。

（2）原材料生产期能源消耗与排放量化分析。

分析原材料生产过程的能耗类型及排放源，现场调研与资料调研相结合，量化分析分析沥青、乳化沥青、水泥、集料、冷再生材料生产的能耗及排放，提出原材料生产期的节能减排措施。

（3）施工期材料消耗、能源消耗与气体排放量化分析。

在现场调查的基础上，量化分析沥青面层、冷再生基层、大粒径沥青碎石基层技术方案施工期材料消耗、能源消耗与排放量，分析施工过程中各个环节的能耗与排放，分析不同基层方案的能耗排放差异，提出沥青面层及基层施工期的节能减排措施。

（4）沥青路面大修工程节能减排技术措施应用效果评价。

对厂拌热再生沥青面层、厂拌冷再生基层、水泥再生土底基层、高聚物注浆等节能减排技术方案的能耗、排放进行量化分析，评价其使用性能及节能减排效果，为沥青路面节能减排技术决策提供依据。

(5) 基于绿色理念的沥青大修工程节能、减排评价方法研究。

在对沥青路面改建工程原材料生产过程与路面施工过程中材耗、能耗、气体排放量化分析的基础上，以“节材、节能、减排”评价为核心，确定沥青路面改建工程节能减排评价指标体系，提出基于绿色理念的节能减排综合量化评价方法，为沥青路面改建工程节能减排技术决策、节能减排效果评价提供科学的方法。

1.4.2 技术路线

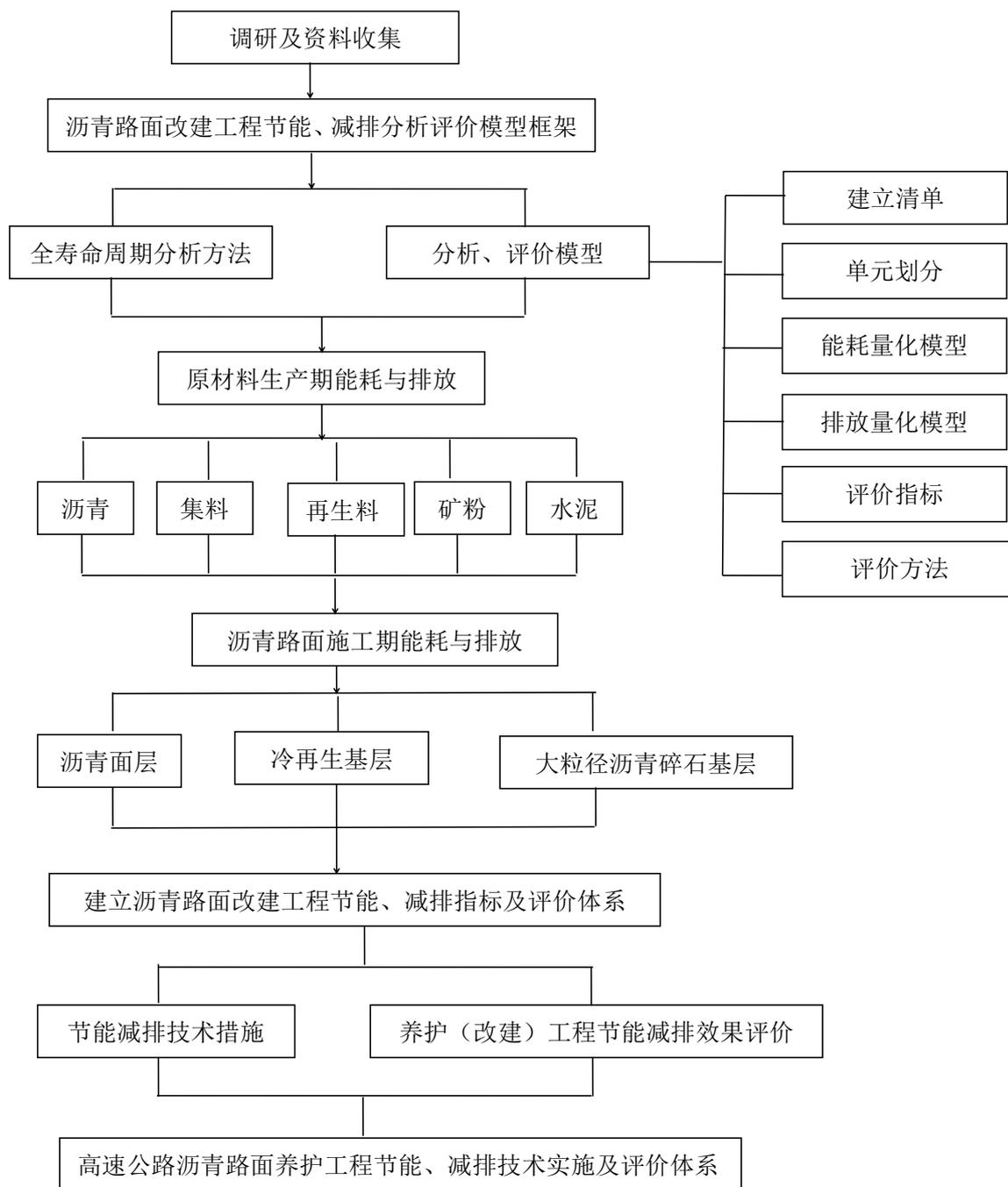


图 1-6 技术路线框图

Fig 1-6 Technology roadmap

第二章 沥青路面改建工程节能、减排分析与评价模型框架

2.1 研究方法理论基础

沥青路面维修改造过程中的能源消耗与气体排放问题,实际上是沥青路面维修改造过程对环境的影响问题,目前,国内外主要采用生命周期分析(Life Cycle Analysis, LCA)进行环境影响量化评价。生命周期分析由于其系统性、全面性可以充分考虑沥青路面维修改造过程各个阶段不同材料、能源消耗产生的环境影响;生命周期分析透明性、科学性的特点可以保证沥青路面维修改造节能减排量化分析方法和分析结果的可靠性、公正性;生命周期分析开放性、灵活性的特点可以充分考虑沥青路面维修改造的特殊性,能够满足沥青路面维修改造节能减排量化分析的需要,有利于沥青路面维修改造节能减排量化分析方法的推广应用。目的与范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释四个部分组成LCA 分析评价过程(图2-1),这四个部分之间相互联系、不断反复。

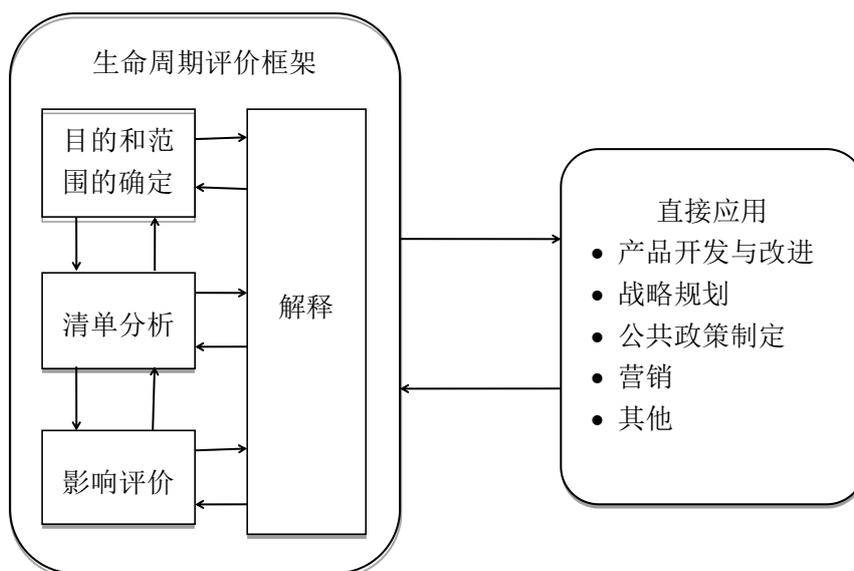


图 2-1 LCA 评价过程^[19]

Fig 2-1 Life Cycle Analysis Process

ISO 14040 标准虽然给出了生命周期分析的通用框架,可应用生命周期分析的具体方法和步骤并没有给出。国内外研究人员基于此基础,提出了开展生命周期分析的具体方法,目前常用的生命周期分析方法分为三种:基于流程的生命周期分析法(Process LCA)、输入-输出生命周期分析法(I-O LCA)以及综合性生命周期分析方法(Hybrid LCA)。根据研究,三种分析方法各有所长,但基于

流程的生命周期分析法（Process LCA）注重细节、直观简单，且应用时具有较多的研究支撑和基础（相关数据有国际和地区性组织数据库的支持），因此，本课题选择基于流程的生命周期分析法（Process LCA）。

2.2 沥青路面改建工程节能、减排分析与评价流程

2.2.1 分析研究目的与范围

（1）分析研究目的

近年来，交通运输部大力发展低碳交通运输体系，致力于建设资源节约型、环境友好型交通运输行业，推进交通运输绿色、循环、低碳发展，并要求把低碳发展的理念落实到交通运输各个环节中。而高速公路沥青路面维修改造工程，工程量大，能源消耗量大，节能减排的可实现空间也较大，对其节能减排的效果进行科学评价，非常必要。

本课题的研究目的就是采用LCA量化分析大修改建过程的能耗及排放，分析结果不仅可以衡量大修工程的节能减排效果；同时对大修工程及各技术措施的节能减排效果进行评价，从而为大修技术方案的决策提供依据。

（2）分析研究范围

根据生命周期的定义，新建沥青路面的生命周期一般分为原材料开采与生产、路面施工、运营使用、养护维修以及生命周期末五个阶段。分析各时期所产生的排放量特点，材料生产、施工与养护维修阶段是材料消耗、机械使用最为集中的阶段，也是沥青路面能耗与气体排放最为显著的阶段，因此绝大多数沥青路面生命周期分析均考虑了上述三个阶段。

对于沥青路面大修工程，其沥青路面能耗与气体排放最为集中的阶段也是在于原材料生产、施工阶段及营运阶段（大修后的营运阶段），但在营运期，车辆的能耗与排放短期内不会降低，甚至会随着服务水平的提高，交通量增加而增加。本课题将大修工程的原材料生产、施工阶段作为主要研究内容。

2.2.2 清单分析

2.2.2.1 单元划分及数据收集

可全面综合地分析一个产品或工艺的流程，通过对这个过程中能源和原材料的需求以及环境排放的量化分析，总结产品或工艺的环境特性，便于生产商找到提高产品环境性能的方法和环节称为清单分析法^[20]。它是以数据为基础，对产品、工艺或活动的整个生命周期阶段中能源、资源输入和环境排放的输出的客观量化过程^[21]。

在沥青路面建设或改建工程中，运用清单分析法，就是对沥青路面生命周期中所要分析的阶段（本课题原材料生产期及施工期）输入的能源消耗与输出的气

体排放进行量化分析的过程，是节能减排分析中最为关键的一步。清单分析的主要内容是根据沥青路面大修工程的建设流程，收集或测定能源消耗与排放过程的相关数据，并采用科学合理的计算方法，确定沥青路面大修所分析阶段的能源消耗与气体排放量，从而为沥青路面大修工程的节能减排量化分析与评价提供依据。

（1）数据收集范围

沥青路面改建工程节能、减排量化分析及评价，以能耗、排放的量化为目的，需要输入的数据包括沥青路面的设计技术方案、技术参数（配合比设计、压实工艺等）、各种燃料以及电力等能源消耗量，最终输出结果主要为分析阶段的温室气体排放量。

原材料生产过程及沥青路新建或改建过程中各种机械设备、运输车辆消耗的能源主要有车用汽油、柴油、残留燃料油（重油）、液化石油气、煤等不同形式的固、液体燃料。这些燃料在不同的使用过程中，由于燃烧器、燃烧形式的差异，导致的气体排放类型也有所差异。在原材料生产、沥青路面改建施工、道路营运期间气体（烟雾）排放类型主要有：二氧化碳 CO_2 、甲烷 CH_4 、氧化亚氮 N_2O 、一氧化碳 CO 、氨气 NH_3 、硫化物 SO_x 、氮氧化物 NO_x 、非甲烷挥发性有机物 NMVOCs 、颗粒性物质 TSP 、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 。本研究在进行评价时，重点关注温室气体的排放，即具有全球变暖效应的气体：二氧化碳 CO_2 、甲烷 CH_4 、氧化亚氮 N_2O 。

除了气体排放外，沥青路面新建或改建工程中环境影响包含的范围较广，还可能存在土地占用、土壤污染、水体污染等，尤其在沥青路面大修工程产生废弃材料较多，有可能存在土地占用、土壤污染问题。因此，考虑到大修工程的项目特点，在输出方面还要考虑材料（碎石）节约量、再生材料使用量及固体废弃物量等。

（2）划分单元

确定数据收集范围后，还需要进一步明确沥青路面改建过程中的哪些环节产生的环境影响在数据收集的范围之内，亦即明确沥青路面改建工程的哪些生产和使用环节会消耗能源并产生气体排放。本文采用基于流程的单元划分方法，以沥青混合料（冷再生混合料）的生产流程为对象，需要将沥青混合料（冷再生混合料）的生产进一步细分为若干个单元过程，最终数据表现为若干个单元过程能耗及气体排放的总和。

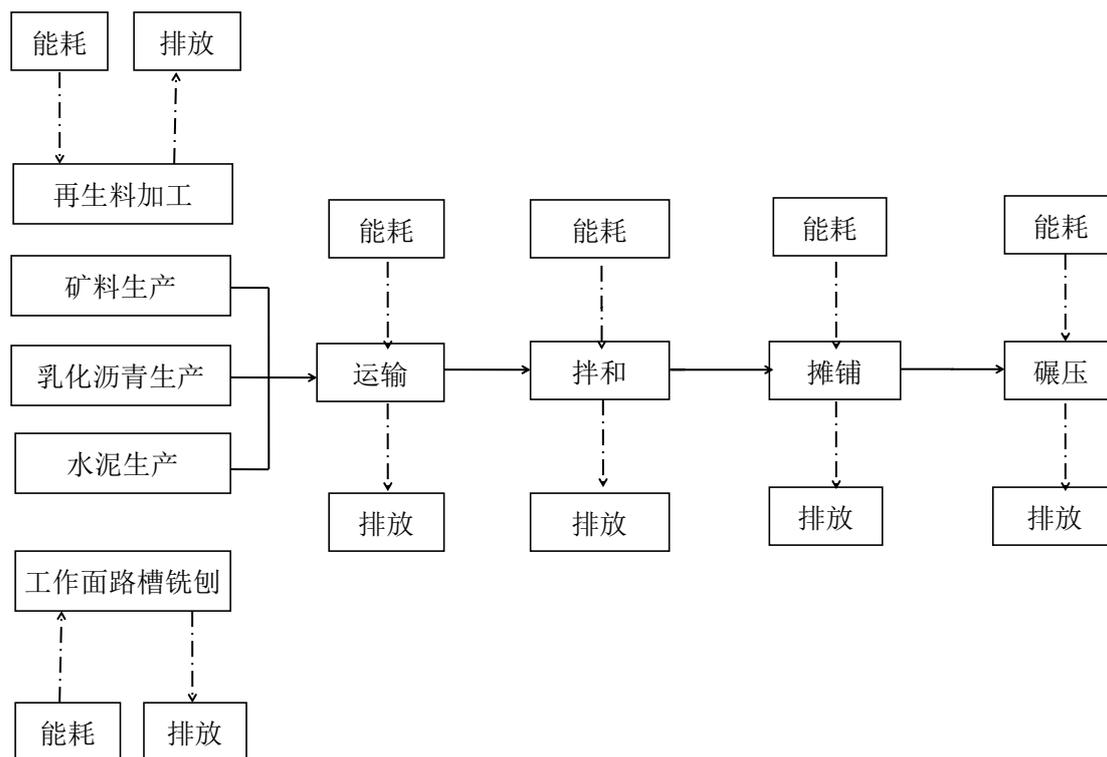


图 2-2 基于流程的冷再生基层单元划分

Fig 2-2 Process-based unit division of cold recycling base course

(3) 基础参数收集

基础参数通常包括：路面结构参数（标段划分、各标段长度、路面结构层类型及厚度、各层宽度）、材料参数（路面使用材料类型、配合比设计、实测压实度等）、施工工艺（面层、基层、底基层的拌和、碾压、养生等工艺过程及要求）、与施工工艺相关的设备、车辆参数（型号、数量、耗能形式）等。基础数据的主要作用是确定路面材料用量，确定机械设备、运输车辆的燃油（煤、电）消耗量，最终确定温室气体排放量。确定数据收集范围并合理划分单元过程后，就需要根据沥青路面改建工程的单元过程，依托实体工程，进行基础数据收集。依托改建工程共长105.377km，分为三个标段，三个标段都分别采集了基础数据。

2.2.2.2 能耗量化计算方法

(1) 数据获取

调查大修工程施工工艺等路面基础数据后，能耗可以直接通过机械设备、运行车辆的参数和使用频率计算得到。根据不同的数据来源和应用范围，新建或大修工程沥青路面的能耗量化计算方法主要有三种：实测法、理论法、定额法。实测法以沥青路面施工（原材料生产）某个特定生产工艺流程能耗的实测数据为基础，在具体工程计算中，根据实际使用的生产设备类型及运转状况，确定单位产量能耗。理论法以生产设备的标准参数为依据，计算其在标准工况下的能耗。定

额法以我国现行《公路工程预算定额》(JTG/T B06-02-2007)和《公路工程机械台班费用定额》(JTG/T B06-03-2007)为依据,首先根据预算定额规定的施工工艺流程,确定单位产量的机械台班数量;然后根据机械台班费用定额规定的机械设备单位台班能耗参数,确定能耗总量;最终计算得到单位产量的能耗。本课题采用依托实体工程,“实测法为主、理论法为辅”的能耗量化计算方法,使计算结果可以真实表达依托大修工程的能耗,同时为后续研究提供基础数据积累。

(2) 能耗换算

在能耗计算过程中,沥青路面原材料生产或路面施工中不同设备使用的能源种类不同,有固体状态的煤、还有液体的汽油、煤油、柴油,还有电源,不同种类的能源不仅单位不同,其产生的动力效果也不同,各种能源对应的排放也不同。量化、评价时,都需要不同能源进行累加,得到统一的数据,代表其综合能源消耗量,否则无法进行评价。

目前,生命周期分析方法中多采用净发热值法计算能源消耗量。燃料通过燃烧发热释放自身能量,可以采用燃料的发热值将能源消耗值转换为普通能源单位(焦耳J)。联合国政府间气候变化专门委员会 IPCC 经统计分析后得出了不同燃料的净发热值统计数据(表2-1)。

表 2-1 燃料净发热值数据^[18]

Tab 2-1 Net calorific value of fuels

| 燃料类型及英文说明 | 净发热值 | 较低 | 较高 |
|--------------------------------|------|------|------|
| 车用汽油Motor Gasoline | 44.3 | 42.5 | 44.8 |
| 汽油/柴油Gas/Diesel Oil | 43.0 | 41.4 | 43.3 |
| 残留燃料油Residual Fuel Oil | 40.4 | 39.8 | 41.7 |
| 液化石油气Liquefied Petroleum Gases | 47.3 | 44.8 | 52.2 |
| 无烟煤Anthracite | 26.7 | 21.6 | 32.2 |

注:较低与较高值是95%置信区间的下限和上限;重柴油可参考残留燃烧油

根据以上方法,可按公式2.1计算净发热值:

$$E = \sum_{i=1}^n (F_i \times NCV_i) \quad (2.1)$$

我国的GB/T 2589-2008《综合能耗计算通则》^[22],规定用能单位实际消耗的燃料应以其低(位)发热量为计算基础,并且折算为标准煤量 kgce^[23]。低(位)发热量等于29 307千焦(kJ)的燃料,称为1千克标准煤(1 kgce)。表2-2中总结的几种沥青路面新建或改建过程中涉及到的各种机械设备、车辆常用燃料的平均

低位热值及折算的标准煤系数。

表 2-2 几种能源的平均低位发热值及折算标准煤系数

Tab 2-2 The average low calorific value and coefficient of standard coal
for several kinds of energy

| 能源名称 | 平均低位发热量 | 折标准煤系数 |
|---------|-----------------------------|----------------------------|
| 原煤 | 20908KJ/kg(5000kcal/kg) | 0.7143kgce/kg |
| 洗精煤 | 26344KJ/kg(6300kcal/kg) | 0.9000kgce/kg |
| 原油 | 41816KJ/kg(10000kcal/kg) | 1.1572kgce/L |
| 燃料油 | 41816KJ/kg(10000kcal/kg) | 1.4286kgce/kg |
| 汽油 | 43070KJ/kg(10300kcal/kg) | 1.4714kgce/kg |
| 煤油 | 43070KJ/kg(10300kcal/kg) | 1.4714kgce/kg |
| 柴油 | 42652KJ/kg(10200kcal/kg) | 1.2194kgce/L |
| 液化石油汽 | 50179KJ/kg(12000kcal/kg) | 1.7143kgce/kg |
| 油田天然气 | 38931KJ/kg(9310kcal/kg) | 0.9541kgce/ m ³ |
| 电力（当量值） | 3600KJ/(kw.h)(860kcal/kw.h) | 0.1229kgce/(kw.h) |

MJ 与标准煤的换算关系为 1kgce 标准煤=29.307MJ，净发热值也可以同标准煤量进行换算。本课题，将能耗统一转化为标准煤量。

2.2.2.3 排放量化计算方法

在原材料生产、沥青路面改建施工、道路营运期间气体（烟雾）排放类型主要有：二氧化碳 CO₂、甲烷 CH₄、氧化亚氮 N₂O、一氧化碳 CO、氨气 NH₃、硫化物 SO_x、氮氧化物 NO_x、非甲烷挥发性有机物 NMVOC_s、颗粒物等，这些气体及颗粒对环境的影响是不同的。联合国环境规划署（UNEP）、国际环境毒理学与化学学会（SETAC）以及中科院生态环境研究中心分别给出了生命周期影响评价中清单结果的具体类别^[24]，主要包括臭氧耗竭、全球变暖、生态毒性等。本文结合沥青路面维修改造工程节能减排量化分析的需要以及清单分析的数据收集范围，将沥青路面生命周期清单分析结果划分为材料消耗、能源消耗以及环境排放三个大类，排放的具体的分类如表 2-3 所示。

表 2-3 气体排放影响类别、影响因子及特征因子^[25]

Tab 2-3 Influenceing category、influencing factors and characteristic factors of emissions

| 影响类别 | 气体 | 影响因子 | 特征因子 |
|------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------|
| 全球变暖 | CO ₂ | Kg等效CO ₂ (IPCC100年模型) | 1 |
| | CH ₄ | | 25 |
| | N ₂ O | | 298 |
| 酸化效应 | SO _x | Kg等效CO ₂ | 1 |
| | NO _x | | 0.7 |
| | NH ₃ | | 1.88 |
| 健康危害 | SO _x | Kg等效益, 4-二氯苯 | 0.096 |
| | NO _x | | 1.2 |
| | CO | | 2.4 |
| | NMVOC | | 0.64 |
| 颗粒物 | PM ₁₀ 、PM _{2.5} | kg | 1 |

注：全球变暖采用IPCC第四次报告中的100年气候变暖潜势数值；SO_x数据采用SO₂数据，NO_x数据采用NO₂数据。

对于环境排放，排放的不同气体对环境的影响程度是不同的。例如，在全球变暖类别中，CO₂、CH₄、N₂O 所引起的温室效应是不同的。因此需通过科学的过程，选择不同影响类别的代表因子，即特征因子，将其他影响因子的作用通过特征因子唯一表征，从而汇总得到某个影响类别以量化数值表示的影响能力。目前，国内外通常采用当量模型，即以特征因子作为当量系数来进行清单分析结果的特征化，其计算公式如式 2.2 所示：

$$EI_i = \sum_j (I_{ij} \times C_{ij}) \quad (2.2)$$

式中：EI_i为第i个影响类别的特征化结果；I_{ij}为第i个影响类中，第j个影响因子的清单分析结果；C_{ij}为第i个影响类中，第j个影响因子的特征参数。

本研究进行沥青路面改建工程节能减排清单分析归类结果的特征化同样采用上述当量模型，其中的影响类别、影响因子以及各影响因子对应的特征因子如表 2-3 所示。该表中数据来源为联合国政府间气候变化专门委员会 IPCC 及国际应用系统分析学会 IIASA。将得到的污染物排放量，按表 2-3 结果分类、统计，可得环境影响的排放效应。

依托改建工程的建设目标是绿色公路，目前我国基于公路新建工程已经初步建立绿色低碳公路的评价指标体系，该指标体系中包含强度性指标（能耗强度、

二氧化碳排放强度)、体系性指标(绿色低碳技术应用)、保障性指标、特色性指标四个方面的一级指标。从该体系可看出,绿色公路建设,最关注的气体排放是二氧化碳,因此本课题也以二氧化碳及其他具有温室效应的气体为主要研究对象,对温室气体排放进行量化分析及评价。

应用清单分析法对实际工程的温室气体排放量进行测算时,其计算方法采用实测数据与排放因子乘积的方法,排放因子采用我国发改委公布数据。计算方法见式2.3和2.4。

$$\text{排放}_{GHG, HG} = \text{燃料消耗}_{\text{燃料}} \times \text{排放因子}_{GHG, HG} \quad (2.3)$$

$$\text{总排放}_{GHG, HG} = \sum \text{排放}_{GHG, HG} \quad (2.4)$$

其中:排放_{GHG, HG}——按燃料类型给出的温室气体排放;

燃料消耗_{燃料}——燃料的消耗量;

排放因子_{GHG, HG}——按燃料类型给出的温室气体排放因子。

表 2-4 温室气体排放因子^[26]

Tab 2-4 Emissions factors of greenhouse gases

| 排放形式 | 能源类别 | 燃料 | 排放因子 | | |
|------|------|-----|----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| | | | 二氧化碳 (CO ₂) | 甲烷 (CH ₄) | 氧化亚氮 (N ₂ O) |
| 固定源 | 煤 | 原料煤 | 2.69Kg CO ₂ /Kg | 2.85E-05Kg CH ₄ /Kg | 4.27E-05 Kg N ₂ O/Kg |
| | | 燃料煤 | 2.53Kg CO ₂ /Kg | 2.68E-05Kg CH ₄ /Kg | 4.02E-05 Kg N ₂ O/Kg |
| | | 无烟煤 | 3.09Kg CO ₂ /Kg | 3.14E-05Kg CH ₄ /Kg | 4.71E-05 Kg N ₂ O/Kg |
| | 燃料油 | 原油 | 2.76Kg CO ₂ /L | 1.13E-04Kg CH ₄ /L | 2.26E-05 Kg N ₂ O/L |
| | | 柴油 | 2.73Kg CO ₂ /L | 1.11E-04Kg CH ₄ /L | 2.21E-05 Kg N ₂ O/L |
| | | 汽油 | 2.26Kg CO ₂ /L | 8.16E-04Kg CH ₄ /L | 2.61E-04 Kg N ₂ O/L |
| 移动源 | 油 | 柴油 | 2.73Kg CO ₂ /L | 1.44E-04Kg CH ₄ /L | 1.44E-04Kg N ₂ O/L |

CO₂是人类活动最常产生的温室效应气体,为将温室效应气体特征化,引入CO₂当量的概念。CO₂当量就是将不同的温室气体根据温室效应的程度高低,转化成等效的CO₂排放量,以CO₂作为评估温室气体全球暖化潜势的基准气体,其全球暖化潜势为1。通常全球变暖潜势评估时间取100年。参考IPCC第四次调查数据^[23],温室气体的全球暖化潜势及其特征因子见表2-3。二氧化碳当量的计算方法如下:

$$G_c = \sum g_i \times EF_{i, j} \times q \quad (2.5)$$

式中: G_c ——CO₂当量 (kg);

g_i ——i类燃料的消耗量 (L/kg);

$EF_{i,j}$ ——i 类燃料j 类温室气体排放因子（见表2-3）；

q ——温室气体的特征因子。

根据沥青路面原材料生产及施工过程排放源能源消耗量，采用温室气体排放计算模型（2.5）进行计算。

由表2-3和2-4中给出的数值，可依据式2.5计算得出不同能源的CO₂当量排放因子，可更便利的进行温室气体排放的统计计算，见表2-5。

表 2-5 CO₂ 当量排放因子

Tab 2-5 Emissions factors of carbon dioxide equivalence

| 排放形式 | 能源类别 | 燃料 | CO ₂ 当量排放因子 | |
|------|------|-----|------------------------|------------------------|
| 固定源 | 煤 | 原煤 | 2.703kg/kg | |
| | | 洗精煤 | 2.545kg/kg | |
| | | 无烟煤 | 3.105kg/kg | |
| | 燃料油 | 原油 | 3.037kg/L | |
| | | 柴油 | 2.619kg/L | |
| | | 其他 | 天然气 | 1.882kg/m ³ |
| | 移动源 | 燃料油 | 电力 | 0.618kg/(kwh) |
| | | | 汽油 | 3.028kg/L |
| | | | 柴油 | 2.654kg/L |

2.2.3 节能减排效果评价

对工程项目节能减排量化分析后，要对节能减排的效果进行综合评价，其结论、建议也可为同类工程提供科学合理的指导。沥青路面新建或改建工程节能减排效果评价应包含以下内容：①评价指标的选择。目前针对沥青路面节能减排量化评价研究提出了较多的评价指标，而且不同的研究由于其研究对象、目的等因素的差别，所采用的评价指标也互不相同。为此，需要以沥青路面节能减排量化分析评价的目的与范围为基础，考虑工程项目建设方、管理方以及社会公众的要求，在现有技术水平的条件下，从保证评价结果准确、公正、客观的前提下，合理确定评价指标的选择原则。②确定指标权重。所确定的各评价指标，对于节能减排的影响程度是不同的，为了合理反应影响程度的差异，应赋予各指标不同的权重。③确定指标标准值。根据社会发展平均水平或行业要求，确定评价的标准。④综合量化评价。在确定评价指标、指标权重的基础上，采用模糊评价、灰色评价理论等综合评价方法，结合交通部对绿色公路的指导意义及沥青路面改建工程

的特点，建立沥青路面大修工程综合量化评价方法，提出节能减排措施，并为沥青路面大修工程节能减排量化分析与评价提供技术支撑。

2.3 本章小结

(1) 沥青路面维修改造过程中的能耗与排放问题，其实质是工程实施过程对环境的影响问题，本文采用生命周期分析 (Life Cycle Analysis, LCA) 进行能耗及环境影响量化评价。LCA分析评价过程包括确定目的与范围、清单分析、影响评价和结果解释四个部分。生命周期分析由于其开放性和灵活性可以针对性的考虑沥青路面维修改造过程，有利于沥青路面维修改造节能减排量化分析方法的推广应用。

(2) 根据生命周期的定义，新建沥青路面的生命周期一般分为原材料开采与生产、路面施工、运营使用、养护维修以及生命期末五个阶段。分析各时期所产生的排放量特点，材料生产、施工与养护维修阶段是材料消耗、机械使用最为集中的阶段，也是沥青路面能耗与气体排放最为显著的阶段，因此绝大多数沥青路面生命周期分析均考虑了上述三个阶段。对于沥青路面大修工程，其沥青路面能耗与气体排放最为集中的阶段也是在于原材料生产、施工阶段及营运阶段（大修后的营运阶段），由于营运期节能减排的空间较小，本课题依据研究目的，选择将大修工程的原材料生产、施工阶段作为研究的主要内容。

(3) 建立了在沥青路面建设或改建工程中运用清单分析法的流程，提出基础数据采集内容及数据采集原则，结合依托实体工程，对沥青路面改建工程沥青面层、冷再生基层清单单元进行划分。

(4) 根据 ISO 14040 对生命周期分析的相关规定，结合绿色公路的要求及改建工程特点，明确了能耗、排放的量化计算方法，建立了适用于沥青路面改建工程节能减排量化分析的基本模型框架。

(5) 基于交通部对绿色公路的指导意见及沥青路面改建工程的特点，得出综合量化评价的流程：评价指标的选择、确定指标权重、确定指标标准值、综合量化评价。

第三章 原材料生产期能源消耗与排放量化分析

3.1 工程基础资料及数据

3.1.1 改建方案及工程量

京台高速公路蚌埠至合肥段（依托路段）起讫点为京台高速公路 K901+077（蚌埠仁和集）~K1006+454（路口枢纽），全长 105.377km。原路面结构形式见表 3-1。

表 3-1 原路面结构型式

Tab 3-1 Structure form of original pavement

| 结构层 | 混合料类型 | 厚度(cm) |
|-----|--------|--------|
| 上面层 | AK-16A | 4 |
| 中面层 | AC-25I | 5 |
| 下面层 | AC-25I | 6 |
| 基层 | 水泥稳定碎石 | 35 |
| 底基层 | 二灰土 | 20 |

本工程依据路面的不同损坏情况及维修要求提出了六种改建方案：

| |
|-----------------------|
| 4cmSBS 改性沥青混凝土 SMA-13 |
| 6cmSBS 改性沥青混凝土 AC-20C |
| 8cm 普通沥青混凝土 AC-25C |
| 15cm 乳化沥青冷再生混合料 |

方案 A

| |
|---------------------------|
| 4cmSBS 改性沥青混凝土 SMA-13 |
| 6cmSBS 改性沥青混凝土 AC-20C |
| 8cm 普通沥青混凝土 AC-25C |
| 15cm 大粒径沥青碎石(LSPM-30)基层重铺 |
| 铣刨修复后原水泥稳定碎石下基层 |

方案 B



方案 C



方案 D



方案 E



方案 F

图 3-1 改建工程路面设计方案

Fig 3-1 Design plan for pavement of reconstructed project

依托沥青路面改建工程施工分为三个标段，三个标段施工长度、路面结构层类型及各结构层工程量见表3-2。依托改建工程沥青面层幅宽设计值为4.10m，上基层幅宽设计值为3.95m，下基层幅宽设计值为3.70m，底基层幅宽设计值为3.55m。根据设计宽度及施工里程，也可以计算每公里路面各结构层混合料材料

的用量。

表 3-2 三个标段各结构层工程量及每公里材料用量

Tab 3-2 Quantities of each structural layer and material consumption per kilometer of three sections

| 标段 | 01 | | 02 | | 03 | |
|-------------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------|-----------------------------|
| | K901+077~K939+489 | | K939+489~K974+747 | | K974+747~K1006+454 | |
| 起讫点 | 工程量 | 材料量 (m ³ /km) | 工程量 | 材料量 (m ³ /km) | 工程量 | 材料量 (m ³ /km) |
| SMA-13 | 127.0km | 164.0 | 119.0km | 164.0 | 103.0km | 164.0 |
| AC-20C | 110.0km | 246.0 | 108.0km | 246.0 | 91.0km | 246.0 |
| AC-25C | 108.0km | 328.0 | 105.0km | 328.0 | 90.0km | 328.0 |
| 冷再生 | 75.0km | 592.5 | 67.0km | 592.5 | 87.0km | 592.5 |
| LSPM-30 | 2.5km | 592.5 | 29.0km | 592.5 | 0.7km | 592.5 |
| 水泥稳定碎石 | 20.0km | 629.0 | 18.0km | 629.0 | 41.0km | 629.0 |
| 水泥稳定土 | 0.6km | 1346.0 | 0 | 0 | 3.5km | 1346.0 |
| 高聚物注浆 | 0m | - | 10466.7m | - | 1539.3m | - |
| 粘层(100m ²) | 20076.7 | - | 25774.2 | - | 21174.0 | - |
| 透封层(100m ²) | 5251.3 | - | 5901.0 | - | 47608.0 | - |

为便于量化计算工程项目原材料能耗与排放，基于表3-2中的数据，对各结构层材料总量进行统计、汇总（表3-3）。

表 3-3 三个标段各结构层材料总量

Tab 3-3 The total amount of materials of each structural layer of three sections

| 结构层 | 材料用量 | | |
|--------------------------|---------|---------|---------|
| | 01 | 02 | 03 |
| SMA-13(m ³) | 20828.0 | 19516.0 | 16892.0 |
| AC-20C(m ³) | 27060.0 | 26568.0 | 22386.0 |
| AC-25C(m ³) | 35424.0 | 34440.0 | 29520.0 |
| 冷再生(m ³) | 44437.5 | 39697.5 | 51547.5 |
| LSPM-30(m ³) | 1481.3 | 17182.5 | 414.8 |

表 3-3 三个标段各结构层材料总量 (续)

Tab 3-3 The total amount of materials of each structural layer of three sections(continue)

| 结构层 | 材料用量 | | |
|-------------------------|---------|---------|---------|
| | 01 | 02 | 03 |
| 水泥稳定碎石(m ³) | 12580.0 | 11322.0 | 25789.0 |
| 水泥稳定土(m ³) | 808.0 | 0 | 4711.0 |
| 粘层(100m ²) | 20076.7 | 25774.2 | 21174.0 |
| 透封层(100m ²) | 5251.3 | 5901.0 | 47608.0 |

在各沥青层之间及沥青层与冷再生沥青混合料(大粒径沥青碎石 LSPM)层之间,设置粘层沥青。采用改性乳化沥青,用量不低于 0.6kg/m²(折算纯沥青用量)。在水泥稳定碎石下基层与冷再生沥青混合料(或 LSPM 沥青碎石)层间设置透封层。透封层采用改性乳化沥青,用量一般为每平方米 0.9~1.0kg。

3.1.2 原材料类型及混合料配合比

依托维修改建工程中涉及到的主要工程项目包括沥青面层、大粒径沥青碎石基层、冷再生基层和水泥稳定碎石基层等,其应用到的原材料主要包括沥青、石料、沥青再生料等。原材料类型列于表3-4中。

表 3-4 沥青路面改建工程原材料类型

Tab 3-4 Type of raw materials for asphalt pavement of reconstructed project

| 结构层名称 | 原材料 | |
|--------------|---------|----------------|
| | 胶结材料 | 矿料 |
| 改性沥青上面层 | SBS改性沥青 | |
| 面层 改性沥青中面层 | SBS改性沥青 | 集料、矿粉 |
| 沥青下面层 | 普通沥青 | |
| 大粒径沥青碎石基层 | SBS改性沥青 | 集料 |
| 基层 冷再生基层 | 改性乳化沥青 | 沥青混合料再生料、集料、水泥 |
| 再生水泥稳定碎石基层 | 水泥+水 | 再生水泥稳定碎石料、集料 |
| 底基层 再生石灰土底基层 | 石灰+水 | 再生灰土 |

注:上面层集料为玄武岩,其余结构层集料均为石灰岩,基层以冷再生基层为主。

为了对原材料的能耗与排放进行量化计算,需要计算依托改建工程中各原材

料的确切用量。本文依据实际施工时三个标段的配合比设计数据（表3-5、表3-6、表3-7），分别计算三个标段各种原材料的用量。

表 3-5 01 标混合料配合比

Tab 3-5 Ratio of mixture for section one

| 混合料种类 | 配合比 | 油石比 (%) | 密度 (t/m ³) |
|---------|--|---------|------------------------|
| SMA-13 | (9.5-13.2mm): (4.75-9.5mm) :(0-2.36mm): 矿粉: 消石灰: 木质素纤维=45:30:15:8.5:1.5:0.3 | 6.3 | 2.430 |
| AC-20C | (16-26.5mm): (9.5-16mm): (4.75-9.5mm): (2.36-4.75mm): (0-2.36mm): 矿粉=28:27:17:0:24:4 | 4.4 | 2.432 |
| AC-25C | (26.5-31.5): (16-26.5mm): (9.5-16mm): (4.75-9.5mm): (2.36-4.75mm) :(0-2.36mm): 矿粉=12:27:17:20:0:21:3 | 4.1 | 2.420 |
| 冷再生 | (9.5-31.5mmRAP): (0-9.5mmRAP) : (16-26.5mm) :水泥: 矿粉 =35: 48.5:12:2:2.5 | 3.8 | 2.301 |
| LSPM-30 | (26.5-31.5mm): (16-26.5mm): (9.5-16mm): (4.75-9.5mm): (2.36-4.75mm) :(0-2.36mm): 消石灰=23:27:18:10:10:11:1 | 3.1 | 2.186 |
| 水泥稳定碎石 | (26.5-31.5mm): (16-26.5mm): (9.5-16mm): (4.75-9.5mm): (2.36-4.75mm) :(0-2.36mm):水泥=17:21:17:16:0:29:5.0 | -- | 2.350 |

表 3-6 02 标混合料配合比

Tab 3-6 Ratio of mixture for section two

| 混合料种类 | 配合比 | 油石比 (%) | 密度 (t/m ³) |
|--------|--|---------|------------------------|
| SMA-13 | (9.5-13.2mm): (4.75-9.5mm) :(0-2.36mm): 矿粉: 消石灰: 木质素纤维=37:38:15:8.5:1.5:0.3 | 6.3 | 2.445 |
| AC-20C | (16-26.5mm): (9.5-16mm): (4.75-9.5mm): (2.36-4.75mm): (0-2.36mm): 矿粉=17:24:20:10:25:4 | 4.4 | 2.426 |
| AC-25C | (26.5-31.5): (16-26.5mm): (9.5-16mm): (4.75-9.5mm): (2.36-4.75mm) :(0-2.36mm): 矿粉=8:20:20:18:10:21:3 | 4.1 | 2.416 |
| 冷再生 | (9.5-31.5mmRAP): (0-9.5mmRAP) : (16-26.5mm) :水泥: 矿粉 =35: 48.5:12:2:2.5 | 3.8 | 2.301 |

表 3-6 02 标混合料配合比 (续)

Tab 3-6 Ratio of mixture for section two(continue)

| 混合料种类 | 配合比 | 油石比 (%) | 密度 (t/m ³) |
|---------|--|---------|------------------------|
| LSPM-30 | (26.5-31.5mm):(16-26.5mm):(9.5-16mm):(4.75-9.5mm): (2.36-4.75mm):(0-2.36mm):消石灰=23:27:18:10:10:11:1 | 3.1 | 2.186 |
| 水泥稳定碎石 | (26.5-31.5mm):(16-26.5mm):(9.5-16mm):(4.75-9.5mm): (2.36-4.75mm):(0-2.36mm):水泥=17:21:17:16:0:29:5.0 | -- | 2.350 |

表 3-7 03 标混合料配合比

Tab 3-7 Ratio of mixture for section three

| 混合料种类 | 配合比 | 油石比 (%) | 密度 (t/m ³) |
|---------|--|---------|------------------------|
| SMA-13 | (10~15mm):(5~10mm):(0~3mm 机制砂):矿粉:消石灰:木质素纤维=30:42:17:10:1:0.3 | 6.3 | 2.423 |
| AC-20C | (15~25mm):(10~15mm):(0~3mm):矿粉=30:39:28:3 | 4.3 | 2.435 |
| AC-25C | (25~30mm):(15~25mm):(10~15mm):(0~3mm):矿粉=17:18:29:33:3 | 3.9 | 2.433 |
| 冷再生 | (9.5-31.5mmRAP):(0-9.5mmRAP):(16-26.5mm):水泥:矿粉=36:48:12:2:2 | 3.8 | 2.305 |
| LSPM-30 | (26.5-31.5mm):(16-26.5mm):(9.5-16mm):(4.75-9.5mm): (2.36-4.75mm):(0-2.36mm):消石灰=23:27:18:10:10:11:1 | 3.1 | 2.186 |
| 水泥稳定碎石 | (26.5-31.5mm):(16-26.5mm):(4.75-9.5mm): :石屑:水泥=19:34:25:17:5 | -- | 2.406 |

依据单幅路面每公里的工程量和混合料的配合比可以计算得出主要原材料的使用量,在计算时,考虑到集料在开采和拌合过程中会产生一定量的损耗,故采用式 3.1~3.2 计算集料的开采量。

$$V_d = (V_c \cdot A + V_0) \cdot K_s \quad (3.1)$$

$$K_s = K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7 \cdot K_8 \cdot K_9 \cdot [1 + v \cdot (K_1 \cdot K_2 - 1)] \quad (3.2)$$

V_d ——砂石原料的总开采量, t;

V_c ——沥青混合料总量, m³;

A ——每m³混合料骨料用量,一般可取2.15~2.2t/m³;

- V_0 ——其他工程砂石用量，取 $V_0=0$ ；
 K_s ——总损耗补偿系数；
 K_1 ——石粉或细砂流失补偿系数，原料为灰岩的人工砂，石粉含量较多时，可取较大值；
 K_2 、 K_4 、 K_6 ——均包括运输、堆储中的损耗；
 K_3 ——骨料加工损耗（冲洗）；
 K_5 ——无预洗工艺取1.0；
 K_7 ——级配不平衡的弃料补偿系数，一般不能超过1.2；
 K_8 ——包括成品料的堆储和运输损耗补偿系数；
 K_9 ——混合料的运输、浇筑、废料损耗补偿系数；
 v ——平均砂率，以小数计，薄壁和地下工程为0.3~0.35。
 $K_s=1.03 \times 1.01 \times 1 \times 1.01 \times 1 \times 1.02 \times 1.01 \times [1 + 0.35 \times (1.25 \times 1.02 - 1)] = 1.187$

以01标上面层为例，由表3-5可知 $V_c=164 \text{ m}^3$ ，取 $A=2.2 \text{ t/m}^3$ ， $V_0=0$ ，计算得 $K_s=1.187$ ，带入式3.1中，即 $V_d=164 \times 2.2 \times 1.187=428.3 \text{ t}$ ，由表3-6知油石比为6.3%，则SBS改性沥青用量为 $428.3 \times 6.3\%=27.0 \text{ t}$ 。可依此法计算出其他结构层的集料和沥青用量汇总于表3-10中。

表 3-8 各结构层 1km 单幅路面原材料用量统计表

Tab 3-8 Raw materials amount of each structural layer of one kilometer single carriageway

| 原材料 | 标段 | | | |
|-----|-------------|-------|-------|-------|
| | 01 | 02 | 03 | |
| 上面层 | 玄武岩 (t) | 428.3 | 428.3 | 428.3 |
| | 矿粉 (t) | 40.5 | 40.5 | 48.1 |
| | 消石灰 (t) | 7.1 | 7.1 | 4.8 |
| | 木质素纤维 (t) | 1.4 | 1.4 | 1.4 |
| | SBS改性沥青 (t) | 27.0 | 27.0 | 27.0 |
| 中面层 | 石灰岩 (t) | 642.4 | 642.4 | 642.4 |
| | 矿粉 (t) | 26.8 | 26.8 | 19.9 |
| | SBS改性沥青 (t) | 28.3 | 28.3 | 27.6 |
| 下面层 | 石灰岩 (t) | 856.5 | 856.5 | 856.5 |
| | 矿粉 (t) | 26.5 | 26.5 | 26.5 |
| | 普通沥青 (t) | 35.1 | 35.1 | 33.4 |

表 3-8 各结构层 1km 单幅路面原材料用量统计表 (续)

Tab 3-8 Raw materials amount of each structural layer of one kilometer single carriageway (continue)

| 原材料 | 标段 | | | |
|----------|-------------|--------|--------|--------|
| | 01 | 02 | 03 | |
| 冷再生上基层 | RAP料 (t) | 1352.9 | 1352.9 | 1353.9 |
| | 石灰岩 (t) | 194.4 | 194.4 | 193.4 |
| | 矿粉 (t) | 40.5 | 40.5 | 32.2 |
| | 水泥 (t) | 32.4 | 32.4 | 32.2 |
| | 改性乳化沥青 (t) | 58.8 | 58.8 | 58.8 |
| 大粒径上基层 | 石灰岩 (t) | 1547.3 | 1547.3 | 1547.3 |
| | 消石灰 (t) | 15.6 | 15.6 | 15.6 |
| | SBS改性沥青 (t) | 48.0 | 48.0 | 48.0 |
| 水稳下基层 | 石灰岩 (t) | 1642.6 | 1642.6 | 1642.6 |
| | 水泥 (t) | 82.1 | 82.1 | 82.1 |
| 水泥稳定土底基层 | 水泥 (t) | 40.4 | 0 | 40.4 |
| 粘层 | 改性乳化沥青 (t) | 1204.6 | 1546.5 | 1270.4 |
| 透封层 | 改性乳化沥青 (t) | 498.8 | 560.6 | 4522.8 |

3.2 沥青生产

3.2.1 能耗及排放量化计算模型

依托沥青路面大修工程的维修范围涉及整个路面结构,包括沥青面层、基层及少量底基层,其中上中面层使用SBS改性沥青,下面层使用普通沥青,冷再生混合料上基层使用改性乳化沥青(透封层及粘层也使用普通乳化沥青),大粒径沥青碎石上基层使用普通沥青。沥青生产工艺复杂,排放源较多。

目前,国内还没有建立系统的沥青类材料能耗与排放量化清单。本课题将参照欧洲沥青协会(European Bitumen Association)提供的清单分析成果。EBA在1999年对沥青材料进行了较为全面的生命周期清单分析,2009年对研究成果进行了进一步的更新和完善。主要研究对象是道路铺装用沥青材料,包含了针入度等级20~220(0.1mm)的石油沥青、聚合物改性沥青和乳化沥青,考虑了包括直馏、半氧化、丙烷脱等在内的多种加工流程,数据来源基本涵盖了欧洲主要工业

国家，具有较广泛的代表性^[27]。考虑到石油产品多用国外油源，国内沥青生产工艺水平同其他先进国家相当，本课题采用欧洲沥青协会得出的不同沥青生命周期清单数据^[24]。

由于生产工艺不同，石油沥青（基质沥青）、改性沥青、乳化沥青和改性乳化沥青生产过程能耗与排放存在较大的差异。但是，目前有关沥青路面生命周期的研究中，大多均未将这四种沥青分开考虑，虽然有些研究在数据清单中分别收集了石油沥青和改性沥青的材料消耗量，但是在能耗与排放量化分析中仍然采用相同的排放因子计算这三种沥青生产过程的排放，势必低估改性沥青和乳化沥青生产过程的能耗与排放，进而导致计算结果产生很大的不确定性。因此，针对依托大修工程中普通沥青、改性沥青、乳化沥青和改性乳化沥青均有使用的情况，有必要在沥青生产阶段对石油沥青、改性沥青、乳化沥青和改性乳化沥青的能耗与排放分别进行分析计算。

3.2.2 沥青生产能耗类型及排放源

沥青的生产流程为：石油-常减压渣油-普通石油沥青-改性沥青/乳化沥青。调查研究结果表明，常减压渣油生产装置消耗电能和化石燃料，溶剂脱沥青生产装置、改性沥青生产装置和乳化沥青生产装置消耗电能，因此。在沥青生产过程中主要消耗电能和化石燃料。生产过程中产生的排放包括消耗电能产生的排放，倒灌、移罐以及泄露产生的逸散排放，化石燃料消耗产生的排放三部分。化石燃料一般包括煤、燃料油或燃料气等。消耗电能产生的排放主要来自于火力发电厂，我国目前电能生产仍然以火力发电为主。

表 3-9 沥青生产能耗类型

Tab 3-9 Type of energy consumption of asphalt production

| 排放源名称 | 能耗类型 |
|--|-------|
| 常减压油渣生产设备（热交换器、电脱盐罐、初馏塔、常压塔、减压塔、常压炉、氧化塔） | 电能、燃料 |
| 运输罐车、储存罐 | 石油挥发 |
| 沥青生产设备（深拔装置、氧化塔、溶剂脱沥青设备、改性沥青生产设备、乳化沥青生产设备） | 电能 |

3.2.3 沥青生产能耗及排放计算

为方便进行比较，将不同化石燃料的消耗统一转换为标准煤（规定应用基低位发热量7000kcal/kg的燃料）用量作为能耗的代表值，以二氧化碳当量是以二氧化碳作为评估温室气体全球暖化潜势的基准气体。

(1) 普通道路石油沥青

在不考虑基础设施的情况下，生产 1t 普通沥青所需的能耗和气体排放如表 3-10^[23]。

表 3-10 1t 普通沥青生产能耗

Tab 3-10 Energy consumption of producing one ton of ordinary asphalt

| 1t沥青 | 单位 | 原油开采 | 运输 | 炼油 | 存储 | 总计 | |
|------|-----|----------------|-------|---------|---------|---------|--------|
| 原材料 | 原油 | kg | 1000 | | | 1000 | |
| 能源消耗 | 天然气 | m ³ | 18.90 | 0.40 | 0.58 | 0.19 | 20.10 |
| | 原油 | L | 17.50 | 9.30 | 11.90 | 2.20 | 40.90 |
| | 煤炭 | kg | 0 | 0.21 | 0.49 | 0.33 | 1.03 |
| | 铀 | g | 0 | 0.00001 | 0.00003 | 0.00002 | 0.0001 |

如表所示，依据不同化石燃料与标准煤的转换关系可得出生产每吨普通沥青的标准煤消耗量，详见表3-11。

表 3-11 生产 1t 普通沥青标准煤耗

Tab 3-11 Standard coal consumption of one ton of producing ordinary asphalt

| 能源 | 用量 | 折标准煤系数 | 标准煤折算值 (kgce) | 合计 (kgce) |
|-----|----------------------|----------------------------|---------------|-----------|
| 天然气 | 20.10 m ³ | 0.9541kgce/ m ³ | 19.2 | |
| 原油 | 40.90L | 1.1572kgce/L | 47.3 | 67.4 |
| 煤炭 | 1.03 kg | 0.9000kgce/kg | 0.9 | |

依据不同化石燃料的消耗量与其对应的温室气体CO₂当量排放因子的乘积，可求得不同温室气体的排放量，详见表3-12。

表 3-12 生产 1t 普通沥青温室气体排放量

Tab 3-12 Greenhouse gas emissions of producing one ton of ordinary asphalt

| 燃料 | 用量 | CO ₂ 当量 (kg) | 合计 (kg) |
|-----|----------------------|-------------------------|---------|
| 天然气 | 20.10 m ³ | 37.8 | |
| 原油 | 40.90 L | 93.8 | 134.2 |
| 煤炭 | 1.03 kg | 2.6 | |

(2) 改性沥青

改性沥青中SBS含量为3-5%（依托采用4.5%），生产1t改性沥青需普通沥青

955kg (95.5%)，SBS 45kg (4.5%)。改性沥青采用采用高速剪切法或胶体磨法制备。SBS改性沥青能耗和气体排放如表3-13。

表 3-13 1t 改性沥青生产能耗

Tab 3-13 Energy consumption of producing one ton of SBSmodified asphalt

| 1t改性沥青 | 单位 | 普通沥青 | SBS | 剪切 | 总计 | |
|--------|-----|----------------|---------|-------|---------|--------|
| 原材料 | 原油 | kg | 955 | 45 | 1000 | |
| 能源消耗 | 天然气 | m ³ | 19.20 | 30 | 0.78 | 50.00 |
| | 原油 | L | 39.10 | 20.50 | 0.30 | 59.90 |
| | 煤炭 | kg | 1.00 | 5.40 | 2.10 | 8.50 |
| | 铀 | g | 0.00006 | 0 | 0.00015 | 0.0002 |

如表所示，依据不同化石燃料与标准煤的转换关系可得出生产每吨普通沥青的标准煤消耗量，详见表3-14。

表 3-14 生产 1tSBS 改性沥青标准煤耗

Tab 3-14 Standard coal consumption of producing one ton of SBS modified asphalt

| 能源 | 用量 | 折标准煤系数 | 标准煤折算值 (kgce) | 合计 (kgce) |
|-----|----------------------|----------------------------|---------------|-----------|
| 天然气 | 50.00 m ³ | 0.9541kgce/ m ³ | 47.7 | |
| 原油 | 59.90L | 1.1572kgce/L | 69.3 | 124.7 |
| 煤炭 | 8.50 kg | 0.9000kgce/kg | 7.7 | |

依据不同化石燃料的消耗量与其对应的温室气体CO₂当量排放因子的乘积，可求得不同温室气体的排放量，详见表3-15。

表 3-15 生产 1tSBS 改性沥青温室气体排放量

Tab 3-15 Greenhouse gas emissions of producing one ton of SBS modified asphalt

| 燃料 | 用量 | CO ₂ 当量 (kg) | 合计 (kg) |
|-----|----------------------|-------------------------|---------|
| 天然气 | 50.00 m ³ | 94.1 | |
| 原油 | 59.90 L | 198.1 | 313.8 |
| 煤炭 | 8.50 kg | 21.6 | |

(3) 乳化沥青

乳化沥青在公路建设中多用于透封层和粘层，还应用于沥青混合料冷再

生基层，其中消耗量比较大的是冷再生基层。依托大修工程冷再生基层选用改性乳化沥青，粘层和透封层也均为改性乳化沥青，其质量要求见表3-16。

表 3-16 厂拌冷再生沥青混合料用改性乳化沥青质量要求

Tab 3-16 Quality requirements of modified emulsified asphalt for cold in-plant recycling mixture

| 试验项目 | 品种及代号（拌和型） | | 试验方法 |
|-----------------|---------------|---------------|-------|
| | 阳离子 BC-1 | | |
| 筛上剩余量（1.18mm 筛） | ≤0.1% | | T0652 |
| 离子电荷 | 阳离子（+） | | T0653 |
| 破乳速度 | 慢裂 | | T658 |
| 蒸发 残留 | 残留分含量 | ≥65% | T0651 |
| | 溶解度 | ≥97.5% | T0607 |
| 物性质 | 针入度（25℃） | 50~150（0.1mm） | T0604 |
| | 延度（15℃） | ≥40cm | T0605 |
| 储存 | 1d | ≤1% | T0655 |
| 稳定性 | 5d | ≤5% | |
| 粘度 | 沥青标准粘度计 C25,3 | 10s~60s | T0621 |
| | 恩格拉粘度计 E25 | 2~30 | T0622 |

进行能耗及排放测算时，考虑的普通乳化沥青种类为我国常用，其中沥青固含量按65%计，原材料组成包括：普通沥青650kg（65%）、乳化剂8kg（0.8%）和水342kg（34.2%）。在不考虑基础设施的情况下，生产1t乳化沥青的能耗和气体排放如表3-17^[29]。

表 3-17 1t 乳化沥青生产能耗

Tab 3-17 Energy consumption of producing one ton of emulsified asphalt

| 1t乳化沥青 | | 单 位 | 普通沥青 | 乳化剂（生 产和运输） | 热水（水 和加热） | 乳化沥 青制备 | 总计 |
|--------|----|--------|------|----------------|--------------|------------|------|
| 原材料 | 原油 | kg | 650 | 8 | 342 | | 1000 |

表 3-17 1t 乳化沥青生产能耗 (续)

Tab 3-17 Energy consumption of producing one ton of emulsified asphalt (continue)

| 1t 乳化沥青 | 单位 | 普通沥青 | 乳化剂 (生产和运输) | 热水 (水和加热) | 乳化沥青制备 | 总计 |
|---------|----------------|-------|-------------|-----------|--------|---------|
| 天然气 | m ³ | 13.10 | 0.22 | 0.08 | 1.21 | 14.60 |
| 原油 | L | 26.60 | 1.40 | 1.80 | 0.40 | 30.20 |
| 能源消耗 | 煤炭 | kg | 0.67 | 0.07 | 3.25 | 4.30 |
| | 铀 | g | 0.00004 | 0.00002 | 0 | 0.00023 |
| | | | | | | 0.0003 |

如表所示,依据不同化石燃料与标准煤的转换关系可得出生产每吨普通沥青的标准煤消耗量,详见表3-18。

表 3-18 生产 1t 乳化沥青标准煤耗

Tab 3-18 Standard coal consumption of producing one ton of emulsified asphalt

| 能源 | 用量 | 折标准煤系数 | 标准煤折算值 (kgce) | 合计 (kgce) |
|-----|----------------------|---------------------------|---------------|-----------|
| 天然气 | 14.60 m ³ | 0.9541kgce/m ³ | 13.9 | |
| 原油 | 30.20L | 1.1572kgce/L | 34.9 | 52.7 |
| 煤炭 | 4.30 kg | 0.9000kgce/kg | 3.9 | |

依据不同化石燃料的消耗量与其对应的温室气体CO₂当量排放因子的乘积,可求得不同温室气体的排放量,详见表3-19。

表 3-19 生产 1t 乳化沥青温室气体排放量

Tab 3-19 Greenhouse gas emissions of producing one ton of emulsified asphalt

| 燃料 | 用量 | CO ₂ 当量 (kg) | 合计 (kg) |
|-----|----------------------|-------------------------|---------|
| 天然气 | 14.60 m ³ | 27.5 | |
| 原油 | 30.20 L | 91.7 | 130.1 |
| 煤炭 | 4.30 kg | 10.9 | |

根据上述普通乳化沥青的生产方式,进行能耗及排放测算时,改性乳化沥青中沥青固含量也按65%计,原材料组成包括:SBS改性沥青650kg (65%)、乳化剂12kg (1.2%)和水338kg (33.8%)。在不考虑基础设施的情况下,生产1t改性乳化沥青的能耗和气体排放如表3-20。

表 3-20 1t 改性乳化沥青生产能耗

Tab 3-20 Energy consumption of producing one ton of modified emulsified asphalt

| 1t 乳化沥青 | | 单位 | 改性沥青 | 乳化剂（生 产和运输） | 热水（水 和加热） | 乳化沥 青制备 | 总计 |
|---------|-----|----------------|--------|----------------|--------------|------------|--------|
| 原材料 | 原油 | kg | 650 | 12 | 338 | | 1000 |
| | 天然气 | m ³ | 32.50 | 0.33 | 0.08 | 2.21 | 35.10 |
| | 原油 | L | 38.90 | 2.10 | 1.80 | 0.80 | 43.60 |
| 能源消耗 | 煤炭 | kg | 5.50 | 0.45 | 0.07 | 6.25 | 12.30 |
| | 铀 | g | 0.0001 | 0.00003 | 0 | 0.0005 | 0.0006 |

如表所示，依据不同化石燃料与标准煤的转换关系可得出生产每吨普通沥青的标准煤消耗量，详见表3-21。

表 3-21 生产 1t 改性乳化沥青标准煤耗

Tab 3-21 Standard coal consumption of producing one ton of modified emulsified asphalt

| 能源 | 用量 | 折标准煤系数 | 标准煤折算值（kgce） | 合计（kgce） |
|-----|----------------------|---------------------------|--------------|----------|
| 天然气 | 35.10 m ³ | 0.9541kgce/m ³ | 33.5 | |
| 原油 | 43.60 L | 1.1572kgce/L | 50.5 | 95.1 |
| 煤炭 | 12.30 kg | 0.9000kgce/kg | 11.1 | |

依据不同化石燃料的消耗量与其对应的温室气体排放因子的乘积，可求得不同温室气体的排放量，详见表3-22。

表 3-22 生产 1t 改性乳化沥青温室气体排放量

Tab 3-22 Greenhouse gas emissions of producing one ton of modified emulsified asphalt

| 燃料 | 用量 | CO ₂ 当量（kg） | 合计（kg） |
|-----|----------------------|------------------------|--------|
| 天然气 | 35.10 m ³ | 66.1 | |
| 原油 | 43.60 L | 132.4 | 229.8 |
| 煤炭 | 12.30 kg | 31.3 | |

根据测算结果，将依托改建工程中应用的沥青类材料能耗及排放汇总于表 3-23 中。

表 3-23 依托改建工程 1t 沥青类材料能耗及排放汇总表

Tab 3-23 Energy consumption and emissions of one ton of asphalt materials for Bengbu to Hefei section reconstructed project

| 能耗与排放 | 材料名称 | | | |
|-------------------------|-------|---------|-------|--------|
| | 普通沥青 | SBS改性沥青 | 乳化沥青 | 改性乳化沥青 |
| 标准煤耗 (kgce) | 67.4 | 124.7 | 52.7 | 95.1 |
| CO ₂ 当量 (kg) | 134.2 | 313.8 | 130.1 | 229.8 |

由表中数据可知,改性沥青能耗是普通沥青的1.85倍,排放是普通沥青的2.34倍;改性乳化沥青的能耗是普通乳化沥青的1.80倍,其排放是乳化沥青的1.77倍;乳化沥青能耗为普通沥青的0.78倍,其排放是普通沥青的0.97倍。所有的沥青材料中,普通乳化沥青能耗和排放最低,普通沥青和改性乳化沥青次之,改性沥青的能耗和排放最高。

3.3 集料生产

3.3.1 集料生产工艺流程

在沥青混合料中应用的集料包括粗集料、细集料和矿粉,矿粉与粗、细集料的加工方式不同。集料生产工艺流程主要包括石料开采、集料加工两个阶段。集料生产过程中温室气体的排放主要来自于炸药爆破和石料生产线消耗电能。但集料生产的场地建设等准备工作也是有能耗与排放的。本课题仅考虑了开采、加工两个环节。

(1) 石料开采

石料开采主要是石料爆破开采。石料工程爆破中多用的爆破手段有浅孔爆破法、深孔爆破法、药壶爆破法和洞室爆破法等几种。爆破手段的选定要根据工程规模大小、施工难易程度及开挖强度的需求。深孔爆破法爆破开发岩石的施工过程主要为:台阶平整→钻孔→装炸药、堵塞炮孔口→连接起爆网络、起爆→清运石渣^[30]。石料爆破流程中的耗能和气体排放源总结如下:

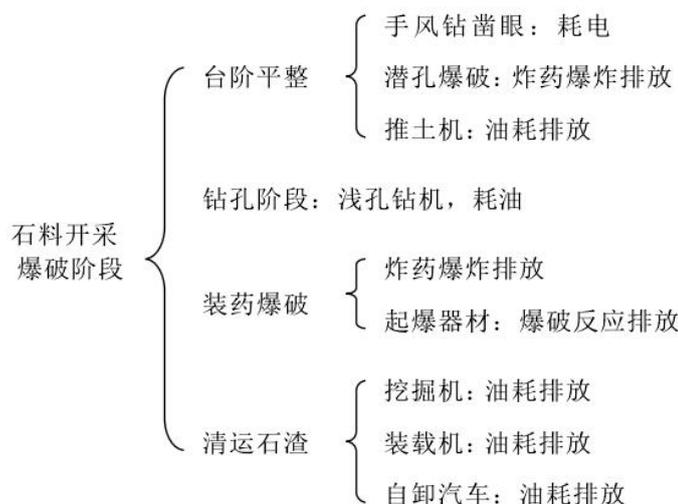


图 3-2 石料爆破流程中的耗能、气体排放源

Fig 3-2 Energy consumption and emissions source in stone explosion processes

矿山开采爆破是化学爆破，炸药中的化学潜能瞬间转化对外界做功（气体热胀冷缩）。起爆类器材和炸药爆炸后将释放大量温室废气。药启爆释放的温室废气根据炸药类别差异而有差异，见表3-24。炸药爆破程序中释放的废气有CO₂、N₂、CO、NO、N₂O₃。

表 3-24 炸药爆破时气体排放状况表

Tab 3-24 Gas emissions for demolition of explosives

| 炸药 | 排放的气体 |
|------------|----------------------------------|
| 岩石乳化炸药 | NO、N ₂ O ₃ |
| TNT（三硝基甲苯） | N ₂ 、CO |
| 铵梯炸药 | CO ₂ 、N ₂ |
| 黑火药 | CO ₂ 、N ₂ |
| 硝化甘油炸药 | CO ₂ 、N ₂ |

分析可看出，石料爆破过程能耗类型主要为油耗和电耗；气体排放源，一般来自机械燃料油释放和炸药类爆炸释放。

(2) 破碎加工

爆破后由挖掘机、装载机配合自卸汽车将石块装运到石料加工厂进行生产加工。爆破得到的大块石材要在石料加工厂通过破碎和筛分等工序破碎成用于道路施工的不同规格碎的粗、细集料。集料生产线根据进出料粒度和产量等要求，

通常配用的设备有鄂式破碎机、反击式碎石机（高速公路要求使用反击式破碎机）、给料机、输送机、筛分设备等。初破采用鄂式破碎机，给料粒度为125mm-750mm，型号根据实际情况选定。二级破碎采用反击式破碎机，而后由输送机运到筛分机进行筛分，不合格物料返回二级破碎机继续破碎，直到所有物料粒度达标，由输送设备将不同规格的成品料运到储料堆。其流程图见图 3-3 所示。

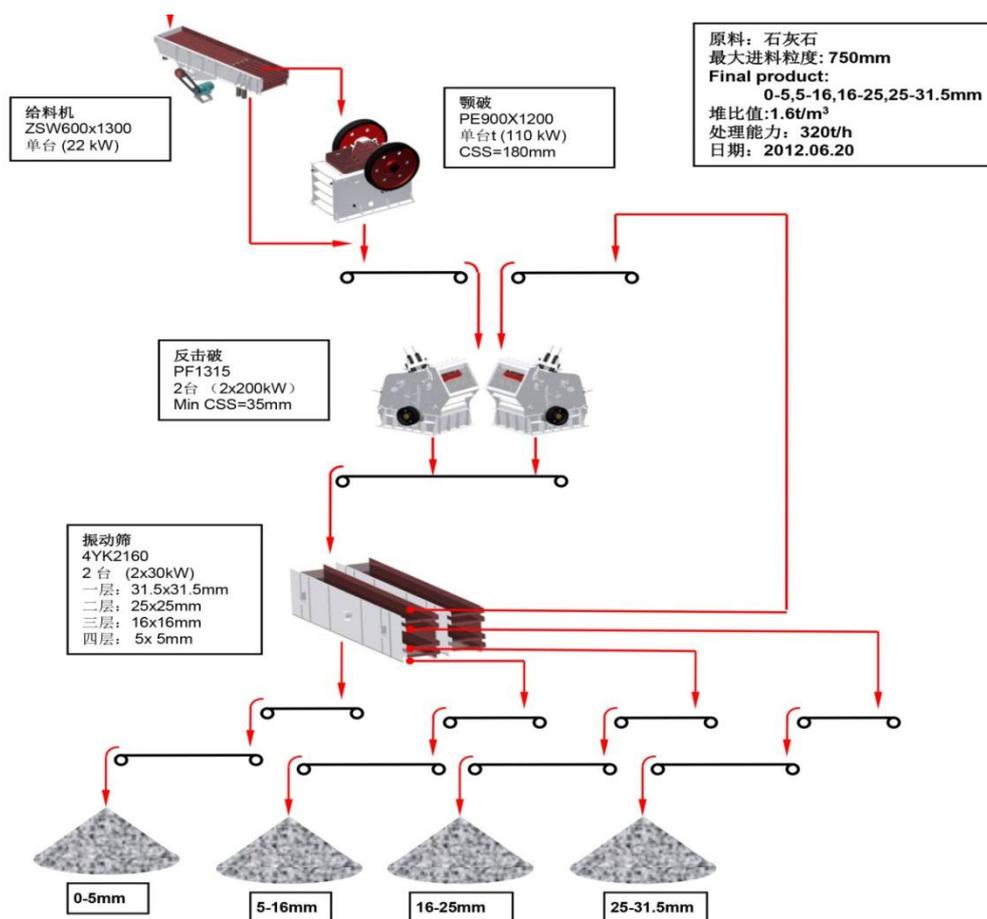


图 3-3 集料生产工艺示意图

Fig 3-3 Aggregate production process



图 3-4 依托改建工程石灰岩集料破碎加工

Fig 3-4 Limestone aggregate production for Bengbu to Hefei section reconstruction project

3.3.2 集料生产能耗

(1) 能耗类型

根据上述分析根据前文分析,将石料获取流程中的能源消耗源及能耗类别汇总见表3-25。依据集料生产的工艺流程,集料生产的能耗环节包括石料开采的化学爆破、集料破碎消耗的电能及装载机、车辆需要消耗柴油、汽油等燃料。化学爆破需要的炸药是将化学潜能瞬间转化为对外界做功。

表 3-25 集料生产过程中能耗类型

Tab 3-25 Type of energy consumption for aggregate production

| 生产过程 | 设备名称 | 能源类型 |
|------|-----------------------|------|
| 块石开采 | 钻机、水、风、电系统 | 电能 |
| | 自卸汽车、挖掘机、装载机 | 柴油 |
| | 爆破 | 炸药 |
| 集料破碎 | 给料机、颚式破碎机、反击式碎石机、输送机、 | 电能 |
| | 振动筛分设备、除尘系统 | |
| | 自卸汽车、挖掘机、装载机 | 柴油 |

依托大修工程中应用的石料有两种,分别是上面层使用的玄武岩和其他结构层使用的石灰岩。为得出石料在开采和加工过程中的能耗,分别对两个石料厂的生产过程进行了跟踪调研。依据调研进行能耗分析。

(2) 块石开采能耗

经对石料厂的现场调查,每开采1t玄武岩块石,钻机消耗的电能约为5kwh;

每开采1t石灰岩块石，钻机消耗的电能约为4.3kwh。开采块石的炸药用量，采用现场实地调查，共连续调查六个工作日，开采玄武岩和石灰岩块石的炸药消耗数据列于表3-26、表3-27中。

表 3-26 炸药用量及玄武岩开采量调查表

Tab 3-26 Explosives amounts and quantity of basalt aggregate exploitation

| 调查内容 | 第一天 | 第二天 | 第三天 | 第四天 | 第五天 | 第六天 |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 气温（最低/最高） | 23℃/31℃ | 21℃/28℃ | 23℃/25℃ | 23℃/30℃ | 25℃/36℃ | 25℃/33℃ |
| 炸药用量（kg） | 3500 | 4037 | 2511 | 2367 | 2871 | 2796 |
| 石料开采量（t） | 17500 | 20200 | 12500 | 11900 | 14300 | 14000 |

表 3-27 炸药用量及石灰岩开采量调查表

Tab 3-27 Explosives amounts and quantity of limestone aggregate exploitation

| 调查内容 | 第一天 | 第二天 | 第三天 | 第四天 | 第五天 | 第六天 |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 气温（最低/最高） | 23℃/31℃ | 22℃/28℃ | 24℃/26℃ | 24℃/31℃ | 23℃/34℃ | 22℃/35℃ |
| 炸药用量（kg） | 810 | 805 | 806 | 813 | 817 | 811 |
| 石料开采量（t） | 5400 | 5500 | 5400 | 5100 | 6000 | 5550 |

依据玄武岩和石灰岩石料厂的调研数据可以采用计算平均值的方法求得每生产 1t 玄武岩或石灰岩的炸药消耗量（表 3-28）。

表 3-28 开采 1t 玄武岩或石灰岩块石的炸药消耗量

Tab 3-28 Explosives amounts of producing one ton of basalt or limestone

| 石料厂类别 | 玄武岩厂 | 石灰岩厂 |
|----------------------|------|------|
| 每生产 1t 石料的平均炸药消耗(kg) | 0.20 | 0.15 |

块石开采后，要将石块运输至加工厂进行破碎加工，一般加工厂距离都靠近塘口。本项目调研的玄武岩的塘口距离加工厂1km，石灰岩塘口距离加工厂2km。采用自卸汽车进行运输，两个石料厂的运输车参数相近，具体型号和参数见表3-29。

表 3-29 运输自卸汽车基本参数及油耗表

Tab 3-29 Basic parameters and fuel consumption of autodumpers

| 调查项目 | 车型 | | |
|------------------|----------|----------|-----------|
| | 福田瑞沃 290 | 重汽豪沃 336 | 江淮轻量化 290 |
| 额定功率 (kw) | 213 | 247 | 213 |
| 载重 (t) | 45 | 45 | 45 |
| 燃油类型 | 柴油 | 柴油 | 柴油 |
| 行驶速度 (km/h) | 80 | 80 | 80 |
| 满载油耗 (L/100km) | 85 | 105 | 82 |
| 空载油耗 (L/100km) | 50 | 62 | 48 |
| 平均满载油耗 (L/100km) | 90.7 | | |
| 平均空载油耗 (L/100km) | 53.3 | | |

自卸汽车消耗柴油，其排放的温室气体主要有 CO₂、CH₄ 和 N₂O。运输过程中自卸汽车主要往返于开采点和加工厂之间，由开采点出发时为满载，返回时空载。

已知玄武岩厂自卸汽车满载重量为45t，则每运输1t玄武岩石料自卸汽车的燃油消耗应为 $(90.7+53.3) \times 1 \div 100 \div 45 = 0.032\text{L}$ ；同理，石灰岩厂每运输1t石灰岩石料自卸汽车的燃油消耗应为 $(90.7+53.3) \times 2 \div 100 \div 45 = 0.064\text{L}$ 。

(3) 破碎加工能耗

破碎加工过程中主要是破碎机对石料进行破碎、筛分，装载机用于给破碎机喂料，破碎机设备消耗电能、装载机消耗柴油。对玄武岩、石灰岩破碎机设备的能耗进行实地调查，连续6个工作日的能耗列于表3-31、表3-32中。

表 3-30 破碎机基本参数表

Tab 3-30 Basic parameters of crushers

| 调查项目 | 调查结果 |
|------------|------------|
| 破碎机型号 | PCZ1615-VI |
| 装机总功率 (kw) | 400 |
| 处理能力 (t/h) | 420-500 |
| 使用年数 | 4 |

表 3-31 破碎机日产量及能耗（玄武岩）

Tab 3-31 Daily output and energy consumption of crushers(basalt)

| 调查内容 | 第一天 | 第二天 | 第三天 | 第四天 | 第五天 | 第六天 |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 气温（最低/最高） | 23℃/31℃ | 21℃/28℃ | 23℃/25℃ | 23℃/30℃ | 25℃/36℃ | 25℃/33℃ |
| 连续工作时间（h） | 12 | 13 | 4 | 10 | 13 | 8 |
| 产量（t） | 6000 | 6300 | 1900 | 4800 | 6400 | 3800 |
| 耗电量（kwh） | 24000 | 26000 | 8000 | 20000 | 26000 | 16000 |

表 3-32 破碎机日产量及能耗（石灰岩）

Tab 3-32 Daily output and energy consumption of crushers(limestone)

| 调查内容 | 第一天 | 第二天 | 第三天 | 第四天 | 第五天 | 第六天 |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 气温（最低/最高） | 23℃/30℃ | 21℃/28℃ | 22℃/25℃ | 23℃/30℃ | 22℃/32℃ | 22℃/33℃ |
| 连续工作时间(h) | 12 | 10 | 5 | 12 | 13 | 11 |
| 产量（t） | 5040 | 4000 | 2200 | 5000 | 5460 | 5170 |
| 耗电量（kwh） | 4800 | 4000 | 2000 | 4800 | 5200 | 4400 |

依据玄武岩和石灰岩石料厂调研数据，可计算得出每生产 1t 玄武岩或石灰岩集料破碎机设备的电耗（表 3-33）。

表 3-33 破碎、加工1t集料的电耗

Tab 3-33 Power consumption of producing one ton of aggregate

| 集料类别 | 玄武岩 | 石灰岩 |
|---------------------------|------|------|
| 每生产 1t 石料整个石料生产线平均电量（kwh） | 4.13 | 0.94 |

集料破碎加工厂使用装载机将块石运至喂料口，经调查，装载机型号及参数列于表3-34中。

表 3-34 装载机基本参数及油耗表

Tab 3-34 Basic parameters and fuel consumption of loaders

| 调查项目 | 装载机 | | |
|---------------------|-----------|---------|-----------|
| 型号 | 龙工 LG855B | 晋工 ZL50 | 雷沃 FL956F |
| 斗容（m ³ ） | 3 | 2.8 | 3 |

表 3-34 装载机基本参数及油耗表 (续)

Tab 3-34 Basic parameters and fuel consumption of loaders(continue)

| 调查项目 | 装载机 | | |
|-------------|------|-----------|---------|
| | 型号 | 龙工 LG855B | 晋工 ZL50 |
| 额定载重量 (kg) | 5000 | 5000 | 5000 |
| 额定功率 (kw) | 162 | 162 | 162 |
| 行驶速度 (km/h) | 36 | 35 | 36 |

查阅破碎机加工厂生产记录资料,并参考装载机功率,每台装载机的平均油耗采用14.0L/h,按每小时可供料400t计算(3台装载机),每供给1t石料装载机的平均油耗约为0.105L,与供料时料斗内的石料种类无关。

根据以上调查、分析,集料生产经过块石开采和加工过程,每生产1t集料的能耗汇总于表3-35中。计算结果显示,每生产1t玄武岩集料,其能耗为1.29kgce,每生产1t石灰岩集料,其能耗为0.86kgce。玄武岩石质坚硬,加工难度大于石灰岩,且由于玄武岩集料用于上面层,粒径较小,因此加工过程能耗较大。

表 3-35 生产 1t 石料的能耗

Tab 3-35 Energy consumption of producing one ton of aggregate

| 集料类型 | 能耗类型 | 设备 | 用量 | 折标准煤系数 | 标准煤折算值 (kgce) | 合计 (kgce) |
|------|------|------|---------|-------------------|-------------------|-----------|
| 玄武岩 | 电力 | 钻机 | 5kwh | 0.1229kgce/(kw.h) | 0.61 | 1.29 |
| | | 破碎机 | 4.13kwh | 0.1229kgce/(kw.h) | 0.51 | |
| | 炸药 | 铵梯炸药 | 0.20kg | 0 | 0 | |
| | 柴油 | 自卸汽车 | 0.032L | 1.2194kgce/L | 0.04 | |
| | | 装载机 | 0.105L | 1.2194kgce/L | 0.13 | |
| | 石灰岩 | 电力 | 钻机 | 4.3kwh | 0.1229kgce/(kw.h) | |
| 破碎机 | | | 0.94kwh | 0.1229kgce/(kw.h) | 0.12 | |
| 炸药 | | 铵梯炸药 | 0.15kg | 0 | 0 | |
| 柴油 | | 自卸汽车 | 0.064L | 1.2194kgce/L | 0.08 | |
| | | 装载机 | 0.105L | 1.2194kgce/L | 0.13 | |

注:炸药爆破时释放热量极低,不计入统计。

3.3.3 集料生产温室气体排放计算方法及排放统计

(1) 温室气体排放计算方法

① 炸药排放

炸药是一种化学物质,它会在热能或者机械能剧烈作用下迅速地分解并随即产生大量的热量和气体。仅考虑炸药在爆炸时产生的主要温室气体,即 CO_2 ,其排放量可按式 3.3 估算:

$$G_i = T_i \times EF_i \quad (3.3)$$

式中: G_i ——温室气体排放量 (kg);

T_i ——炸药用量 (t);

EF ——爆破过程 CO_2 排放因子。

② 耗电排放

石料生产过程中消耗电能产生的排放主要是来自于火力发电厂,属于间接排放。计算公式见式 3.4。

$$G_i = M_i \times EF_{i,j} \quad (3.4)$$

式中: G_i ——i 类温室气体排放量 (kg);

M_i ——电力消耗量 (kwh);

$EF_{i,j}$ ——与电力消耗相对应的 CO_2 当量排放因子;

③ 燃油排放

自卸汽车和装载机排放的计算方法可以根据油耗法进行计算。公式如 3.5 所示。

$$G_i = g_i \times EF_{i,j} \quad (3.5)$$

式中: G_i ——温室气体排放量 (kg);

g_i ——消耗 i 类燃柴油量 (kg);

$EF_{i,j}$ ——与 i 类燃料对应的 CO_2 当量排放因子。

依据燃料煤的消耗量与其对应的 CO_2 当量排放因子的乘积,可求得不同温室气体的排放量,详见表 3-36。

表 3-36 生产 1t 集料温室气体排放量

Tab 3-36 Greenhouse gas emissions of producing one ton of aggregate

| 石料 | 燃料 | 用量 | CO_2 当量 (kg) | 合计 (kg) |
|-----|----|---------|-----------------------|---------|
| | 炸药 | 0.20kg | 0.04 | |
| 玄武岩 | 电力 | 9.13kwh | 5.64 | 6.04 |
| | 柴油 | 0.137L | 0.36 | |

表 3-36 生产 1t 集料温室气体排放量 (续)

Tab 3-36 Greenhouse gas emissions of producing one ton of aggregate(continue)

| 石料 | 燃料 | 用量 | CO ₂ 当量 (kg) | 合计 (kg) |
|-----|----|---------|-------------------------|---------|
| | 炸药 | 0.15kg | 0.03 | |
| 石灰岩 | 电力 | 5.24kwh | 3.24 | 3.72 |
| | 柴油 | 0.169L | 0.45 | |

根据测算结果, 将依托改建工程中应用的集料能耗及排放汇总于表3-37中。

表 3-37 依托改建工程生产 1t 集料能耗及排放汇总表

Tab 3-37 Energy consumption and emissions of producing one ton of aggregate

| 能耗与排放 | 集料生产 | |
|-------------------------|------|------|
| | 玄武岩 | 石灰岩 |
| 标准煤耗 (kgce) | 1.29 | 0.86 |
| CO ₂ 当量 (kg) | 6.04 | 3.72 |

3.3.4 矿粉、水泥和石灰

(1) 矿粉

依托改建工程使用由石灰岩石料磨制的矿粉。矿粉生产工艺主要包括原料处理、粉磨过程。生产矿粉通常使用破碎后较小粒径的石灰岩碎石, 再经高效锤式破碎机破碎, 利用高效筛分超细磨, 将细粒径碎石送入磨机粉磨, 磨好的成品存放于圆库内, 用包装机包装好送成品库储存。

矿粉生产过程温室气体排放源主要是粉磨设备的能耗排放, 一般为耗电排放。可选择球磨机、立磨、辊压机、环辊磨工艺设备。球磨机粉磨工艺简单, 但粉磨效率低、单位产品电耗高, 立磨、辊压机、环辊磨粉磨效率高、单位产品电耗低, 噪音小, 适应于工厂大型加工。消耗电能产生的排放转化为燃煤产生的排放(考虑火力发电)。

参考长安大学的调查结果, 1t矿粉的能耗为77.85MJ(约为2.656kgce标准煤), CO₂当量排放量为7.391kg。

(2) 水泥

目前多采用新型干法水泥生产技术生产水泥, 以期利用其环保、高效、有害物质排放量低和节约能源等优点改善水泥生产能耗高的情况。在水泥生产过程中, 消耗大量的燃煤和电力, 产生的污染气体主要是二氧化碳(CO₂)、二氧化硫

(SO₂)、氮氧化物(NO_x)、碳氢化合物(HC)以及一氧化碳(CO)等。

水泥生产过程不同温室气体排放源采用不同计算方法。材料本身的排放采用物料衡算法根据化学反应式计算,能耗排放采用能耗法计算。但实际上目前水泥行业对水泥生产过程的温室气体排放已有充分研究,水泥和水泥混凝土协会总结了至2010年全球各国学者关于单位水泥生产排放的数据。不同来源的水泥排放量有差异,因为水泥生产条件不同。

我国也做过相关的研究,水泥生产干法工序的资源、能源消耗和温室气体已有排放数据如下表3-38。

表 3-38 2004 年我国每吨水泥生产排放

Tab 3-38 Emissions of producing one ton of cement of China in 2004

| 项目 | | 数量 |
|----|----|---------|
| 能耗 | 电耗 | 97.4kwh |
| | 煤耗 | 116.0kg |
| | 柴油 | 0.2L |

将生产1t水泥的能耗和排放转换为标准煤和CO₂当量,详见表3-39。

表 3-39 2004年我国每吨水泥生产能耗和排放

Tab 3-39 Energy consumption and emissions of producing one ton of cement of China in 2004

| 标准煤(kgce) | CO ₂ 当量(kg) |
|-----------|------------------------|
| 116.6 | 355.9 |

(3) 石灰

在大粒径沥青碎石中,为改进沥青混合料的水稳定性,加入消石灰粉。石灰的生产工序主要包括原料破碎及入窑煅烧。石灰的能耗,蔡博峰等在《中国石灰生产和能源消耗分析》中得出,2007年,中国生产石灰的企业共6154家,涉及9327座石灰窑。总产能为2.27亿吨,共生产石灰1.06亿吨,企业平均产量为4000t,企业生产每吨石灰平均能耗水平为163kgce标准煤^[31]。天津市《DB12 046.47-2008生石灰单位产量综合能耗计算方法及限额》中,规定生石灰单位产量综合能耗不能大于147kgce标准煤。本文中采用生石灰的能耗为147kgce,排放为415kg。原材料生产期胶结材料都是高耗能、高排放材料,尤其是石灰、水泥、改性沥青。原材料(胶结料)能耗与排放由高到低的顺序为:石灰、水泥、改性沥青、改性乳化沥青、沥青、乳化沥青。

3.4 沥青混合料再生集料生产

在依托改建工程中，为节约资源，大部分上基层需要铣刨修复的路段采用乳化沥青冷再生基层。厂拌冷再生是将旧沥青混合料路面铣刨后运回工厂，通过破碎、筛分，形成再生集料，根据再生集料的级配，掺入一定数量的新集料、乳化沥青和水泥(必要时)进行拌和，摊铺、碾压形成符合各项技术指标要求的基层结构。使用再生集料优点明显：避免旧路挖除废弃和重新开采石料对生态环境的污染破坏；节省造价。因此，再生集料的应用节能减排效果显著。

3.4.1 再生集料加工工艺流程

(1) 技术要求

用于高速公路改建工程上基层的再生集料（铣刨料）公称最大粒径为26.5mm，最大粒径不得超过31.5mm。经破碎筛分分成0-9.5mm和9.5-31.5mm两种规格。铣刨料中不能有土块、植物等有害物质，也不应含有水泥稳定土等杂物。再生集料（铣刨料）的质量应符合表3-40要求。

表 3-40 再生集料（铣刨料）质量技术要求

Tab 3-40 Quality requirement of recycled aggregate

| 指标 | 单位 | 本项目 |
|----------|----|------|
| 砂当量，不小于 | % | 60 |
| 含水量，不大于 | % | 2 |
| 最大粒径，不大于 | mm | 31.5 |

(2) 加工工艺

冷再生基层材料使用沥青面层的铣刨料。铣刨后的废旧沥青混合料运回拌合场，进行破碎、筛分。依托项目铣刨料加工、存储场地设在沥青混合料拌合场内，场地已经过水泥硬化处理，同时场内还有防、排水设施。

3.4.2 再生集料生产能耗

依据再生集料的加工流程可知，再生集料在加工过程中的主要能耗为二次筛分设备的电能消耗和装载机、运输车辆设备的燃油消耗。

(1) 二次筛分

依托大修工程三个标段使用相同的二次筛分设备，具体参数见表3-41。供料设备为装载机。再生集料加工消耗的能源为筛分设备消耗的电能及装载机消耗的柴油。

表 3-41 再生集料二次破碎筛分设备基本参数

Tab 3-41 Basic parameters of secondary crushing screening equipment

| 型号 | RM9620X3 |
|------------|---------------------------|
| 功率 (kw) | 振动筛 18.5kw, 4 条皮带共 11.5kw |
| 生产能力 (t/h) | 80 |
| 使用年数 | 11 |

本课题采用现场调研, 确定二次筛分设备的电能消耗。调查5个工作日筛分设备的产量及能耗(表3-42)。

表 3-42 二次破碎筛分设备每工作日产量及能耗

Tab 3-42 Daily output and energy consumption of secondary crushing screening equipment

| 调查内容 | 第一天 | 第二天 | 第三天 | 第四天 | 第五天 |
|------------|------|------|------|------|------|
| 气温(最低/最高)℃ | 9/22 | 6/17 | 7/18 | 8/18 | 9/17 |
| 连续工作时间(h) | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| 产量(t) | 506 | 485 | 497 | 503 | 511 |
| 耗电量(kwh) | 350 | 342 | 368 | 356 | 363 |

注: 每日连续工作时间不包括机械中断时间。

(2) 装载机与运输车辆

三个标段的装载机型号及具体参数列于表3-43。装载机油耗仍采用14.0L/h, 每装载1t铣刨料装载机的平均油耗约为0.105L。

表 3-43 再生集料生产装载机基本参数表

Tab 3-43 Basic parameters of loaders

| 型号 | 徐工 LW500F | 厦工 XG-956 II | 龙工 ZL50C-II | 徐工 LW521F | 厦工 XG955 | 成工 ZL-50E |
|----------------------|--------------|-----------------|----------------|--------------|-------------|--------------|
| 斗容 (m ³) | 3 | 4.5 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 额定载重量 (kg) | 5000 | 5000 | 5000 | 5000 | 5000 | 5000 |
| 额定功率 (kw) | 162 | 162 | 162 | 162 | 160 | 162 |
| 行驶速度 (km/h) | 10-35 | 11.5-38 | 35 | 36 | 38 | 36 |
| 使用年数 | 4 | 1.5 | 4.5 | 4.5 | 4 | 5 |

依托大修工程采用大载重量的自卸汽车配合运输, 01标和02标使用载重为

45t的福田瑞沃290、重汽豪沃336和江淮轻量化290，03标使用载重为35t的福田瑞沃210、福田欧曼260、江淮210和东风天锦200。自卸汽车具体参数列于表3-44中。

表 3-44 铣刨料运输自卸汽车基本参数及油耗表

Tab 3-44 Basic parameters and fuel consumption of autodumpers

| 参数及油耗 | 福田瑞沃 290 | 重汽豪沃 336 | 江淮轻量化 290 | 福田瑞沃 210 | 福田欧曼 260 | 江淮 210 | 东风天锦 200 |
|----------------|----------|----------|-----------|----------|----------|--------|----------|
| 额定功率 (kw) | 213 | 247 | 213 | 156 | 192 | 155 | 147 |
| 载重 (t) | 45 | 45 | 45 | 35 | 35 | 35 | 35 |
| 燃油类型 | 柴油 | 柴油 | 柴油 | 柴油 | 柴油 | 柴油 | 柴油 |
| 行驶速度 (km/h) | 80 | 80 | 80 | 85 | 96 | 85 | 90 |
| 满载油耗 (L/100km) | 85 | 105 | 82 | 53 | 66 | 52 | 49 |
| 空载油耗 (L/100km) | 50 | 62 | 48 | 35 | 37 | 35 | 32 |

自卸汽车主要消耗柴油，其排放的温室气体主要有 CO₂、CH₄ 和 N₂O。

铣刨的运输过程中自卸汽车主要往返于铣刨现场和加工厂之间，由铣刨现场出发时为满载，返回时空载。由于各标段中需要铣刨的路段距离较长，会导致铣刨路段距离加工厂的距离不一致，为方便计算，选取最远距离与最近距离的平均值作为运输距离的代表值。据调查，01标运输距离为12.3km，02标运输距离为11km，03标运输距离为10.5km。

依据表3-44可计算得各标段自卸汽车满载或空载时每百公里的平均燃油消耗（表3-45）。

表 3-45 各标段自卸汽车满载或空载时每百公里的平均燃油消耗

Tab 3-45 The average fuel consumption of each section's autodumpers when they travel one hundred kilometers in full load or no-load condition

| 标段 | 01 | 02 | 03 |
|----------------|------|------|------|
| 满载油耗 (L/100km) | 90.7 | 90.7 | 55.0 |
| 空载油耗 (L/100km) | 53.3 | 53.3 | 34.8 |

已知01标的自卸汽车满载重量为45t，则每运输1t混合料自卸汽车的燃油消耗

应为 $(90.7+53.3) \times 12.3 \div 100 \div 45 = 0.39\text{L}$ ；同理，02标每运输1t混合料自卸汽车的燃油消耗应为 $(90.7+53.3) \times 11 \div 100 \div 45 = 0.35\text{L}$ ；03标每运输1t混合料自卸汽车的燃油消耗应为 $(55.0+34.8) \times 10.5 \div 100 \div 35 = 0.27\text{L}$ 。

根据以上计算及分析，每生产1t用于冷再生基层的再生集料（RAP料），其能耗列于表3-46中。

表 3-46 1t 再生集料的能耗

Tab 3-46 Energy consumption of producing one ton of recycled aggregate

| 标段 | 能耗类型 | 设备 | 能耗 | 折标准煤系数 | 标准煤折算值 (kgce) | 合计 (kgce) |
|----|------|-------|---------|-------------------|------------------|--------------|
| 01 | 电力 | 二次筛分机 | 0.41kwh | 0.1229kgce/(kw.h) | 0.05 | 0.66 |
| | 柴油 | 装载机 | 0.105L | 1.2194kgce/L | 0.13 | |
| | | 自卸汽车 | 0.39L | 1.2194kgce/L | 0.48 | |
| 02 | 电力 | 二次筛分机 | 0.41kwh | 0.1229kgce/(kw.h) | 0.05 | 0.61 |
| | 柴油 | 装载机 | 0.105L | 1.2194kgce/L | 0.13 | |
| | | 自卸汽车 | 0.35L | 1.2194kgce/L | 0.43 | |
| 03 | 电力 | 二次筛分机 | 0.41kwh | 0.1229kgce/(kw.h) | 0.05 | 0.51 |
| | 柴油 | 装载机 | 0.105L | 1.2194kgce/L | 0.13 | |
| | | 自卸汽车 | 0.27L | 1.2194kgce/L | 0.33 | |

再生集料生产能耗在 0.51-0.66kgce 之间，再生集料二次筛分的机械电力能耗较少，73%的能耗为车辆将铣刨料运至拌合场时，运输车辆的能耗，加工铣刨料的拌合场距离对再生料的能耗有较大的影响。

3.4.3 再生集料生产温室气体排放计算方法及排放统计

(1) 温室气体排放计算方法

二次筛分机的气体排放可按电能消耗温室气体排放计算方法进行计算，见公式 3.3。装载机和自卸汽车的排放采用油耗法进行计算，见式 3.4。

依据柴油和电力的消耗量与其对应的CO₂当量排放因子，可求得生产1t再生集料的当量温室气体排放量，详见表3-47。

表 3-47 生产1t再生集料温室气体排放量

Tab 3-47 Greenhouse gas emissions of producing one ton of recycled aggregate

| 标段 | 能耗类型 | 用量 | CO ₂ 当量 (kg) | 合计 (kg) |
|----|------|----------|-------------------------|---------|
| 01 | 电力 | 0.41 kwh | 1.03 | 2.34 |
| | 柴油 | 0.495L | 1.31 | |
| 02 | 电力 | 0.41kwh | 1.03 | 2.24 |
| | 柴油 | 0.455L | 1.21 | |
| 03 | 电力 | 0.41kwh | 1.03 | 2.03 |
| | 柴油 | 0.375L | 1.00 | |

根据测算结果，将依托改建工程中每处理1t再生集料能耗及排放汇总于表3-48中。

表 3-48 依托改建工程再生集料（1t）生产能耗及排放汇总表

Tab 3-48 Energy consumption and emissions of recycled aggregate (one ton) production

| 能耗与排放 | 标段 | | |
|-------------------------|------|------|------|
| | 01 | 02 | 03 |
| 标准煤耗 (kgce) | 0.66 | 0.61 | 0.51 |
| CO ₂ 当量 (kg) | 2.34 | 2.24 | 2.03 |

再生集料生产能耗在 0.51-0.66kgce 之间，排放在 2.03-2.34kg 之间，再生集料二次筛分的机械电力能耗较少，60%的能耗为车辆将铣刨料运至拌合场时，运输车辆的能耗，加工铣刨料的拌合场距离对再生料的能耗有较大的影响。

3.5 依托改建工程原材料能耗与排放总量计算

3.5.1 原材料运输能耗与排放

前面能耗与排放的分析中，未考虑成品材料运输的能耗与排放，再次补充运输产生的能耗与排放。沥青、石料和沥青再生料均采用自卸汽车配合运输，在这个过程中消耗的主要能源为柴油，自卸汽车的具体参数详见表3-44。原材料的运输过程中自卸汽车主要往返于集料加工厂、沥青经销地和拌合站之间，由集料加工厂、沥青经销地去拌合站时为满载，返回时空载。三个标段不同原材料与拌合站之间的运距见表3-49。再生集料加工厂与冷再生混合料拌合站在同一场地，故运距为0。对于再生材料，材料运输将节约较多能耗与排放。

表 3-49 原材料运距

Tab 3-49 Load distance of raw materials

| 原材料 | 运输距离 (km) | | |
|------|-----------|----|----|
| | 01 | 02 | 03 |
| 沥青材料 | 32 | 40 | 27 |
| 玄武岩 | 45 | 35 | 29 |
| 石灰岩 | 33 | 24 | 35 |
| 矿粉 | 12 | 10 | 11 |
| 水泥 | 10 | 12 | 11 |
| 消石灰 | 10 | 12 | 11 |
| 再生集料 | 0 | 0 | 0 |

依据表3-45和表3-49，可计算得每运输1t原材料自卸汽车的燃油消耗，依据柴油与标准煤的折算系数将其转换为标准煤的消耗量。

表 3-50 运输1t原材料自卸汽车的燃油消耗

Tab 3-50 Autodumpers' fuel consumption of transporting one ton of raw materials

| 原材料 | 油耗 (L) | | |
|------|--------|------|------|
| | 01 | 02 | 03 |
| 沥青材料 | 1.02 | 1.28 | 0.69 |
| 玄武岩 | 1.44 | 1.12 | 0.74 |
| 石灰岩 | 1.06 | 0.77 | 0.90 |
| 矿粉 | 0.38 | 0.32 | 0.28 |
| 水泥 | 0.32 | 0.38 | 0.28 |
| 消石灰 | 0.32 | 0.38 | 0.28 |
| 再生集料 | 0 | 0 | 0 |

表 3-51 运输 1t 原材料的标准煤消耗值

Tab 3-51 Standard coal consumption of transporting one ton of raw materials

| 标段 | 原材料 | 能耗类型 | 用量 | 折标准煤系数 | 标准煤折算值(kgce) |
|----|------|------|------|--------------|--------------|
| 01 | 沥青材料 | 柴油 | 1.02 | 1.2194kgce/L | 1.24 |
| | 玄武岩 | 柴油 | 1.44 | 1.2194kgce/L | 1.76 |
| | 石灰岩 | 柴油 | 1.06 | 1.2194kgce/L | 1.29 |
| | 矿粉 | 柴油 | 0.38 | 1.2194kgce/L | 0.46 |
| | 水泥 | 柴油 | 0.32 | 1.2194kgce/L | 0.39 |
| | 消石灰 | 柴油 | 0.32 | 1.2194kgce/L | 0.39 |
| | 再生集料 | 柴油 | 0 | 1.2194kgce/L | 0 |
| 02 | 沥青材料 | 柴油 | 1.28 | 1.2194kgce/L | 1.56 |
| | 玄武岩 | 柴油 | 1.12 | 1.2194kgce/L | 1.37 |
| | 石灰岩 | 柴油 | 0.77 | 1.2194kgce/L | 0.94 |
| | 矿粉 | 柴油 | 0.32 | 1.2194kgce/L | 0.39 |
| | 水泥 | 柴油 | 0.38 | 1.2194kgce/L | 0.46 |
| | 消石灰 | 柴油 | 0.38 | 1.2194kgce/L | 0.46 |
| | 再生集料 | 柴油 | 0 | 1.2194kgce/L | 0 |
| 03 | 沥青材料 | 柴油 | 0.69 | 1.2194kgce/L | 0.84 |
| | 玄武岩 | 柴油 | 0.74 | 1.2194kgce/L | 0.90 |
| | 石灰岩 | 柴油 | 0.90 | 1.2194kgce/L | 1.10 |
| | 矿粉 | 柴油 | 0.28 | 1.2194kgce/L | 0.34 |
| | 水泥 | 柴油 | 0.28 | 1.2194kgce/L | 0.34 |
| | 消石灰 | 柴油 | 0.28 | 1.2194kgce/L | 0.34 |
| | 再生集料 | 柴油 | 0 | 1.2194kgce/L | 0 |

依据柴油消耗量与其对应的CO₂当量排放因子的乘积，可求得不同温室气体的排放量，详见表3-52。

表 3-52 运输 1t 原材料温室气体排放量

Tab 3-52 Greenhouse gas emissions of transporting one ton of raw materials

| 标段 | 原材料 | 能耗类型 | 用量 | CO ₂ 当量 (kg) |
|----|------|------|------|-------------------------|
| 01 | 沥青材料 | 柴油 | 1.02 | 2.71 |
| | 玄武岩 | 柴油 | 1.44 | 3.82 |
| | 石灰岩 | 柴油 | 1.06 | 2.81 |
| | 矿粉 | 柴油 | 0.38 | 1.01 |
| | 水泥 | 柴油 | 0.32 | 0.85 |
| | 消石灰 | 柴油 | 0.32 | 0.85 |
| | 再生集料 | 柴油 | 0 | 0 |
| 02 | 沥青材料 | 柴油 | 1.28 | 3.40 |
| | 玄武岩 | 柴油 | 1.12 | 2.97 |
| | 石灰岩 | 柴油 | 0.77 | 2.04 |
| | 矿粉 | 柴油 | 0.32 | 0.85 |
| | 水泥 | 柴油 | 0.38 | 1.01 |
| | 消石灰 | 柴油 | 0.38 | 1.01 |
| | 再生集料 | 柴油 | 0 | 0 |
| 03 | 沥青材料 | 柴油 | 0.69 | 1.83 |
| | 玄武岩 | 柴油 | 0.74 | 1.96 |
| | 石灰岩 | 柴油 | 0.90 | 2.39 |
| | 矿粉 | 柴油 | 0.28 | 0.74 |
| | 水泥 | 柴油 | 0.28 | 0.74 |
| | 消石灰 | 柴油 | 0.28 | 0.74 |
| | 再生集料 | 柴油 | 0 | 0 |

将不同标段原材料运输的能耗和排放汇总于表 3-53。

表 3-53 运输1t原材料的能耗和排放汇总

Tab 3-53 Energy consumption and emissions of transporting one ton of raw materials

| 标段 | 原材料 | 能耗类型 | 标准煤耗(kgce) | CO ₂ 当量 (kg) |
|----|------|------|------------|-------------------------|
| 01 | 沥青材料 | 柴油 | 1.24 | 2.71 |
| | 玄武岩 | 柴油 | 1.76 | 3.82 |
| | 石灰岩 | 柴油 | 1.29 | 2.81 |
| | 矿粉 | 柴油 | 0.46 | 1.01 |
| | 水泥 | 柴油 | 0.39 | 0.85 |
| | 消石灰 | 柴油 | 0.39 | 0.85 |
| | 再生集料 | 柴油 | 0 | 0 |
| 02 | 沥青材料 | 柴油 | 1.56 | 3.40 |
| | 玄武岩 | 柴油 | 1.37 | 2.97 |
| | 石灰岩 | 柴油 | 0.94 | 2.04 |
| | 矿粉 | 柴油 | 0.39 | 0.85 |
| | 水泥 | 柴油 | 0.46 | 1.01 |
| | 消石灰 | 柴油 | 0.46 | 1.01 |
| | 再生集料 | 柴油 | 0 | 0 |
| 03 | 沥青材料 | 柴油 | 0.84 | 1.83 |
| | 玄武岩 | 柴油 | 0.90 | 1.96 |
| | 石灰岩 | 柴油 | 1.10 | 2.39 |
| | 矿粉 | 柴油 | 0.34 | 0.74 |
| | 水泥 | 柴油 | 0.34 | 0.74 |
| | 消石灰 | 柴油 | 0.34 | 0.74 |
| | 再生集料 | 柴油 | 0 | 0 |

3.5.2 考虑成品运输的原材料能耗与排放

考虑每个标段的运距，每使用 1t 原材料能耗和排放汇总于表 3-54 中。

表 3-54 每生产 1t 原材料能耗和排放汇总

Tab 3-54 Energy consumption and emissions of producing one ton of raw materials

| 标段 | 原材料 | 生产能耗与排放 (kgce/kg) | 运输能耗与排放 (kgce/kg) | 1t 材料能耗与排放 (kgce/kg) | | |
|--------|-----|----------------------|----------------------|-------------------------|-------------|-------------|
| 01 | 沥青 | 普通沥青 | 67.4/134.2 | 1.24/2.71 | 68.6/136.9 | |
| | | SBS 改性沥青 | 124.7/313.8 | 1.24/2.71 | 125.9/316.5 | |
| | | 乳化沥青 | 52.7/130.1 | 1.24/2.71 | 53.9/132.8 | |
| | | 改性乳化沥青 | 95.1/229.8 | 1.24/2.71 | 96.3/232.5 | |
| | 石料 | 玄武岩 | 1.29/6.04 | 1.76/3.82 | 3.1/9.9 | |
| | | 石灰岩 | 0.86/3.72 | 1.29/2.81 | 2.2/6.5 | |
| | | 再生集料 | 0.66/2.34 | 0 | 0.7/2.3 | |
| | | 矿粉 | 2.66/7.39 | 0.46/1.01 | 3.1/8.4 | |
| | | 水泥 | 116.6/355.9 | 0.39/0.85 | 117.0/356.8 | |
| | | 消石灰 | 147.0/415.0 | 0.39/0.85 | 147.4/415.9 | |
| | 02 | 沥青 | 普通沥青 | 67.4/134.2 | 1.56/3.40 | 69.0/137.6 |
| | | | SBS 改性沥青 | 124.7/313.8 | 1.56/3.40 | 126.3/317.2 |
| 乳化沥青 | | | 52.7/130.1 | 1.56/3.40 | 54.3/133.5 | |
| 改性乳化沥青 | | | 95.1/229.8 | 1.56/3.40 | 96.6/233.2 | |
| 石料 | | 玄武岩 | 1.29/6.04 | 1.37/2.97 | 2.7/9.0 | |
| | | 石灰岩 | 0.86/3.72 | 0.94/2.04 | 1.8/5.8 | |
| | | 再生集料 | 0.61/2.24 | 0 | 0.6/2.2 | |
| | | 矿粉 | 2.66/7.39 | 0.39/0.85 | 3.1/8.2 | |
| | | 水泥 | 116.6/355.9 | 0.46/1.01 | 117.1/356.9 | |
| | | 消石灰 | 147.0/415.0 | 0.46/1.01 | 147.5/416.0 | |

表 3-54 每生产 1t 原材料能耗和排放汇总 (续)

Tab 3-54 Energy consumption and emissions of producing one ton of raw materials (continue)

| 标段 | 原材料 | 生产能耗与排放 (kgce/kg) | 运输能耗与排放 (kgce/kg) | 1t 材料能耗与排放 (kgce/kg) |
|----|----------|----------------------|----------------------|-------------------------|
| | 普通沥青 | 67.4/134.2 | 0.84/1.83 | 68.2/136.0 |
| | SBS 改性沥青 | 124.7/313.8 | 0.84/1.83 | 125.5/315.6 |
| | 乳化沥青 | 52.7/130.1 | 0.84/1.83 | 53.5/131.9 |
| | 改性乳化沥青 | 95.1/229.8 | 0.84/1.83 | 95.9/231.6 |
| 03 | 玄武岩 | 1.29/6.04 | 0.90/1.96 | 2.2/8.0 |
| | 石灰岩 | 0.86/3.72 | 1.10/2.39 | 2.0/6.1 |
| | 再生集料 | 0.51/2.03 | 0 | 0.5/2.0 |
| | 矿粉 | 2.66/7.39 | 0.34/0.74 | 3.0/8.1 |
| | 水泥 | 116.6/355.9 | 0.34/0.74 | 116.9/356.6 |
| | 消石灰 | 147.0/415.0 | 0.34/0.74 | 147.3/415.7 |

上表分析数据显示,运输能耗在集料能耗中均占较大比重(41.4%-60.6%)。再生集料加工场地与再生冷再生混合料拌合场在同一场所,无车辆运输成本,能耗与排放大为降低。再生集料能耗(0.51-0.66kgce)约仅为新集料能耗(0.86-1.29kgce)的50%。

依托改建工程项目共使用再生集料309814.1t,实现了废旧沥青面层材料的100%再生利用,由此节约新集料约300519.7t。

依托改建工程项目共消耗原材料:改性沥青19649.6t、普通沥青10482.3t、改性乳化沥青13465.2t,玄武岩集料149476.7t,石灰岩集料668340.2t、再生集料309814.1t,矿粉83741.2t、消石灰2743.3t、水泥14053.7t,材料总体能耗为895.47万吨折算标准煤,排放为2416.45万吨CO₂。

3.5.3 分项工程原材料能耗、排放汇总表

根据前面的分析结果,可计算得出各结构层单幅每公里的能耗与排放。

(1) 沥青面层

表 3-55 上面层单幅每公里能耗与排放

Tab 3-55 Energy consumption and emissions for above layer

| 标段 | 原材料 | 用量 (t) | 1t 能耗与排放 (kgce/kg) | 1km 能耗与排放 (kgce/kg) | 合计 (kgce/kg) |
|----|------------|--------|--------------------|---------------------|----------------|
| 01 | 玄武岩 (t) | 428.3 | 3.1/9.9 | 1327.7/4240.2 | 5899.1/16078.8 |
| | 矿粉 (t) | 40.5 | 3.1/8.4 | 125.6/340.2 | |
| | 消石灰 (t) | 7.1 | 147.4/415.9 | 1046.5/2952.9 | |
| | SBS改性沥青(t) | 27.0 | 125.9/316.5 | 3399.3/8545.5 | |
| 02 | 玄武岩 (t) | 428.3 | 2.7/9.0 | 1156.4/3854.7 | 5739.4/15704.8 |
| | 矿粉 (t) | 40.5 | 3.1/8.2 | 125.6/332.1 | |
| | 消石灰 (t) | 7.1 | 147.5/416.0 | 1047.3/2953.6 | |
| | SBS改性沥青(t) | 27.0 | 126.3/317.2 | 3410.1/8564.4 | |
| 03 | 玄武岩 (t) | 428.3 | 2.2/8.0 | 942.3/3426.4 | 5182.1/14332.6 |
| | 矿粉 (t) | 48.1 | 3.0/8.1 | 144.3/389.6 | |
| | 消石灰 (t) | 4.8 | 147.3/415.7 | 707.0/1995.4 | |
| | SBS改性沥青(t) | 27.0 | 125.5/315.6 | 3388.5/8521.2 | |

表 3-56 中面层单幅每公里能耗与排放

Tab 3-56 Energy consumption and emissions for mid-layer

| 标段 | 原材料 | 用量 (t) | 1t 能耗与排放 (kgce/kg) | 1km 能耗与排放 (kgce/kg) | 合计 (kgce/kg) |
|----|------------|--------|--------------------|---------------------|----------------|
| 01 | 石灰岩 (t) | 624.4 | 2.2/6.5 | 1373.7/4058.6 | 5019.8/13240.7 |
| | 矿粉 (t) | 26.8 | 3.1/8.4 | 83.1/225.1 | |
| | SBS改性沥青(t) | 28.3 | 125.9/316.5 | 3563.0/8957.0 | |
| 02 | 石灰岩 (t) | 624.4 | 1.8/5.8 | 1123.9/3621.5 | 4781.3/12818.1 |
| | 矿粉 (t) | 26.8 | 3.1/8.2 | 83.1/219.8 | |
| | SBS改性沥青(t) | 28.3 | 126.3/317.2 | 3574.3/8976.8 | |
| 03 | 石灰岩 (t) | 624.4 | 2.0/6.1 | 1248.8/3808.8 | 4772.3/12680.6 |
| | 矿粉 (t) | 19.9 | 3.0/8.1 | 59.7/161.2 | |
| | SBS改性沥青(t) | 27.6 | 125.5/315.6 | 3463.8/8710.6 | |

表 3-57 下面层单幅每公里能耗与排放

Tab 3-57 Energy consumption and emissions for lower layer

| 标段 | 原材料 | 用量 (t) | 1t 能耗与排放 (kgce /kg) | 1km 能耗与排放 (kgce /kg) | 合计 (kgce /kg) |
|----|----------|--------|------------------------|-------------------------|----------------|
| 01 | 石灰岩 (t) | 856.5 | 2.2/6.5 | 1884.3/5567.3 | 4374.4/10595.1 |
| | 矿粉 (t) | 26.5 | 3.1/8.4 | 82.2/222.6 | |
| | 普通沥青 (t) | 35.1 | 68.6/136.9 | 2407.9/4805.2 | |
| 02 | 石灰岩 (t) | 856.5 | 1.8/5.8 | 1541.7/4967.7 | 4045.8/10014.8 |
| | 矿粉 (t) | 26.5 | 3.1/8.2 | 82.2/217.3 | |
| | 普通沥青 (t) | 35.1 | 69.0/137.6 | 2421.9/4829.8 | |
| 03 | 石灰岩 (t) | 856.5 | 2.0/6.1 | 1713.0/5224.7 | 4070.4/9981.8 |
| | 矿粉 (t) | 26.5 | 3.0/8.1 | 79.5/214.7 | |
| | 普通沥青 (t) | 33.4 | 68.2/136.0 | 2277.9/4542.4 | |

(2) 基层

表 3-58 冷再生基层单幅每公里能耗与排放

Tab 3-58 Energy consumption and emissions of cold recycling grassroots

| 标段 | 原材料 | 用量 (t) | 1t 能耗与排放 (kgce /kg) | 1km 能耗与排放 (kgce /kg) | 合计 (kgce /kg) |
|----|------------|--------|------------------------|-------------------------|-----------------|
| 01 | RAP料 (t) | 1352.9 | 0.7/2.3 | 947.0/3111.7 | 10953.5/29946.8 |
| | 石灰岩 (t) | 194.4 | 2.2/6.5 | 427.7/1263.6 | |
| | 矿粉 (t) | 40.5 | 3.1/8.4 | 125.6/340.2 | |
| | 水泥 (t) | 32.4 | 117.0/356.8 | 3790.8/11560.3 | |
| | 改性乳化沥青 (t) | 58.8 | 96.3/232.5 | 5662.4/13671.0 | |
| 02 | RAP料 (t) | 1352.9 | 0.6/2.2 | 811.7/2976.4 | 10761.3/29711.8 |
| | 石灰岩 (t) | 194.4 | 1.8/5.8 | 349.9/1127.5 | |
| | 矿粉 (t) | 40.5 | 3.1/8.2 | 125.6/332.1 | |
| | 水泥 (t) | 32.4 | 117.1/356.9 | 3794.0/11563.6 | |
| | 改性乳化沥青 (t) | 58.8 | 96.6/233.2 | 5680.1/13712.2 | |

表 3-58 冷再生基层单幅每公里能耗与排放 (续)

Tab 3-58 Energy consumption and emissions of cold recycling grassroots (continue)

| 标段 | 原材料 | 用量 (t) | 1t 能耗与排放 (kgce /kg) | 1km 能耗与排放 (kgce /kg) | 合计 (kgce /kg) |
|----|------------|--------|---------------------|----------------------|-----------------|
| | RAP料 (t) | 1353.9 | 0.5/2.0 | 677.0/2707.8 | |
| | 石灰岩 (t) | 193.4 | 2.0/6.1 | 386.8/1179.7 | |
| 03 | 矿粉 (t) | 32.2 | 3.0/8.1 | 96.6/260.8 | 10563.5/29248.9 |
| | 水泥 (t) | 32.2 | 116.9/356.6 | 3764.2/11482.5 | |
| | 改性乳化沥青 (t) | 58.8 | 95.9/231.6 | 5638.9/13618.1 | |

表 3-59 大粒径碎石基层单幅路面每公里能耗与排放汇总

Tab 3-59 Energy consumption and emissions of large size asphalt macadam base course

| 标段 | 原材料 | 用量 (t) | 1t 能耗与排放 (kgce /kg) | 1km 能耗与排放 (kgce /kg) | 合计 (kgce /kg) |
|----|--------------|--------|---------------------|----------------------|-----------------|
| | 石灰岩 (t) | 1547.3 | 2.2/6.5 | 3404.1/10057.5 | |
| 01 | SBS 改性沥青 (t) | 48.0 | 125.9/316.5 | 6043.2/15192.0 | 11746.7/31737.5 |
| | 消石灰 (t) | 15.6 | 147.4/415.9 | 2299.4/6488.0 | |
| | 石灰岩 (t) | 1547.3 | 1.8/5.8 | 2785.1/8974.3 | |
| 02 | SBS 改性沥青 (t) | 48.0 | 126.3/317.2 | 6062.4/15225.6 | 11148.5/30689.5 |
| | 消石灰 (t) | 15.6 | 147.5/416.0 | 2301.0/6489.6 | |
| | 石灰岩 (t) | 1547.3 | 2.0/6.1 | 3094.6/9438.5 | |
| 03 | SBS 改性沥青 (t) | 48.0 | 125.5/315.6 | 6024.0/15148.8 | 11416.5/31072.2 |
| | 消石灰 (t) | 15.6 | 147.3/415.7 | 2297.9/6484.9 | |

表 3-60 水泥稳定碎石基层单幅路面每公里能耗与排放

Tab 3-60 Energy consumption and emissions of cement-stabilized macadam base course

| 标段 | 原材料 | 用量 (t) | 1t 能耗与排放 (kgce /kg) | 1km 能耗与排放 (kgce /kg) | 合计 (kgce /kg) |
|----|---------|--------|------------------------|-------------------------|-----------------|
| 01 | 石灰岩 (t) | 1642.6 | 2.2/6.5 | 3613.7/10676.9 | 13219.4/39970.2 |
| | 水泥 (t) | 82.1 | 117.0/356.8 | 9605.7/29293.3 | |
| 02 | 石灰岩 (t) | 1642.6 | 1.8/5.8 | 2956.7/9527.1 | 12570.6/38828.6 |
| | 水泥 (t) | 82.1 | 117.1/356.9 | 9613.9/29301.5 | |
| 03 | 石灰岩 (t) | 1642.6 | 2.0/6.1 | 3285.2/10019.9 | 12882.7/39296.8 |
| | 水泥 (t) | 82.1 | 116.9/356.6 | 9597.5/29276.9 | |

表 3-61 各结构层每公里材料能耗与排放汇总表

Tab 3-61 Energy consumption and emissions for one kilometer raw materials
of each structural layer

| 标段 | 01 | | 02 | | 03 | | 平均值 | |
|---------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
| | 能耗 (kgce) | 排放 (kg) | 能耗 (kgce) | 排放 (kg) | 能耗 (kgce) | 排放 (kg) | 能耗 (kgce) | 排放 (kg) |
| 沥青上面层 | 5899.1 | 16078.8 | 5739.4 | 15704.8 | 5182.1 | 14332.6 | 5606.9 | 15372.1 |
| 沥青中面层 | 5019.8 | 13240.7 | 4781.3 | 12818.1 | 4772.3 | 12680.6 | 4857.8 | 12913.1 |
| 沥青下面层 | 4374.4 | 10595.1 | 4045.8 | 10014.8 | 4070.4 | 9981.8 | 4163.5 | 10197.2 |
| 冷再生基层 | 10953.5 | 29946.8 | 10761.3 | 29711.8 | 10563.5 | 29248.9 | 10759.4 | 29635.8 |
| 大粒径沥青 碎石基层 | 11746.7 | 31737.5 | 11148.5 | 30689.5 | 11416.5 | 31072.2 | 11437.2 | 31166.4 |
| 水泥稳定碎 石基层 | 13219.4 | 39970.2 | 12570.6 | 38828.6 | 12882.7 | 39296.8 | 12890.9 | 39365.2 |

基层结构原材料阶段能耗与排放由低到高分别是：冷再生基层、大粒径沥青碎石基层、水泥稳定碎石基层。由于水泥是高能耗材料，水泥稳定碎石材料能耗最高。冷再生基层同大粒径沥青碎石基层相比，原材料能耗低6.0%、排放低4.9%；同水泥稳定碎石相比，原材料能耗降低16.5%、排放降低25.2%。

根据以上分析，可得出原材料生产期节能减排措施：尽量减少水泥、石灰等高耗能、高排放材料的用量；使用再生集料；就近取材，尽量降低运输距离；拌

合站位置合理设置，减少运输环节能耗与排放。

3.6 本章小结

(1) 原材料生产期胶结材料都是高耗能、高排放材料，尤其是石灰、水泥、改性沥青。原材料（胶结料）能耗与排放由高到低的顺序为：石灰、水泥、改性沥青、改性乳化沥青、沥青、乳化沥青。

(2) 采用现场调研法确定集料生产能耗与排放。每生产1t玄武岩集料，其能耗、排放分别为1.29kgce、6.04kg，每生产1t石灰岩集料，其能耗、排放分别为0.86kgce、3.72kg；运输能耗在集料能耗中均占较大比重（41.4%-60.6%）。

(3) 生产石灰岩集料比玄武岩集料能耗低33.8%、排放低38.4%。玄武岩石质坚硬，加工难度大于石灰岩，且由于玄武岩集料用于上面层，粒径较小，因此加工过程能耗、排放较大。

(4) 再生集料生产能耗在0.51-0.66kgce之间，再生集料二次筛分的机械电力能耗较少，60%的能耗为车辆将铣刨料运至拌合场时，运输车辆的能耗，加工铣刨料的拌合场距离对再生料的能耗有较大的影响。

(5) 再生集料加工场地与再生冷再生混合料拌合场在同一场所，无车辆运输成本大为降低，经计算使用再生集料能耗（0.51-0.66kgce）约仅为新集料能耗（0.86-1.29）的50%。

(6) 基层结构原材料阶段能耗与排放由低到高分别是：冷再生基层、大粒径沥青碎石基层、水泥稳定碎石基层。由于水泥是高能耗材料，水泥稳定碎石材料能耗最高。冷再生基层同大粒径沥青碎石基层相比，原材料能耗低6.0%、排放低4.9%；同水泥稳定碎石相比，原材料能耗降低16.5%、排放降低25.2%。

(7) 依托改建工程项目共消耗原材料：改性沥青19649.6t、普通沥青10482.3t、改性乳化沥青13465.2t，玄武岩集料149476.7t，石灰岩集料668340.2t、再生集料309814.1t，矿粉83741.2t、消石灰2743.3t、水泥14053.7t，材料总体能耗为895.47万吨折算标准煤，排放为2416.45万吨CO₂。

(8) 依托改建工程项目共使用再生集料309814.1t，实现了废旧沥青面层材料的100%再生利用，由此节约新集料约300519.7t。

(9) 原材料生产期节能减排措施：尽量减少水泥、石灰、改性沥青等高耗能、高排放材料的用量；使用再生集料；就近取材，尽量降低运输距离；拌合站位置合理设置，减少运输环节能耗与排放。

第四章 沥青路面改建工程施工期能耗与排放分析

沥青路面施工过程中的耗能较高，排放量较大。本章依托改建工程，主要采用现场调查的方法，从生命周期的视角出发，分析沥青面层、冷再生基层、大粒径沥青碎石基层在拌和、摊铺、碾压过程中的主要工艺流程、技术设备、能源消耗和气体排放的类别及数量，量化计算能耗与排放，分析沥青路面施工期能耗与排放的关键环节和影响因素，为提出沥青路面施工期节能减排措施奠定基础^[32]。

4.1 沥青面层施工期能耗与排放

沥青面层施工包括沥青混合料拌和、摊铺、碾压及运输四个环节。沥青面层分为上、中、下三个层次，依次是SMA-13(4cm)、AC-20C (6cm)、AC-25C (8cm)。

4.1.1 拌和

(1) 工艺及能耗、排放类型

目前我国沥青混合料拌和主要使用间歇式拌合楼。沥青混合料拌合时，包含工艺过程如下：装载机供料、集料进入冷料仓初配，集料进入烘干滚筒烘干、加热，热料二次筛分（储存在热料仓）、集料、矿粉和沥青称重拌和、自卸汽车装料运走（进入成料仓储存）。拌合楼生产流程见图4-1，拌合过程中排放源及能耗类型见表4-1。

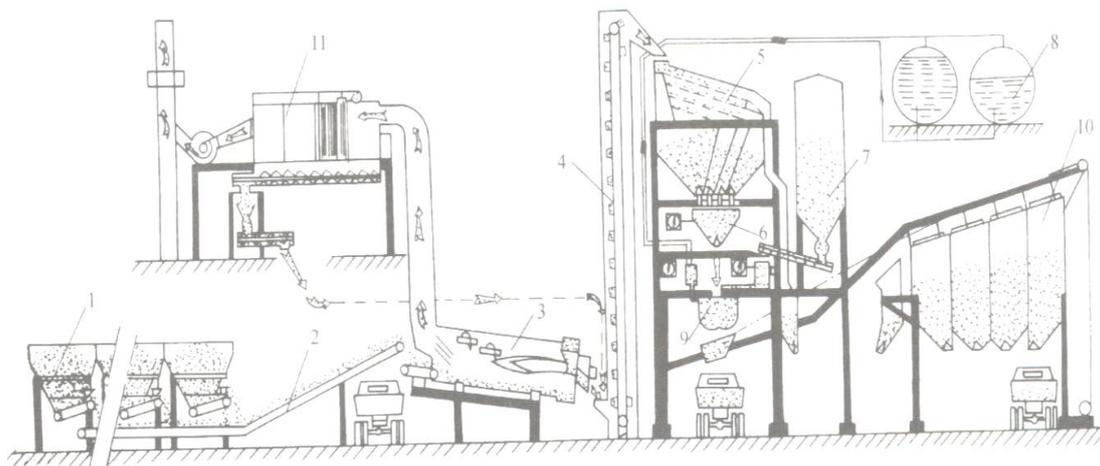


图 4-1 间歇式拌和楼生产工艺简图

Fig 4-1 The intermittent mixing floor production process

表 4-1 拌和过程中排放源及能耗类型

Tab 4-1 The emission source and type of energy consumption for the mixing process

| 沥青混合料拌和 | 排放源 | 依托项目能耗类型 |
|---------|--|----------|
| 拌合楼拌和过程 | 1、冷矿料储存及配料装置；2、冷矿料输送机；3、冷矿料烘干加热系统；4、热矿料提升机；5、热矿料筛分及储存装置；6、热矿料计量装置；7、矿粉供给及计量装置；8、沥青供给系统；9、搅拌器；10、成品料储存仓；11、除尘装置 | 电能、精煤 |
| 辅助生产 | 拌合楼控制室、沥青储存加热装置、装载机供料 | (重)柴油、电能 |

依托改建项目三个标段的拌和楼型号分别是廊坊 DG-5000、加隆 4000 和南方路机 3000，设备参数列于表 4-2 中。

表 4-2 沥青拌合站设备基本参数表

Tab 4-2 The basic parameters of asphalt mixing station

| 标段 | 01 | 02 | 03 |
|------------------------|------------------------------|---------|-----------|
| 型号 | 廊坊 DG-5000 | 加隆 4000 | 南方路机 3000 |
| 生产能力 (t/h) | 320 | 320 | 180-240 |
| 料仓容积 (m ³) | 50 | 45 | 25 |
| 装机总功率 (kw) | 870 | 865 | 655 |
| 使用年数 | 2 | 6 | 6 |
| 沥青混合料类型 | SMA-13、AC-20C、AC-25C、LSPM-30 | | |
| 能耗类型 | 精煤+电 | | |

在沥青混合料拌和环节，沥青拌合楼主要消耗是精煤与电，沥青储存加热采用重柴油，装载机、运输车辆主要消耗柴油，其排放的温室气体主要有 CO₂、CH₄ 和 N₂O。

(2) 能耗调查与计算

采用现场调查的方式分别对三个标段上、中、下面层拌合站拌和过程中的煤耗、电耗以及装载机、运输车辆的柴油消耗等进行收集。沥青拌合站能耗调查数据详见表4-3~4-5。

表 4-3 沥青拌合站上面层产量与能耗调查表

Tab 4-3 The above layer's output and energy consumption of asphalt mixing station

| 标段 | 01 | | 02 | | 03 | |
|---------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 气温 (最低/最高) °C | 23/34 | 22/28 | 22/30 | 24/31 | 20/27 | 18/28 |
| 产量 (t) | 1624.5 | 1652 | 2540 | 2490 | 1722 | 1314 |
| 耗电量 (kwh) | 7270 | 7255 | 6230 | 5480 | 5500 | 3636 |
| 精煤 (t) | 17.9 | 17.8 | 35.4 | 35.2 | 22.0 | 17.4 |

表 4-4 沥青拌合站中面层产量与能耗调查表

Tab 4-4 The mid-layer's output and energy consumption of asphalt mixing station

| 标段 | 01 | | 02 | | 03 | |
|---------------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 气温 (最低/最高) °C | 16/25 | 21/32 | 18/28 | 20/30 | 17/26 | 17/27 |
| 产量 (t) | 1230 | 1096.2 | 2780 | 2530 | 1523 | 1350 |
| 耗电量 (kwh) | 3690 | 3330 | 6010 | 5500 | 4500 | 3780 |
| 精煤 (t) | 11.9 | 10.9 | 38 | 38.3 | 18.9 | 17.2 |

表 4-5 沥青拌合站下面层产量与能耗调查表

Tab 4-5 The lower layer's output and energy consumption of asphalt mixing station

| 标段 | 01 | | 02 | | 03 | |
|---------------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 气温 (最低/最高) °C | 24/31 | 18/27 | 19/30 | 15/28 | 16/27 | 14/18 |
| 产量 (t) | 1120 | 1341 | 2750 | 2540 | 1550 | 1520 |
| 耗电量 (kwh) | 3500 | 4006 | 6000 | 5538.5 | 4380 | 4470 |
| 精煤 (t) | 10.2 | 11.9 | 37.8 | 34.9 | 18.5 | 19.2 |

经计算可求得各标段上、中、下面层每拌合1t 沥青混合料的电能和精煤的消耗量 (表4-6)。沥青混合料的主要组成为集料, 而拌合站中的集料主要由装载

机供给，且在拌合过程中有少量集料损耗，由此为简化计算，可认为每拌合1t混合料需装载机供给1t集料，每吨供料消耗柴油0.105L (0.13 kgce)，排放温室气体0.28kg。在沥青混合料生产过程中还涉及到沥青加热环节，依托改建工程沥青罐采用重柴油加热，经调查1t沥青混合料沥青加热需要的能耗为重柴油0.53kg(0.76kgce)，产生的温室气体排放为1.60kg。依据电力和精煤与标准煤的转换关系可得出各标段拌合站每拌合1t沥青混合料整个过程的标准煤消耗量（表4-6）。

表 4-6 沥青拌合站拌合 1t 沥青混合料能耗汇总表

Tab 4-6 Energy consumption of mixing one ton of asphalt mixture

| 层位 | 能源 | 标段 | | |
|-----|----------------|------|------|------|
| | | 01 | 02 | 03 |
| 上面层 | 电力 (kwh) | 4.4 | 2.2 | 3.0 |
| | 精煤 (kg) | 10.9 | 14.0 | 13.0 |
| | 折算标准煤用量 (kgce) | 10.4 | 12.9 | 12.1 |
| 中面层 | 电力 (kwh) | 3.0 | 2.2 | 2.9 |
| | 精煤 (kg) | 9.8 | 14.4 | 12.6 |
| | 折算标准煤用量 (kgce) | 9.2 | 13.2 | 11.7 |
| 下面层 | 电力 (kwh) | 3.1 | 2.2 | 2.9 |
| | 精煤 (kg) | 9.0 | 13.7 | 12.3 |
| | 折算标准煤用量 (kgce) | 8.5 | 12.6 | 11.4 |

不同的沥青拌合站能耗差异明显，每拌和1t沥青混合料，沥青拌合站的能耗在8.5-13.2kgce之间，沥青上面层（SMA13）因添加纤维、使用改性沥青，且粒径较小，能耗比中面层高3.5%，比下面层高9.3%。拌和时间、拌和温度都会影响能耗。

(3) 温室气体排放计算

沥青混合料拌和排放主要是拌和楼消耗电能和化石燃料排放、装载机消耗柴油排放以及沥青混合料自身排放。其中，拌和楼和装载机主要排放源，沥青混合料自身排放量与之相比极少且实测难度较大，本着考虑主要排放的思想，本文中混合料自身的排放忽略不计。根据能耗类型及数量，可计算出温室气体排放CO₂当量（表4-7）。

表 4-7 生产1t沥青混合料温室气体排放CO₂当量

Tab 4-7 Carbon dioxide equivalence of producing one ton of asphalt mixture

| 混合料类型 | 标段 | 能源 | 用量 | CO ₂ 当量 (kg) | 合计 (kg) |
|--------|----|-----|---------|-------------------------|---------|
| SMA-13 | 01 | 电力 | 4.4kwh | 2.72 | 32.3 |
| | | 精煤 | 10.9kg | 27.74 | |
| | | 柴油 | 0.105L | 0.28 | |
| | | 重柴油 | 0.53kg | 1.60 | |
| | 02 | 电力 | 2.2kwh | 1.36 | 38.9 |
| | | 精煤 | 14.0 kg | 35.63 | |
| | | 柴油 | 0.105L | 0.28 | |
| | | 重柴油 | 0.53kg | 1.60 | |
| | 03 | 电力 | 3.0kwh | 1.85 | 36.8 |
| | | 精煤 | 13.0kg | 33.09 | |
| | | 柴油 | 0.105L | 0.28 | |
| | | 重柴油 | 0.53kg | 1.60 | |
| AC-20C | 01 | 电力 | 3.0kwh | 1.85 | 28.7 |
| | | 精煤 | 9.8kg | 24.94 | |
| | | 柴油 | 0.105L | 0.28 | |
| | | 重柴油 | 0.53kg | 1.60 | |
| | 02 | 电力 | 2.2kwh | 1.36 | 39.9 |
| | | 精煤 | 14.4kg | 36.65 | |
| | | 柴油 | 0.105L | 0.28 | |
| | | 重柴油 | 0.53kg | 1.60 | |
| | 03 | 电力 | 2.9kwh | 1.79 | 35.7 |
| | | 精煤 | 12.6kg | 32.07 | |
| | | 柴油 | 0.105L | 0.28 | |
| | | 重柴油 | 0.53kg | 1.60 | |

表 4-7 生产1t沥青混合料温室气体排放CO₂当量 (续)

Tab 4-7 Carbon dioxide equivalence of producing one ton of asphalt mixture(continue)

| 混合料类型 | 标段 | 能源 | 用量 | CO ₂ 当量 (kg) | 合计 (kg) |
|--------|----|-----|--------|-------------------------|---------|
| AC-25C | 01 | 电力 | 3.1kwh | 1.92 | 26.7 |
| | | 精煤 | 9.0kg | 22.91 | |
| | | 柴油 | 0.105L | 0.28 | |
| | | 重柴油 | 0.53kg | 1.60 | |
| | 02 | 电力 | 2.2kwh | 1.36 | 38.1 |
| | | 精煤 | 13.7kg | 34.87 | |
| | | 柴油 | 0.105L | 0.28 | |
| | | 重柴油 | 0.53kg | 1.60 | |
| | 03 | 电力 | 2.9kwh | 1.79 | 35.0 |
| | | 精煤 | 12.3kg | 31.30 | |
| | | 柴油 | 0.105L | 0.28 | |
| | | 重柴油 | 0.53kg | 1.60 | |

依托改建工程中单幅路面1km沥青混合料拌合的能耗和温室气体排放汇总于表4-8中。

表 4-8 沥青面层单幅路面1km混合料拌合的能耗和温室气体排放

Tab 4-8 Energy consumption and emissions of mixing asphalt mixture

| 沥青混合料类型 | 能耗与排放 | 标段 | | |
|---------|-------------------------|--------|---------|---------|
| | | 01 | 02 | 03 |
| SMA-13 | 标准煤耗 (kgce) | 2017.2 | 2427.2 | 2296.0 |
| | CO ₂ 当量 (kg) | 5297.2 | 6379.6 | 6035.2 |
| AC-20C | 标准煤耗 (kgce) | 2730.6 | 3714.6 | 3345.6 |
| | CO ₂ 当量 (kg) | 7060.2 | 9815.4 | 8782.2 |
| AC-25C | 标准煤耗 (kgce) | 3411.2 | 4756.0 | 4362.4 |
| | CO ₂ 当量 (kg) | 8757.6 | 12496.8 | 11480.0 |

4.1.2 摊铺

(1) 工艺及能耗

对于新建工程,一般采用两台摊铺机梯队作业。依托改建工程上面层一个工作面采用2台摊铺机,中下面层及基层一个工作面均采用一台摊铺机。其中,上面层的摊铺宽度为11.2m,中下面层的摊铺宽度为8.2m,基层的摊铺宽度为7.9m。摊铺过程中,一般有2-3辆运料车等待。整个面层的摊铺速度定为3.0m/min,松铺系数为1.2。



图 4-2 沥青中面层摊铺、碾压施工

Fig 4-2 Asphalt mid-layer paving and rolling construction

摊铺过程的能耗主要来源于摊铺机,摊铺机消耗的能源为柴油。依托三个标段均使用相同型号沥青摊铺机,摊铺机型号及参数详见表4-9。

表 4-9 沥青摊铺机基本参数表

Tab 4-9 Basic parameters of asphalt pavers

| 类型 | 沥青摊铺机 |
|------------------------|------------------|
| 型号 | 福革勒 super 2100-C |
| 总功率 (kw) | 180 |
| 摊铺宽度 (m) | 2.5-13 |
| 摊铺厚度 (mm) | 300 |
| 摊铺速度 (m/min) | 0-25 |
| 料斗容量 (m ³) | 6 |

摊铺机主要消耗的是柴油,其排放的温室气体主要有CO₂、CH₄和N₂O。

(2) 排放检测

摊铺过程中的排放主要包括摊铺机消耗柴油产生温室气体排放、高温摊铺时沥青混合料自身排放两部分。

摊铺机与配套使用的自卸汽车消耗柴油产生温室气体排放主要为二氧化碳（CO₂）、甲烷（CH₄）、一氧化亚氮（N₂O）。对于高温下摊铺沥青混合料自身排放产物，一般文献认为有沥青烟、CO、SO₂、VOC 和氮氧化物等，温室气体主要有CO₂、N₂O、CH₄。

课题组对于高温下摊铺沥青混合料自身排放产物进行了现场检测，具体的检测方法和结果见表4-10。



图 4-3 摊铺现场沥青混合料自身气体排放检测

Fig 4-3 Asphalt mixture's emission detection at the scene of paving

表 4-10 沥青混合料摊铺过程中自身温室气体排放检测结果

Tab 4-10 Detection results of asphalt mixture's emissions at the scene of paving

| | |
|------|--|
| 检测内容 | 废气：二氧化硫、二氧化氮、氟化物、非甲烷总烃、二氧化碳、颗粒物 |
| 检测仪器 | FA1004 电子天平（EAA-029）、722G 分光光度计（EAA-014）、TEX-1370R 二氧化碳测试仪（GCM-035）、QCS-6000 肆气路大气采样器（GCM-003）、中流量智能 TSP 采样器（GCM-015）、PF-1-01 氟离子电极（EAA-007）、GC9860 气相色谱仪（EAA-042） |

表 4-10 沥青混合料摊铺过程中自身温室气体排放检测结果 (续)

Tab 4-10 Detection results of asphalt mixture's emissions at the scene of paving(ontinue)

| | | | | |
|-----------------|--|-------|-------|-------|
| 检测依据 及方法 | 颗粒物: GB/T 15432-1995 环境空气总悬浮颗粒物的测定重量法 | | | |
| | 二氧化硫: HJ482-2009 环境空气二氧化硫的测定甲醛吸收-副玫瑰苯胺分光光度法 | | | |
| | 二氧化氮: 《空气和废气监测分析方法》(第四版) 国家环境保护总局 2003 年 盐酸萘乙二胺分光光度法第三篇第一章 (二) | | | |
| | 氟化物: HJ480-2009 环境空气氟化物的测定滤膜采样负离子电极法 | | | |
| | 非甲烷总烃: HJ/T 38-1999 固定污染物排气中非甲烷总烃的测定气相色谱法 | | | |
| | 二氧化碳: GB/T 18204.2-2004 公共场所卫生检验方法第 2 部分: 化学污染物 | | | |
| | 检测位置 | 高温-1 | 高温-2 | 低温-1 |
| | 测试项目 | | | |
| 检测结果 (废气无组织) | 二氧化硫 (mg/m ³) | 0.024 | 0.022 | 0.022 |
| | 二氧化氮 (mg/m ³) | 0.096 | 0.191 | 0.078 |
| | 二氧化碳(mg/m ³) | 0.32 | 0.35 | 0.26 |
| | 氟化物 (μg/m ³) | 0.933 | 1.22 | 1.28 |
| | 颗粒物 (mg/m ³) | 23.1 | 26.4 | 20.8 |
| | 非甲烷总烃浓度 (mg/m ³) | 81.6 | 89.0 | 77.0 |
| | 温度(°C) | 58.4 | 58.4 | 58.4 |
| | 湿度(%) | 58 | 58 | 58 |
| | 大气压(Kpa) | 100.2 | 100.2 | 100.2 |

检测结果显示, 摊铺过程沥青混合料环境排放主要有: 非甲烷总烃化物、二氧化碳、二氧化氮、二氧化硫、氟化物及颗粒物。温室气体主要为二氧化碳(CO₂)。

(3) 能耗调查及量化计算

现场调查依托改建项目沥青混合料摊铺机的柴油消耗量, 上、中、下面层摊铺过程中的摊铺机的柴油消耗列于表4-11。

表 4-11 沥青面层摊铺机燃油消耗调查表

Tab 4-11 Fuel consumption of asphalt pavers

| 面层类型 | 上面层 SMA-13 | | 中面层 AC-20 | | 下面层 AC-25 | |
|------------|------------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
| 连续工作时间 (h) | 13 | 12 | 12 | 12 | 13 | 12 |
| 摊铺长度 (km) | 2.80 | 2.55 | 2.55 | 2.55 | 1.80 | 1.65 |
| 摊铺宽度 (m) | 11.2 | 11.2 | 8.2 | 8.2 | 8.2 | 8.2 |
| 摊铺厚度 (cm) | 4 | 4 | 6 | 6 | 8 | 8 |
| 柴油消耗 (L) | 567.0 | 521.0 | 359.0 | 353.0 | 241.2 | 224.4 |

依据柴油与标准煤的转换关系可得出各标段每摊铺1km单幅路面（面层宽为4.1m）的标准煤消耗量（表4-12）。

表 4-12 单位长度面层（1km）施工摊铺机能耗

Tab 4-12 Energy consumption of asphalt pavers when covering unit length asphalt surface layer

| 层位 | 能源 | 用量 (L) | 标准煤折算系数 | 标准煤折算值 (kgce) |
|-----|----|--------|--------------|---------------|
| 上面层 | 柴油 | 74.5 | 1.2194kgce/L | 90.8 |
| 中面层 | 柴油 | 69.8 | 1.2194kgce/L | 85.1 |
| 下面层 | 柴油 | 67.5 | 1.2194kgce/L | 82.3 |

(4) 温室气体排放计算

沥青混合料在摊铺过程中会产生温室气体，产生温室气体的排放源为摊铺机消耗的柴油和沥青混合料自身。依据摊铺机柴油的消耗量与其对应的温室气体CO₂当量排放因子的乘积，可求得摊铺机排放的CO₂当量，摊铺1km单幅路面温室气体排放量列于表4-13中。

表 4-13 摊铺1km单幅路面温室气体排放量

Tab 4-13 Greenhouse gas emissions of paving one kilometer pavement

| 层位 | 能源 | 用量 (L) | CO ₂ 当量 (kg) | 合计 (kg) |
|-----|----|--------|-------------------------|---------|
| 上面层 | 柴油 | 74.5 | 197.7 | 197.7 |
| | -- | -- | 0.000051 | |
| 中面层 | 柴油 | 69.8 | 185.2 | 185.2 |
| | -- | -- | 0.000076 | |
| 下面层 | 柴油 | 67.5 | 179.1 | 179.1 |
| | -- | -- | 0.000100 | |

由上表可知，混合料自身温室气体的排放微乎其微，对整个摊铺过程的排放几乎没有影响。根据测算结果，将依托改建工程中1km单幅沥青路面摊铺的能耗及排放汇总于表4-14中。

表 4-14 依托改建工程摊铺1km单幅路面的能耗及排放汇总表

Tab 4-14 Energy consumption and emissions of paving one kilometer pavement

| 能耗与排放 | 沥青混合料类型 | | |
|-------------------------|---------|--------|--------|
| | SMA-13 | AC-20C | AC-25C |
| 标准煤耗 (kgce) | 90.8 | 85.1 | 82.3 |
| CO ₂ 当量 (kg) | 197.7 | 185.2 | 179.1 |

4.1.3 碾压

(1) 碾压工艺及能耗、排放类型

沥青面层碾压通常采用钢轮压路机与胶轮压路机组合，碾压方式有静压和振压两种，不同类型的压路机的碾压速度应满足表 4-15 中要求。

表 4-15 压路机碾压速度 (m/min)

Tab 4-15 Rolling speed of road rollers (m/min)

| 压路机类型 | 初压 | | 复压 | | 终压 | |
|--------|------------|----------|-----------|-------|---------|-------|
| | 适宜 | 最大 | 适宜 | 最大 | 适宜 | 最大 |
| 钢筒式压路机 | 2~3 | 4 | 3~5 | 6 | 3~6 | 6 |
| 轮胎压路机 | 2~3 | 4 | 3~5 | 6 | 4~6 | 8 |
| 振动压路机 | 2~3(静压或振动) | 3(静压或振动) | 3~4.5(振动) | 5(振动) | 3~6(静压) | 6(静压) |

依托改建工程三个标段沥青面层的碾压方式略有不同，见表4-16~4-18。

表 4-16 01 标沥青面层碾压工艺

Tab 4-16 Asphalt surface layer's roller compaction technology of section one

| 混合料 | 流程 | 初压 | 复压 | 终压 |
|--------|---------|----------|-------|---------|
| SMA-13 | 机型 | 2台双钢轮 | 2台双钢轮 | 1台双钢轮 |
| | 遍数 | 进静压后退振1遍 | | 振2遍 |
| | 行驶速度 | 2-3 | | 3~6 |
| | (m/min) | 3.5~4.5 | | 全断面收光1遍 |

表 4-16 01 标沥青面层碾压工艺 (续)

Tab 4-16 Asphalt surface layer's roller compaction technology of section one (continue)

| 混合料 | 流程 | 初压 | 复压 | 终压 |
|--------|-----------------|----------|---------|-------|
| AC-20C | 机型 | 2台双钢轮 | 两台胶轮 | 1台双钢轮 |
| | 遍数 | 进静压后退振1遍 | 静压6遍 | 静压2遍 |
| | 行驶速度 (m/min) | 2-3 | 3-4.5 | 3~6 |
| AC-25C | 机型 | 2台胶轮 | 2台双钢轮 | 1台双钢轮 |
| | 遍数 | 静压2遍 | 振3遍 | 静压2遍 |
| | 行驶速度 (m/min) | 2-3 | 3.5~4.5 | 3~6 |

表 4-17 02 标沥青面层碾压工艺

Tab 4-17 Asphalt surface layer's roller compaction technology of section two

| 混合料 | 流程 | 初压 | 复压 | 终压 | |
|--------|-----------------|---------|---------|---------|-------|
| SMA-13 | 机型 | 2台双钢轮 | 2台双钢轮 | 1台双钢轮 | |
| | 遍数 | 静压1遍 | 振3遍 | 全断面收光1遍 | |
| | 行驶速度 (m/min) | 2-3 | 3.5~4.5 | 3~6 | |
| AC-20C | 机型 | 2台双钢轮 | 2台双钢轮 | 两台胶轮 | 1台双钢轮 |
| | 遍数 | 静压后退振1遍 | 静压2遍 | 静压5遍 | 静压2遍 |
| | 行驶速度 (m/min) | 2-3 | 3-4.5 | 3-4.5 | 3~6 |
| AC-25C | 机型 | 2台胶轮 | 2台双钢轮 | 2台胶轮 | 1台双钢轮 |
| | 遍数 | 静压2遍 | 振1遍 | 静压3遍 | 静压2遍 |
| | 行驶速度 (m/min) | 2-3 | 3.5~4.5 | 3.5~4.5 | 3~6 |

表 4-18 03 标沥青面层碾压工艺

Tab 4-18 Asphalt surface layer's roller compaction technology of section one

| 混合料 | 流程 | 初压 | 复压 | 终压 | |
|--------|-----------------|----------|---------|---------|-------|
| SMA-13 | 机型 | 2台双钢轮 | 2台双钢轮 | 1台双钢轮 | |
| | 遍数 | 静压1遍 | 振3遍 | 全断面收光1遍 | |
| | 行驶速度 (m/min) | 2-3 | 3.5~4.5 | 3~6 | |
| AC-20C | 机型 | 2台双钢轮 | 两台胶轮 | 1台双钢轮 | |
| | 遍数 | 静压1遍 | 静压6遍 | 静压2遍 | |
| | 行驶速度 (m/min) | 2-3 | 3-4.5 | 3~6 | |
| AC-25C | 机型 | 2台双钢轮 | 2台胶轮 | 两台胶轮 | 1台双钢轮 |
| | 遍数 | 进静压后退振1遍 | 静压2遍 | 静压4遍 | 静压2遍 |
| | 行驶速度 (m/min) | 2-3 | 2-3 | 3-4.5 | 3~6 |

依托大修工程使用的压路机主要有 SKM 222C、XSM220、徐工 XP302、徐工 XP301 和 HAMM HD130，压路机设备参数列于表 4-19 中。

表 4-19 压路机基本参数

Tab 4-19 Basic parameters of road rollers

| 调查项目 | 调查结果 | | | | |
|--------------|----------|----------|----------|------------|--------------|
| 类型 | 振动压路机 | 轮胎压路机 | 轮胎压路机 | 双钢轮压路机 | 振动压路机 |
| 型号 | SKM 222C | 徐工 XP302 | 徐工 XP301 | HAMM HD130 | XSM220 |
| 功率 (kw) | 132 | 132 | 132 | 98-133 | 128 |
| 重量 (t) | 22 | 17.6-30 | 17.6-30 | 13.8-15.4 | 20 |
| 工作速度 (m/min) | 2-12 | 2-16 | 2-16 | 2-12 | 2.63 5.3 8.6 |
| 数量及组合形式 | 2 | 2 | 1 | 4 | 1 |
| 平均使用年数 | 4 | 3 | 4 | 10 | 12 |

沥青混合料碾压过程能耗主要是压路机的能耗，压路机的动力来源是柴油。沥青混合料碾压过程的排放源包括压路机和热沥青混合料自身排放。压路机燃油排放温室气体主要有：二氧化碳（CO₂）、甲烷（CH₄）、一氧化亚氮（N₂O）。碾压过程中热沥青混合料自身排放与摊铺过程中混合料排放相同（因为温度降

低，排放量略少于摊铺。一般沥青混合料自身的排放在摊铺和碾压过程中只计算一次，因此这里忽略不计。

(2) 能耗及排放量化计算

在沥青混合料碾压的过程，现场采集压路机柴油消耗量数据，三个标段碾压过程中的压路机的柴油消耗，列于表4-20~4-22中。

表 4-20 01 标沥青面层压路机燃油消耗调查表

Tab 4-20 Road rollers' fuel consumption for asphalt surface layer of section one

| 面层分类 | SMA-13 | | AC-20C | | AC-25C | |
|-------------|--------|------|--------|------|--------|------|
| 连续工作时间 (h) | 13 | 12 | 12 | 12 | 13 | 12 |
| 碾压施工长度 (km) | 2.85 | 2.60 | 2.70 | 2.70 | 1.90 | 1.75 |
| 碾压宽度 (m) | 11.2 | 11.2 | 8.2 | 8.2 | 8.2 | 8.2 |
| 厚度 (cm) | 4 | 4 | 6 | 6 | 8 | 8 |
| 总燃油消耗 (L) | 267 | 241 | 240 | 235 | 300 | 287 |

表 4-21 02 标沥青面层压路机燃油消耗调查表

Tab 4-21 Road rollers' fuel consumption of asphalt surface layer of section two

| 面层分类 | SMA-13 | | AC-20C | | AC-25C | |
|-------------|--------|------|--------|------|--------|------|
| 连续工作时间 (h) | 12 | 11 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| 碾压施工长度 (km) | 2.75 | 2.40 | 2.60 | 2.60 | 1.80 | 1.75 |
| 碾压宽度 (m) | 11.2 | 11.2 | 8.2 | 8.2 | 8.2 | 8.2 |
| 厚度 (cm) | 4 | 4 | 6 | 6 | 8 | 8 |
| 总燃油消耗 (L) | 250 | 215 | 320 | 330 | 270 | 259 |

表 4-22 03 标沥青面层压路机燃油消耗调查表

Tab 4-22 Road rollers' fuel consumption of asphalt surface layer of section three

| 面层分类 | SMA-13 | | AC-20C | | AC-25C | |
|-------------|--------|------|--------|------|--------|------|
| 连续工作时间 (h) | 12 | 12 | 12 | 12 | 13 | 12 |
| 碾压施工长度 (km) | 2.70 | 2.65 | 2.70 | 2.65 | 1.85 | 1.80 |
| 碾压宽度 (m) | 11.2 | 11.2 | 8.2 | 8.2 | 8.2 | 8.2 |

表 4-22 03 标沥青面层压路机燃油消耗调查表 (续)

Tab 4-22 Road rollers' fuel consumption of asphalt surface layer of section three(continue)

| 面层分类 | SMA-13 | | AC-20C | | AC-25C | |
|-----------|--------|-----|--------|-----|--------|-----|
| 厚度 (cm) | 4 | 4 | 6 | 6 | 8 | 8 |
| 总燃油消耗 (L) | 250 | 245 | 240 | 235 | 260 | 245 |

依据柴油与标准煤的转换关系可得出各标段每碾压1km单幅路面标准煤消耗量, 详见表4-23。

表 4-23 各标段每碾压 1km 单幅沥青路面能耗

Tab 4-23 Energy consumption for compacting one kilometer single asphalt pavement of each sections

| 沥青混合料类型 | 标段 | 能源 | 用量 (L) | 标准煤折算系数 | 标准煤折算值 (kgce) |
|---------|----|----|--------|--------------|---------------|
| SMA-13 | 01 | 柴油 | 34.1 | 1.2194kgce/L | 41.6 |
| | 02 | 柴油 | 33.1 | 1.2194kgce/L | 40.4 |
| | 03 | 柴油 | 33.9 | 1.2194kgce/L | 41.3 |
| AC-20C | 01 | 柴油 | 44.0 | 1.2194kgce/L | 53.7 |
| | 02 | 柴油 | 62.5 | 1.2194kgce/L | 76.2 |
| | 03 | 柴油 | 44.4 | 1.2194kgce/L | 54.1 |
| AC-25C | 01 | 柴油 | 80.5 | 1.2194kgce/L | 98.2 |
| | 02 | 柴油 | 74.5 | 1.2194kgce/L | 90.8 |
| | 03 | 柴油 | 69.2 | 1.2194kgce/L | 84.4 |

(3) 温室气体排放计算

沥青混合料在碾压过程中会产生温室气体, 产生温室气体的排放源为压路机消耗柴油和沥青混合料自身。碾压过程中热沥青混合料自身排放与摊铺过程中混合料排放相同 (因为温度降低, 排放量略少于摊铺。一般沥青混合料自身的排在摊铺和碾压过程中只计算一次, 因此这里忽略不计。

表 4-24 碾压1km单幅路面温室气体排放CO₂当量

Tab 4-24 Carbon dioxide equivalence of compacting one kilometer pavement

| 沥青混合料类型 | 标段 | 能源 | 用量 (L) | CO ₂ 当量 (kg) |
|---------|----|----|--------|-------------------------|
| SMA-13 | 01 | 柴油 | 34.1 | 90.5 |
| | 02 | 柴油 | 33.1 | 87.8 |
| | 03 | 柴油 | 33.9 | 90.0 |
| AC-20C | 01 | 柴油 | 44.0 | 116.8 |
| | 02 | 柴油 | 62.5 | 165.9 |
| | 03 | 柴油 | 44.4 | 117.8 |
| AC-25C | 01 | 柴油 | 80.5 | 213.6 |
| | 02 | 柴油 | 74.5 | 197.7 |
| | 03 | 柴油 | 69.2 | 183.7 |

根据测算结果，将依托改建工程中1km单幅沥青路面碾压的能耗及排放汇总于表4-25中。

表 4-25 依托改建工程中1km单幅沥青路面碾压能耗及排放汇总表

Tab 4-25 Energy consumption and emissions of compacting one kilometer single road

| 沥青混合料类型 | 能耗与排放 | 标段 | | |
|---------|-------------------------|-------|-------|-------|
| | | 01 | 02 | 03 |
| SMA-13 | 标准煤耗 (kgce) | 41.6 | 40.4 | 41.3 |
| | CO ₂ 当量 (kg) | 90.5 | 87.8 | 90.0 |
| AC-20C | 标准煤耗 (kgce) | 53.7 | 76.2 | 54.1 |
| | CO ₂ 当量 (kg) | 116.8 | 165.9 | 117.8 |
| AC-25C | 标准煤耗 (kgce) | 98.2 | 90.8 | 84.4 |
| | CO ₂ 当量 (kg) | 213.6 | 197.7 | 183.7 |

4.1.4 运输

(1) 能耗与排放类型

依托大修工程采用大载重量的自卸汽车配合运输，主要有01标和02标使用的载重为45t的福田瑞沃290、重汽豪沃336和江淮轻量化290以及03标使用的载重为35t的福田瑞沃210、福田欧曼260、江淮210和东风天锦200。运输车辆参数见表

4-26。

表 4-26 运输自卸汽车基本参数及油耗表

表 4-26 Basic parameters and fuel consumption of autodumpers

| 调查项目 | 调查结果 | | | | | | |
|-------------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------|-------------|
| 型号 | 福田瑞沃 290 | 重汽豪沃 336 | 江淮轻量化 290 | 福田瑞沃 210 | 福田欧曼 260 | 江淮 210 | 东风天锦 200 |
| 额定功率 (kw) | 213 | 247 | 213 | 156 | 192 | 155 | 147 |
| 载重 (t) | 45 | 45 | 45 | 35 | 35 | 35 | 35 |
| 燃油类型 | 柴油 | 柴油 | 柴油 | 柴油 | 柴油 | 柴油 | 柴油 |
| 行驶速度 (km/h) | 80 | 80 | 80 | 85 | 96 | 85 | 90 |
| 满载油耗 (L/100km) | 85 | 105 | 82 | 53 | 66 | 52 | 49 |
| 空载油耗 (L/100km) | 50 | 62 | 48 | 35 | 37 | 35 | 32 |

自卸汽车主要消耗柴油，其排放的温室气体主要有 CO₂、CH₄ 和 N₂O。

(2) 能耗调查与计算

沥青混合料的运输过程中自卸汽车主要往返于沥青拌合站和摊铺现场之间，由拌合站出发时为满载，返回时空载。由于各标段中需要摊铺的路段距离较长，会导致摊铺路段距离拌合站的距离不一致，为方便计算，选取最远距离与最近距离的平均值作为运输距离的代表值。据调研，01标的运输距离为12.3，02标的运输距离为11km，03标的运输距离为10.5km。

依据表4-26可计算得各标段自卸汽车满载或空载时每百公里的平均燃油消耗及运输1t混合料能耗（表4-27）。

表 4-27 自卸汽车运输1t混合料能耗

Tab 4-27 Autodumpers' energy consumption of transporting one ton of mixture

| 标段 | 01 | 02 | 03 |
|----------------------|------|------|------|
| 满载油耗 (L/100km) | 90.7 | 90.7 | 55.0 |
| 空载油耗 (L/100km) | 53.3 | 53.3 | 34.8 |
| 运输1t混合料油耗 (L) | 0.39 | 0.35 | 0.27 |
| 运输1t混合料标准煤折算值 (kgce) | 0.48 | 0.43 | 0.33 |

(3) 温室气体排放计算

混合料运输过程中主要排放源为自卸汽车消耗柴油的排放。依托改建工程中沥青面层单幅路面1km的能耗及排放汇总于表4-28中。

表 4-28 沥青面层单幅路面1km混合料运输的能耗及排放汇总表

Tab 4-28 Energy consumption and emissions of transporting asphalt mixture

| 沥青混合料类型 | 能耗与排放 | 标段 | | |
|---------|-------------------------|-------|-------|-------|
| | | 01 | 02 | 03 |
| SMA-13 | 标准煤耗 (kgce) | 78.7 | 70.5 | 54.1 |
| | CO ₂ 当量 (kg) | 169.7 | 152.4 | 117.6 |
| AC-20C | 标准煤耗 (kgce) | 118.1 | 105.8 | 81.2 |
| | CO ₂ 当量 (kg) | 254.6 | 228.5 | 176.4 |
| AC-25C | 标准煤耗 (kgce) | 157.4 | 141.0 | 108.2 |
| | CO ₂ 当量 (kg) | 339.5 | 304.7 | 235.2 |

4.1.5 原沥青面层铣刨

(1) 铣刨工艺及能耗、排放类型

在施工沥青面层前，首先要进行工作面的铣刨。目前，高速公路养护都采用铣刨机进行机械铣刨，一般情况下沥青面层同时铣刨，铣刨机运行时一次可铣刨一条车道。



图 4-4 旧路面铣刨

Fig 4-4 Milling the old pavement

本工程三个标段均采用Writgrn W2000型铣刨机进行铣刨，其额定功率为432.5kw，具体参数见表4-29。

表 4-29 铣刨机基本参数表

Tab 4-29 Basic parameters of milling machines

| 型号 | Writgrn W2000 |
|--------------|---------------|
| 额定功率 (kw) | 432.5 |
| 燃油类型 | 0#柴油 |
| 铣刨宽度 (m) | 2 |
| 铣刨深度 (mm) | 320 |
| 工作速度 (m/min) | 2.5 |

原沥青面层铣刨过程能耗主要是铣刨机的能耗，铣刨机的动力来源是柴油。铣刨机压路机燃油排放温室气体主要有：二氧化碳（CO₂）、甲烷（CH₄）、一氧化亚氮（N₂O）。

(2) 能耗及排放量化计算

在原沥青面层铣刨的过程中，通过现场调查采集铣刨机的柴油消耗（因三个标段使用铣刨机型号相同，主要调查03标的铣刨机油耗），详见表4-30。

表 4-30 铣刨机铣刨沥青面层油耗

Tab 4-30 Milling machines' fuel consumption of milling asphalt surface layer

| 工作日 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------|------|-------|-------|-------|-------|
| 气温（最低/最高）℃ | 9/21 | 13/26 | 15/27 | 16/29 | 16/28 |
| 铣刨里程 (km) | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| 铣刨机油耗 (L) | 430 | 434 | 427 | 431 | 429 |
| 面层铣刨厚度 (cm) | 15 | | | | |

根据调查油耗数据，可计算得每铣刨1km单幅车道的油耗应为1075.5L,标准煤折算系数为1.2194kgce/L，则将柴油折算为标准煤的值为1311.5kgce。每铣刨1km单幅车道温室气体排放CO₂当量应为1075.5×2.654=2854.4kg。

4.1.6 沥青面层施工期能耗与排放汇总

依托改建工程沥青面层单幅路面1km的能耗和排放统计于表4-31中。三个标段单幅1km上中下面层中，下面层因为厚度值最大，故能耗与排放量最大。

1tSMA-13、AC-20C、AC-25C的能耗范围在13.6-16.0kgce、12.1-16.2kgce、11.4-15.5kgce之间；1tSMA-13、AC-20C、AC-25C的排放范围在35.1-41.6kg、31.0-42.3kg、29.0-36.8kg之间。沥青上面层（SMA-13）因添加纤维、使用改性沥青，且粒径较小，能耗比中面层高4.0%，比下面层高8.1%。拌和时间、拌和温度都会影响能耗。不同的拌合站能耗与排放差异明显，说明拌合站设备、燃煤品质及管理水平差异较大。

表 4-31 沥青面层单幅路面1km的能耗和排放量

Tab 4-31 Energy consumption and emissions of constructing one kilometer asphalt surface layer

| 标段 | 结构层 | 施工流程 | 能耗与排放 (kgce/kg) | 1km能耗与排放 (kgce/kg) | 1t混合料能耗与 排放 (kgce/kg) |
|----|--------|------|--------------------|-----------------------|--------------------------|
| 01 | SMA-13 | 拌合 | 2017.2/5297.2 | 2228.3/5755.1 | 13.6/35.1 |
| | | 摊铺 | 90.8/197.7 | | |
| | | 碾压 | 41.6/90.5 | | |
| | | 运输 | 78.7/169.7 | | |
| | AC-20C | 拌合 | 2730.6/ 7060.2 | 2987.5/7616.8 | 12.1/31.0 |
| | | 摊铺 | 85.1/185.2 | | |
| | | 碾压 | 53.7/116.8 | | |
| | | 运输 | 118.1/254.6 | | |
| | AC-25C | 拌合 | 3411.2/8757.6 | 3749.1/9495.9 | 11.40/29.0 |
| | | 摊铺 | 82.3/185.2 | | |
| | | 碾压 | 98.2/213.6 | | |
| | | 运输 | 157.4/339.5 | | |
| | 原路面铣刨 | | 1311.5/2854.4 | 1311.5/2854.4 | -- |

表 4-31 沥青面层单幅路面1km的能耗和排放量（续）

Tab 4-31 Energy consumption and emissions of constructing
one kilometer asphalt surface layer (continue)

| 标段 | 结构层 | 施工流程 | 能耗与排放 (kgce/kg) | 1km能耗与排放 (kgce/kg) | 1t混合料能耗与 排放 (kgce/kg) |
|----|--------|------|--------------------|-----------------------|--------------------------|
| 02 | SMA-13 | 拌合 | 2427.2/ 6379.6 | 2628.9/6817.5 | 16.0/41.6 |
| | | 摊铺 | 90.8/197.7 | | |
| | | 碾压 | 40.4/87.8 | | |
| | | 运输 | 70.5/152.4 | | |
| | AC-20C | 拌合 | 3714.6/9815.4 | 3981.7/10395.0 | 16.2/42.3 |
| | | 摊铺 | 85.1/185.2 | | |
| | | 碾压 | 76.2/165.9 | | |
| | | 运输 | 105.8/228.5 | | |
| | AC-25C | 拌合 | 4756.0/ 12496.8 | 5070.1/13178.3 | 15.5/40.2 |
| | | 摊铺 | 82.3/179.1 | | |
| | | 碾压 | 90.8/197.7 | | |
| | | 运输 | 141.0/304.7 | | |
| | 原路面铣刨 | | 1311.5/2854.4 | 1311.5/2854.4 | -- |
| 03 | SMA-13 | 拌合 | 2296.0/6035.2 | 2482.2/6640.5 | 15.1/40.5 |
| | | 摊铺 | 90.8/197.7 | | |
| | | 碾压 | 41.3/90.0 | | |
| | | 运输 | 54.1/117.6 | | |
| | AC-20C | 拌合 | 3345.6/ 8782.2 | 3566.0/9261.6 | 14.5/37.6 |
| | | 摊铺 | 85.1/185.2 | | |
| | | 碾压 | 54.1/117.8 | | |
| | | 运输 | 81.2/176.4 | | |
| | AC-25C | 拌合 | 4362.4/ 11480.0 | 4637.3/12078.0 | 14.1/36.8 |
| | | 摊铺 | 82.3/179.1 | | |
| | | 碾压 | 84.4/183.7 | | |
| | | 运输 | 108.2/235.2 | | |
| | 原路面铣刨 | | 1311.5/2854.4 | 1311.5/2854.4 | -- |

表 4-32 沥青面层施工期各环节能耗及排放比重

Tab 4-32 The proportion for energy consumption and emissions of each link of asphalt surface layer in construction period

| 施工环节 | 上料 | 拌和 | 沥青罐加热 | 摊铺 | 碾压 | 运输 | 铣刨 |
|-------|-----|------|-------|-----|-----|-----|------|
| 能耗比例% | 0.9 | 77.4 | 5.2 | 2.3 | 1.1 | 2.9 | 11.3 |
| 排放比例% | 0.6 | 82.1 | 3.4 | 1.8 | 0.9 | 2.2 | 9.7 |

在沥青面层施工期的各个环节，沥青混合料拌和能耗与排放比重最大，占总能耗的77.4%，占总排放的82.1%，因此沥青混合料拌和是降低能耗与排放的关键环节。根据本文的调查与分析，对于依托改建工程，拌和过程中，集料加热消耗的能量拌和过程的94-98%。因此，拌和站的集料加热环节是拌合站节能减排的关键。通过选择热值高、排放低的能源是节能减排的有效措施。三个标段中拌和过程能耗大的施工单位，选用的煤品质较差，燃烧不完全，热效率低。

4.2 冷再生基层施工期能耗与排放

冷再生混合料基层施工包括冷再生混合料拌和、摊铺、碾压及运输四个环节。

4.2.1 拌和

(1) 拌和设备与工艺

冷再生混合料的拌和不需要加热，其拌合站同水泥稳定碎石基层拌和设备类似。拌和设备是能按用量（以质量计）连续配料的连续式拌和机。为了保证拌和品质，同水泥稳定碎石拌合站相比，冷再生材料拌合站将拌缸的长度及拌臂加长，并加设了可调节出料速度的控制装置，可以有效提高拌和时间。拌和设备增加了冷料仓的数量，采用精密称重设备，使RAP材料的充分分级和多种外加集料的掺加得以实现，提高混合料的均匀性、稳定性。乳化沥青和水的供给系统配备了高精度的动态计量器，并能跟拌和机精确、协同工作，根据拌合机送料情况自动调节乳化沥青和水的喷入量，在喷洒延迟等方面能够精确控制。



图 4-5 冷再生混合料拌合站

Fig 4-5 Cold recycling mixture mixing station

依托改建项目三个标段的冷再生拌和楼均为 ARC300E, 生产能力 300t/h, 装机总功率 280kw, 料仓容积 40m³。冷再生混合料使用改性乳化沥青作为胶结料, 因此不需加热集料或沥青, 只消耗电力。

(2) 能耗、排放调查与计算

现场调查冷再生拌合站拌合过程中的电耗, 采集 5 个工作日的数据 (表 4-33), 经计算, 冷再生拌合站每拌合 1t 再生混合料的电能的消耗量为 1.13kwh, 标准煤折算值为 0.139 (kgce)。用于供料的装载机柴油消耗量仍采用 0.105L (0.128kgce)。再生混合料拌和排放主要是拌和楼消耗电能排放、装载机消耗柴油排放 (表 4-33、表 4-34)。

表 4-33 生产 1t 冷再生混合料温室气体排放 CO₂ 当量

Tab 4-33 Carbon dioxide equivalence of producing one ton of cold in-place recycling mixture

| 混合料类型 | 能源 | 用量 | CO ₂ 当量 (kg) | 合计 (kg) |
|--------|----|---------|-------------------------|---------|
| 冷再生混合料 | 电力 | 1.13kwh | 0.698 | 0.977 |
| | 柴油 | 0.105L | 0.279 | |

表 4-34 冷再生上基层单幅路面 1km 混合料拌和的能耗和温室气体排放

Tab 4-34 Energy consumption and emissions of mixing cold in-place recycling mixture

| 混合料类型 | 能耗与排放 | 数值 |
|--------|-------------------------|-------|
| 冷再生混合料 | 标准煤耗 (kgce) | 158.2 |
| | CO ₂ 当量 (kg) | 578.9 |

4.2.2 摊铺

(1) 工艺及能耗

冷再生沥青混合料上基层根据工作面宽度选择一台摊铺机摊铺或2台摊铺机梯队联合摊铺。两台摊铺机联合作业时，摊铺机前后距离一般为10~20m，两台摊铺机之间重叠50~100mm，保证纵向接缝为湿接缝。摊铺速度为3~4m/min，摊铺速度根据拌和站生产能力进行调整。

摊铺过程的能耗主要来源于摊铺机，摊铺机消耗的能源为柴油。依托三个标段均使用相同型号的冷再生材料摊铺机，摊铺机型号及参数见表4-35。

表 4-35 冷再生摊铺机基本参数表

Tab 4-35 Basic parameters of cold recycling mixture pavers

| 类型 | 冷再生摊铺机 |
|------------------------|--------------|
| 型号 | 天顺长城 SP120-2 |
| 总功率 (kw) | 174 |
| 摊铺宽度 (m) | 2.5-12 |
| 摊铺厚度 (mm) | 350 |
| 摊铺速度 (m/min) | 0-18 |
| 料斗容量 (m ³) | 6 |

摊铺机主要消耗的是柴油，其排放的温室气体主要有CO₂、CH₄和N₂O。

(2) 能耗、排放调查及量化计算

现场采集5个工作日冷再生混合料上基层施工时摊铺机的柴油消耗（表4-36）。

表 4-36 冷再生上基层摊铺机燃油消耗量

Tab 4-36 Fuel consumption of cold recycling mixture pavers

| 工作日 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 气温（最低/最高）℃ | 14/25 | 18/28 | 17/26 | 21/28 | 20/30 |
| 连续工作时间 (h) | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| 摊铺长度 (km) | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 |
| 摊铺宽度 (m) | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 |
| 摊铺厚度 (cm) | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 柴油消耗 (L) | 165 | 167 | 175 | 180 | 150 |

根据调研数据,可计算得出,每摊铺 1km 单幅冷再生上基层的柴油消耗量为 69.8 L,标准煤折算值为 85.1kgce,其排放 CO₂ 当量为 185.2kgce。

4.2.3 碾压

(1) 碾压工艺及能耗、排放类型

依托改建工程冷再生面层碾压采用单(双)钢轮压路机与胶轮压路机组合的方式,压路机型号主要有 SKM 222C、XSM220、徐工 XP302、徐工 XP301 和 HAMM HD130。碾压方式包括静压和振动碾压。



图 4-6 冷再生基层碾压施工

Fig 4-6 Compacting plant-mixed cold recycled base

依托改建工程三个标段冷再生上基层的碾压工艺列于表 4-37 中。不同类型的压路机的碾压速度应满足表 4-38 中要求。

表 4-37 冷再生上基层压路机设备组合

Tab 4-37 Road roller combination of cold in-place recycling grassrootss

| 标段 | 流程 | 初压 | 复压 | | 终压 |
|----|-----------------|------------|-------|------|------|
| 01 | 压路机 | 1台双钢轮 | 2台单钢轮 | 2台胶轮 | 2台胶轮 |
| | 遍数 | 静压1遍, 振压两遍 | 振压3遍 | 静压4遍 | 静压3遍 |
| | 行驶速度 (m/min) | 2-3 | 3~4 | 2~3 | 3~6 |

表 4-37 冷再生上基层压路机设备组合 (续)

Tab 4-37 Road roller combination of cold in-place recycling grassrootss (continue)

| 标段 | 流程 | 初压 | | 复压 | | 终压 | |
|----|-----------------|------------|----|-------|------|-------|----|
| | | 适宜 | 最大 | 适宜 | 最大 | 适宜 | 最大 |
| 02 | 压路机 | 2台双钢轮 | | 2台单钢轮 | 2台胶轮 | 1台双钢轮 | |
| | 遍数 | 静压1遍, 振压1遍 | | 振压4遍 | 静压4遍 | 静压2遍 | |
| | 行驶速度 (m/min) | 2-3 | | 3~4 | 2~3 | 3~6 | |
| 03 | 压路机 | 2台双钢轮 | | 2台单钢轮 | 2台胶轮 | 1台双钢轮 | |
| | 遍数 | 静压1遍, 振压两遍 | | 振压3遍 | 静压4遍 | 静压2遍 | |
| | 行驶速度 (m/min) | 2-3 | | 3~4 | 2~3 | 3~6 | |

表 4-38 压路机碾压速度 (m/min)

Tab 4-38 Rolling speed of road rollers (m/min)

| 压路机类型 | 初压 | | 复压 | | 终压 | |
|--------|----------------|--------------|---------|-------|---------|-------|
| | 适宜 | 最大 | 适宜 | 最大 | 适宜 | 最大 |
| 双钢轮压路机 | 2~3 (静压或振动) | 4 (静压或振动) | 3~4 | 6 | 3~5(静压) | 6(静压) |
| 单钢轮压路机 | 2~3 | 4 | 3~4(振动) | 6(振动) | 4~5 | 8 |
| 轮胎式压路机 | 2~3 | 3 | 2~3(静压) | 5(静压) | 3~5 | 6 |

冷再生混合料碾压过程能耗主要是压路机的能耗, 压路机的动力来源是柴油。沥青混合料碾压过程的排放源为压路机排放。压路机燃油排放温室气体主要有: 二氧化碳 (CO₂)、甲烷 (CH₄)、一氧化亚氮 (N₂O)。

(2) 能耗及排放量化计算

现场调查碾压过程中的压路机摊铺机的柴油消耗 (表4-39)。根据调研数据及基础数据, 可计算得每碾压1km单幅冷再生上基层的能耗及排放 (表4-40)。

表 4-39 冷再生上基层压路机燃油消耗量

Tab 4-39 Fuel consumption of road rollers

| 标段 | 01 | | 02 | | 03 | |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 连续工作时间 (h) | 12 | 12 | 12 | 12 | 13 | 12 |
| 碾压施工长度 (km) | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 |
| 碾压宽度 (m) | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 |
| 厚度 (cm) | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 总燃油消耗 (L) | 267 | 276 | 309 | 320 | 317 | 323 |

表 4-40 1km 单幅冷再生上基层压实工序能耗及排放

Tab 4-40 Energy consumption and emissions of compacting cold in-place recycling grassroots

| 混合料类型 | 标段 | 能源 | 用量 (L) | 标准煤折算系数 | 标准煤折算值 (kgce) | CO ₂ 当量 (kg) |
|--------|----|----|--------|--------------|---------------|-------------------------|
| 冷再生混合料 | 01 | 柴油 | 113.1 | 1.2194kgce/L | 137.9 | 300.2 |
| | 02 | 柴油 | 131.1 | 1.2194kgce/L | 159.9 | 347.9 |
| | 03 | 柴油 | 133.4 | 1.2194kgce/L | 162.7 | 354.0 |

4.2.4 运输

自卸汽车在运输混合料时的油耗仅与载重量和运输距离有关,和运输的混合料类型无关,所以无论是沥青混合料还是冷再生混合料,对自卸汽车的油耗都不会产生影响。运距会对运输能耗产生较大影响。

表 4-41 冷再生上基层单幅路面1km运输的能耗及排放汇总表

Tab 4-41 Energy consumption and emissions of transporting cold in-place recycling mixture

| 沥青混合料类型 | 能耗与排放 | 标段 | | |
|---------|-------------------------|-------|-------|-------|
| | | 01 | 02 | 03 |
| 冷再生混合料 | 标准煤耗 (kgce) | 284.4 | 254.8 | 195.5 |
| | CO ₂ 当量 (kg) | 613.2 | 550.4 | 424.8 |

4.2.5 原水稳上基层铣刨

(1) 铣刨工艺及能耗、排放类型

依托改建工程三个标段均采用Writgrn W2000型铣刨机进行基层铣刨,其动

力来源是柴油。铣刨机压路机燃油排放温室气体主要有：二氧化碳（CO₂）、甲烷（CH₄）、一氧化亚氮（N₂O）。

现场调查铣刨机铣刨水泥稳定碎石基层的柴油消耗量，采集5个工作日的数据（表4-42）。

表 4-42 1 台铣刨机每个工作日铣刨水稳上基层油耗调查表

Tab 4-42 Fuel consumption of a machine of milling cement-stabilized macadam base per day

| 工作日 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 气温（最低/最高）℃ | 19/30 | 18/31 | 18/29 | 17/26 | 17/24 |
| 铣刨里程（km） | 0.4 | 0.55 | 0.55 | 0.55 | 0.55 |
| 铣刨机油耗（L） | 343 | 475 | 460 | 466 | 476 |
| 基层铣刨厚度（cm） | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |

计算可得每铣刨1km单幅车道上基层的油耗为854.1L,标准煤折算值为1041.5kgce。由柴油消耗产生的温室气体排放CO₂当量为2266.8kg。

4.2.6 冷再生上基层施工能耗、排放汇总

根据以上计算、分析，冷再生上基层施工（单幅路面1km）全过程的能耗和排放汇总于表4-43中。因为不需要加热，冷再生基层结构层本身的能耗和排放很低，1km仅为641.7kgce，排放仅为1627.6kg（三个标段数值很接近）。1km水泥稳定碎石基层铣刨的能耗、排放相对较高，分别为1041.5kgce、2266.8kg。

表 4-43 冷再生基层施工期（单幅路面1km）能耗和排放量

Tab 4-43 Energy consumption and emissions of cold in-place recycling
grassrootss in construction period

| 标段 | 结构层 | 施工流程 | 能耗与排放（kgce/kg） | 能耗与排放合计（kgce/kg） |
|----|------------|-------|----------------|------------------|
| 01 | 冷再生 上基层 | 拌合 | 158.2/578.9 | 1707.1/3944.3 |
| | | 摊铺 | 85.1/185.2 | |
| | | 碾压 | 137.9/300.2 | |
| | | 运输 | 284.4/613.2 | |
| | | 原路面铣刨 | 1041.5/2266.8 | |

表 4-43 冷再生基层施工期（单幅路面1km）能耗和排放量（续）

Tab 4-43 Energy consumption and emissions of cold in-place recycling grassroots in construction period(continue)

| 标段 | 结构层 | 施工流程 | 能耗与排放 (kgce/kg) | 能耗与排放合计 (kgce/kg) |
|----|------------|------|-----------------|-------------------|
| 02 | 冷再生 上基层 | 拌合 | 158.2/578.9 | 1699.5/3929.2 |
| | | 摊铺 | 85.1/185.2 | |
| | | 碾压 | 159.9/347.9 | |
| | | 运输 | 254.8/550.4 | |
| | 原路面铣刨 | | 1041.5/2266.8 | |
| 03 | 冷再生 上基层 | 拌合 | 158.2/578.9 | 1643.0/3809.7 |
| | | 摊铺 | 85.1/185.2 | |
| | | 碾压 | 162.7/354.0 | |
| | | 运输 | 195.5/424.8 | |
| | 原路面铣刨 | | 1041.5/2266.8 | |

4.3 大粒径沥青碎石基层施工期能耗与排放

4.3.1 拌和

粒径沥青碎石混合料也属于热拌沥青混合料，其拌和工艺与沥青混合料相同，采用相同的沥青拌合站进行拌和。其能耗与排放的计算方法也和沥青混合料相同。现场调查大粒径沥青碎石混合料拌和过程中的煤耗、电耗（表4-44），计算得出拌合1t 大粒径沥青混合料的能耗及排放（表4-45）。

表 4-44 沥青拌合站大粒径沥青碎石产量与能耗

Tab 4-44 Output and energy consumption of asphalt mixing station when mixing large-stone asphalt macadam

| 标段 | 01 | | 02 | | 03 | |
|-----------|--------|------|------|------|------|------|
| 产量 (t) | 1624.5 | 1652 | 2540 | 2490 | 1722 | 1314 |
| 耗电量 (kwh) | 7300 | 7255 | 6270 | 5980 | 5400 | 3636 |
| 精煤 (t) | 17.5 | 17.7 | 35.0 | 35.2 | 23 | 17.6 |

表 4-45 拌合 1t 大粒径沥青碎石混合料的能耗、排放

Tab 4-45 Energy consumption and emissions of mixing one ton of large-stone asphalt macadam

| 标段 | 能源 | 用量 | 标准煤折算系数 | 标准煤折算值 (kgce) | CO ₂ 当量 (kg) | 能耗、排放合计 (kgce/kg) |
|----|-----|---------|------------------|------------------|----------------------------|----------------------|
| 01 | 电力 | 4.44kwh | 0.1229kgce/(kwh) | 0.55 | 2.74 | 11.11/31.95 |
| | 精煤 | 10.74kg | 0.9000kgce/kg | 9.67 | 27.33 | |
| | 柴油 | 0.105L | 1.2194kgce/L | 0.13 | 0.28 | |
| | 重柴油 | 0.53kg | 1.4286 kgce/kg | 0.76 | 1.60 | |
| 02 | 电力 | 2.44kwh | 0.1229kgce/(kwh) | 0.30 | 1.51 | 13.75/38.92 |
| | 精煤 | 13.96kg | 0.9000kgce/kg | 12.56 | 35.53 | |
| | 柴油 | 0.105L | 1.2194kgce/L | 0.13 | 0.28 | |
| | 重柴油 | 0.53kg | 1.4286 kgce/kg | 0.76 | 1.60 | |
| 03 | 电力 | 2.96kwh | 0.1229kgce/(kwh) | 0.36 | 1.83 | 13.29/37.76 |
| | 精煤 | 13.38kg | 0.9000kgce/kg | 12.04 | 34.05 | |
| | 柴油 | 0.105L | 1.2194kgce/L | 0.13 | 0.28 | |
| | 重柴油 | 0.53kg | 1.4286 kgce/kg | 0.76 | 1.60 | |

表 4-46 单幅路面1km大粒径沥青碎石拌合的能耗及排放量

Tab 4-46 Energy consumption and emissions of mixing large-stone asphalt macadam mixture

| 混合料类型 | 能耗与排放 | 标段 | | |
|---------|-------------------------|---------|---------|---------|
| | | 01 | 02 | 03 |
| LSPM-30 | 标准煤耗 (kgce) | 6582.7 | 8146.9 | 7874.3 |
| | CO ₂ 当量 (kg) | 18930.4 | 23060.1 | 22372.8 |

4.3.2 摊铺

对于新建工程,一般采用两台摊铺机梯队作业。在依托改建工程中,大粒径沥青碎石主要用于裂缝等病害严重的行车道基层铣刨修复。单车道施工采用一台摊铺机摊铺,双车道施工则采用2台摊铺机梯队作业。摊铺过程中,一般有2-3辆运料车等待。大粒径的摊铺速度为1.5m/min,能保持匀速、连续不间断摊铺,松铺系数为1.2。



图 4-7 大粒径沥青碎石摊铺

Fig 4-7 Paving large-stone asphalt macadam

现场调查大粒径沥青碎石摊铺时设备的能耗（4-47），据此计算大粒径沥青碎石摊铺的能耗及排放。

表 4-47 大粒径沥青碎石上基层摊铺机燃油消耗调查表

Tab 4-47 Asphalt pavers' fuel consumption of paving large-stone asphalt macadam base

| 标段 | 01 | | 02 | | 03 | |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 连续工作时间 (h) | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| 摊铺长度 (km) | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 |
| 摊铺宽度 (m) | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 |
| 摊铺厚度 (cm) | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 柴油消耗 (L) | 267.0 | 297.0 | 322.0 | 289.0 | 302.2 | 279.0 |

表 4-48 摊铺 1km 单幅大粒径沥青碎石基层的能耗和排放

Tab 4-48 Energy consumption and emissions of paving large-stone asphalt macadam grassroots

| 混合料类型 | 能源 | 用量 (L) | 标准煤折算值 (kgce) | CO ₂ 当量 (kg) |
|---------|----|--------|---------------|-------------------------|
| LSPM-30 | 柴油 | 122.0 | 148.8 | 323.8 |

4.3.3 碾压

大粒径沥青碎石上基层由于厚度较大（15cm），比沥青面层需要更大的压实

功。碾压仍旧采用钢轮压路机与胶轮压路机相结合的方式。依托改建工程三个标段大粒径沥青碎石上基层的碾压工艺列于表 4-49 中。压路机型号与沥青面层相同。

表 4-49 大粒径沥青碎石上基层碾压工艺

Tab 4-49 Roller compaction technology of large-stone asphalt macadam grassroots

| 标段 | 工艺 | 初压 | 复压 | 终压 |
|----|--------------|--------------|---------|-------|
| 01 | 机型 | 2台双钢轮 | 2台胶轮 | 1台双钢轮 |
| | 遍数 | 进静压后退振1遍，振一遍 | 静压2遍 | 静压1遍 |
| | 行驶速度 (m/min) | 2-3 | 3.5-4.5 | 3-6 |
| 02 | 机型 | 1台双钢轮 | 2台双钢轮 | 1台双钢轮 |
| | 遍数 | 进静压后退振1遍 | 振压2遍 | 静压1遍 |
| | 行驶速度 (m/min) | 2-3 | 3-4.5 | 3-6 |
| 03 | 机型 | 1台双钢轮 | 2台双钢轮 | 1台双钢轮 |
| | 遍数 | 进静压后退振1遍 | 振压2遍 | 静压2遍 |
| | 行驶速度 (m/min) | 2-3 | 3.5-4.5 | 3-6 |

现场调查大粒径沥青碎石混合料碾压过程中压路机的柴油消耗量(表4-50)。

表 4-50 大粒径沥青碎石上基层压路机燃油消耗量

Tab 4-50 Road rollers' fuel consumption of rolling large-stone asphalt macadam grassroots

| 标段 | 01 | | 02 | | 03 | |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 连续工作时间 (h) | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| 碾压施工长度 (km) | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 |
| 碾压宽度 (m) | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 |
| 厚度 (cm) | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 总燃油消耗 (L) | 170 | 163 | 199 | 207 | 211 | 224 |

根据调查数据计算压实 1km 单幅大粒径沥青碎石基层能耗及排放量(表 4-51)。

表 4-51 压实 1km 单幅 LSPM-30 上基层的能耗及排放量

Tab 4-51 Energy consumption and emissions of compacting large-stone asphalt macadam

| 混合料类型标段 | 能源 | 用量 (L) | 标准煤折算系数 | 标准煤折算值 (kgce) | CO ₂ 当量 (kg) |
|------------|----|--------|--------------|------------------|-------------------------|
| 01 | 柴油 | 69.4 | 1.2194kgce/L | 84.6 | 184.2 |
| LSPM-30 02 | 柴油 | 84.6 | 1.2194kgce/L | 103.2 | 224.5 |
| 03 | 柴油 | 90.6 | 1.2194kgce/L | 110.5 | 240.5 |

4.3.4 运输

根据运距及自卸汽车的油耗计算大粒径沥青碎石混合料运输的能耗和排放, 运输车辆及油耗等数据与沥青混合料相同。

表 4-52 单幅路面1km大粒径沥青碎石材料运输的能耗及排放

Tab 4-52 Energy consumption and emissions of transporting

large-stone asphalt macadam mixture

| 沥青混合料类型 | 能耗与排放 | 标段 | | |
|---------|-------------------------|-------|-------|-------|
| | | 01 | 02 | 03 |
| LSPM-30 | 标准煤耗 (kgce) | 284.4 | 254.8 | 195.5 |
| | CO ₂ 当量 (kg) | 613.2 | 550.4 | 424.8 |

4.3.5 大粒径沥青碎石上基层施工其能耗、排放汇总

根据以上分析、计算, 大粒径沥青碎石施工期(单幅路面1km)的能耗和排放汇总于表4-53中。大粒径沥青碎石结构层施工期拌和、摊铺、碾压的能耗与排放分别8142.0-9695.2kgce、22318.4-26425.6kgce之间。

表 4-53 大粒径沥青碎石施工期（单幅路面1km）的能耗和排放量

Tab 4-53 Energy consumption and emissions of large-stone asphalt macadam
(one kilometer single carriageway) construction period

| 标段 | 结构层 | 施工流程 | 能耗与排放 (kgce/kg) | 能耗与排放合计 (kgce/kg) |
|----|----------------|---------------|-----------------|-------------------|
| 01 | LSPM-30上 基层 | 拌合 | 6582.7/18930.4 | 8142.0/22318.4 |
| | | 摊铺 | 148.8/323.8 | |
| | | 碾压 | 84.6/184.2 | |
| | | 运输 | 284.4/613.2 | |
| | 原路面铣刨 | 1041.5/2266.8 | | |
| 02 | LSPM-30上 基层 | 拌合 | 8146.9/23060.1 | 9695.2/26425.6 |
| | | 摊铺 | 148.8/323.8 | |
| | | 碾压 | 103.2/224.5 | |
| | | 运输 | 254.8/550.4 | |
| | 原路面铣刨 | 1041.5/2266.8 | | |
| 03 | LSPM-30上 基层 | 拌合 | 7874.3/22372.8 | 9370.6/25628.7 |
| | | 摊铺 | 148.8/323.8 | |
| | | 碾压 | 110.5/240.5 | |
| | | 运输 | 195.5/424.8 | |
| | 原路面铣刨 | 1041.5/2266.8 | | |

4.4 1km单幅路面能耗与排放汇总

表 4-54 结构层每公里施工能耗与排放汇总表

Tab 4-54 Energy consumption and emissions of each structure layer per kilometer

| 标段 | 01 | | 02 | | 03 | | 平均值 | |
|---------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
| | 能耗 (kgce) | 排放 (kg) | 能耗 (kgce) | 排放 (kg) | 能耗 (kgce) | 排放 (kg) | 能耗 (kgce) | 排放 (kg) |
| 沥青面层 | 10276.4 | 25722.2 | 12992.2 | 33245.2 | 11997.0 | 30834.5 | 11755.2 | 29934.0 |
| 冷再生基层 | 1707.1 | 3944.3 | 1699.5 | 3929.2 | 1643.0 | 3809.7 | 1683.2 | 3894.4 |
| LSPM-30 基层 | 8142.0 | 22318.4 | 9495.2 | 26425.6 | 9370.6 | 25628.7 | 9002.6 | 24790.9 |

表 4-55 各结构层每公里整体能耗与排放汇总表

Tab 4-55 The total energy consumption and emissions of each structure layer per kilometer

| 结构层 | 原材料 | | 施工阶段 | | 合计 | |
|------------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
| | 能耗 (kgce) | 排放 (kg) | 能耗 (kgce) | 排放 (kg) | 能耗 (kgce) | 排放 (kg) |
| 沥青面层 | 14628.2 | 38482.4 | 11755.2 | 29934.0 | 26383.4 | 68416.4 |
| 冷再生上基层 | 10759.4 | 29635.8 | 1683.2 | 3894.4 | 12442.6 | 33530.2 |
| LSPM-30 基层 | 11437.2 | 31166.4 | 9002.6 | 24790.9 | 20439.8 | 55957.3 |

考虑原材料生产及施工期两个阶段, 1km冷再生基层比大粒径沥青碎石基层减少能耗、排放分别为7997.2kgce、22427.1kg, 冷再生基层的能耗与排放是大粒径沥青碎石基层的60.9%、59.9%, 依托改建工程累计节约能耗 1.88×10^6 kgce、减少排放 5.39×10^6 kg。大粒径沥青碎石能耗高的原因主要是热拌沥青混合料的集料加热环节耗能量大。

表4-55中数据结果还反映出, 在沥青路面施工中, 沥青混合料施工期能耗与排放占总量的比重较大, 沥青面层施工期能耗与排放占总量的44.5%、43.8%, 冷再生基层施工期能耗与排放仅占总量比例的13.5%、11.6%, 沥青混合料施工期是节能减排管理工作的重点。

4.5 本章小结

(1) 1tSMA-13、AC-20C、AC-25C的能耗范围在13.6-16.0kgce、12.1-16.2kgce、11.4-15.5kgce之间; 1tSMA-13、AC-20C、AC-25C的排放范围在35.1-41.6kg、31.0-42.3kg、29.0-36.8kg之间。沥青上面层(SMA-13)因添加纤维、使用改性沥青, 且粒径较小, 能耗比中面层高4.0%, 比下面层高8.1%。拌和时间、拌和温度都会影响能耗。不同的拌合站能耗与排放差异明显, 说明拌合站设备、燃煤品质及管理水平差异较大。

(2) 在沥青路面施工中, 沥青混合料施工期能耗与排放占总量的比重较大, 沥青面层施工期能耗与排放占总量的44.5%、43.8%, 冷再生基层施工期能耗与排放仅占总量比例的13.5%、11.6%, 沥青混合料施工期是节能减排管理工作的重点。

(3) 在沥青面层施工期的各个环节, 沥青混合料拌和能耗与排放比重最大, 占总能耗的77.4%, 占总排放的82.1%, 因此沥青混合料拌和是降低能耗与排放的关键环节。沥青混合料拌和过程中, 集料加热消耗的能量占拌和过程的94-98%。通过选择热值高、排放低的能源是节能减排的有效措施。

(4) 冷再生基层结构层施工期的能耗和排放很低, 1km仅为641.7kgce, 排放仅为1627.6kg, 仅为大粒径沥青碎石基层的8.8%、7.8%。虑原材料生产及施工期两个阶段, 冷再生基层的能耗与排放是大粒径沥青碎石基层的60.9%、59.9%。1km冷再生基层比大粒径沥青碎石基层减少能耗、排放分别为7997.2kgce、22427.1kg。依托改建工程累计节约能耗 1.88×10^6 kgce、减少排放 5.39×10^6 kg, 冷再生基层节能减排效果显著。

(5) 水泥稳定碎石基层铣刨的能耗、排放相对较高, 单幅1km分别为1041.5kgce、2266.8kg。

第五章 节能减排技术应用及效果分析

“十三五”时期交通运输部提出：将牢固树立和贯彻落实创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念。在这一时期将有更多高速公路里程进入扩容、改造阶段。因此，在高速公路养护、改建阶段采用节能减排技术措施，是发展绿色交通的重要环节。在依托改建工程中应用的节能减排措施主要有：厂拌热再生技术、冷再生技术、高聚物注浆技术、温拌沥青技术、沥青拌合楼节能技术等。本章将分析实施以上各项技术的路面质量状况及其节能减排效果。

5.1 沥青路面改建工程再生利用技术

5.1.1 沥青面层再生

5.1.1.1 沥青混合料热再生

单从旧沥青混合料的再生利用来讲，再生利用方式包括厂拌热再生、厂拌冷再生、现场热再生和现场冷再生四大类^[33]。厂拌热再生技术先将旧沥青混凝土路面铣刨后运回工厂，通过破碎、筛分（必要时），并根据旧料中沥青含量、沥青老化程度、碎石级配等指标，掺入一定数量的新集料、沥青和再生剂（必要时）进行拌和，使混合料达到规范规定的各项指标，按照与新建沥青混凝土路面完全相同的方法重新铺筑^[34]。

2009年于G3京台高速公路合徐段蚌埠-合肥方向K915+438-k916+300段行车道施工沥青混合料厂拌热再生试验段，试验路段上基层为热再生大粒径沥青碎石，面层为热再生沥青混合料。2014年9月进行路况调查，热再生路段性能良好，无裂缝等病害（图5-1）。2016年11月份再次进行路况调查，热再生路段性能良好，无裂缝等病害（图5-2）。



K915+450 行车道无裂缝



K915+900 行车道无裂缝



K916+000 路况良好



K916+100 路况良好



K916+300 行车道路况良好

图 5-1 热再生路段路况良好（2014 年）

Fig 5-1 Hot recycling sections are in good condition(2014)



图 5-2 厂拌热再生路段路况良好（2016 年）

Fig 5-2 Hot In-plant Recycling sections are in good condition(2016)

长安大学张争奇等以定额法为基础,提出了厂拌热再生旧路处理、新料生产、再生混合料生产以及再生沥青路面施工等 4 个生命周期阶段的能耗量化计算方法,对热再生沥青面层的能耗及排放进行了量化分析(表 5-1、表 5-2)。分析结果认为:单位产量的厂拌热再生沥青混合料在 4 个阶段的总能耗较普通热拌沥青混合料降低 19.0%,温室气体排放降低 3.9%。

表 5-1 1t 热再生和普通热拌沥青混合料施工期能耗对比

Tab 5-1 Construction period's energy consumption comparison between hot in-plant recycling asphalt mixture and ordinary hot-mixed asphalt mixture

| 阶段 | 厂拌热再生沥青路面 | | AC-20 普通沥青路面 | |
|--------|-----------|-------|--------------|-------|
| | 能耗 (kgce) | 能耗比 | 能耗 (kgce) | 能耗比 |
| 旧路处理 | 0.07 | 3.4 | - | - |
| 新料生产 | 1.05 | 54.2 | 1.58 | 65.7 |
| 混合料生产 | 0.74 | 37.8 | 0.74 | 30.6 |
| 沥青路面施工 | 0.09 | 4.6 | 0.09 | 3.7 |
| 合计 | 1.95 | 100.0 | 2.41 | 100.0 |

表 5-2 厂拌热再生和普通热拌沥青混合料施工期环境排放对比

Tab 5-2 Construction period's emissions comparison between hot in-plant recycling asphalt mixture and ordinary hot-mixed asphalt mixture

| 类型 | 影响类别 | 旧路处理 (kg) | 新料生产 (kg) | 混合料生产 (kg) | 沥青路面施工 (kg) | 总计(kg) |
|-------|------|-----------|-----------|------------|-------------|----------|
| 厂拌热再生 | 全球变暖 | 1451.07 | 5068.39 | 18592.50 | 1924.32 | 27036.28 |
| | 酸化效应 | - | 35.38 | 86.00 | 9.75 | 131.13 |
| | 健康危害 | - | 71.88 | 563.65 | 24.30 | 659.82 |
| | 颗粒物 | - | 177.07 | 9.10 | 0.45 | 186.62 |
| 普通热拌 | 全球变暖 | - | 7621.50 | 18592.50 | 1924.32 | 28138.32 |
| | 酸化效应 | - | 53.20 | 86.00 | 9.75 | 148.95 |
| | 健康危害 | - | 108.09 | 563.65 | 24.30 | 696.03 |
| | 颗粒物 | - | 236.82 | 9.10 | 0.45 | 246.38 |

5.1.1.2 沥青混合料冷再生

厂拌冷再生技术将旧沥青路面铣刨后运回加工厂,经过破碎、筛分作为再生集料,加入水泥、乳化沥青等胶结材料及部分新集料,按一定比例进行拌和,然

后将其摊铺在具有足够强度和平整度的基层上，经碾压形成新的结构层（通常用作基层），使其恢复到原有路面性能的施工工艺。依托改建工程中，铣刨的沥青混合料都用于冷再生基层施工。

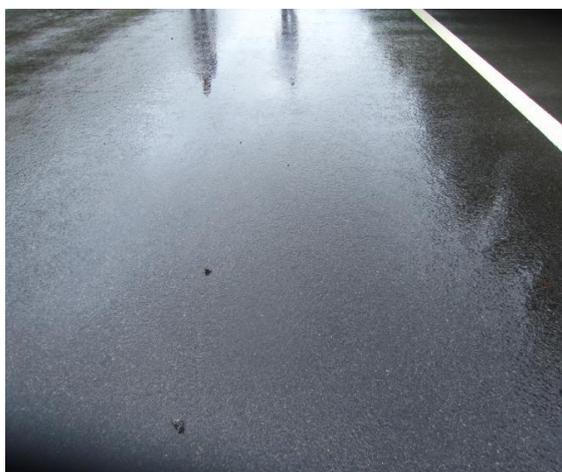
冷再生基层最早于2011年在G3京台高速公路合徐段蚌埠-合肥方向K928+501-k930+696段全福施工试验段。2014年9月进行徒步路况调查，总体路况良好（图5-3）。全路段仅出现3处坑槽病害，2处位于右侧轮迹带，1处位于施工横缝处（图5-4）。据调查，该路段施工时间在11月初，气温较低，故局部出现由于压实度不足造成的坑槽病害。施工桥头搭板处出现3处裂缝（图5-5）。



K928+600路况良好



K928+800路况良好



K929+800路况良好



K930+000 路况良好



K930+500 路况良好

图 5-3 K928+501-K930-696 冷再生路段路况良好

Fig 5-3 Cold in-plant recycling section is in good condition



K929+017 桥头搭板处裂缝



K930+130 桥头搭板处裂缝、松散

图 5-4 桥头搭板处裂缝

Fig 5-4 Cracks in approach slab



K929+598 行车道右侧轮迹带坑槽



K929+850 行车道右侧轮迹带坑槽



K930+219 施工横缝处坑槽

图 5-5 路面坑槽

Fig 5-5 Pot holes

2016 年底对该路段再次调查，总体路况良好，病害仍旧是存在零星坑槽（图 5-6），坑槽病害主要同面层施工质量有关，同冷再生基层本身质量基本无关。



图 5-6 K929+200 冷再生路段路面坑槽

Fig 5-6 Pot holes of Cold in-plant recycling section

2014 年、2015 年在依托改建工程中大规模进行冷再生基层施工。2016 年调研蚌埠方向 K963+300-K964+700 段、K992+000-K994+000 段、K1003+373-K1003+955 段（2014 年施工），均路况良好，现场无病害。



K963+300 冷再生路段



K993+300 冷再生路段



K1003+875 冷再生路段

图 5-7 冷再生路段路况良好

Fig 5-7 Cold in-plant recycling sections are in good condition

路况调查结果显示,冷再生基层性能良好,适合在大交通量的高速公路改建工程中应用。经过第四章的分析,冷再生基层结构层施工期的能耗和排放很低,

1km仅为641.7kgce, 排放仅为1627.6kg, 仅为大粒径沥青碎石基层的8.8%、7.8%。考虑原材料生产及施工期两个阶段, 1km冷再生基层比大粒径沥青碎石基层减少能耗、排放分别为7997.2kgce、22427.1kg。冷再生基层节能减排效果显著。

5.1.2 水泥冷再生石灰土底基层

5.1.2.1 实施路段及施工工艺

(1) 实施路段

施工后铣刨路面结构层后, 部分路段底基层及路床部分灰土出现龟裂、纵向裂缝病害, 尤其有些纵缝张开很宽(图 5-8)。底基层及路床石灰改善土纵缝不仅影响其自身整体强度, 而且施工后很快反射至路面, 导致面层开裂, 当路面积水从裂缝处渗入路面结构层及路床位置后, 会很快导致路面再次损坏, 最终诱发路面坑槽、沉陷等破坏。



图 5-8 石灰土底基层、路基纵缝

Fig 5-8 Longitudinal seam of calcareous soil subbase and ubgrade

为解决裂缝病害造成的质量隐患, 对石灰土底基层严重裂缝病害路段, 采用水泥再生石灰土处治方案, 以提高路面结构下承层的承载力, 延缓裂缝病害反射, 延长路面整体使用寿命。水泥再生土实施路段见表 5-3, 累计用量单幅 25.5km。

表 5-3 水泥再生石灰土底基层路段

Tab 5-3 Regeneration of soil cement sections

| 实施方案 | 方向 | 实施路段 | 备注 |
|----------------------|------|---------------------|----------|
| 水泥再生灰土底层 (3%水泥剂量) | 蚌埠方向 | K992+000-k994+000 | 行车道底基层 |
| | | K903+000-k904+000 | 行车道底基层 |
| | | K907+000-k908+000 | 行车道底基层 |
| | | K920+000-k922+000 | 行车道底基层 |
| | | K931+000-k933+000 | 行车道底基层 |
| | | K934+000-k937+000 | 行车道底基层 |
| | | K938+000-k939+000 | 行车道底基层 |
| | 合肥方向 | K980+000-k982+000 | 行车道底基层 |
| | | K986+000-k989+000 | 行车道底基层 |
| | | K991+000-k995+000 | 行车道底基层 |
| | | K994+000-K994+530 | 行车道底基层 |
| | | K996+016-K996+700 | 行、超车道底基层 |
| | | K997+570-K998+140 | 行车道底基层 |
| | | K1002+000-k1003+000 | 行车道底基层 |
| | | K1005+000-k1006+000 | 行车道底基层 |

(2) 施工工艺与技术要求

采用水泥再生时，不掺加新集料，原石灰改善土采用铰刨机现场翻松粉碎，单个颗粒的最大粒径不超过 37.5mm（表 5-4）。水泥产地安徽长丰海螺水泥厂，水泥品种：P.C32.5 级（缓凝型），水泥剂量为 3%。水泥再生土最大干密度 1.678t/m³，最佳含水量 20.0 %。经无侧限抗压强度试验，水泥再生土的强度为 2.5MPa。

表 5-4 水泥再生石灰土的颗粒组成

Tab 5-4 Granulometric composition of regeneration of soil cement

| | | | | | | | | | |
|--------------|------|--------|------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| 筛孔尺寸 (mm) | 37.5 | 31.5 | 26.5 | 19.0 | 9.5 | 4.75 | 2.36 | 0.6 | 0.075 |
| 通过质量百分率 (%) | 100 | 98.7 | 96.0 | 82.6 | 50.0 | 31.9 | 22.7 | 12.1 | 3.0 |
| 设计范围 (%) | 100 | 90-100 | - | 67-90 | 45-68 | 29-50 | 18-38 | 8-22 | 0-7 |

表 5-5 水泥再生石灰土的抗压强度标准

Tab 5-5 The compressive strength standard of regeneration of soil cement

| | | |
|----------|---------|---------|
| 层位 | 底基层 | 路床 |
| 强度 (MPa) | 1.8-2.5 | 1.0-1.5 |

采用路拌法施工，路拌法施工工艺见下图（图 5-9）。

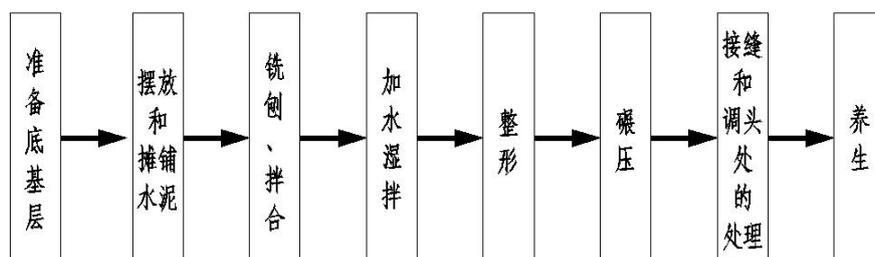


图 5-9 路拌法施工水泥再生石灰土的工艺流程

Fig 5-9 Technology process regeneration of soil cement road-mixing method



图 5-10 再生水泥土施工(撒布水泥)

Fig 5-10 Regeneration of soil cement subbase sections operation (sprinkling the cement)



图 5-11 再生水泥土施工（就地拌和）

Fig 5-11 Regeneration of soil cement subbase sections operation (mix-in-place)

采用专用铣刨拌和设备，随时检查拌和深度并配合拌和机操作员调整拌和深度。拌和深度达稳定层底并侵入下承层 5-10mm，以利上下层粘结。通常应拌和两遍以上且保证水泥与石灰土拌合均匀。

拌和过程结束时，如果混合料的含水量不足，用喷管式洒水车补充洒水。洒水后，再次进行拌和，使水分在混合料中分布均匀。混合料拌和均匀后，在保证原路拱横坡的前提下，采用齿耙等工具将局部不平整处整平。再生土碾压设备单钢轮压路机、胶轮压路机。通常钢轮压路机碾压 3 遍，胶轮压路机碾压 2 遍。

5.1.2.2 使用效果调查

选取较长的 3 个段落，调查其通车 1-2 年后的路面质量状况。调研 K980+00-K982+000 段（合肥方向）、K993+00-K994+000 段（合肥方向）、K992+000-K994+000 段（蚌埠方向），均路况良好，现场无病害。



K980+00-K982+000 段路况良好



K993+00-K994+000 段路况良好



K992+000-K994+000 段（蚌埠方向）路况良好



K992+000-K992+050 段纵向裂缝（施工缝附近）

图 5-12 水泥再生石灰土底基层路段路况良好

Fig 5-12 Regeneration of soil cement subbase sections are in good condition

5.1.2.3 能耗及排放计算

水泥稳定石灰土消耗的原材料主要是水泥、再生土和水。施工过程中的能耗包括铣刨机铣刨（拌和）和压路机碾压的能耗。根据现场调查，水泥再生土的能耗（单车道每公里）分析见表 5-6。水泥再生土每公里能耗为 5202.56kgce，排放 CO₂ 当量为 14689.22kg。其能耗仅为水泥稳定碎石层的 35.5%，排放是水泥稳定碎石层的 34.1%。依托改建工程共施工水泥再生土单幅 25.468km，累计节能 240772.9kgce、减排 722485.9kg。

表 5-6 水泥再生土的能耗与排放

Tab 5-6 Energy consumption and emissions of regeneration of soil cement

| | 用量/工序 | 能耗 (kgce) | 排放 CO ₂ 当量 (kg) |
|-------|---------------|-----------|----------------------------|
| 水泥 | 33.6t | 3917.76 | 11958.24 |
| 铣刨机拌和 | 铣刨拌和 2 次 | 1161.6 | 2464.0 |
| 压路机碾压 | 钢轮 3 遍，胶轮 2 遍 | 123.2 | 267.68 |
| 合计 | - | 5202.56 | 14689.22 |

5.2 高聚物注浆技术

5.2.1 高聚物注浆工艺

(1) 技术简介

分别装在不同密封容器中两种液体组分，加热后经压力作用在注浆管道出口处相遇并按照一定比例混合，发生剧烈的化学反应^[35]。反应过程中形成温度较高的流塑状的混合物，在注浆压力和材料反应体积膨胀的作用下不断的填充路面结构层中的空隙、周围土体中的孔隙和压密土体，并能将基层或路基中的积水沿裂缝或尚未注浆的管道挤出，起到加固结构层或土体的作用称为高聚物注浆技术。近十年来，高聚物注浆技术逐渐应用于高速公路养护工程中。高聚物注浆应用于道路工程，除高聚物对于土体的加固效果外，高聚物浆体填充路面结构层中脱空的部位，填充路面结构层中的裂缝，封闭水分，提升路面结构的承载能力。在沥青路面养护过程中，对于某些病害使用高聚物注浆技术或者高聚物注浆技术与铣刨修复相结合，不仅能缩短施工时间，且经济效益也十分显著。

(2) 施工工艺

沥青路面高聚物注浆施工工艺流程如下：交通控制——>注浆路段定位——>标记注浆孔位置——>注浆前检测——>钻孔——>下注浆管——>安装注射帽——>注浆——>注浆后检测——>封孔——>清扫环境——>开放交通

根据高聚物注浆技术要求及注浆孔布置设计，对处理路段使用自喷漆标注，以便钻孔。注浆孔距离裂缝 25cm，沿缝间距 100cm，交叉布置。依托改建工程

主要是对横缝、纵缝路段实施高聚物注浆，横缝、纵缝注浆孔布置如图 5-13、图 5-14 所示。

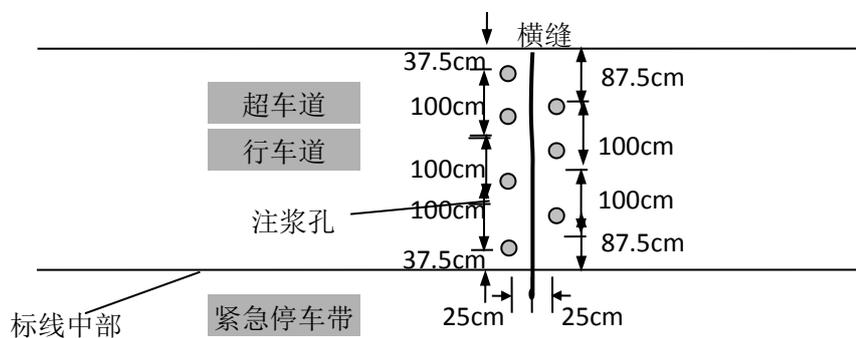


图 5-13 横缝注浆孔布置示意图

Fig 5-13 Lateral seam grouting hole layout diagram

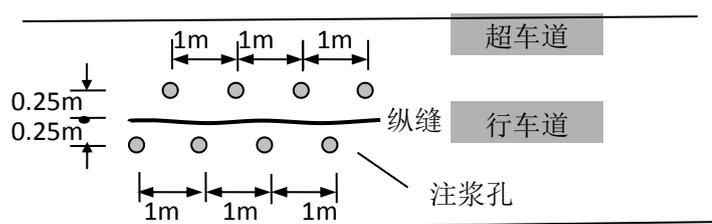


图 5-14 纵缝注浆孔布置示意图

Fig 5-14 Longitudinal seam grouting hole layout diagram



图 5-15 高聚物注浆现场施工

Fig 5-15 Polymer grouting sections site operation

5.2.2 高聚物注浆应用效果

(1) 依托改建工程

依托改建工程实施高聚物注浆较长的路段有三段：K957-K958（超车道）、K939+710-K940+937（行车道）、K944+166-K945+205（行车道），K945+785-K948+120（行超车道），主要病害：超车段路段以横缝为主，行车道路段横缝、纵缝都有。其余还有7段以处理纵缝为主的路段，长度在30-250m之间。

表 5-7 高聚物注浆路段一览表

Tab 5-7 Polymer grouting sections list

| 桩号 | 位置 | 病害类型 | 施工方案 | 刨铣深度 |
|-------------------|--------|------|---------|------------------------|
| K957+000-K958+000 | 上行超车道 | 横缝 | 注浆后刨铣修复 | 前500米刨铣4层后 500米刨铣三层 |
| K939+710-K940+937 | 上行行车道 | 纵横交错 | 注浆后刨铣修复 | 刨铣三层 |
| K944+166-K945+205 | 上行行车道 | 纵横交错 | 注浆后刨铣修复 | 刨铣三层 |
| K945+785-K948+120 | 上行行超车道 | 纵横交错 | 注浆后刨铣修复 | 刨铣三层 |
| K974+041-K974+075 | 上行行车道 | 纵缝 | 刨铣修复后注浆 | 刨铣三层 |
| K974+517-K974+542 | 上行行车道 | 纵缝 | 刨铣修复后注浆 | 刨铣三层 |
| K981+357-K981+327 | 下行行车道 | 纵缝 | 注浆后刨铣修复 | 刨铣三层 |
| K980+000-K979+745 | 下行行车道 | 纵缝 | 注浆后刨铣修复 | 刨铣三层 |
| K980+470-K980+600 | 下行行车道 | 纵缝 | 注浆后刨铣修复 | 刨铣三层 |
| K989+440-K989+455 | 下行停车道 | 纵缝 | 注浆后刨铣修复 | 刨铣三层 |
| K989+857-K989+872 | 下行停车道 | 纵缝 | 注浆后刨铣修复 | 刨铣三层 |

行车一年多以后，对依托改建工程高聚物注浆路段进行路况调查，高聚物注浆路段路况良好，无裂缝等病害出现。高聚物注浆邻近路段暂无明显差异。



K944+000 无高聚物注浆



K945+000 高聚物注浆路段



K956+900 无高聚物注浆路段



K957+500 高聚物注浆路段

图 5-16 高聚物注浆路段路况良好

Fig 5-16 Polymer grouting sections are in good condition

(2) 马芜高速公路养护工程

在马芜高速（G4211）上行行车道 K57+400-K58+000、K58+000-K58+500、K60+998-K61+190 共 3 段实施高聚物注浆结合面层铣刨修复技术。K57+400-K58+000 段病害以横缝为主；K58+000-K58+500 段病害不仅有横缝，而且还有纵缝及少量修补块；K60+998-K61+190 段以纵缝病害为主，也有部分横缝，纵缝在整个路段都有分布，其中双纵缝路段 22m。

2015 年 12 月中旬（行车 1 年多），对高聚物注浆结合铣刨修复路段进行路况调查，高聚物注浆结合铣刨修复路段总体路况良好。K57+400-K58+000 段（原路面横缝 59 条）出现横缝 5 条，位置分别为：K57+490、K57+507、K57+664、K57+668、K57+700（已在研究报告中分析，原因是铣刨深度不合理，根据横缝数量及芯样裂缝发展状态该段应铣刨中、上面层两层）。K58+000-K58+500 段无病害。K60+998-K61+190 段无病害，相邻路段 K59+880-K60+997 段未注浆，直接铣刨修复，出现 2m 长纵缝。

5.2.3 高聚物注浆材料能耗及排放

高聚物注浆材料主要为双组份聚氨酯高分子材料，但由于其为专利产品，故无法准确按其成分进行能耗及排放分析，本课题借用聚氨酯材料的研究成果。聚氨酯主要由异氰酸酯组分和多元醇组成组成，生产原材料主要依赖石油。聚氨酯生产所用能源主要是电和柴油等。与其它化工产品不同，异氰酸酯和聚醚多元醇等存在较高的技术壁垒，尤其是异氰酸酯，其关键技术主要掌握在一些跨国企业和极少数国内企业手中，缺乏相关基础数据库。中国建材检验认证集团股份有限公司马丽萍等对异氰酸酯、聚醚多元醇和戊烷采用欧洲数据库，对我国典型硬泡

聚氨酯板生命周期进行评价了研究, 得出了国内聚氨酯材料的能耗及排放(表 5-8), 得出结果同欧洲研究发布的数据较为接近。

表 5-8 国内硬泡聚氨酯板功能单位生命周期能源消耗及排放

Tab 5-8 Energy consumption and emissions of functional unit rigid polyurethane board

| 类型 | 我国 | 欧洲 |
|----------------------------------|------|------|
| 能源消耗 (MJ) | 106 | 102 |
| 碳排放 (kgCO ₂ 当量-100 年) | 5.79 | 4.16 |

注: 1kg 为功能单位

高聚物注浆技术的能耗与排放主要来源是注浆材料生产的能耗与排放, 还有就是施工过程中的能耗与排放。在现场注浆过程中, 主要消耗柴油。统计依托改建工程里程较长的 4 段工程(单幅 7.936km)的材耗、能耗及排放。高聚物注浆每公里能耗为 8559.1kgce、排放为 13931kg, 比大粒径沥青碎石层能耗低 12193.1 kgce、排放低 43124.4kg; 比冷再生基层降低能耗 3965.9kgce、排放 19591.9kg。

表 5-9 高聚物注浆技术材料能耗及排放统计表

Tab 5-9 Energy consumption and emissions of polymer grouting technology materials

| 序号 | 桩号 | 位置 | 聚氨酯材料消耗 | 柴油消耗 |
|--------------------------|-------------------|--------|-------------|-----------|
| 1 | K957+000-K958+000 | 上行超车道 | 2.9t | 163kg |
| 2 | K939+710-K940+937 | 上行行车道 | 4.0t | 202kg |
| 3 | K944+166-K945+205 | 上行行车道 | 3.9t | 190kg |
| 4 | K945+785-K948+120 | 上行行超车道 | 7.8t | 480kg |
| 合计 | | | 18.6t | 1035kg |
| 标准煤 | | | 67212.6kgce | 713.0kgce |
| 碳排放 (CO ₂ 当量) | | | 107694.0 kg | 2865.9 kg |

5.3 温拌沥青技术

5.3.1 技术概述

根据拌和施工温度的不同, 目前常用的沥青混合料可分为两种: 热拌沥青混合料 (Hot Mix Asphalt, HMA) 和冷拌沥青混合料 (Cold Mix Asphalt, CMA)。冷拌沥青混合料一般采用乳化沥青或者液体沥青与集料在常温状态下拌和、铺筑, 无需对集料和胶结料进行加热, 节能效果明显, 但其初期路用性能差, 难

以满足高速公路、重载交通道路等重要工程的要求。热拌沥青混合料是应用最为广泛、路用性能最为良好的一种混合料。但是在热拌沥青混合料生产过程中,沥青与石料需要在 150~180℃ 高温条件下拌和^[36]。此过程消耗大量能源,排放大量的 CO₂、烟尘和有害气体^[37]。如温度控制不当,沥青结合料在高温拌和过程中容易发生老化,影响使用性能。在前章节已经分析了沥青面层的能耗与排放。在沥青路面施工过程中,拌和是耗能及排放最多的工艺环节。

本文第四章研究数据表明,每生产一吨热拌沥青混合料需消耗 8 升燃料油。降低拌和温度可节约 30% 的燃料油和减少 30% 以上的气体以及粉尘排放。为此,西方国家于上个世纪 90 年代中后期开始研究温拌沥青混合料(Warm Mix Asphalt, WMA),通过降低沥青混合料的拌和与摊铺温度,达到降低沥青路面施工过程中的能耗与气体及粉尘排放量的目的,同时保证温拌沥青混合料具有与热拌沥青混合料基本相同的路用性能与施工和易性。由于温拌沥青混合料的节能、环保等优点在道路工程中应用逐渐增加^[38]。

5.3.2 温拌技术-泡沫沥青

依据降温原理不同,可将国内外多达十几种温拌沥青混合料技术分为三大类,分别是沥青发泡技术,沥青降粘技术和表面活性技术^[39]。依托改建工程应用的是沥青发泡技术。其主要原理是:一定量的水在标准大气压下变成水蒸气的话,它的体积可膨胀 1.675 倍,通过发泡喷嘴或亲水材料(如沸石)或潮湿的集料等将少量水加入沥青中,当水分散在沥青中并变成水蒸气(与热沥青接触)时,会导致沥青体积的迅速膨胀,粘度降低,从而降低拌和温度。

5.3.3 温拌沥青节能减排效果评价

在原材料相同的条件下,温拌技术拌和、摊铺和压实的温度一般比热拌低 30~50℃,能耗和有害气体的排放量随着拌和温度下降将显著减少。

(1) 沥青混合料拌合过程中的能耗与排放

施工路段沥青混合料拌合站为北京嘉隆 4000 型沥青拌和站,生产能力为 220-250 吨/小时。根据现场工作日志,常温沥青混合料与温拌沥青混合料拌和生产的能耗数据见表 5-10、表 5-11。同常温沥青混合料相比,温拌沥青拌和时能耗降低 22.9%,拌和的排放降低 22.9%。

表 5-10 沥青拌合站设备参数及能耗调查

Tab 5-10 Basic parameters and energy consumption of asphalt mixing station

| 调查项目 | | 调查结果 |
|------------------|-------------|---------|
| 型号 | | 加隆 4000 |
| 生产能力 (t/h) | | 220-250 |
| 装机总功率 (kw) | | 865 |
| 沥青混合料类型 | | AC-25 |
| 燃料类型 | | 煤 |
| 热拌 (160-165℃) | 电耗 (kwh/t) | 2.23 |
| | 煤耗 (kg/t) | 14.06 |
| | 合计煤耗 (kg/t) | 14.74 |
| 温拌 (148-145℃) | 电耗 (kwh/t) | 1.74 |
| | 煤耗 (kg/t) | 10.83 |
| | 合计煤耗 (kg/t) | 11.36 |

表 5-11 单幅每公里沥青面层沥青混合料拌合过程中的能耗与排放

Tab 5-11 Energy consumption and emissions of mixing one kilometer single asphalt covering

| 层位 | 燃料煤 (kg) | CO ₂ 排放 量(kg) | CH ₄ 排放 量(kg) | N ₂ O排 放量(kg) | 总能耗 (kgce) | CO ₂ 当量 (kg) | |
|-----|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------|----------------------------|-------|
| 下面层 | 热拌 | 26237 | 66380 | 0.703 | 1.055 | 23903 | 66712 |
| | 温拌 | 20221 | 51159 | 0.542 | 0.813 | 18422 | 51415 |

沥青混合料在拌和过程中除了拌和站消耗电能和化石燃料排放温室气体,拌和站中混合料自身也会有排放,温拌沥青混合料与普通沥青混合料的自身气排放列于表表 5-12 中,温拌沥青混合料自身气体排放量下降 60-75%,降幅明显。

表 5-12 沥青混合料拌合过程中温室气体排放统计表

Tab 5-12 Greenhouse gas emissions of mixing asphalt mixture

| 温室气体 | 热拌沥青混合料 | 温拌沥青混合料 | 降幅 (%) |
|-------------------------|--------------------------|--------------------------|------------|
| | 排放量 (mg/m ³) | 排放量 (mg/m ³) | WHA 相对 HMA |
| 二氧化碳 (CO ₂) | 2.6 | 1 | 60.0 |
| 氮氧化物 (NO _x) | 146 | 40 | 72.6 |
| 二氧化硫 (SO ₂) | 13.3 | 3.3 | 75.2 |

北美 Pincin 环境公司曾对麦克沥青公司拌和楼厂生产的 HMA 和 WMA 排放作了量化的检测,见表 5-13。检测结果同本项目结论较为接近。

表 5-13 沥青热拌与温拌拌合楼排放数据比较

Tab 5-13 Asphalt mixing station's emissions data comparison between hot mixed asphalt mixture and warm mixed asphalt mixture

| 测试项目 | 热拌 | 温拌 | 降幅 (%) |
|------------------------|------|------|--------|
| O ₂ (%) | 14.6 | 17.5 | -19.9 |
| CO ₂ (%) | 48 | 26 | 458 |
| CO (%) | 702 | 259 | 631 |
| NO _x (mg/L) | 622 | 261 | 580 |
| SO ₂ (mg/L) | 17.2 | 101 | 41.3 |

5.4 沥青路面施工节能减排工艺措施

在依托改建工程中,把节能减排当成重要技术工作。在拌合站位置选择及场地建设、拌合楼技术改造、施工工艺等方面均采用节能减排措施。根据前面章节的分析,结合资料调研,汇总得出沥青路面施工环节节能减排技术措施。

5.4.1 拌合站设置

依托改建工程三个标段拌和站距离高速公路主线距离在 10.5-12.5km 之间,拌和站都建在路边,沥青混合料、冷再生混合料材料运距都比较近,节约运输成本,从而节能减排。

冷再生材料加工同基层拌和楼位置靠近,节约运输成本。材料存放区都采用水泥混凝土进行场地硬化,且具有良好的排水设施,所有材料储存区都搭棚防雨。

一般集料含水量增加 1%,拌和站产量降低 10%,采取措施降低集料含水

量，可降低烘干集料的能耗，提高拌和站的产量，达到节能诉求并加快施工进度。各拌和场站材料存放区均搭设了防雨棚，材料存放区位于高程较高的位置，材料存放区无积水，保证沥青拌和站生产的时候集料的含水量降低。

5.4.2 拌合站节能改造

沥青拌和站是在沥青路面施工中耗能最大的机械设备。通过本文的分析可知，沥青混合料拌和阶段的能耗明显高于摊铺、碾压阶段，约为摊铺、碾压阶段的 30-60 倍，摊铺和碾压阶段的能耗较为接近。因此，拌和阶段是节能减排控制的主要环节。沥青拌和站主要在 3 个方面产生耗能：集料的加热烘干；对重油、管路、沥青、阀门等加热保温；电机的驱动。

目前我国在沥青混合料生产过程中的沥青、集料加热都主要依靠煤。煤是一种低热值、燃烧排放量大、价格便宜的低品质化石燃料。由于我国煤产量较大、价格较低，因此煤常常作为沥青混合料生产的主力燃料。但是燃煤设备燃烧效率不高，造成能量浪费和大量排放。

因此，从减少排放的角度，更换加热燃料，用高品质高热值的燃料取代低热值高污染的煤，是实现减少温室气体排放的途径之一。从实用的角度出发，我国投入使用替代燃煤锅炉的导热油锅炉为燃油（重油）锅炉和燃气锅炉。

重油锅炉与燃煤锅炉相比，容易实现雾化燃烧，燃烧效率更高、燃烧更完全；就燃料品质而言，重油氢含量高，燃烧产生的温室气体少；含氮、含硫量低，燃烧污染小，对设备的腐蚀低。

天然气燃烧品质最高，含氢量可达 20%左右，燃烧纯净，几乎不产生粉尘颗粒 PM；热值高，燃烧混合均匀，燃烧效率高；燃烧后产生的碳排放最少。在美国，由于天然气资源丰富，其国内的沥青拌合设备大多都可使用天然气作为燃料，以天然气生产的沥青混合料占总产量的 70%-90%。我国的一些天然气资源丰富的地区，也已经开始将天然气作为沥青拌合的燃料。

集料加热也存在相同的问题。大部分高速公路建设广泛采用煤、重油作为集料加热燃料，燃烧不完全、积碳严重的问题普遍存在，且对集料质量也有一定影响。如果改用天然气，这些问题均能得到较好改善。同理，改用电力加热亦可达到节能减排诉求。本项目三个标段均为新采购 4000 型拌和机，并根据情况进行了一定的技术改造：采用精煤进行集料加热，精煤呈粉末状，其热值高于一般燃煤。但其排放仍高于天然气等清洁能源。能源种类的改变对沥青混合料碳排放和能耗的影响见表 5-14。

表 5-14 沥青混合料改变能源种类的节能减排效果

Tab 5-14 The effects on energy saving and emissions reduction of changing the types of energy for asphalt mixture

| 改变能源种类 | 煤改油 | 油改气 | 煤改油 | 油改气 | 气改电 | 柴油改电 | |
|---------------|--------|--------|---------|---------|---------|--------|-------|
| 环节 | 集料加热 | 集料加热 | 沥青脱桶及加热 | 沥青脱桶及加热 | 沥青脱桶及加热 | 混合料拌合 | |
| 碳排放对比 (kg/t) | 前 | 24.376 | 21.199 | 7.13 | 5.46 | 3.948 | 1.465 |
| | 后 | 21.199 | 13.487 | 5.46 | 3.948 | 7.297 | 2.054 |
| 能耗对比 (kgce/t) | 前 | 8.195 | 9.316 | 2.399 | 2.399 | 2.399 | 0.800 |
| | 后 | 9.316 | 9.316 | 2.399 | 2.399 | 2.3991 | 0.322 |
| 减少碳排放(%) | 13.03 | 36.38 | 23.42 | 27.69 | -82.43 | -40.21 | |
| 节约能源(%) | -13.67 | - | - | - | - | 59.71 | |

5.5 本章小结

(1) 在高速公路沥青路面改建工程中, 采用的厂拌热再生、厂拌冷再生、水泥灰土冷再生等技术都具有节能减排效果。

(2) 依托改建工程 2009 年施工的厂拌热再生路段(面层、上基层均再生), 经七年行车后路况良好、无裂缝等病害, 单位产量的厂拌热再生沥青混合料总能耗较普通热拌沥青混合料降低 19.0%, 温室气体排放降低 3.9%。

(3) 温拌技术具有明显的节能减排效果, 主要体现在拌和环节, 依据施工现场调查分析, 同常温沥青混合料相比, 温拌沥青拌和时能耗降低 22.9%, 拌和的排放降低 22.9%。

(4) 水泥稳定再生石灰土路段行车 1-2 年后, 路况良好。水泥稳定再生石灰土消耗的原材料主要是水泥、再生土和水。施工过程中的能耗包括铣刨机铣刨(拌和)和压路机碾压的能耗。根据现场调查测算, 水泥再生土每公里能耗为 5202.56kgce, 排放 CO₂ 当量为 14689.22kg, 其能耗与排放仅为水泥稳定碎石基层的 35.5%和 34.1%。

(5) 依托改建工程共施工水泥再生土单幅 25.468km, 累计节能 240772.9 kgce、减排 722485.9kgce。

(6) 高聚物注浆技术的能耗与排放主要来源是注浆材料生产的能耗与排放, 还有就是施工过程中的能耗与排放。在现场注浆过程中, 主要消耗柴油。统计依托改建工程里程较长的 4 段工程(单幅 7.936km)的材耗、能耗及排放。高聚物注

浆每公里能耗为 8559.1kgce、排放为 13931kg，比大粒径沥青碎石层能耗低 12193.1kgce、排放低 43124.4kg；比冷再生基层降低能耗 3965.9kgce、排放 19591.9kg。

(7) 在沥青路面施工过程中，节能减排的关键环节是沥青拌和站，拌和站使用高热值、低排放能源节能减排效果最为显著。拌和站位置合理设置，料场搭棚覆盖，也具有节能减排效果。

第六章 沥青路面节能减排绿色养护评价体系

6.1 节能减排绿色养护评价指标

6.1.1 指标选取原则

对高速公路沥青路面进行大修养护, 现有养护对策的选择以路面质量状况、病害类型及严重程度、交通量等技术因素为依据, 主要从经济角度进行费用效益分析, 并未充分考虑环境影响、社会效益因素。本文遵循绿色建设理念, 建立节能减排绿色养护评价体系, 从沥青路面养护工程项目的节能、减排效果及等级进行评价。绿色养护追求“高效、低耗、环保”的综合效益, 以环保优先为原则, 要求做到环境保护、经济效益、社会效益的有机统一, 最大限度地节约资源和减少对环境的负面影响, 实现节能、节材和环境保护, 同时对废旧材料再循环再利用[40]。

路面养护工程节能减排评价体系是实现公路沥青路面养护可持续发展的重要手段, 从节能、环保等绿色角度对养护工程或采用的技术措施进行评价, 为高速公路沥青路面养护或大修决策提供科学依据。

路面养护工程节能减排评价体系的有效构建, 除了要遵循全面性、层次性、目标性等一般原则外, 还应遵循以下原则:

①科学性原则

评价体系的建立要有一定的理论基础, 应尽量全面、完善。评价指标的设计必须建立在科学的基础上, 指标明确, 能够真实、客观反映绿色养护节材、节能和环境保护等多方面的要求。评价指标体系繁简要适宜, 不能过多过细而造成指标间相互交叉重叠, 也不能过少过简而导致指标信息不全面。还应遵循以下原则:

②整体性原则

节能减排评价体系应能够全面反映路面养护技术的本质特征和整体性能, 应该将路面改建(养护)施工过程视为一个有机系统对象, 使指标体系的层次结构合理、相互联系、相互制约, 确保节能减排评价体系的客观性、全面性。对于路面工程的节能减排评价, 评价指标体系必须全面反映路面改建(养护)技术对资源、环境、社会、经济等多方面的影响。

③可操作性原则

可操作性是保证指标体系可行性的首要条件, 要求指标选择应考虑数据获取的难易度, 应保证数据的可靠性, 可对其进行量化处理。评价指标基于现阶段的检测仪器水平应能易于采集获得。指标应具有一定的可度量性和可比较性。对于评价体系中的定性指标, 应通过量化的科学分析方法量化。对于各评价指标应

使用统一标准进行衡量,尽量消除主观因素影响,增强评价的客观性,确保评价结果的准确性、科学性。

④动态性原则

高速公路路面改建(养护)施工是一个动态过程,与一定的社会条件和技术水平相联系,评价指标的选择应充分考虑评价系统动态变化的特性,应充分考虑时间因素,应能够综合反映养护技术的现状和发展趋势。

⑤实用性原则

评价指标的目的是改进技术方案或施工工艺,评价指标也应具有很强的指导价值。

6.1.2 评价指标

我国实施绿色公路建设的指导思想是:牢固树立创新、协调、绿色、开放、共享五大发展理念,建设以质量优良为前提,以资源节约、生态环保、节能高效、服务提升为主要特征的绿色公路,实现公路建设可持续发展。依据我国绿色公路倡导的指导思想,基于本课题前面节能减排量化分析结论,参考我国沥青路面节能减排指标体系的研究成果,本课题以“节材、节能、减排”为核心,建立评价指标体系,围绕此核心提出具有普遍性、指导性的一级指标。一级指标有4项:资源节约、节能低碳、绿色管理、路面质量状态。对一级指标进行细化,确定易于考核、量化的二级指标。

(1) 资源节约指标

在沥青路面新建或养护工程中,都要消耗大量的原材料。根据本文对能耗与排放的量化分析结果,在沥青路面养护工程中,原材料生产的能耗与排放在沥青路面养护工程总能耗与排放中占很大的比重(沥青面层原材料能耗占总能耗的60.8%,排放占总排放量的58.8%,因为沥青为高耗能材料)。资源利用指标还可以反映出绿色理念的落实情况、再生技术的应用状况、项目的管理水平等。

从原材料节能减排的角度,根据本文前面的分析结论:尽量减少水泥、石灰、沥青等高耗能、高排放材料的用量;使用再生集料;就近取材,尽量降低运输距离;拌合站位置合理设置,减少运输环节能耗与排放。据此,根据养护工程实际,本文选择以下4项指标为资源节约指标中的二级指标:旧路面材料再生使用(再生沥青混合料、再生石灰土、再生水泥稳定碎石等);新型环保材料(岩沥青、高聚物注浆材料等);材料运距;材料存储。

在对资源节约利用指标评价时,分别计算旧沥青面层(基层、底基层)材料利用量占废旧材料的总量,根据利用率计算得分。鼓励废旧材料的再生沥青,材料再生利用不仅具有节能减排的效益,同时由于减少集料(工程用土)的消耗,可以使更多山体、土地得以保护,生态效益显著。

(2) 节能低碳指标

在沥青路面生命周期中,沥青路面材料生产、养护维修施工过程以及车辆运行都会消耗大量的电力、燃油等不同类型的燃料。根据本文的调查及量化计算分析,沥青路面生命周期中能源消耗数量巨大。节能低碳是绿色公路建设的主要目标,必须在沥青路面节能减排评价指标体系中考虑能源消耗及减少排放指标。

能源消耗指标、资源消耗指标、排放指标也是我国沥青路面节能减排评价指标研究者的共识,但具体选用的二级指标有所不同,评价计分方法不同。长安大学杨博博士论文“沥青路面节能减排量化分析方法及评价体系研究”^[13]、长安大学蔺瑞玉博士论文“沥青路面建设过程温室气体排放评价体系研究”^[14]及河南高速公路发展有限公司商东旭、华南理工大学史纪村发表的“基于模糊物元法的沥青路面养护工程节能减排效果评价研究”^[16]文章中,都提出能源消耗指标、资源消耗指标、排放指标。

杨博根据沥青路面生命周期能源消耗情况调查分析,结合沥青路面能源消耗量化分析评价模型,选择电力消耗量、燃油消耗量(包括汽油、柴油、重油等燃料油)2项指标作为能源消耗指标中的二级指标。蔺瑞玉、史纪村^{[14][16]}等提出的能源消耗指标也是电力消耗量和燃油消耗量。

能源消耗与环境排放紧密相关,能耗的数量直接反映了沥青路面生命周期过程对生态环境和经济效益的影响。能耗与排放是直接相关的指标,能耗低、排放少,因此本文列为一项一级指标。关于二级指标,本文考虑到无论各种形式的能耗均可转换为标准煤的用量,不同能源的排放均可转化为CO₂当量,考虑到易于评价、效果直接、有利于节能减排技术改进的原则,选用能耗下降率、碳排放下降率、拌合站节能减排、混合料节能减排、施工工艺节能减排五项指标作为二级指标。这样评价目的明确,计分标准易于制定,容易量化,并能突出沥青路面施工中能耗大的环节,可以有针对性地进行节能减排的技术改进。

(3) 绿色管理指标

只有牢固树立绿色理念,作为决策者积极组织、推动绿色公路建设,节能减排才能成为可能,因此本文选择绿色管理指标作为一级指标。

长安大学杨博博士论文中提出的其他一级指标包括管理控制指标,和本文的绿色管理指标具有类似之处。杨博提出5项指标作为管理控制指标中的二级指标:①质量管理认证(包括企业资质、质量管理体系认证);②工程质量奖励(包括企业获得国家或省部级工程质量奖励);③工程质量管理措施(包括工程质量管理计划、人员培训、质量自检情况);④环境排放控制计划(包括环境排放控制计划书、人员培训计划);⑤环境排放控制措施(包括环境排放检测人员和设备配置、环境排放控制设备配置、环境排放控制设备完好情况)。

本文选择二级指标的原则侧重于节能减排的保障措施，以确保节能减排工作得以落实，因此包括项目绿色养护规划、资金保障、组织措施（培训、宣传）评估考核、信息化系统五项指标。

（4）路面质量状态指标

充分调研以往的研究成果，依据指标确定原则，本文提出的第4个一级指标为路面质量状态指标，即改建（养护）后路面的技术状况。改建（养护）后的路面质量状态，对营运车辆的行驶费用、后续的养护投入都有直接影响。只有经养护后的路面处于良好的质量状态，改建（养护）中的能耗才有价值。故本文提出路面质量状态指标。路面质量状态的二级指标包括养护（改建）工程验收质量及新技术应用路段质量评价两个二级指标。最终文本提出节能减排评价指标体系见表6-1。

表 6-1 沥青路面改建（大修）工程节能减排评价指标体系

Tab 6-1 Evaluation index system for energy conservation and emissions reduction of asphalt pavement reconstruction project

| 一级指标 | 二级指标 | 备注 |
|--------|---------------------|---------------------------|
| 资源节约 | 旧路面材料再生利用 | |
| | 新型环保材料应用 运距 | （冷再生、热再生、再生水泥稳定碎石、水泥再生土等） |
| | 材料存储 | |
| 节能低碳 | 能耗下降率 | 标准煤折算值 |
| | 碳排放下降率 | CO ₂ 当量 |
| | 拌合站节能减排 | |
| | 混合料节能减排 施工工艺节能减排 | |
| 绿色管理 | 绿色养护规划 | |
| | 资金保障 | |
| | 组织措施 | |
| | 信息化系统 评估考核 | 实施采集测算每工作日能耗及排放 |
| 路面质量状态 | 养护（改建）工程验收质量 | 竣工（交工）验收质量 |
| | 新技术应用路段质量评价 | 高聚物注浆、温拌沥青路段质量状况 |

6.2 评价方法

6.2.1 指标权重

节能减排评价指标有一级指标、二级指标,在计算评价结果时,各指标的权重很重要。权重值反映了该评价指标在沥青路面节能减排评价体系中的重要性,权重值的大小直接影响沥青路面节能减排评价结果。因此,为了确保节能减排评价的科学性与对工程建设的指导性,必须合理确定指标的权重。根据相关的研究成果,充分考虑沥青路面节能减排评价指标及其对节能减排评价结果的影响程度,本课题选用改进层次分析法确定一级指标和二级指标的权重。

层次分析法 (Analytical Hierarchy Progress) 简称为 AHP 法,其基本过程是:把复杂问题分解成各个组成元素,按支配关系将这些元素分组、分层,形成有序的递阶层次结构,在此基础上通过两两比较方式判断各层次中诸元素的重要性,然后综合这些判断计算单准则排序和层次总排序,从而确定诸元素在决策中的权重的一种定量与定性相结合的多目标决策分析方法。

改进的层次分析法 (IAHP) 在确定权重向量时,不仅克服了 (1/9,9) 标度重要度排序过程的不确定性,而且克服了权值计算和一致性检验的复杂性,具有直观、简捷的特点。下面主要采用改进层次分析法确定各指标权重,改进层次分析法的具体步骤为:

(1) 构造判断矩阵

首先建立路基质量评价指标体系的层次模型,然后在同一层次对各评价因素进行两两重要性比较,获得综合比较矩阵,根据重要程度排序指数构造相应的判断矩阵。各评价因素的重要性评判采用如下简单量值规则:

$$k_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{(因素i没有因素j重要)} \\ 1 & \text{(因素i与因素j一样重要)} \\ 2 & \text{(因素i比因素j重要)} \end{cases} \quad (6.1)$$

式中, k_{ij} 是因素 i 和因素 j 的比较数量化值,也是综合比较矩阵中的相应元素。

判断矩阵 A 的计算公式为:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

$$\text{其中: } a_{ij} = \begin{cases} r_i - r_j & (r_i > r_j) \\ 1 & (r_i = r_j) \\ \frac{1}{r_j - r_i} & (r_i < r_j) \end{cases} \quad (6.3)$$

$$r_i = \sum_{l=1}^n k_{il} \quad (6.4)$$

式中： a_{ij} 为判断矩阵 A 的相应元素； r_i 为重要程度排序指数； n 为矩阵的阶数； k_{il} 为综合比较矩阵的相应元素。

(2) 计算判断矩阵的优化矩阵

由判断矩阵 A ，得出优化矩阵的相应元素计算公式为：

$$b_{ij} = \frac{\sqrt[n]{\prod_{l=1}^n a_{il}}}{\sqrt[n]{\prod_{l=1}^n a_{li}}} \quad (6.5)$$

于是得到优化矩阵：

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

(3) 计算评价指标权重值

计算优化矩阵每一行元素的乘积 M_i

$$M_i = \prod_{j=1}^n b_{ij} \quad i=1,2,\dots,n \quad (6.7)$$

计算 M_i 的 n 次方根 \bar{W}_i

$$\bar{W}_i = \sqrt[n]{M_i} \quad (6.8)$$

对向量 $\bar{W} = [\bar{W}_1, \bar{W}_2, \dots, \bar{W}_n]^T$ 做归一化处理，得到

$$W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{W}_j} \quad i, j=1,2,\dots,n \quad (6.9)$$

则 $W = [W_1, W_2, \dots, W_n]^T$ 即为所求的权重特征向量。

从收集到的专家调查表中得到综合比较矩阵，按前述的改进层次分析法构造相应的判断矩阵，用MATLAB计算出每个专家的权重值，取其平均值作为各评价指标的权重。

表 6-2 各一级指标权重

Tab 6-2 The weight of each first class indicator

| 一级指标 | 资源节约 | 节能低碳 | 绿色管理 | 路面质量状态 |
|------|-------|-------|-------|--------|
| 权重 | 0.458 | 0.381 | 0.113 | 0.048 |

6.2.2 指标量化评价

根据本文的研究成果及节能减排技术成果，结合我国绿色公路理念、政策要求及技术水平、管理水平，确定指标量化评分方法。

表 6-3 资源节约指标计分标准

Tab 6-3 Score standard resource conservation index

| 一级指标 | 二级指标 | 计分标准 | 得分 |
|-------------|------------------|--|----|
| 资源节约 46分 | 旧路面材料再生利用 38分 | <p>对旧路面材料进行再生利用，如沥青热再生、沥青冷再生、再生水泥稳定碎石基层、再生水泥土等。</p> <p>1.旧沥青面层按利用率不同划分为4个等级： 旧路面面层材料再生利用率（%）=旧路面材料再生沥青总量/旧路面材料总量×100%</p> <p>1) 95%以上，一级，得28分</p> <p>2) 80%-95%之间，二级，24分</p> <p>3) 60-80%之间，三级，18分</p> <p>4) 60%以下，四级，不得分</p> <p>2.使用热再生技术，超过旧沥青混合料总量30%，加3分，30-10%，加2分，小于10%加1分。</p> <p>3.旧路面基层（非沥青类）材料再生利用，超过废旧材料50%，加2分，小于50%加1分</p> <p>4.旧路面底基层材料再生利用，超过废旧材料50%，加2分，小于50%加1分</p> | |
| | 新型环保材料应用 4分 | 采用环保材料，如高聚物注浆、岩沥青、泡沫沥青等，每项加1分，不超过4分。 | |
| | 运距 2分 | 就地取材，施工现场100km运距以内的材料占70%以上（沥青除外），得1分；运距50km以内的材料占70%以上，得2分。 | |
| | 材料存储 2分 | 搭建棚库用于储存粗细集料、料场排水设施良好；水泥、矿粉有专用储罐；沥青储罐宜节能环保。（2.0分） | |
| | | | |

表 6-4 节能低碳指标计分标准

Tab 6-4 Score standard of energy saving and low-carbon emissions index

| 一级指标 | 二级指标 | 计分标准 | 得分 |
|-------------|----------------|--|----|
| 节能低碳 38分 | 能耗下降率 11分 | 依据标准煤折算值得基准值（1t沥青混合料能耗为32.16kgce(上面层)、27.05kgce（中面层）、17.24kgce）（下面层），1t水泥稳定碎石基层（17cm）能耗为23.82kgce），计算能耗（标准煤折算值）下降比例： 1) 下降率在40%及以上，得11分 2) 下降率在20-30%之间，得9分 3) 下降率在10-20%之间，得7分 4) 下降率在0-10%之间，得6分。 | |
| | 碳排放下降率 13分 | 依据CO ₂ 当量基准值（1t沥青混合料排放为90.91kg（上面层）、76.26kg（中面层）、68.28kg（下面层），1t水泥稳定碎石基层（17cm）排放为70.00kg），计算温室气体排放（CO ₂ 当量）下降比例： 1) 下降率在30%及以上，得13分 2) 下降率在10-30%之间，得11分 3) 下降率在5-10%之间，得9分。 4)下降率在0-5%之间，得7分。 | |
| | 拌合站节能减排 10分 | 1) 沥青混合料拌和站采用节能减排技术，降低能耗，拌和1t沥青混合料： 能耗小于等于8.0kgce，得6分 能耗在8.0-10.5kgce 之间，得5分 能耗在10.5-13.0kgce之间，得3分 2) 使用天然气清洁能源： 天然气占能耗比例50%以上 得3分 天然气占能耗比例30-50%之间 得2分 天然气占能耗比例10-30%之间 得1分 3) 拌合站有建立耗数据采集、监测、分析系统，得1分 | |
| | 混合料节能减排 3分 | 使用温拌沥青技术 1) 超过面层总量的30%得3分 2) 占面层总量10-30%，得2分 3) 成功应用，占面层总量少于10%，得1分 | |
| | 施工工艺节能减排 1分 | 优化施工组织，降低设备故障率，提高设备使用率，减少车辆空载率。得1分 | |
| | | | |

表 6-5 绿色管理指标计分标准

Tab 6-5 Score standard of green management index

| 一级指标 | 二级指标 | 计分标准 | 得分 |
|-------------|--------------|--|----|
| 绿色管理 11分 | 绿色养护规划 3分 | 基于全寿命周期思想制定绿色养护规划,制定包含养护设计、原材料生产及供应、施工、评估各环节的实施指南。3分 | |
| | 资金保障 2分 | 有专项资金用于落实节能减排工作,设置节能减排奖励基金。2分 | |
| | 组织措施 2分 | 开展绿色养护、绿色施工宣传及培训工作。2分 | |
| | 信息化系统 2分 | 建立节能减排信息化系统,实时采集测算能耗及排放量。2分 | |
| | 评估考核 2分 | 组织节能减排等绿色施工评估、考核,建立奖惩机制。2分 | |

表 6-6 路面质量状态计分标准

Tab 6-6 Score standard pavement quality status

| 一级指标 | 二级指标 | 计分标准 | 得分 |
|------------------|--------------------|-------------------------|----|
| 路面质量 状态 5分 | 养护(改建)工程验收质量 3分 | 竣工(交工)验收优良。3分 | |
| | 新技术应用路段质量评价 2分 | 高聚物注浆、温拌沥青等新技术路段路况良好。2分 | |

根据以上计分标准,对评价工程项目进行评分,评价结果分为四个档次,得分 ≥ 90 分为优秀,80-90分为良好,70-80分为中等,60-70分为及格。

6.3 本章小结

(1) 基于交通部对绿色公路的指导意见及沥青路面改建工程的特点,在本课题对节能减排量化分析的基础上得出综合量化评价的流程:评价指标的选择、确定指标权重、确定计分方法及量化指标基准值、计分评价。

(2) 依据我国绿色公路倡导的指导思想,基于本课题节能减排量化分析结论,以“节材、节能、减排”为核心,提出4项一级指标:资源节约、节能低碳、绿色管理、路面质量状态。

(3) 资源节约指标包括旧路面材料再生使用(再生沥青混合料、再生石灰土、再生水泥稳定碎石等)、新型环保材料(岩沥青、高聚物注浆材料等)、材料运

距；材料存储四项二级指标；节能低碳指标包括能耗下降率、碳排放下降率、拌合站节能减排、混合料节能减排、施工工艺节能减排五项二级指标；绿色管理指标包括包括项目绿色养护规划、资金保障、组织措施（培训、宣传）评估考核、信息化系统五项指标；路面质量状态的二级指标包括养护（改建）工程验收质量及新技术应用路段评价两个二级指标。

（4）在本课题节能减排量化分析的基础上，依据建立的指标体系，提出节能减排计分及评价方法。

第七章 结论与建议

沥青路面维修改造过程中的能源消耗与气体排放问题,其实质是沥青路面维修改造过程对环境的影响问题。本文以安徽省某沥青路面改建工程为依托,基于绿色公路建设理念,运用生命周期分析方法,建立高速公路沥青路面维修改造工程节能、减排分析评价模型框架;对原材料生产期、沥青路面施工期的能耗、排放进行量化分析;对比不同技术措施、不同施工环节的能耗及排放量,明确节能减排重点,提出节能减排措施;基于绿色公路建设理念,以“节材、节能、减排”为核心,提出沥青路面改建(养护)工程节能减排评价指标体系及评价方法。从节能减排角度对高速公路改建(养护)工程的技术决策、管理、实施及评价提供指导。

7.1 主要结论

(1) 依据生命周期分析方法,建立了在沥青路面建设或改建工程中运用清单分析法的流程,结合绿色公路的要求及改建工程特点,明确了能耗、排放的量化计算方法,建立了适用于沥青路面改建工程节能减排量化与评价的基本模型框架。

(2) 原材料生产期胶结材料都是高耗能、高排放材料,尤其是石灰、水泥、改性沥青。原材料(胶结料)能耗与排放由高到低的顺序为:石灰、水泥、改性沥青、改性乳化沥青、沥青、乳化沥青。

(3) 采用现场调研法确定集料生产能耗与排放。每生产1t玄武岩集料,其能耗、排放分别为1.29kgce、6.04kg,每生产1t石灰岩集料,其能耗、排放分别为0.86kgce、3.72kg;运输能耗在集料能耗中均占较大比重(41.4%-60.6%)。再生集料生产能耗在0.51-0.66kgce之间,再生集料能耗约为新集料能耗(0.86-1.29)与排放的50%。

(4) 依托改建工程项目共使用再生集料309814.1t,实现了废旧沥青面层材料的100%再生利用,由此节约新集料约300519.7t。

(5) 依托改建工程项目原材料生产期材料总体能耗为895.47万吨折算标准煤,排放为2416.45万吨CO₂。

(6) 原材料生产期节能减排措施:尽量减少水泥、石灰、改性沥青等高耗能、高排放材料的用量;使用再生集料;就近取材,尽量降低运输距离;拌合站位置合理设置,减少运输环节能耗与排放。

(7) 1tSMA-13、AC-20C、AC-25C的能耗范围在13.6-16.0kgce、12.1-16.2kgce、11.4-15.5kgce之间;1tSMA-13、AC-20C、AC-25C的排放范围在35.1-41.6kg、

31.0-42.3kg、29.0-36.8kg之间。沥青上面层(SMA-13)因添加纤维、使用改性沥青,且粒径较小,能耗比中面层高4.0%,比下面层高8.1%。拌和时间、拌和温度都会影响能耗。不同的拌合站能耗与排放差异明显,说明拌合站设备、燃煤品质及管理水平的差异较大。

(8)在沥青路面施工中,沥青混合料施工期能耗与排放占总量的比重较大,沥青面层施工期能耗与排放占总量的44.5%、43.8%,冷再生基层施工期能耗与排放仅占总量比例的13.5%、11.6%,沥青混合料施工期是节能减排管理工作的重点。

(9)在沥青面层施工期的各个环节,沥青混合料拌和能耗与排放比重最大,占总能耗的77.4%,占总排放的82.1%,因此沥青混合料拌和是降低能耗与排放的关键环节。沥青混合料拌和过程中,集料加热消耗的能量占拌和过程的94-98%。通过选择热值高、排放低的能源是节能减排的有效措施。

(10)冷再生基层结构层施工期的能耗和排放很低,1km仅为641.7kgce,排放仅为1627.6kg,仅为大粒径沥青碎石基层的8.8%、7.8%。考虑原材料生产及施工期两个阶段,冷再生基层的能耗与排放是大粒径沥青碎石基层的60.9%、59.9%。1km冷再生基层比大粒径沥青碎石基层减少能耗、排放分别为7997.2kgce、22427.1kg。依托改建工程累计节约能耗 1.88×10^6 kgce、减少排放 5.39×10^6 kg,冷再生基层节能减排效果显著。

(11)在高速公路沥青路面改建工程中,采用的厂拌热再生、厂拌冷再生、水泥灰土冷再生、高聚物注浆等都具有节能减排效果,且经调查施工路段路况良好。

(12)单位产量的厂拌热再生沥青混合料总能耗较普通热拌沥青混合料降低19.0%,温室气体排放降低3.9%。温拌沥青拌和能耗降低22.9%,拌和的排放降低22.9%。水泥再生土每公里能耗为5202.56kgce,排放CO₂当量为14689.22kg。其能耗为水泥稳定碎石层的35.5%,排放是水泥稳定碎石层的34.1%。依托改建工程施工水泥再生土单幅25.468km,累计节能240772.9kgce、减排722485.9kg。

(13)高聚物注浆技术属于新型环保技术应用,高聚物注浆的能耗与排放主要来源是注浆材料生产的能耗与排放,高聚物注浆每公里能耗为8559.1kgce、排放为13931kg,比大粒径沥青碎石层能耗低12193.1kgce、排放低43124.4kg;比冷再生基层降低能耗3965.9kgce、排放19591.9kg。

(14)在沥青路面施工过程中,节能减排的关键环节是沥青拌合站,拌合站使用高热值、低排放能源节能减排效果最为显著。拌合站位置合理设置,料场搭棚覆盖,也具有节能减排效果。

(15)依据我国绿色公路倡导的指导思想,基于本课题节能减排量化分析结

论,结合高速公路养护工程施工的特点,以“节材、节能、减排”为核心,确定沥青路面改建工程节能减排二级评价指标体系(一级指标4项,二级指标16项)。一级指标包括:资源节约、节能低碳、绿色管理、路面质量状态。

(16)在对实体工程能耗、排放量化分析基础上,提出基于绿色理念的节能减排综合量化评价方法,为沥青路面改建工程节能减排技术决策、节能减排效果评价提供科学的方法。

7.2 建议

(1)本文中集料生产,再生集料生产,改建工程各结构层施工的能耗与排放均来自现场实地调研,实地调研数据占比达90%以上。但文中采用的沥青、水泥等原材料生产的能耗与排放因调研难度大、厂家配方保密等原因无法进行实地调研,依然采用的是资料数据,可能与现有生产水平存在差异,建议进一步实地采集,获取最新数据。

参考文献

- [1] Håkan Stripple. Life Cycle Assessment of Road[R]. IVL report .IVL Swedish Environmental Research Institute, 2001.03: P22~50
- [2] Tarja Häkkinen, Kari Mäkelä. Environmental Adaptation of Concrete Environmental Impact of Concrete and Asphalt Pavements[R]. ESPOO: Technical Research Centre of Finland.1996.
- [3] Pablo Zapata, John A. Gambatese. Energy Consumption of Asphalt and Reinforced Concrete Pavement Materials and Construction[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2005, 11(1): 9-20
- [4] Kwangho Park, Yongwoo Hwang, Seongwon Seo, et al. Quantitative Assessment of Environmental Impacts on Life Cycle of Freeways[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2003, 129(1): 25-31
- [5] Hanson, Christopher,Noland, Robert ,Cavale, Karthik. Life-cycle greenhouse gas emissions of materials used in road construction[J]. Transportation Research Record, 2010(2287):174-181.
- [6] Raja Chowdhury, Defne Apul, Tim Fry. A Life Cycle Based Environmental Impacts Assessment of Construction Materials Used in Road Construction[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2010, 54(4): 250-255
- [7] D. Cass, A. Mukherjee. Calculation of Greenhouse Gas Emissions for Freeway 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
- [8] Rachel Katherine Nathman. Palate User Guide, Example Exercise, and Contextual Discussion[D]. Newark: University of Delaware, 2008
- [9] International Institute for Sustainable Development. Assessing Sustainable Development:Principles in Practice[R]. Winnipeg: I I f S Development, 1997
- [10] Martina Soderlund. Sustainable Roadway Design- A Model For An Environmental Rating System[D]. Washington D. C: University of Washington, 2007
- [11] 尚春静, 张智慧, 李小冬. 高速公路生命周期能耗和大气排放研究[J]. 公路 交通科技, 2010, 27 (8): 149-154
- [12] 潘美萍. 基于 LCA 的高速公路能耗与碳排放计算方法研究与应用[D]. 华南理工大学硕士学位论文, 2011.05
- [13] 杨博. 沥青路面节能减排量化分析方法及评价体系研究[D]. 长安大学博士学位论文, 2012.12
- [14] 蔺瑞玉. 沥青路面建设过程温室气体排放评价体系研究[D]. 长安大学博士学位论文, 2014.12
- [15] 王婷婷.公路沥青路面不同预防性养护方式的绿色评价研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文, 2013.6
- [16] 商东旭, 史纪村. 基于模糊物元方法的沥青路面养护工程节能减排效果评价研究[J]. 公路交通科技, 2015.11
- [17] 齐乐. 沥青面层节能减排评价指标及评估体系研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2015.5
- [18] 陈力维. 沥青路面营运期间能量消耗与气体排放量化分析研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2012.6
- [19] 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

- [20] 夏添, 邓超, 吴军. 生命周期评价清单分析的算法研究[J]. 计算机工程与设计, 2005 (7) :1681-1683
- [21] 孙启宏. 生命周期评价在清洁生产领域的应用前景[J]. 环境科学研究, 2002, 15(4) : 4-6
- [22] GB/T 2589-2008, 综合能耗计算通则[S]. 国家技术监督局
- [23] 王维真, 毛剑锋, 黄领周, 林景宇, 周晓霞. 印刷机械节能产品方法的研究[J]. 科技与企业, 2014 (1) : 141-142
- [24] 夏青, 于洁. ISO14020 系列国际标准教程[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004
- [25] 杨博, 尚同羊, 张慧鲜, 张争奇. 沥青路面建设阶段能耗与排放量化预估方法研究[J]. 中外公路, 2014, (1): 7-13
- [26] 国家发展和改革委员会办公厅, 国家发展和改革委员会办公厅关于印发省级温室气体清单编制指南(试行)的通知, 国家发展和改革委员会办公厅文件, 发改办气候[2011]1041号
- [27] 陈力维. 沥青路面运营期间养护能耗与排放量化分析[J]. 交通运输部管理干部学院学报, 2013, 23(2): 12-19
- [28] 政府间气候变化委员会第四次调查报告[R]. IPCC核心撰写组. 2007,4
- [29] 沥青寿命清单[R]. 欧洲沥青协会. 2012
- [30] 杜丽. 基于生命周期评方法半刚性基层施工过程中温室气体排放分析研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2012.5
- [31] 蔡博峰, 曹东, 刘兰翠, 张战胜. 中国石灰生产与能源消耗分析[J]. 环境工程, 2012, 30(1): 124-131
- [32] 李丛豪, 杜丽, 李玉梅. 沥青路面施工过程节能减排影响因素分析[J]. 公路与汽运, 2013, (4): 128-130
- [33] 林翔, 沥青路面再生利用关键技术研究[D], 北京工业大学硕士学位论文, 2010
- [34] 翟丽艳, 东北地区沥青混凝土再生方式的选择与应用[J]. 北方交通, 2007 (4) :79-82
- [35] 石明生, 马小跃, 王复明. 高聚物注浆技术在水泥混凝土道路维修中的应用[J]. 河南科学, 2010 (1) :74-77
- [36] 孙大权, 王锡通, 汤士良, 褚丽花, 罗杰. 环境友好型温拌沥青混合料制备技术研究进展[J]. 石油沥青, 2007 (4): 54-57
- [37] 陆新民, 周军, 沈建荣, 孙大权, 吕伟民. 功能性新型沥青混合料技术特性及其应用[J]. 石油沥青, 2006 (3): 52-57
- [38] 孙志林, 温拌沥青应用技术研究探讨[J]. 科技信息, 2012 (15) :2-3
- [39] 孙大权, 孟庆楠, 张立文. 温拌沥青混合料制备技术研究现状及新进展[J]. 城市道桥与防洪, 2010 (3) :19-21
- [40] 张争奇, 张苛, 姚晓光. 厂拌热再生技术能耗与排放量化分析[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2015,(5): 615-620.

攻读硕士学位期间的主要成果

1、参加科研项目

第十届路面养护技术论坛，2016

2、发表学术论文

沈艺奇. 高速公路改建工程沥青面层施工期能耗与排放量化分析[J]. 工程与建设. 2017, 31
(1)

厚德 笃学 崇实 尚新