

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.10.023

就地热再生沥青路面建设期碳排放分析

柴明明¹, 李明², 齐桂才³, 王腾¹

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074; 2. 江西赣粤高速公路股份有限公司九景高速公路管理处, 江西 九江 332000; 3. 上饶市公路管理局婺源分局, 江西 上饶 333200)

摘要: 为分析就地热再生沥青路面建设期产生的碳排放, 采用生命周期分析方法, 将建设期划分为材料生产和路面施工两个阶段, 根据碳排放系数与活动数据相乘原理建立碳排放模型。结合工程实例计算路面建设期的碳排放, 量化不同新材料掺比、旧料运距及利用率下的碳排放, 对比分析4种路面养护技术的碳排放强度。结果表明: 材料生产和路面施工阶段碳排放占比20%和80%; 就地热再生新材料掺比提高1%, 碳排放增加2%; 旧料利用率100%的厂拌热再生与就地热再生碳排放相等时的旧料运距为42 km, 只有旧料运距高于42 km时, 就地热再生碳排放才比厂拌热再生少, 当旧料利用率低于75%时, 无论旧料运距长短, 就地热再生碳排放都比厂拌热再生少; 与就地热再生相比, 微表处、超薄罩面和铣刨重铺碳排放强度增幅分别为53%, 72%和79%。

关键词: 环境工程; 碳排放; 生命周期分析; 就地热再生沥青路面

中图分类号: X734

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2016)10-0148-05

Analysis of Carbon Emission during Hot In-place Recycling Asphalt Pavement Construction

CHAI Ming-ming¹, LI Ming², QI Gui-cai³, WANG Teng¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Jiujiang Expressway Administration of Jiangxi Ganyue Expressway Co., Ltd., Jiujiang Jiangxi 332000, China;

3. Wuyuan Branch of Shangrao Highway Administration, Shangrao Jiangxi, 333200, China)

Abstract: To analyse the carbon emission of hot in-place recycling asphalt pavement during construction period, the construction period is divided into material production and pavement construction by using the life cycle analysis method, and the carbon emission model is established according to the multiplication principle of carbon emission coefficient and activity data. Combining the engineering example, the carbon emission of pavement construction is calculated, the carbon emission with different new material ratios, different recycled material haul distances and utilization rates of recycling asphalt mixture are quantified, and the carbon emission of 4 pavement maintenance technologies are compared. The result shows that (1) carbon emission of material production and pavement construction account for 20% and 80% respectively; (2) carbon emission increases by 2% with the increases of hot in-place recycling new material ratio by 1%; (3) when hot mix plant recycling with 100% utilization rate of recycled asphalt mixture produces the equal carbon emission with hot in-place recycling, recycled asphalt mixture haul distance is 42 km, only when the haul distance is over 42 km, the carbon emission of hot in-place recycling is less than that of hot mix plant recycling, when the utilization rate of recycled asphalt mixture is lower than 75%, the carbon emission of hot in-place recycling is always less than that of hot mix plant recycling no matter how long the haul distance is; (4) compared with

收稿日期: 2016-05-24

基金项目: 重庆市科学技术委员会科技项目 (cstc2015jcs30001); 江西省交通科技项目 (2015B0050); 重庆市交通委员会科技项目 (2015JDH-0174); 重庆市研究生科研创新项目 (CYB14089)

作者简介: 柴明明 (1993-), 女, 河北衡水人, 硕士研究生. (CMMTGMMH@163.com)

hot in-place recycling, the increase amplitudes of carbon emission about micro surfacing, ultra-thin overlay and mill and resurface asphalt pavement is 53%, 72% and 79% respectively.

Key words: environment engineering; carbon emission; life cycle analysis; hot in - place recycling asphalt pavement

0 引言

目前, 全球性能源紧张及气候变化已成为社会普遍关注的重大问题, 节能减排已成为国际社会的共同责任。我国“十二五”期间道路建设沥青混合料的年需求量超过 1 亿 t, CO₂年排放量达到 450 万 t^[1], 随着道路大范围的进入维修期, 传统的铣刨重铺方法会造成大量材料废弃、环境污染、碳排放量急剧增加。2020 年全国公路路面旧料循环利用率要达到 90% 以上^[2], 近年来新兴路面维修养护工艺如就地热再生技术可 100% 回收利用原沥青路面旧料, 此技术可在提高资源利用率的同时减少碳排放。

国内外主要采用生命周期分析方法 (LCA) 开展道路碳排放的量化分析研究, 基于 LCA 和 Darrell Cass^[3]等研究了一条州际干线公路大修工程中材料生产、运输和机械施工的能耗及环境影响; Qazi Aurangzeb^[4]等分析了旧沥青混合料含量对环境的影响, 包括能量消耗和温室气体的排放; 尚春静^[5]等研究了高速公路水泥混凝土路面在建筑材料生产、建造、养护和拆除废弃 4 个阶段能耗和排放; 王贤卫^[6]等研究了高速公路建设过程中路基、路面、桥涵和隧道工程在材料生产、材料运输和机械施工 3 个阶段的 CO₂ 排放。这些研究主要集中在新建道路的碳排放, 针对就地热再生沥青路面建设期的碳排放并无具体研究。

本文采用生命周期分析方法, 采取碳排放系数与活动数据相乘原理, 建立就地热再生沥青路面建设期碳排放计算模型, 结合工程实例计算路面建设期碳排放, 量化不同新料掺比、不同旧料运距及利用率下的碳排放, 对比分析 4 种常用高速公路沥青路面养护技术的碳排放。

1 就地热再生建设期碳排放计算模型

基于生命周期分析法, 就地热再生沥青路面的建设期界定为材料生产和路面施工两阶段, 见图 1, 建设期碳排放的计算模型包括两阶段的碳排放总和。

$$P = P_{cl} + P_{sg}, \quad (1)$$

$$P_{cl} = \sum_{i=1}^n (m_i \times s_i) + \sum_{j=1}^t (x_j \times v_j), \quad (2)$$

$$P_{sg} = m_j \times \Delta T \times p + \sum_{s=1}^u (m_s \times f_s), \quad (3)$$

式中, P , P_{cl} , P_{sg} 分别为就地热再生沥青路面建设期、材料生产阶段、路面施工阶段碳排放量; m_i 为原材料的使用量; s_i 为原材料的碳排放系数; i 为各种原材料; n 为原材料种类数; m_j 为加热路面的总量; ΔT 为路面升高的温度; p 为加热机碳排放系数; x_j , m_s 为施工机械活动数据; v_j , f_s 为施工机械碳排放系数; j , s 为各路面施工机械; t , u 为施工机械种类数。

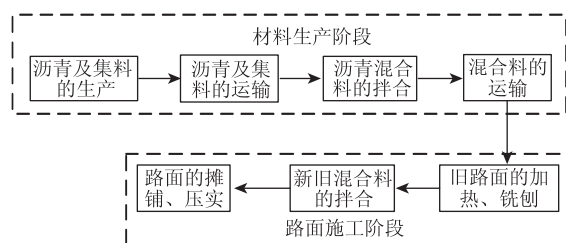


图 1 就地热再生沥青路面建设过程划分

Fig. 1 Division of hot in-place recycling asphalt pavement construction process

2 工程实例

结合某高速公路就地热再生沥青路面试验路工程, 通过分析碳排放系数和活动数据, 计算路面建设期的碳排放。

2.1 碳排放系数

通过各能源缺省排放因子^[7]和净发热值^[8], 考虑目前我国的发电情况^[9], 结合 CO₂, CH₄, N₂O 的全球变暖潜值, 得到以 CO₂ 为计算代表的能源的碳排放系数: 柴油 3.171 kg/kg, 汽油 2.996 kg/kg, 重油 3.247 kg/kg, 电能 0.785 kg/(kW · h)。

查阅相关文献 [10 - 15] 得到建设期各过程的能源消耗量, 结合能源的碳排放系数, 计算得到各过程碳排放系数见表 1。

2.2 活动数据

就地热再生沥青路面试验路工程完成路面实体 1 210.64 m³, 再生后路面密度 2.475 t/m³, 新料掺比 10%, 新料沥青含量 5.1%, 沥青、集料、混合料运距分别为 70, 27, 45 km。再生设备为鞍山森远集团的 SY4500 再生机组 (3 台加热机、1 台铣刨

表1 就地热再生建设期各过程碳排放系数

Tab.1 Carbon emission coefficients of hot in-place recycling asphalt pavement construction at different stages

阶段	过程	碳排放系数
材料生产阶段	SBS 改性沥青生产	315.77 kg/t
	集料生产	2.36 kg/t
	沥青运输(10 t 以内)	159.49 kg/台班
	集料运输(10 t 以内)	175.44 kg/台班
	混合料拌和(60 t/h)	6 864.15 kg/台班
	混合料运输(15 t 以内)	215.30 kg/台班
路面施工阶段	加热机	0.092 5 kg/(t · °C)
	铣刨机	2.58 kg/t
	复拌机	2.11 kg/t
	摊铺机(4.5 m 以内)	133.38 kg/台班
	光轮压路机(15 t 以内)	256.62 kg/台班
	振动压路机(15 t 以内)	256.62 kg/台班
	轮胎压路机(16 ~ 20 t)	134.12 kg/台班

机和1台复拌机),摊铺机使用的是4.5 m 以内的摊铺机,光轮压路机和振动压路机使用的是15 t 以内、轮胎压路机为16~20 t。

3 工程实例碳排放分析

3.1 就地热再生沥青路面建设期碳排放分析

由图2可知,就地热再生沥青路面试验路工程材料生产和路面施工阶段产生碳排放占建设期总排放的20%和80%,路面施工阶段是就地热再生沥青路面建设期碳排放的主要组成部分。材料生产阶段的碳排放主要集中在原材料的生产和混合料的拌和,碳排放占比39%和41%;路面施工阶段的碳排放主要来源于就地热再生设备(加热机、铣刨机、复拌机),碳排放占比90%,其中加热机产生碳排放占比66%。从碳排放角度来看,需选用高效节能的就地热再生机组。

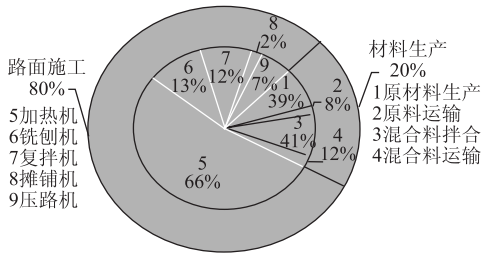


图2 就地热再生沥青路面建设期碳排放

Fig.2 Carbon emission of hot in-place recycling asphalt pavement construction

3.2 不同新料掺比下碳排放分析

就地热再生技术可以实现旧料的100%利用,但新料的掺量却根据工程而定,不同新料掺比下1 000 m³路面实体产生的碳排放见图3,可知新料掺比为15%,10%,5%时碳排放分别为63 153,56 601,50 688 kg,碳排放增长率与新料掺比呈线性正相关,新料掺比提高1%,碳排放增加2%。

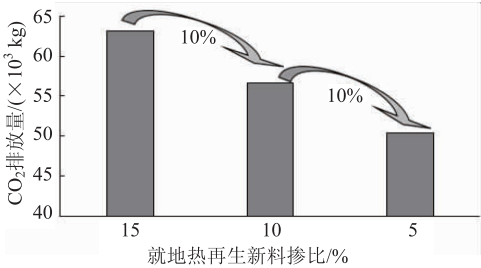


图3 就地热再生沥青路面不同新料掺比下的碳排放

Fig.3 Carbon emission of hot in-place recycling asphalt pavement with different new material ratios

3.3 不同旧料运距及利用率下的碳排放分析

厂拌热再生碳排放随旧料运距增大而逐渐增加,就地热再生是在现场100%利用旧料,碳排放保持不变。1 t 旧料不同运距及利用率下产生的碳排放见图4,就地热再生产生碳排放20 kg。

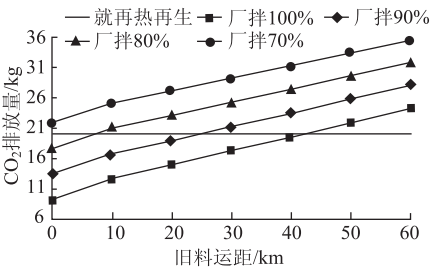


图4 旧料不同运距及利用率下的碳排放

Fig.4 Carbon emission with different old material haul distances and utilization rates

(1) 旧料利用率100%的厂拌热再生在旧料运距为0时产生碳排放10 kg,当运距为42 km时,厂拌和就地热再生产生碳排放相等。从碳排放环保角度出发,只有当运距大于42 km时,就地热再生才有优势。

(2) 旧料运距为0时,旧料利用率为70%,80%,90%的厂拌热再生产生碳排放为22,18,14 kg,碳排放增长量与旧料利用率呈线性负相关,利用率减少10%,碳排放增加4 kg,采用内插法,得到旧料利用率为75%的厂拌热再生产生碳排放为20 kg,和就地热再生产生碳排放相等。故旧料利用率低于75%时,无论运距长短,就地热再生比厂拌

热再生更具有减排优势。

3.4 不同养护技术碳排放对比分析

选取3种常用高速公路沥青路面养护技术进行碳排放对比分析,分别是铣刨重铺技术、超薄罩面技术和微表处技术,分析设定:

(1) 铣刨重铺技术,工程量 $1\,210.64\text{ m}^3$,新料 $2\,996.33\text{ t}$,沥青含量 4.8% ,粘层油用量 0.464 kg/m^3 ,运距 115 km 。铣刨机采用维特根2000,旧料运距 11 km ,预计使用寿命4 a。

(2) 超薄罩面技术,采用NovaChip® Type-B级配,工程量 605.32 m^3 ,新料 $1\,498.17\text{ t}$,沥青含量 5.0% ,粘层油用量 0.8 kg/m^2 。罩面机械为中交西筑ZT600型专用摊铺机,预计使用寿命4 a。

(3) 微表处技术,采用MS-3级配,工程量 272.39 m^3 ,矿料用量 18 kg/m^2 ,其他材料用量为沥青:填料(水泥):水:矿料 $=7.2:1.5:10:100$,施工机械为河南高远HGY5311TXJ微表处摊铺车,预计使用寿命3 a。

就地热再生路面的预计使用寿命为3 a,4种常用高速公路沥青路面养护技术的碳排放强度见图5,就地热再生的碳排放强度为 $19\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{a})$,为4种技术最少,其次是微表处、超薄罩面,产生碳排放最多的是铣刨重铺。微表处、超薄罩面和铣刨重铺技术碳排放强度增幅分别为 53% 、 72% 和 79% 。

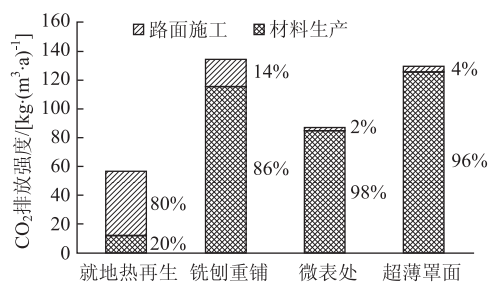


图5 4种养护技术碳排放强度

Fig.5 Carbon emission of 4 maintenance technologies

铣刨重铺、超薄罩面和微表处建设期的碳排放主要来源于材料生产阶段,与就地热再生相反,主要原因是就地热再生百分百利用路面旧料,减少了原材料的生产和运输。

4 结论

本文就地热再生沥青路面建设期划分为材料生产和路面施工两个阶段,采用LCA方法,建立了碳排放计算模型,结合工程实例计算了建设期的碳排放,主要结论如下:

(1) 案例计算结果显示,材料生产和路面施工阶段产生的碳排放分别占建设期总碳排放的 20% 和 80% ,路面施工阶段的碳排放主要来源于就地热再生设备尤其是加热机,材料生产阶段的碳排放主要来自原材料的生产和混合料的拌和。

(2) 就地热再生技术碳排放增长率与新料掺比呈线性正相关,新料掺比每提高 1% ,碳排放增加 2% 。

(3) 就地热再生技术利用 1 t 旧料产生碳排放 20 kg 。旧料 100% 利用的厂拌热再生与就地热再生碳排放相等时的旧料临界运距为 42 km ,当旧料运距高于 42 km 时,就地热再生比厂拌热再生才有优势。随着旧料利用率减少,临界运距随着缩短,旧料 75% 利用的厂拌热再生临界运距减少为 0 km ,无论运距长短,就地热再生比厂拌热再生有优势。

(4) 路面建设期碳排放强度:就地热再生 $<$ 微表处 $<$ 超薄罩面 $<$ 铣刨重铺。就地热再生碳排放强度为 $19\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{a})$,微表处、超薄罩面和铣刨重铺技术碳排放增幅分别为 53% 、 72% 和 79% 。

参考文献:

References:

- [1] 吴军伟. 道路工程碳排放量计算与分析模型的发展与应用[J]. 城市道桥与防洪, 2011(7): 248-250, 274, 20.
WU Jun-wei. Development and Applications of Carbon Emissions Calculation and Analysis Models in Road Engineering[J]. Urban Roads Bridges & Floods Control, 2011(7): 248-250, 274, 20.
- [2] 交通运输部. 关于加快推进公路路面材料循环利用工作的指导意见[EB/OL]. [2012-09-27]. http://www.mot.gov.cn/sj/gonglj/gongluyh_glj/201408/t20140813_1668887.html.
Ministry of Transport. Work Guidance on Accelerating Utilization of Recycling Road Pavement Material[EB/OL]. [2012-09-27]. http://www.mot.gov.cn/sj/gonglj/gongluyh_glj/201408/t20140813_1668887.html.
- [3] ZAPATA P, GAMBATESE J A. Energy Consumption of Asphalt and Reinforced Concrete Pavement Materials and Construction[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2005, 11(1): 9-20.
- [4] AURANGZEB Q, AL-QADI I L, OZER H, et al. Hybrid Life Cycle Assessment for Asphalt Mixtures with High RAP Content. Resources Conservation & Recycling, 2014, 83(1): 77-86.

(下转第158页)

- [9] 胡青蜜, 胡志华, 陶莎. 二级轴辐式零担物流网络设计的资源均衡利用问题 [J]. 公路交通科技, 2013, 30 (4): 124-131.
HU Qin-mi, HU Zhi-hua, TAO Sha. Resource Balanced Usage Problem for Bi-level Hub-and-spoke LTL Logistics Network Design [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30 (4): 124-131.
- [10] 房巧红, 陈功玉. 再制造逆向物流网络的机会约束目标规划模型 [J]. 工业工程与管理, 2010, 15 (1): 74-81.
FANG Qiao-hong, CHEN Gong-yu. Chance-constrained Goal Programming Model for Remanufacturing Reverse Logistics Network [J]. Industrial Engineering and Management, 2010, 15 (1): 74-81.
- [11] 邵增珍. 物流匹配问题的调度模型和算法研究 [D]. 济南: 山东师范大学, 2013.
SHAO Zeng-zhen. Research on Scheduling Model and Algorithms of Logistics Matching Problem [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2013.
- [12] 王旭, 田帅辉, 王振锋. 面向物流任务的跨组织边界物流资源优化配置 [J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18 (2): 389-395.
WANG Xu, TIAN Shuai-hui, WANG Zhen-feng. Inter-organizational Boundaries' Logistics Resource Optimized Allocation Oriented to Logistics Task [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18 (2): 389-395.
- [13] 肖宁. 求解随机机会约束规划的混合智能算法 [J]. 计算机工程与应用, 2010, 46 (22): 43-46.
XIAO Ning. Solving Stochastic Chance-constrained Programming Problems with Hybrid Intelligent Algorithm [J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46 (22): 43-46.
- [14] HONG S P, KIM Y H. A Genetic Algorithm for Joint Replenishment Based on the Exact Inventory Cost [J]. Computers Operations Research, 2009, 36 (1): 167-175.
- [15] 刘志雄, 梁华. 粒子群算法中随机数参数的设置与实验分析 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27 (11): 1489-1496.
LIU Zhi-xiong, LIANG Hua. Parameter Setting and Experimental Analysis of the Random Number in Particle Swarm Optimization Algorithm [J]. Control Theory & Applications, 2010, 27 (11): 1489-1496.
- +++++
- (上接第151页)
- [5] 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.
SHANG Chun-jing, ZHANG Zhi-hui, LI Xiao-dong. Research on Energy Consumption and Emission of Life Cycle of Expressway [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (8): 149-154.
- [6] 王贤卫, 吴灵生, 杨东援. 高速公路建设 CO₂ 排放计算分析 [J]. 公路交通科技, 2014, 31 (2): 150-158.
WANG Xian-wei, WU ling-sheng, YANG dong-yuan. Calculation and Analysis of CO₂ Emission from Expressway Construction [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31 (2): 150-158.
- [7] IPCC National Greenhouse Gas Listing Task Force. IPCC2006, IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [M]. Kanagawa, Japan: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [8] GB-T2589-2008, 综合能耗计算通则 [S].
GB-T2589-2008, General Principles for Calculation of Total Production Energy Consumption [S].
- [9] 交通运输部. 节能减排量或投资额核算技术细则 (第二部分) [EB/OL]. [2014-04-04]. http://jnxz.mot.gov.cn/gongtaotongzhi/201404/t20140404_1601780.html.
Ministry of Transport. Energy-saving and Emission-reduction or Investment Accounting Rules (Part II) [EB/OL]. [2014-04-04]. http://jnxz.mot.gov.cn/gongtaotongzhi/201404/t20140404_1601780.html.
- [10] HJ443-2008, 清洁生产标准-石油炼制业 (沥青) [S].
HJ443-2008, Cleaner Production Standard-Petroleum Refinery Industry (Bitumen) [S].
- [11] 章毅. 沥青路面生命周期能耗与环境排放评价技术研究 [R]. 上海: 同济大学, 2014.
ZHANG Yi. Research on Assessment Technology of Asphalt Pavement Life Cycle Energy Consumption and Environmental Emissions [R]. Shanghai: Tongji University, 2014.
- [12] STRIPPLE H. Life Cycle Inventory of Asphalt Pavements [M]. Gothenburg: IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd., 2001.
- [13] JTG/T B06-02-2007, 公路工程预算定额 [S].
JTG/T B06-02-2007, Highway Engineering Budget Quota [S].
- [14] JTG/T B06-03-2007, 公路工程机械台班费用定额 [S].
JTG/T B06-02-2007, Highway Engineering Machine-team Budget Quota [S].
- [15] 任淑晶, 齐广田. SY4500 型沥青路面就地热再生重铺机组 [J]. 工程机械, 2009, 40 (6): 18-19.
REN Shu-jing, QI Guang-tian. Model SY4500 Hot-in-place Reclamation and Repaving Machine Train for Asphalt Pavements [J]. Construction Machinery and Equipment, 2009, 40 (6): 18-19.