

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2020.04.068

生物沥青碳排放量与经济效益定量分析

邹晓明¹, 侯海元²

(1. 广西交通投资集团有限公司, 广西南宁 530022; 2. 广西交投科技有限公司)

摘要:生物沥青作为一种可再生的生物资源,近年来逐渐应用于道路建设中,但目前尚缺乏生物沥青的环境与经济效益定量分析。该文结合碳排放因子,开展碳排放量计算,量化分析生物沥青环境效益,开展生物沥青混合料路用性能试验,分析其路用性能,并基于性价比指标,研究生物沥青混合料经济效益,从而量化对比生物沥青混合料与基质沥青混合料的环境和经济效益。

关键词:生物沥青;碳排放量;路用性能;效益—费用比

1 引言

基质沥青在施工与使用过程中消耗能源较多,产生较多废气,对环境影响较大。生物沥青是一种可持续的较为环保的能源,可用于道路建设中。制备生物沥青所用的生物油来源于不同生物资源,环保效能高。有研究表明生物沥青施工温度较基质沥青相对较低,能有效控制施工过程中温室气体排放量。同时与基质沥青相比,生物沥青材料成本较低,可节约沥青材料成本费用,节省大量公路建设成本。因此,生物沥青较传统基质沥青具有良好的环境与经济效益,虽然该结论已达成共识,但目前尚缺乏针对生物沥青碳排放量与经济分析的定量描述,尚不明确生物沥青混合料与基质沥青相比其碳排放水平与经济效益的定量优势。

该文通过碳排放分析开展生物沥青环境效益分析,基于生物沥青混合料路用性能试验,结合性价比指标,进行生物沥青混合料经济效益分析,对比分析生物沥青混合料与基质沥青混合料的碳排放量、路用性能以及成本效益,定量研究生物沥青的环境和经济效益。

2 生物沥青混合料碳排放定量研究

碳排放又称温室气体排放,包括二氧化碳等其他温室气体的排放量。沥青路面碳排放主要涉及沥青和

集料加热过程中以及沥青摊铺碾压过程中消耗燃料产生的CO₂和少量氮氧化物等,其中以加热、机械油耗产生的CO₂为主。

2.1 生物沥青混合料碳排放计算方法

沥青混合料碳排放主要是由于煤炭、柴油、天然气等能源消耗所导致,由于各类能源中的化学成分并不相同,其碳排放量也有一定差异。

为了解决不同温室气体的温室效应不同所导致的无法累积的问题,将温室气体统一为可以累加的单一指标,成为当量碳排放,即将不同温室气体根据温室效应的不同转化成等效的二氧化碳排放量,进而累计得出精确值。

国家温室气体碳排放指南规定了与温室气体转化为二氧化碳排放量相关的排放系数,通过全球变暖潜在值(GWP)转化为等效CO₂排放量,即当量二氧化碳排放量,记为CO₂e,其折算系数如表1所示。

表1 当量碳排放折算系数

| 温室气体 | 全球变暖潜在值 GWP | 产生原因 |
|------------------|-------------|-----------|
| CO ₂ | 1 | 化石燃料燃烧 |
| CH ₄ | 21 | 人类活动、农业生产 |
| N ₂ O | 310 | 物质燃烧、化肥分解 |

根据现有研究将温室气体分为3类,主要包括CO₂、CH₄、N₂O。计算时可通过碳排放因子计算不同环节的温室气体排放量,再通过CO₂等效当量值排放

收稿日期:2020-03-08(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51508064);广西交通科技项目[编号:桂交科(2013-100-28)];重庆市前沿与应用基础研究计划项目(编号:cstc2016jcyjA0128)

作者简介:邹晓明,男,硕士,高级工程师, E-mail: xiaoming6885@sina.com

量折算系数,得到 CO₂e,然后开展累计计算总碳排放量,其计算如式(1)所示:

$$GHG = \sum_i \sum_j \sum_K m_{ij} Q_j P_j GWP_k \tag{1}$$

式中:GHG 为碳排放总量(mg);m_{ij} 为第 i 环节第 j 种能源的消耗量(t 或 m³ 或 kW·h);Q_j 为第 j 种能源的单位发热量[MJ/t 或 MJ/m³ 或 MJ/(kW·h)];P_j 为第 j 种能源的排放因子(mg/MJ);GWP_k 为第 j 种能源产生的第 k 种气体的全球变暖潜在值。

2.2 生物沥青与基质沥青碳排放量对比分析

采用公路沥青路面建设过程中所需的 1 t 沥青混合料的碳排放量作为研究对象,量化分析沥青路面建设中的能源消耗与碳排放状况。该文拟对 1 t 木屑类生物沥青混合料和热拌沥青混合料在施工过程中的碳排放量开展对比研究。沥青混合料拌和过程中涉及的因素较多,有研究表明:沥青加热和集料加热环节为施工过程中碳排放的关键环节。该文假设两种沥青混合料拌和过程中的碳排放量相同,计算时仅考虑施工过程中碳排放的关键环节。假设采用 AC-20 沥青混合料,沥青用量为 5%。

(1) 沥青加热环节

根据施工工艺,木屑类生物沥青的加热温度设为 140℃,基质沥青的加热温度设为 160℃,所以其能耗存在一定差异。设两种沥青的比热容均为 1 506.2 kJ/(kg·K),假定沥青的初始温度为 100℃,采用天然气进行加热,燃烧效率为 95%,查得天然气的发热量为 35 588 kJ/m³。

加热沥青混合料所需的能量 Q 计算如式(2)所示:
$$Q = \Delta T \times C \times m \tag{2}$$

式中:ΔT 为材料的温度变化量;C 为材料的比热容;m 为材料的质量。

根据能量守恒定律,生产 1 t 沥青混合料在沥青加热环节所需要的天然气量 M_{天然气} 计算如下:

$$M_{\text{天然气}} = \frac{\Delta T \times C \times m}{Q_i} = \frac{(140 - 100) \times 1\,506.2 \times 1\,000 \times 5\%}{35\,588 \times 0.95} = 44.6\text{ m}^3$$

所以在此环节中加热生物沥青所消耗的天然气量为 44.6 m³。同理计算得到加热基质沥青所消耗的天然气量为 89.2 m³。

(2) 集料加热环节

沥青混合料集料加热过程中的能耗量与集料相关参数息息相关。集料相关参数主要包括比热容、含水量等。假设加热前集料温度为 25℃,含水量为 4%,

集料的比热容取为 920 J/(kg·K),假设当温度升高到 130℃时,水分从集料中全部蒸发,设水的比热容为 4 190 J/(kg·K)。拌和料在加热过程中所消耗的燃料为柴油,有研究表明,柴油燃烧效率为 90%,设柴油的发热量为 42 500 kJ/kg,假设滚筒热交换率为 60%。假设集料加热过程中所消耗的能量主要包括集料加热过程和水分蒸发过程中所消耗的能量,基于能量守恒定律,计算 1 t 生物沥青混合料在集料加热过程中所需的柴油消耗量 M_{柴油},结果如下:

$$m_{\text{集料}} = 1\,000 \times (1 - 5\%) = 950\text{ kg}$$
$$m_{\text{水}} = m_{\text{集料}} \times 4\% = 950 \times 0.04 = 38\text{ kg}$$
$$M_{\text{柴油}} = \frac{\Delta T \times C \times m}{Q_i} = \frac{(130 - 25) \times (920 \times 950 + 4\,190 \times 38)}{42\,500\,000 \times 0.9 \times 0.6} = 4.7\text{ kg}$$

通过计算得到在混合料施工中生产 1 t 生物沥青,加热集料所需柴油量为 4.7 kg,柴油密度为 850 kg/m³,则所需柴油体积为 5.53×10⁻³ m³。同理计算在施工中生产 1 t 基质沥青混合料,加热集料所需柴油量为 6.63 kg,则柴油消耗的体积为 7.80×10⁻³ m³。

中国针对沥青路面建设过程中碳排放研究相对较少,尚无温室气体排放因子计算所需相关指标。该文采用联合国政府间气候变化专门委员会推荐的碳排放因子作为中国高速公路能源碳排放因子。运用全球变暖潜在值将各种温室气体转换成二氧化碳当量,进而开展生物沥青与基质沥青路面在建设过程中的碳排放计算研究。该文所采用的各种能源排放因子指标及各类能源平均低位发热量如表 2 所示。

表 2 各种能源碳排放因子及发热量

| 能源类型 | 缺省排放因子/ (mg·MJ ⁻¹) | | | 平均低位发热量/ (MJ·t ⁻¹) |
|-------|-----------------------------------|-----------------|------------------|-----------------------------------|
| | CO ₂ | CH ₄ | N ₂ O | |
| 煤 | 94 600 | 1 | 1.5 | 20 934 |
| 燃料油 | 77 400 | 3 | 0.6 | 41 868 |
| 柴油,汽油 | 74 100 | 3 | 0.6 | 42 505,43 124 |
| 沥青 | 80 700 | 3 | 0.6 | 35.588 |
| 天然气 | 56 100 | 1 | 0.1 | 3.602 |

根据表 2 相关系数,计算得到生产 1 t 生物沥青混合料的碳排放量为 8.91×10⁸ mg,生产 1 t 基质沥青混合料的碳排放量为 17.83×10⁸ mg,见表 3。因此,生物沥青混合料相对于基质沥青混合料而言,其碳

排放量减少 49.97%,其环境效益较为显著。

表3 生物沥青与基质沥青混合料碳排放量对比

| 沥青类别 | 环节 | 能源消耗量/ m ³ | 碳排放量 合计/mg |
|------|--------|--------------------------|-----------------------|
| 生物沥青 | 沥青加热环节 | 天然气 44.6 | 8.91×10 ⁸ |
| | 集料加热环节 | 柴油 5.53×10 ⁻³ | |
| 基质沥青 | 沥青加热环节 | 天然气 89.2 | 17.83×10 ⁸ |
| | 集料加热环节 | 柴油 7.80×10 ⁻³ | |

3 生物沥青经济效益分析

新型路面材料的优良路用性能以及经济效益对于其应用起着较为关键的作用。该文针对生物沥青的经济性开展分析,为生物沥青在实际工程中的应用提供参考。

3.1 沥青混合料路用性能分析

(1) 生物沥青混合料路用性能试验研究

所用生物质重油的原料为木屑,常温下为黑褐色膏状,其元素组成见表4。

表4 生物质重油理化特性和元素组成(木屑重油)

| 元素组成 | 质量分数/% |
|------|-----------|
| C | 53.0~56.0 |
| H | 5.5~7.1 |
| O | 34.0~45.0 |
| N | 0~0.2 |

基质沥青采用 70# A 级道路石油沥青,各项技术要求和测试结果如表5所示,均满足规范要求。

表5 沥青三大指标测试结果

| 项目 | 单位 | 70#-A 基质沥青 | 技术要求 |
|-------|--------|------------|-------|
| 针入度 | 0.1 mm | 76.4 | 60~80 |
| 软化点 | ℃ | 47.2 | ≥45 |
| 15℃延度 | cm | >100 | ≥100 |

基质沥青与生物沥青混合料的常规路用性能试验,主要包括高温稳定性、低温抗裂性和水稳定性试验,结果如表6所示。

从表6可知:① 沥青混合料的动稳定度随着生物油掺量的增大而逐渐减小。生物油掺量为 5%、10%、15%的生物沥青混合料的动稳定度与基质沥青混合料

表6 基质沥青与生物沥青混合料路用性能试验结果

| 沥青类型 | 动稳定度/ (次·mm ⁻¹) | 最大应变/ με | 冻融劈裂 比/% |
|-----------|--------------------------------|-------------|-------------|
| 基质沥青 | 3 056 | 2 372 | 86.2 |
| 生物油掺量 5% | 2 803 | 2 427 | 83.6 |
| 生物油掺量 10% | 1 502 | 2 683 | 75.9 |
| 生物油掺量 15% | 865 | 2 767 | 60.5 |

相比分别减少 8.3%、50.9%、71.7%。说明生物沥青的掺入降低了混合料抵抗车辙的能力,当生物油掺量小于 13.9%时所制的生物沥青动稳定度均大于基质沥青要求的 1 000 次/mm;② 掺加生物油后,生物油掺量为 5%、10%、15%的生物沥青混合料最大拉应变随着生物油掺量的增加而逐渐增大,与基质沥青混合料相比,其最大拉应变分别增大 2.3%、13.1%、16.7%。因此,生物沥青改性沥青混合料的低温抗裂性能随生物油掺量增加而加大,在一定程度上有所改善;③ 生物油掺量为 5%、10%、15%的沥青混合料的冻融劈裂残留强度比从基质沥青混合料的 86.2%分别降低到 83.6%、75.9%、60.5%。说明生物油的掺入降低了混合料水稳定性能,当生物油掺量小于 10.3%时所制的生物沥青均大于基质沥青要求的 75%,满足广西夏季潮湿区的相应要求。

(2) 路用性能综合评价指标

采用路用性能综合评价指标对沥青混合料*i*的路用性能*j*占有所有混合料的优势率进行计算,计算方法如式(3)所示:

$$a_{ij} = \frac{j_{i1}}{j_{1\max}}$$

(3)

式中:*a_{ij}* 为沥青混合料*i*的路用性能*j*占有所有混合料的综合性能评价指标;*j_{i1}* 为混合料*i*路用性能*j*的实测值;*j_{1max}* 为路用性能*j*的最大实测值。

采用沥青混合料路用性能优势定量评价道路所在地区混合料的综合性能,记为*T_i*,如式(4)所示:

$$T_i = \sum a_{ij} \times c_k$$

(4)

式中:*c_k* 为分项路用性能所占权重。

基于基质沥青与生物沥青混合料的常规路用性能试验结果,结合计算式(3)、(4),分项路用性能所占权重均取 1/3,得到基质沥青与生物沥青混合料路用性能综合评价指标,如表7所示。

由表7可知:基质沥青混合料的路用性能优势为 0.952,生物油掺量 5%、10%、15%的生物沥青混合料的路用性能优势分别为 0.933、0.795、0.759。因此,

表 7 基质沥青与生物沥青混合料路用性能综合评价指标

| 沥青类型 | 路用性能优势 | | | 路用性能优势率 |
|-----------|--------|-------|-------|---------|
| | 动稳定度 | 最大应变 | 冻融劈裂比 | |
| 基质沥青 | 1.000 | 0.857 | 1.000 | 0.952 |
| 生物油掺量 5% | 0.917 | 0.913 | 0.970 | 0.933 |
| 生物油掺量 10% | 0.536 | 0.970 | 0.881 | 0.795 |
| 生物油掺量 15% | 0.576 | 1.000 | 0.702 | 0.759 |

基质沥青混合料与生物油掺量为 5% 的生物沥青混合料具有较好的路用性能。

3.2 生物沥青混合料成本分析

该文暂不考虑拌和时间、拌和方式、拌和能源消耗等因素,仅考虑原材料成本价格的影响。假设两种不同的沥青混合料均采用 AC-20,其所采用的矿料成本均相同,则仅需对比不同种类沥青混合料所需沥青的材料成本费用。假设生物油为 1 500 元/t,基质沥青为 5 000 元/t。计算得到 5%、10%、15% 生物沥青混合料成本费用,并以基质沥青为基数,进一步计算其相对成本,见表 8。

表 8 不同种类沥青的成本费用对比分析

| 沥青类型 | 费用/(元·t ⁻¹) | 相对成本 |
|---------|-------------------------|-------|
| 基质沥青 | 5 000 | 1 |
| 5%生物沥青 | 4 825 | 0.965 |
| 10%生物沥青 | 4 650 | 0.930 |
| 15%生物沥青 | 4 475 | 0.895 |

3.3 生物沥青混合料经济效益分析

采用沥青混合料的性价比为路用性能相对优势指标与相对成本的比值,通过计算得到基质沥青与生物沥青混合料性价比,如表 9 所示。

表 9 基质沥青与生物沥青混合料性价比

| 沥青类型 | 性价比 | 沥青类型 | 性价比 |
|--------|-------|---------|-------|
| 基质沥青 | 0.952 | 10%生物沥青 | 0.855 |
| 5%生物沥青 | 0.967 | 15%生物沥青 | 0.848 |

由表 9 可知:针对生物沥青改性沥青而言,5%生

物沥青混合料的性价比最高为 0.967,说明生物沥青具有良好的经济效益,为生物沥青的推广应用提供了依据。

4 结论

通过碳排放分析与经济效益分析,研究了生物沥青与基质沥青的环境和经济效益。得到以下主要结论:

(1) 考虑沥青混合料碳排放关键环节,对比生物沥青混合料与基质沥青混合料的碳排放量状况。与基质沥青混合料相比,生物沥青混合料的碳排放量减少 49.97%。

(2) 基于路用性能综合评价指标,分析了不同种类沥青混合料的性价比,得到 5% 生物沥青混合料的性价比最高为 0.967。

参考文献:

[1] 汪海年,高俊锋,赵欣,等.基于 DSR 和 RV 的生物沥青结合料流变特性研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2015(6).

[2] 高雪池,曹卫东,韩冰,等.沥青再生剂配制的试验研究[J].中外公路,2019(4).

[3] 曾梦澜,李君峰,夏颖林,等.生物沥青再生沥青结合料使用性能[J].北京工业大学学报,2019(1).

[4] 张金喜,张晗.餐饮废油生物沥青路用性能的试验研究[J].北京工业大学学报,2018(6).

[5] 何敏,曹东伟,张海燕,等.改性生物沥青常规性能研究[J].公路交通科技,2015(2).

[6] 曾梦澜,夏颖林,祝文强,等.生物沥青、岩沥青及复合改性沥青常规性能与流变性能的相关性[J].湖南大学学报(自然科学版),2019(11).

[7] 郭嘉,刘璐.生物油热解条件对生物沥青性能影响的研究[J].北京化工大学学报(自然科学版),2019(6).

[8] 彭波,蔡春丽,胡如安.高速公路沥青路面能耗与碳排放评价[J].长安大学学报(自然科学版),2016(5).

[9] 胡如安.沥青混合料能耗与碳排放分析及节能减排技术研究[D].长安大学硕士学位论文,2014.

[10] 杨亚平.青川岩沥青改性沥青及其混合料技术性能研究[D].郑州大学硕士学位论文,2017.