

Environmental Benefit Evaluation of Plant Mix Hot Recycled Asphalt Mixture Based on LCA Theory

Ning Li¹, Kai Zhao¹, Hongquan Li², Zhao Dong³, Shudong Xu^{3*}, Jiuwei Liu³

¹Shandong Hi-Speed Company Limited, Jinan Shandong

²Shandong Ludong Road and Bridge Co. Ltd., Dongying Shandong

³Shandong Transportation Research Institute, Jinan Shandong

Email: *842631849@qq.com

Received: May 13th, 2020; accepted: Jun. 1st, 2020; published: Jun. 8th, 2020

Abstract

In order to systematically evaluate the environmental benefits of the plant mix hot recycling asphalt mixture in the actual project, the mixture production and construction are divided into three stages: old pavement milling, raw material production and mixture construction. Based on the life cycle analysis theory, the energy consumption and CO₂ equivalent emissions in the production and construction process are calculated. The results show that: with the increase of rap content, the energy consumption and CO₂ equivalent emission of the plant mix hot recycling mixture decrease gradually; the proportion of energy consumption and carbon emission in the process of mixture production and construction is mixture mixing > raw material production > mixture transportation > mixture paving and compaction > old pavement milling, especially in the two stages of raw material production and mixture mixing. It is about 84.4% of the total energy consumption and 80.8% of the total carbon emission. Compared with the ordinary hot mix asphalt mixture, when the rap content is less than 20%, the energy consumption and CO₂ equivalent emission of the recycled mixture are slightly higher. When the rap content is 30% - 60%, the recycled mixture can reduce the energy consumption by 3.2% - 10.0% and CO₂ equivalent emission by 0.33% - 3.05%, which has significant environmental benefits.

Keywords

Life Cycle Assessment, Hot Plant-Mix Recycling Technology, Asphalt Mixture, Environmental Benefits

基于LCA理论的厂拌热再生沥青混合料环境效益评价

李 宁¹, 赵 凯¹, 李洪全², 董 昭³, 徐书东^{3*}, 柳久伟³

¹山东高速股份有限公司, 山东 济南

*通讯作者。

²山东鲁东路桥有限责任公司, 山东 东营

³山东省交通科学研究院, 山东 济南

Email: 842631849@qq.com

收稿日期: 2020年5月13日; 录用日期: 2020年6月1日; 发布日期: 2020年6月8日

摘要

为了系统评价厂拌热再生沥青混合料在实际工程中的环境效益, 将混合料生产施工划分为旧路面铣刨、原材料生产、混合料施工三阶段, 基于生命周期分析理论计算其生产施工过程中的能耗及CO₂当量排放。研究表明: 随RAP掺量的增加, 厂拌热再生混合料能耗及CO₂当量排放逐渐降低; 混合料生产施工过程中能耗及碳排放占比混合料拌和 > 原材料生产 > 混合料运输 > 混合料摊铺压实 > 旧路面铣刨, 其中原材料生产及混合料拌和两阶段产生的能耗及碳排放占比尤为突出, 约为总能耗的84.4%总碳排放的80.8%; 相比于普通的热拌沥青混合料, 当RAP掺量低于20%时, 再生混合料的能耗及CO₂当量排放略高, 当RAP掺量为30%~60%时, 再生混合料能够降低能耗3.2%~10.0%, 减少CO₂当量排放0.33%~3.05%, 环境效益显著。

关键词

生命周期分析, 厂拌热再生技术, 沥青混合料, 环境效益

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球性能源紧张和“温室效应”问题的日益严重, 节能减排已成为当今社会面临的重要问题。交通运输行业作为节能减排的重点领域, 是践行“绿色交通”理念、实现节能减排的重要研究方向。根据国家统计局数据显示, 交通运输行业能源消耗占全社会能耗的7.8%, 交通运输行业的石油消耗占全社会石油消耗的30%, 其中, “十二五”期间道路建设消耗沥青混合料超过1亿吨, CO₂排放量超过450万吨[1] [2] [3]。随着我国公路大规模进入维修养护阶段, 传统的铣刨重铺方式不仅浪费资源破坏环境, 更加重了温室气体的排放。

为缓解上述问题, 交通运输部提出充分发挥科技进步在低碳发展中的基础性和先导性作用, 推广使用新能源、可再生利用技术和节能减排新技术, 推广温拌沥青、废旧路面再生等低碳铺路技术[4] [5]。沥青混合料厂拌再生作为一种新型的资源循环再利用技术, 一方面能够节约沥青和砂石材料, 缓解能源消耗压力; 另一方面实现废旧材料的循环利用, 保护生态环境。但现阶段尚未形成对再生沥青路面环境效益的量化分析, 导致进行再生技术工程评价时针对性不强、理论依据不足。因此有必要对再生沥青混合料的环境效益进行细致化分析, 形成合理的评价体系, 进一步推广再生沥青混合料的工程应用。

欧美[6] [7] [8]国家普遍采用生命周期分析(Life Cycle Assessment: LCA)理论对沥青路面生产施工过程中的碳排放进行量化分析, Mroueh [9]基于LCA理论分析了路面材料对生态环境的影响, 分析过程将路面生命周期分为原材料生产、路面施工、路面养护三阶段, 研究表明再生路面环境效益显著优于传统路面。Stripple、Qazi Aurangzeb [10] [11] [12]提出沥青路面的能耗远低于水泥路面, 路面生命周期内碳排放: 建

设阶段 > 养护阶段 > 使用阶段。国内卢海涛[13]基于 LCA 理论建立了沥青路面能耗分析模型，潘美萍、杨博[14] [15]对比分析了不同路面结构的能耗差异，建立了路面建设阶段的能耗与碳排放分析模型。

论文以厂拌热再生沥青混合料为研究对象，基于生命周期分析理论，分别计算旧路面铣刨、原材料生产、沥青混合料施工等环节的能耗及碳排放，进而评价不同 RAP 掺量条件下厂拌热再生沥青混合料的环境效益。

2. 生命周期分析理论及量化分析

2.1. 生命周期分析理论

生命周期分析理论(Life Cycle Assessment: LCA)是一种评价一个产品系统生命周期整个阶段内对环境造成负荷影响的分析方法，被广泛应用于综合评价产品或产品系统环境效益，对产品从原材料采集、生产、使用直至废弃整个过程所产生的环境影响进行综合评价。其评价过程一般可以分为目的与范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释四部分[16]，具体评价流程如图 1 所示。

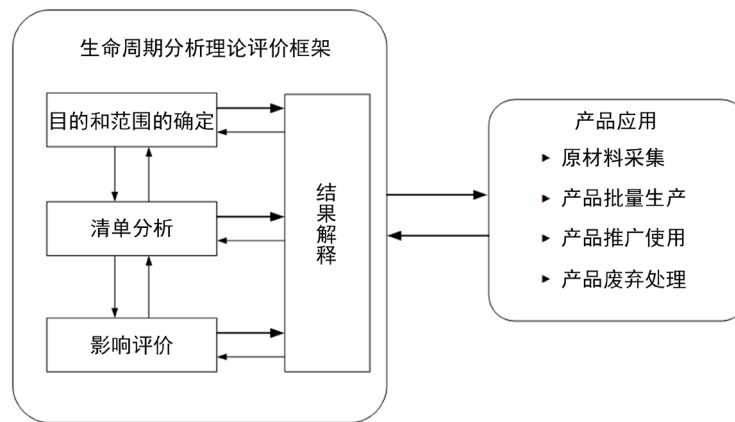


Figure 1. LCA theory evaluation process
图 1. LCA 理论评价流程

基于 LCA 理论将厂拌热再生沥青混合料生产施工划分为旧路面铣刨、原材料生产、沥青混合料施工三个阶段，分别对各阶段的能耗及碳排放进行统计分析，评价过程如图 2 所示。

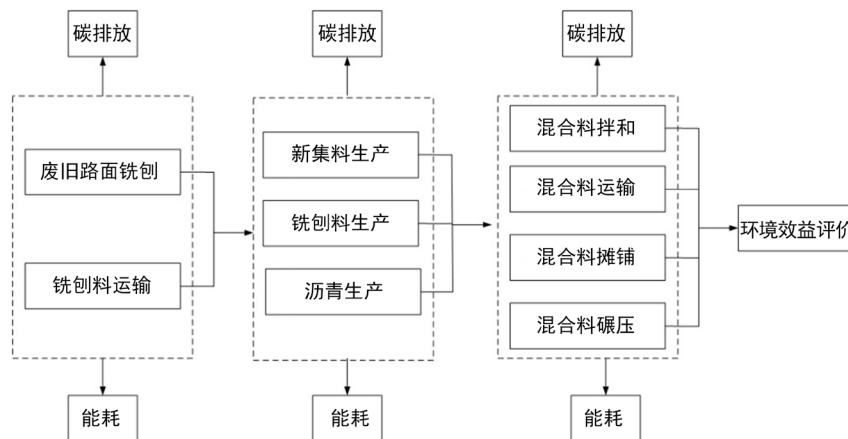


Figure 2. Evaluation process of environmental benefits of plant mix hot recycled asphalt mixture
图 2. 厂拌热再生沥青混合料环境效益评价过程

2.2. 基础数据

沥青混合料生产施工过程中消耗的能源主要包括电力、汽油、柴油、天然气等,为了便于统计分析,根据《中国能源统计年鉴》[17]将各种能源换算成标准煤能耗的净发热量,同时规定 1 kg 标准煤的净发热量为 29.307 MJ,各能源折算系数及净发热量见表 1。

Table 1. Statistics of net calorific value of each energy source

表 1. 各能源净发热量统计

能源	折算系数	净发热量
电力	0.1229 标准煤/(kw.h)	3.596 MJ/(kw.h)
汽油	1.4714 标准煤/kg	43.070 MJ/kg
柴油	1.2194 标准煤/L	42.652 MJ/kg
液化石油气	1.7143 标准煤/kg	50.179 MJ/kg
燃料油(重油)	1.4286 标准煤/kg	41.816 MJ/kg

沥青混合料生产施工过程中会排放 CO₂、CH₄、N₂O 等温室气体,不同的温室气体对环境的影响不尽相同,计算过程中根据 IPCC 2006 数据库中的排放系数将各类温室气体通过特征因子转换为 CO₂ 当量进行统一分析,温室气体特征因子转换关系见表 2。

Table 2. Conversion relationship of greenhouse gas characteristic factors

表 2. 温室气体特征因子转换关系

影响因子	特征因子单位	特征因子
CO ₂		1
CH ₄	Kg 等效 CO ₂	25
N ₂ O		298

《中国能源统计年鉴》统计了各能源单位质量的温室气体排放系数,根据表 2 特征因子转换关系计算各能源的 CO₂ 当量,统计结果见表 3。

Table 3. CO₂ equivalent statistics of various energy sources

表 3. 各能源 CO₂ 当量统计

能源类型	CO ₂ 排放系数	CH ₄ 排放系数	N ₂ O 排放系数	CO ₂ 当量
电力	0.899	2.75×10^{-3}	1.41×10^{-5}	0.972
汽油	3.1605	1.2796×10^{-4}	2.5591×10^{-5}	3.171
柴油	2.9848	1.2921×10^{-4}	2.5842×10^{-5}	2.996
燃料油(重油)	3.2366	1.2545×10^{-4}	2.5090×10^{-5}	3.247

3. 旧路面铣刨能耗及碳排放分析

将需要翻修的路面通过铣刨、破碎、筛分并掺加一定的新集料,可作为铺筑新路面的原材料,实现筑路材料的循环利用。根据工程调研,铣刨机工作过程中油耗为 4.2 kg/m³,沥青混合料密度大约为 2.4 t/m³,可知铣刨 1 t 混合料油耗为 1.75 kg。论文分别以 RAP 掺量 0%、10%、20%、30%、40%、50%、60%作

为研究对象，计算不同 RAP 掺量条件下旧路面铣刨过程中的能耗及碳排放如表 4 所示，不同 RAP 掺量条件下旧路面铣刨过程中的能耗及碳排放变化规律见图 3 和图 4。

Table 4. Energy consumption and carbon emission of old pavement milling under different RAP content
表 4. 不同 RAP 掺量条件下旧路面铣刨能耗及碳排放

RAP 掺量	0	10	20	30	40	50	60
能耗(MJ/t)	0	7.46	14.93	22.39	29.86	37.32	44.78
碳排放(kg/t)	0	0.52	1.05	1.57	2.10	2.62	3.15

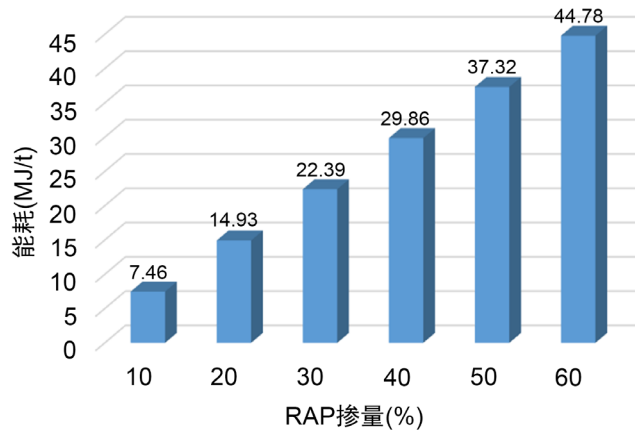


Figure 3. Energy consumption of old pavement milling

图 3. 旧路面铣刨能耗

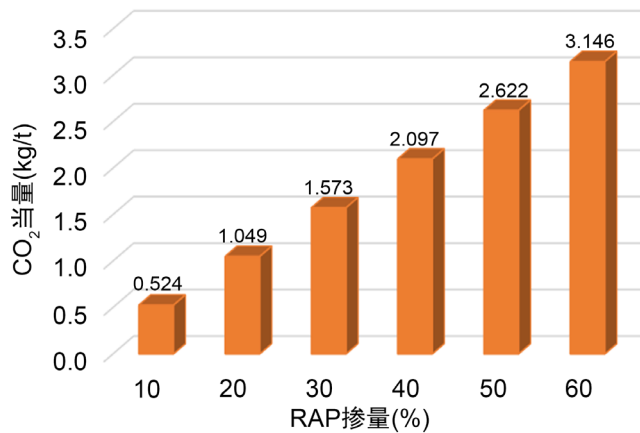


Figure 4. Carbon emission of old pavement milling

图 4. 旧路面铣刨碳排放

由图 3 和图 4 可知，随着 RAP 掺量的增加，旧路面铣刨产生的能耗及 CO₂ 当量越多，RAP 掺量每增加 10%，旧路面铣刨过程中能耗增加 7.46 MJ，CO₂ 当量排放增加 0.52 kg。根据工程应用，以 30%RAP 掺量为基准，旧路面铣刨过程中产生的能耗为 22.39 MJ，CO₂ 当量排放 1.57 kg。

4. 原材料生产能耗及碳排放分析

厂拌热再生混合料原材料主要包括沥青胶结料、铣刨料和新集料，用量较少的矿粉和再生剂分析过程中忽略不计。对于沥青胶结料的能耗及温室气体排放，国内尚没有完整的数据库，分析过程中参考欧

洲沥青协会数据库, 对于新集料参考中国本地化的 LCA 基础数据库 CLCD [18], 单位质量原材料能耗及碳排放数据如表 5 所示。

Table 5. Energy consumption and carbon emission of raw materials
表 5. 原材料能耗及碳排放

原材料	基质沥青	改性沥青	新集料
能耗(MJ/t)	3585.18	5412.22	3199.32
CO ₂ 当量(kg/t)	244.142	323.035	2.376 × 10 ⁻³

由表 5 可知, 改性沥青生产过程中由于增加了沥青改性工艺, 相较于基质沥青其能耗增加了 33.8%, CO₂ 当量排放增加了 24.4%。假设厂拌热再生 AC-16 沥青混合料最佳沥青用量为 4.7%, 铣刨料中沥青含量为 4.3%, 沥青选用改性沥青, 新沥青用量为总沥青用量减去铣刨料中的沥青含量, 由此计算生产 1 t 沥青混合料在不同 RAP 掺量条件下的能耗及碳排放如表 6 所示, 不同 RAP 掺量条件下原材料生产能耗及碳排放变化规律见图 5 和图 6。

Table 6. Energy consumption and carbon emission of mixtures with different RAP content
表 6. 不同 RAP 掺量条件下混合料能耗及碳排放

RAP 掺量(%)	能耗(MJ/t)				CO ₂ 当量(kg/t)			
	沥青	新集料	铣刨料	总计	沥青	新集料	铣刨料	总计
0	254.37	30.49	0.00	284.86	15.183	0.002	0.000	15.185
10	232.10	27.57	0.71	260.38	13.853	0.002	0.086	13.941
20	209.63	24.63	2.86	237.12	12.512	0.002	0.345	12.859
30	186.97	21.66	6.46	215.09	11.159	0.002	0.779	11.940
40	164.11	18.67	11.53	194.30	9.795	0.001	1.390	11.187
50	141.04	15.65	18.09	174.79	8.418	0.001	2.182	10.601
60	117.78	12.60	26.17	156.55	7.030	0.001	3.156	10.186

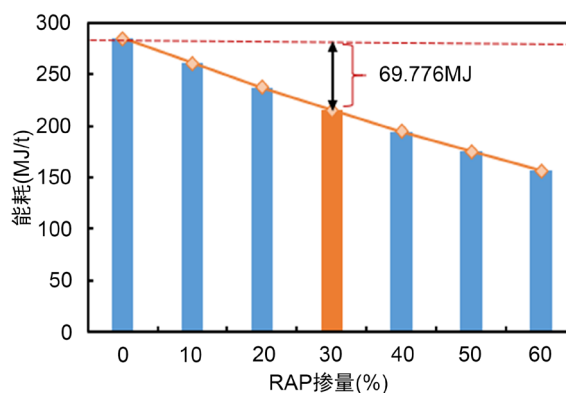


Figure 5. Energy consumption of raw material production
图 5. 原材料生产能耗

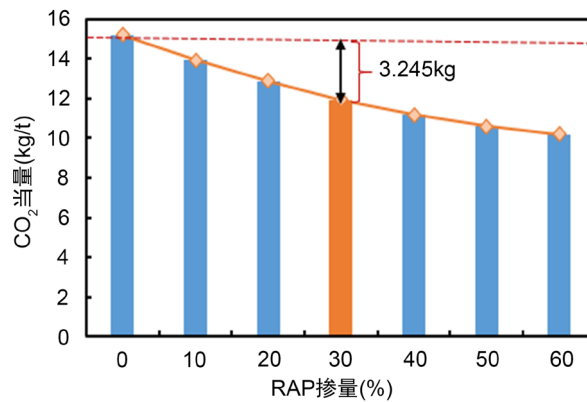


Figure 6. Carbon emission from raw material production
图 6. 原材料生产碳排放

由图 5 和图 6 可知，原材料生产阶段再生混合料产生的能耗及 CO₂ 当量排放明显低于普通的热拌沥青混合料，且随着 RAP 掺量的增加，混合料能耗及 CO₂ 当量排放逐渐减小。当 RAP 掺量为 30% 时，相比于普通的热拌沥青混合料，每生产 1 t 再生混合料，可以节约能耗 69.776 MJ，减少 CO₂ 当量排放 3.245 kg。

5. 厂拌热再生沥青混合料施工

5.1. 混合料拌和

厂拌热再生混合料拌和设备相比于传统的热拌沥青混合料加入了第二烘干筒进行铣刨料的加热，混合料拌和过程中，新集料加热温度为 170℃~185℃，铣刨料加热温度为 110℃~130℃，沥青加热温度为 150℃~160℃。根据工程统计，传统热拌沥青混合料的油耗为 6.85 kg/t，CO₂ 当量排放为 7.36 kg/t，再生沥青混合料第一滚筒油耗为 7.81 kg/t，CO₂ 当量排放为 7.84 kg/t，第二滚筒油耗为 6.37 kg/t，CO₂ 当量排放为 6.75 kg/t，由 1.2 章节给出的基础数据可以计算不同 RAP 掺量条件下混合料拌和过程中的能耗及碳排放如表 7 所示，不同 RAP 掺量条件下混合料拌和能耗及碳排放变化规律见图 7 和图 8。

Table 7. Energy consumption and carbon emission of mixture in mixing process
表 7. 拌和过程中混合料能耗及碳排放

RAP 掺量 (%)	0	10	20	30	40	50	60
能耗 (MJ/t)	292.17	327.26	321.36	315.40	309.39	303.33	297.22
CO ₂ 当量 (kg/t)	21.014	23.177	22.864	22.547	22.228	21.905	21.580

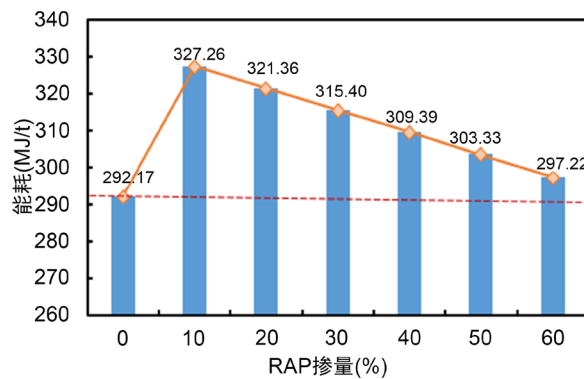


Figure 7. Energy consumption of mixture mixing
图 7. 混合料拌和能耗

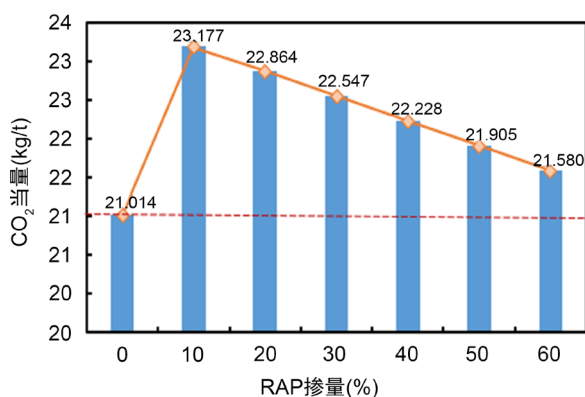


Figure 8. Carbon emission of mixture mixing
图 8. 混合料拌和碳排放

5.2. 混合料运输

根据中国本地化 LCA 基础数据库 CLCD 规定, 选择载重 30 t 自重 10 t 的柴油货车作为运输混合料的标准车辆, 统计数据显示其能耗为 0.804 MJ/(t · km), 温室气体排放为 0.075 kg/(t · km), 假设拌合站距离施工现场平均运距为 50 km, 混合料运输以拌合站(满载)→施工现场(空载)→拌合站作为一个完整的运输周期, 则运输车辆行驶的等效距离为 62.5 km, 由此可以计算混合料运输产生的能耗为 50.25 MJ/t, CO₂ 当量排放为 4.688 kg/t。

5.3. 混合料摊铺及碾压

沥青路面施工通过摊铺机将混合料均匀摊铺到路面上, 压路机紧跟摊铺机进行压实, 碾压可分为初压、复压和终压三个阶段, 为保证混合料达到规定的压实度, 采用双钢轮压路机和胶轮压路机组合的方式进行压实, 结合工程经验确定混合料碾压方案如表 8 所示。

Table 8. Compaction scheme of mixture

表 8. 混合料压实方案

压路机类型	初压	复压	终压
双钢轮压路机(13 t)	震动 2~3 遍		静压 2~3 遍
胶轮压路机(30 t)		静压 4~5 遍	

根据混合料摊铺效率, 摊铺机摊铺速度为 3m/min, 压实方案如表 8 所述, 结合各机械的实际油耗, 计算混合料摊铺及压实时的能耗和碳排放如表 9 所示。

Table 9. Energy consumption and carbon emission of mixture paving and compaction

表 9. 混合料摊铺和压实能耗及碳排放

	能耗(MJ/t)	CO ₂ 当量(kg/t)
摊铺	11.308	0.843
碾压	13.675	1.105

5.4. 混合料施工能耗及碳排放分析

基于上述研究, 统计沥青混合料施工过程中的能耗及碳排放并绘制柱形图如图 9 和图 10 所示。

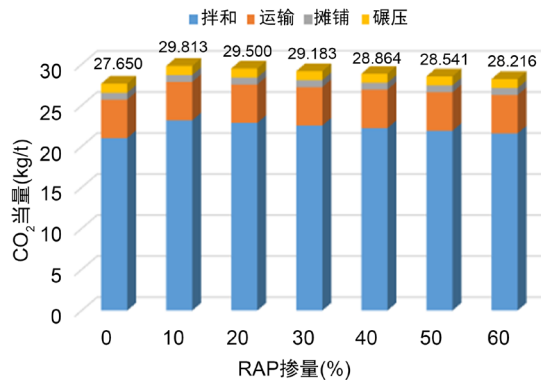


Figure 9. Energy consumption of mixture construction
图 9. 混合料施工能耗

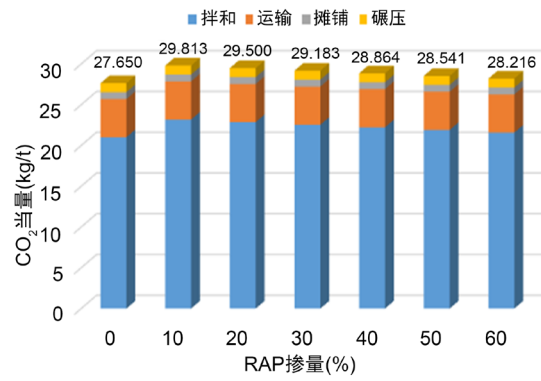


Figure 10. Carbon emission of mixture construction
图 10. 混合料施工碳排放

由图 9 和图 10 可知混合料施工过程中再生混合料的能耗及 CO₂ 当量排放高于普通的热拌沥青混合料，主要是由于拌和过程中增加了用于铣刨料加热的第二烘干筒，加大了能源消耗，但随着 RAP 掺量的增加，混合料能耗及碳排放呈逐渐减小的趋势，是由于 RAP 掺量越大，所需新集料和沥青用量越少，铣刨料加热温度更低，消耗的能源更少，产生的能耗及 CO₂ 当量越低。

6. 厂拌热再生混合料环境效益评价

基于生命周期分析理论，分别统计不同 RAP 掺量条件下混合料生产施工的总能耗及碳排放，统计结果如表 10 所示。

Table 10. Total energy consumption and carbon emission of mixture production and construction
表 10. 混合料生产施工总能耗及碳排放

	RAP 掺量	路面铣刨	原材料生产	混合料拌和	混合料运输	混合料摊铺及碾压	总计
能耗	0	0	284.86	292.17	50.25	24.98	652.26
	10	7.46	260.38	327.26	50.25	24.98	670.33
	20	14.93	237.12	321.36	50.25	24.98	648.64
	30	22.39	215.09	315.4	50.25	24.98	628.11
	40	29.86	194.30	309.39	50.25	24.98	608.78
	50	37.32	174.79	303.33	50.25	24.98	590.67
	60	44.78	156.55	297.22	50.25	24.98	573.78

Continued

	0	0.00	15.185	21.01	4.688	1.95	42.833
	10	0.52	13.941	23.18	4.688	1.95	44.279
	20	1.05	12.859	22.86	4.688	1.95	43.407
碳排放	30	1.57	11.940	22.55	4.688	1.95	42.698
	40	2.10	11.187	22.23	4.688	1.95	42.155
	50	2.62	10.601	21.91	4.688	1.95	41.769
	60	3.15	10.186	21.58	4.688	1.95	41.554

由表 10 可知, 沥青混合料生产施工过程中原材料生产和混合料拌合阶段所产生的能耗及 CO₂ 当量排放最多, 以 30% RAP 掺量作为研究基础, 进一步分析混合料生产施工过程中各阶段的能耗及碳排放占比, 如图 11 和图 12 所示。

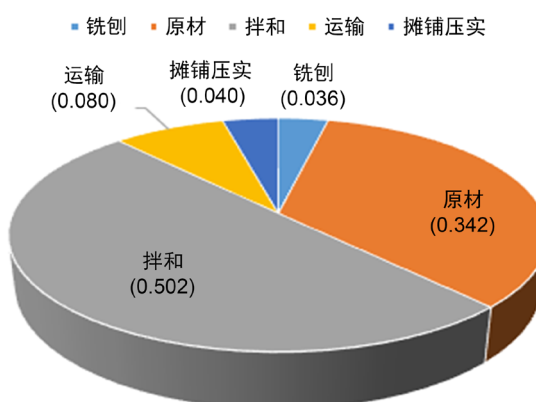


Figure 11. Proportion of energy consumption in mixture production and construction
图 11. 混合料生产施工能耗占比

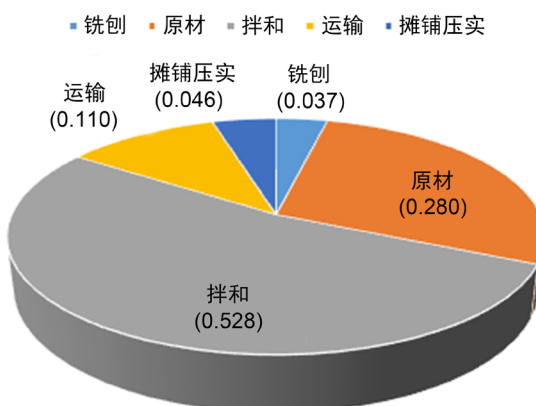


Figure 12. Proportion of carbon emission in mixture production and construction
图 12. 混合料生产施工碳排放占比

由图 11 和图 12 可知, 混合料生产施工过程中能耗及碳排放占比混合料拌和 > 原材料生产 > 混合料运输 > 混合料摊铺压实 > 旧路面铣刨, 其中混合料拌和及原材料生产两阶段产生的能耗及 CO₂ 当量排放占比尤为突出, 约占总能耗的 84.4% 总碳排放的 80.8%。综上研究表明再生混合料生产增加的旧路面铣刨工艺并不会增加工程的环保负担, 反而能够实现筑路材料的循环利用, 节约资源。

为了更加直观分析不同 RAP 掺量条件下厂拌热再生路面的环境效益, 根据表 10 将混合料生产施工过程中的总能耗及碳排放绘制成柱形图, 如图 13 和图 14 所示。

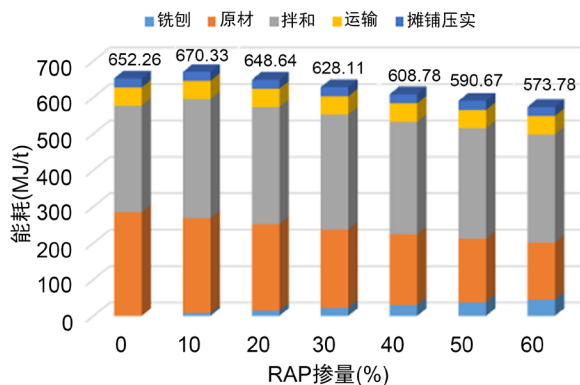


Figure 13. Total energy consumption of mixture production and construction

图 13. 混合料生产施工总能耗

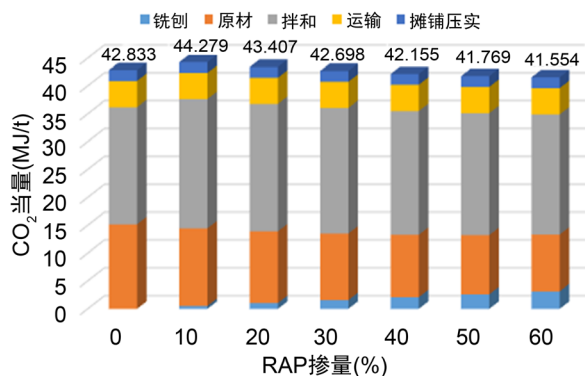


Figure 14. Total carbon emission of mixture production and construction

图 14. 混合料生产施工总碳排放

由图 13 和图 14 可知随铣刨料掺量的增加混合料能耗及碳排放逐渐降低, 当 RAP 掺量低于 20% 时, 再生混合料比普通热拌沥青混合料的能耗及碳排放量略高, 主要是因为混合料拌和过程中增加了铣刨料加热的第二烘干筒, 加大了能源消耗。但随着 RAP 掺量的逐渐增加, 再生混合料的能耗及碳排放要低于普通热拌沥青混合料, 主要是由于混合料生产过程中添加了铣刨料节省了新集料和新沥青的用量。综上所述表明当 RAP 掺量大于 20%, 厂拌热再生混合料不仅能够实现筑路材料资源的循环利用而且能够降低混合料生产施工的能耗及碳排放, 具有良好的环境效益。

7. 结语

1) 基于生命周期理论进行厂拌热再生混合料环境效益评价, 将混合料生产施工分为旧路面铣刨、原材料生产、混合料施工三阶段, 并将各能源消耗统一折算成标准煤的净发热值和 CO₂ 当量进行分析。

2) 混合料生产施工过程中能耗及碳排放占比混合料拌和 > 原材料生产 > 混合料运输 > 混合料摊铺压实 > 旧路面铣刨, 其中混合料拌和及原材料生产两阶段产生的能耗及 CO₂ 当量排放占比尤为突出, 约占总能耗的 85% 总碳排放的 80%。

3) 混合料拌合增加了用于铣刨料加热的第二烘干筒, 加大了再生混合料的能耗及碳排放, RAP 掺量低于 20% 时, 厂拌热再生混合料的能耗及碳排放略高于普通热拌沥青混合料。

4) 随 RAP 掺量的增加, 混合料生产施工总能耗及碳排放逐渐降低, 相比于普通的热拌沥青混合料, 当 RAP 掺量为 30%~60% 时, 厂拌热再生混合料生产施工能够降低能耗 3.2%~10.0%, 减少 CO₂ 当量排放 0.33%~3.05%, 具有良好的环境效益。

参考文献

- [1] 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, 36(5): 615-620.
- [2] 毕连居, 赵博, 蔡海泉. 沥青路面热再生技术环境效益分析研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2017, 36(11): 44-47.
- [3] 魏义青. 沥青路面建设节能减排评价指标研究[J]. 公路交通技术, 2014(4): 45-48.
- [4] 杨博. 基于生命周期分析的沥青路面节能减排量化分析方法及评价体系研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2012.
- [5] Chowdhury, R., Apul, D. and Fry, T. (2010) A Life Cycle Based Environmental Impacts Assessment of Construction Materials Used in Road Construction. *Resources Conservation & Recycling*, **54**, 250-255. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.08.007>
- [6] Temren, Z. and Sonmez, I. (2012) A Study on Energy Consumption and Carbon Footprint of Asphalt and Concrete Mixtures. *5th Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Istanbul.
- [7] Wang, T., Harvey, J. and Kendall, A. (2014) Reducing Greenhouse Gas Emissions through Strategic Management of Highway Pavement Roughness. *Environmental Research Letters*, **9**, Article ID: 034007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/034007>
- [8] Santos, J., Ferreira, A. and Flintsch, G. (2015) A Life Cycle Assessment Model for Pavement Management: Methodology and Computational Framework. *International Journal of Pavement Engineering*, **16**, 268-286. <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.942861>
- [9] Jullien, A., Moneron, P., Quaranta, G., et al. (2006) Air Emissions from Pavement Layers Composed of Varying Rates of Reclaimed Asphalt. *Resources Conservation & Recycling*, **47**, 356-374. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.09.004>
- [10] McRobert, J., Evans, C. and Sharp, K. (2012) Carbon and Asphalt: A Review of Environmental Factors Including Emission Calculators.
- [11] Santero, N.J., Masanet, E. and Horvath, A. (2011) Life-Cycle Assessment of Pavements. Part I: Critical Review. *Resources Conservation & Recycling*, **55**, 801-809. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.010>
- [12] Yu, B., Lu, Q. and Xu, J. (2013) An Improved Pavement Maintenance Optimization Methodology: Integrating LCA and LCCA. *Transportation Research Part a Policy & Practice*, **55**, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.07.004>
- [13] 卢海涛. 高速公路全生命周期能耗统计模型研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2011.
- [14] 潘美萍. 基于 LCA 的高速公路能耗与碳排放计算方法研究及应用[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [15] 杨博, 张争奇, 张慧鲜. 沥青路面节能减排量化评价方法[J]. 公路交通科技, 2014, 31(1): 32-38.
- [16] 姚玉权, 仰建岗, 蒋煜. 基于 LCA 厂拌热再生施工技术环境效益计算与分析[J]. 交通节能与环保, 2019, 15(1): 68-72.
- [17] 中国统计局. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011: 89-95.
- [18] IVL Swedish Environmental Research Institute (2001) Life Cycle Assessment of Road. IVL Report, 22-50.