

沥青混合料在拌和摊铺中的能耗及碳排放计算与测试

王超¹, 蒲继恒^{2,3}, 张益铭², 于留洋², 李克南², 延西利^{2*}

¹四川省交通建设集团股份有限公司, 四川 成都

²长安大学公路学院, 陕西 西安

³西安公路研究院有限公司, 陕西 西安

收稿日期: 2024年5月4日; 录用日期: 2024年5月24日; 发布日期: 2024年5月31日

摘要

为了量化计算沥青混合料在拌和生产与摊铺碾压过程中的能源消耗及温室气体排放量, 本研究选用了70#基质沥青和SBS改性沥青混合料AC-13, 通过沥青的黏度试验和混合料的变温击实试验, 确定了拌和温度和压实功, 建立了在原材料加热、混合料拌和及压实阶段的能耗和排放计算模型, 并进行了量化计算。结果表明, 沥青混合料的生产能耗主要是加热原材料的燃料消耗和碾压混合料的压实功耗, 并通过燃料燃烧来排放CO₂等气体。与SBS沥青混合料相比, 70#沥青混合料的拌和温度要低10°C左右, 可减少燃料消耗和CO₂排放量约6.4%, 降低压实功约18%~26%。对于生产拌和混合料的燃料来说, 煤粉的热效率最低, 用量和碳排放最多, 达到相同加热效果时, 重油比煤粉降低排放约29%, 天然气降低约51%。

关键词

路面工程, 沥青混合料, 能耗, 碳排放, 定量分析

Calculation and Test of Energy Consumption and Carbon Emissions of Asphalt Mixtures in Mixing and Paving

Chao Wang¹, Jiheng Pu^{2,3}, Yiming Zhang², Liuyang Yu², Kenan Li², Xili Yan^{2*}

¹Sichuan Transportation Construction Group Co., Ltd., Chengdu Sichuan

²School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

³Xi'an Highway Research Institute Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

Received: May 4th, 2024; accepted: May 24th, 2024; published: May 31st, 2024

*通讯作者。

文章引用: 王超, 蒲继恒, 张益铭, 于留洋, 李克南, 延西利. 沥青混合料在拌和摊铺中的能耗及碳排放计算与测试[J]. 土木工程, 2024, 13(5): 832-842. DOI: 10.12677/hjce.2024.135089

Abstract

To quantitatively calculate the energy consumption and greenhouse gas emission of asphalt mixture during the mixing production and paving and rolling periods, the 70# base asphalt and SBS-modified asphalt mixture AC-13 were utilized in this study. Mixing temperature and compaction work were determined through the viscosity test of asphalt and variable-temperature compaction test of the mixture. The calculation models of energy consumption and emission of asphalt mixture during the raw materials heating, mixture mixing, and compaction were established and quantitatively calculated. The results indicate that the energy consumption of asphalt mixture production is mainly the fuel consumption of raw materials heating and compaction work consumption of paving mixtures, and the emission of CO₂ and other gases through fuel combustion. Compared with SBS-modified asphalt mixture, the mixing temperature of 70# asphalt mixture is about 10°C lower, which can effectively reduce fuel consumption and CO₂ emissions by 6.4%, and reduce the compaction work by about 18%~26%. In addition, as for the fuel used to produce the mixing mixture, pulverized coal has the lowest thermal efficiency, and thus has the highest consumption and carbon emissions. When achieving the same heating effect, the heavy oil can reduce emissions by about 29% compared to pulverized coal, and natural gas can reduce emissions by 51%.

Keywords

Road Engineering, Asphalt Mixture, Energy Consumption, Carbon Emission, Quantitative Analysis

Copyright © 2024 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

公路建设过程中会消耗大量的能源和资源,在追求经济效益的同时,兼顾对生态环境的保护是当今社会对公路事业提出的新要求[1][2]。作为目前应用最广泛的道路铺筑材料,沥青混合料具有优良的路用性能、较低的噪声和较好的行车舒适性[3],但沥青混合料在生产施工过程中会消耗大量的能源,并释放出废气粉尘排放物,包括 CO₂、CO、SO₂、N₂O、TVOC 等[4],其中 CO₂ 的排放约占总排放量的 90%,是造成温室效应的主要气体,也是目前普遍研究的重点对象。温室气体排放的急剧增加会导致冰川融化、极端天气频发等,不利于道路运营的可持续发展[5]。

为此,国内外学者对路面修筑在不同阶段的能耗及碳排放开展了大量研究。Cass 等[6]根据美国洲际干线公路工程实际,建立了基于 LCA 方法的综合性生命周期分析模型。蔺瑞玉[7]设计了沥青面层及半刚性基层的 CO₂ 气体排放模型,并提出了在建设时期沥青路面的气体排放评价体系。彭波等[8]采用热值法提出了沥青路面碳排放量的计算方法,并根据路面建设各环节权重建立了碳排放量评价模型。Wang 等[9]通过使用生命周期的评估模型评价了水泥混凝土和沥青路面在建设时期的能源消耗和温室气体排放量。柴明明等[10]用 LCA 方法基于运输距离和旧材料掺配比例分析了热再生沥青路面建设期的温室气体排放。潘美萍[11]基于 LCA 方法建立了高速公路能源消耗和 CO₂ 排放量的计算模型。这些研究取得了十分有价值的成果,但要么缺乏定量计算的理论依据,要么对节能减排分析的阶段界定不够清晰。

本文把沥青路面铺筑过程中的能耗和碳排放分为拌和生产与摊铺碾压两个阶段,基于燃料的热值及热效率,建立了各阶段的能耗和碳排放的计算模型,并对 70# 和 SBS 两种常用的沥青混合料 AC-13 进行

了能耗和碳排放的量化计算，比较了两者的能耗和排放特性，为沥青混合料在实际工程应用中的能耗和碳排放提供了测算的依据和示例，为实施“双碳”战略提供基础数据。

2. 试验

2.1. 混合料配合比设计

沥青胶结料采用 70# 沥青与 SBS 改性沥青，由陕西宝利有限公司提供，按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)，测试了沥青的基本技术性能，试验结果见表 1。

Table 1. Basic technical properties of asphalts

表 1. 沥青的基本技术性能

测试项目	70#	SBS	测试方法
针入度(25℃, 0.1 mm)	76.4	53.9	T 0604
软化点(℃)	48.0	76.6	T 0606
延度(5℃, cm)	46.0	28.2	T 0605
密度(15℃, g/cm ³)	1.031	1.035	T 0603
动力黏度(135℃, Pa·s)	0.372	2.220	T 0625

试验采用的集料和矿粉由石灰岩轧制或研磨而成，经检测符合《公路工程集料试验规程》(JTG E42-2004)相关技术要求。沥青混合料的级配类型选用工程上常用的 AC-13 级配，级配曲线见图 1。按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)，通过马歇尔试验得到 70# 和 SBS 沥青混合料的最佳沥青用量均为 4.9%。

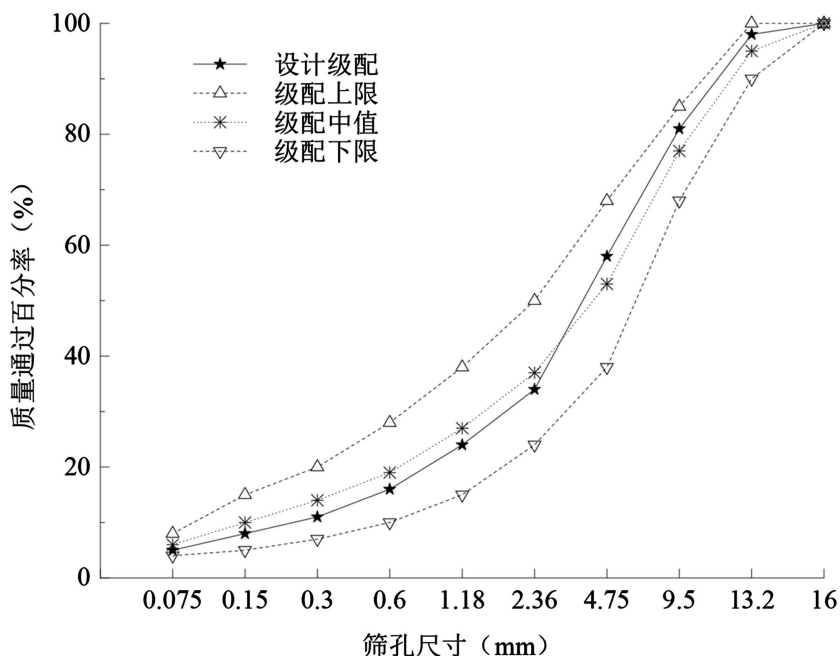


Figure 1. Gradation curve of asphalt mixture AC-13

图 1. 沥青混合料 AC-13 的级配曲线

2.2. 布氏黏度试验

沥青的黏度在一定程度上可以反映沥青混合料的拌和流动特性，沥青的黏度越大，与集料之间的粘结力越强，沥青混合料越难以进行拌和与压实。为了确定沥青混合料在生产中的加热温度，选用了 NDJ-1D 型布氏旋转黏度计，在 105℃~165℃ 的范围内测试了沥青混合料的旋转黏度。

2.3. 击实试验

沥青混合料的击实是由松散的塑性状态向有高抗拉强度的黏聚状态转变的过程，沥青的黏聚力在此过程中表现为与集料间的润滑和粘结作用。初始击实温度设定为 130℃~160℃ 且间隔为 10℃，击实次数设定为由 50 增加到 200 次，且每间隔 20 次测定一次压实度。

2.4. 能耗计算方法

1) 集料的加热能耗

沥青和集料等原材料在加热过程中会消耗大量的燃料，燃料燃烧释放的能量等于材料升温吸收与损失的热量之和。在拌和站的沥青混合料生产流程中，干燥滚筒加热集料、沥青保温和沥青加热等三个阶段的生产能耗与温度有关。大多数拌和站以重油为燃料，极少部分以煤粉为燃料，目前重点公路建设项目多以天然气为燃料，不同燃料的热值(q)及燃烧效率(λ)见表 2。

Table 2. Calorific value and thermal efficiency of fuels

表 2. 燃料的热值与热效率

燃料类型	热值 q (kJ/kg)	标准煤系数	热效率 λ (%)
标准煤	29,270	1.0000	100
煤粉	20,908	0.7143	70
重油	41,816	1.4286	85
天然气	38,931	1.3300	>90

在能耗计算时，a、b、w、f 分别代表集料、沥青、水和燃料。在集料的加热过程中，集料加热消耗的燃料(Q_{af})与集料烘干加热所需热量(Q_a)相等，其计算分别如式(1)和式(2)：

$$Q_{af} = m_{af} \cdot q \cdot \lambda \cdot \eta_a \quad (1)$$

$$Q_a = Q_{ah} + Q_w = c_a m_a (T_{a1} - T_{a0}) + c_w m_w (T_{w1} - T_{w0}) + L_w m_w \quad (2)$$

式中： m_{af} 为集料加热所需的燃料质量(kg)； η_a 为烘干筒的热交换率，取值 50%； Q_{ah} 和 Q_w 分别为集料自身升温和水蒸发所需的热量； c_a ($920 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$) 和 c_w ($4190 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$) 分别为集料和水的比热容； m_a 和 m_w 分别为集料和水的质量(kg)； T_{a0} 和 T_{a1} 分别为集料的初始和加热温度(°C)； T_{w0} 和 T_{w1} 分别为水的初始温度和沸点(°C)； L_w 为水的汽化热(2256 J/kg)。

由此可计算出 m_{af} ，如式(3)：

$$m_{af} = Q_a \div (q \cdot \lambda \cdot \eta_a) \quad (3)$$

2) 沥青的加热能耗

燃料加热沥青的热量(Q_{bf})与沥青加热、保温所需的热量(Q_b)相等，其计算分别如式(4)和式(5)：

$$Q_{bf} = m_{fb} \cdot q \cdot \lambda \cdot \eta_b \quad (4)$$

$$Q_b = Q_{b1} + Q_{b2} = m_b c_b (T_{b1} - T_{b0}) + K \cdot S \cdot (T_y - T_0) \div t_h + c_b m_b \Delta T \cdot t \quad (5)$$

式中： m_{fb} 为沥青加热所需的燃料质量(kg)； η_b 为导热油系统传热率(80%)； Q_{b1} 和 Q_{b2} 分别为沥青加热至

规定温度所需的热量和高温沥青罐保温所需的热量; m_b 为沥青质量(kg); c_b 为沥青比热容($J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$); T_{b0} 和 T_{b1} 分别为沥青的初始加热温度和加热完成温度($^\circ C$); K 为沥青罐的热传导系数($10 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$); S 为沥青罐表面积(40 m^2); T_y 和 T_0 分别为沥青的平均温度和外界环境温度($^\circ C$); t_h 为沥青加热时间(2 h); ΔT 为沥青的降温速率($2^\circ C/h$); t 为沥青的保温时间(2.5 h)。

由此可计算出 m_{bf} , 如式(6):

$$m_{bf} = Q_b \div (q \cdot \lambda \cdot \eta_b) \tag{6}$$

2.5. 排放计算方法

采用碳排放因子法测算沥青混合料生产过程中的排放, 重油、煤粉和天然气的碳排放因子(EF)分别为 3.18、1.88 和 2.16 $\text{kg CO}_2/\text{kg}$ 。燃料燃烧的 CO_2 排放量 E 的计算如式(7):

$$E = AD \cdot EF \tag{7}$$

式中: AD 为生产过程中的燃料用量及电用量。

沥青混合料在原材料加热阶段的排放模型如式(8):

$$E = E_a + E_b = m_{af} \cdot EF_{ai} + m_{bf} \cdot EF_{bi} \tag{8}$$

式中: E_a 和 E_b 分别为加热集料和沥青的碳排放(kg); EF_{ai} 和 EF_{bi} 分别为不同燃料对应的碳排放因子($\text{kg CO}_2/\text{kg}$)。

3. 试验结果与分析

3.1. 布氏黏度试验结果

在测试温度范围内, 70# 沥青与 SBS 改性沥青的布氏黏度结果见图 2。根据沥青路面施工技术规范 JTG E20-2011 的规定, 当沥青的布氏黏度为 $0.17 \text{ Pa} \cdot \text{s} \pm 0.02 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时, 此时为沥青混合料的推荐拌和温度范围。由图 2 可知, 沥青的黏度随温度的升高而减小, 且下降趋势逐渐减缓。70# 沥青和 SBS 改性沥青的推荐拌和温度分别为 $156^\circ C \sim 160^\circ C$ 和 $166^\circ C \sim 170^\circ C$, 后续分别取中值 $158^\circ C$ 和 $168^\circ C$ 进行能耗和排放分析。

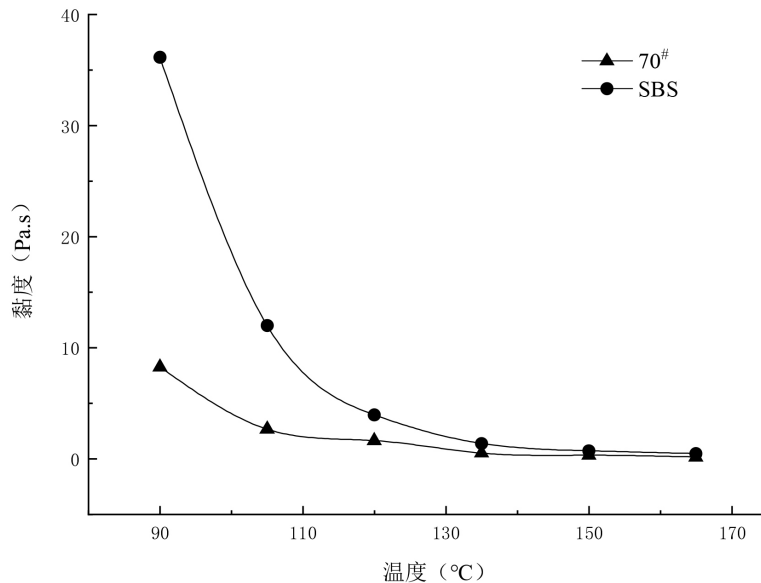


Figure 2. Brookfield viscosity of different asphalts
图 2. 不同沥青的布氏黏度

3.2. 击实试验结果

击实试验可以模拟沥青混合料的现场碾压过程，击实次数可以反映压实过程中的能耗，通过测量试件的压实度来表征压实的效果。在一定的初始击实温度下，沥青混合料压实度随击实次数的变化见图 3。

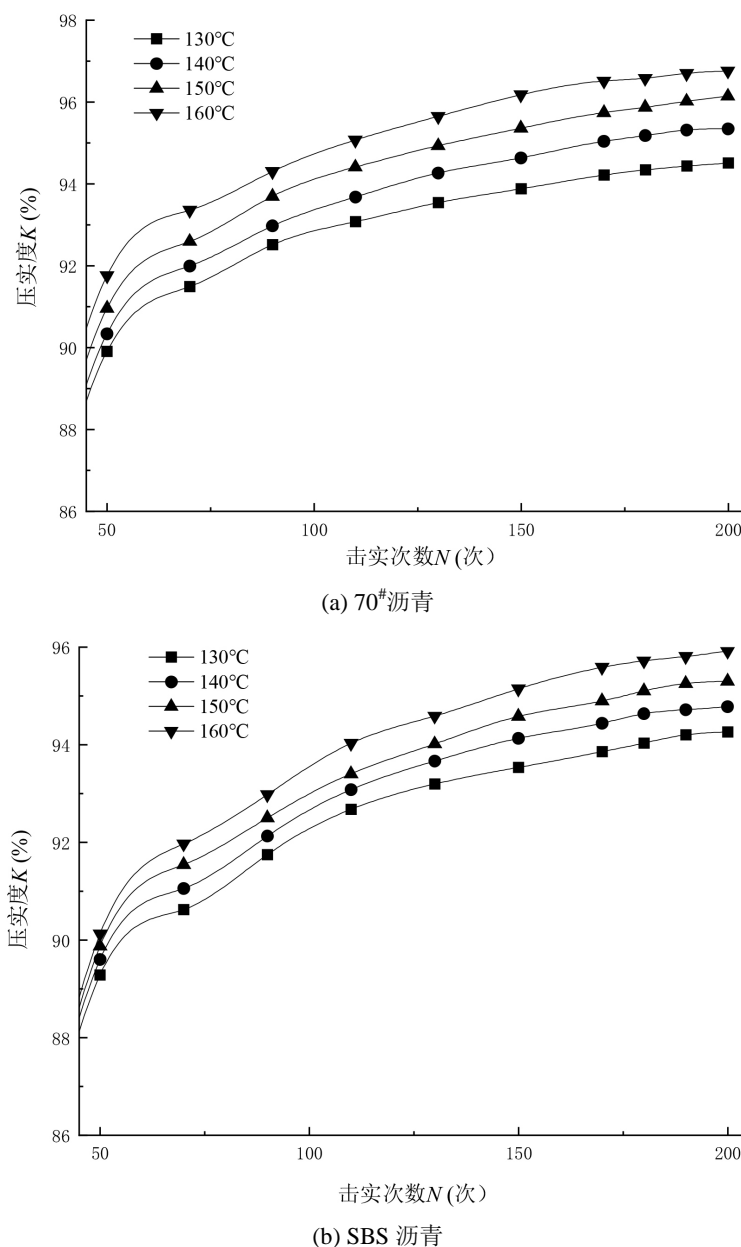


Figure 3. Compactness of asphalt mixtures at different initial compaction temperatures
图 3. 不同初始击实温度下沥青混合料的压实度

由图 3 可知，沥青混合料的压实度随击实次数和初始击实温度的增加而不断增大，且前期的增长速率较快，后期增长速率减慢。主要原因是在击实前期，混合料呈松散状态易于压实，随着击实次数的增加，沥青的润滑作用减少，沥青混合料逐渐密实。沥青的黏度越小，沥青混合料越易压实。相比之下，

70#沥青混合料的压实度在各个击实温度和次数下均大于 SBS 沥青混合料,表明前者具有更好的施工和易性,在相同压实温度和压实次数下的压实效果更好。

3.3. 加热能耗计算

1) 加热集料的能耗

在式(2)中,取 T_{a0} 为 25℃, T_{a1} 分别设为 140℃、150℃、160℃、170℃、180℃,根据集料加热的能耗计算模型可以计算出 1 吨集料由自然状态加热至不同温度所需的能耗,结果见表 3,进而可以计算出相应的燃料用量,并绘制出集料加热温度与燃料用量的关系,结果见图 4。

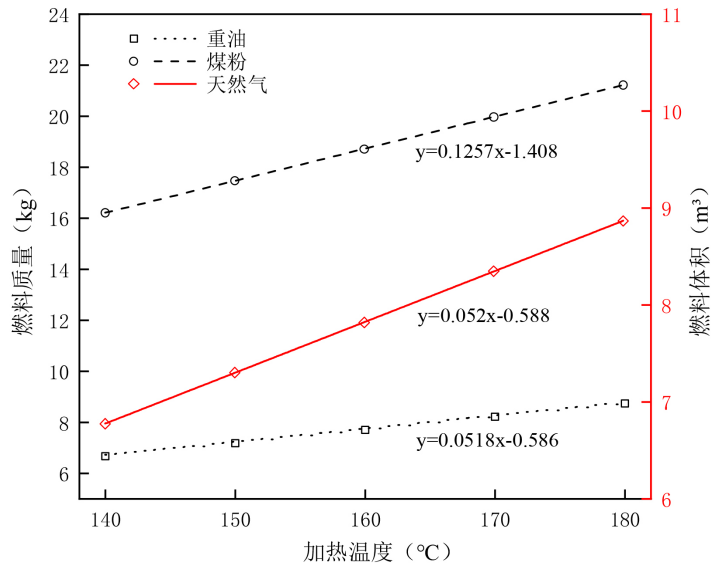


Figure 4. Variation of fuel required for aggregate heating with temperature
图 4. 集料加热所需的燃料随温度的变化

Table 3. Energy consumption for heating 1 ton of aggregates

表 3. 加热 1 吨集料的能耗

集料类型	加热温度(°C)	集料加热能耗(kJ)	水分蒸发能耗(kJ)	总能耗(kJ)
石灰岩 AC-13 级配	140	105,800	12,660	118,460
	150	115,000	12,660	127,660
	160	124,200	12,660	136,860
	170	133,400	12,660	146,060
	180	142,600	12,660	155,260

为了保证集料充分干燥,最低的加热温度应控制在 135℃左右,达到脱水干燥的程度。由表 3 可知,温度越高,集料加热需要的能耗越多,水分被带走的热量约占集料加热总能耗的 10%左右。由图 4 可以看出,由于不同燃料的热值不同,将集料加热至相同温度时的燃料用量也不同。重油与天然气的热值与燃烧效率较高,在实际使用中用量较少。煤粉的热效率较低,用量较多,约为重油的 2.5 倍。

2) 加热沥青的能耗

在式(5)中,取 T_{b0} 为 100℃, T_{b1} 分别设为 130℃、140℃、150℃、160℃、170℃。沥青的比热容随温

度的上升而变大, 见表 4。根据沥青加热的能耗计算模型对 30 t 的整罐加热沥青进行能耗计算, 结果见表 5。将沥青的加热能耗转换为相应的燃料用量, 并绘制加热温度与燃料用量的关系, 见图 5。

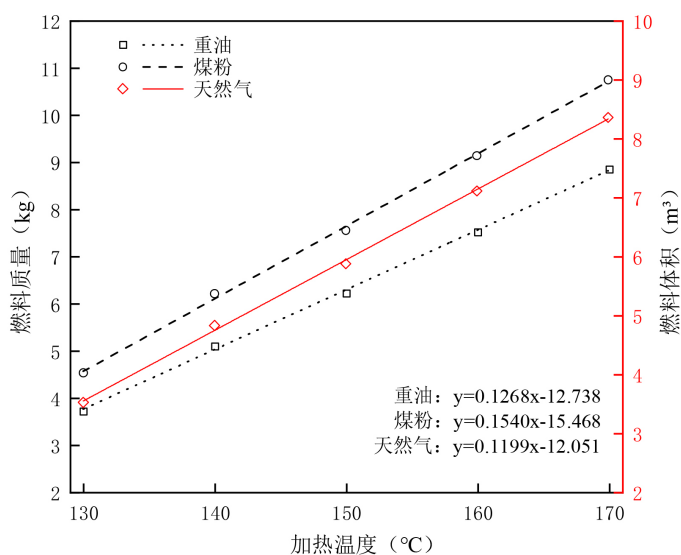


Figure 5. Variation of fuel required for asphalt heating with temperature
图 5. 沥青加热所需燃料随温度的变化

Table 4. Specific heat capacity of asphalt at different temperatures

表 4. 沥青在不同温度下的比热容

温度/°C	比热容/[kJ/(kg·°C)]	变异系数
100	2.2	0.25
110	2.25	0.24
120	2.32	0.24
130	2.39	0.26
140	2.48	0.28
150	2.54	0.28
160	2.61	0.29
170	2.65	0.29

Table 5. Energy consumption for heating 30 tons of asphalt

表 5. 加热 30 t 沥青的能耗

加热温度(°C)	沥青加热能耗(kJ)	沥青保温能耗(kJ)	总能耗(kJ)	每吨沥青能耗(kJ)
130	2,077,500	143,400	2,220,900	74,030
140	2,899,000	148,800	3,047,800	101,593
150	3,560,000	152,400	3,712,400	123,747
160	4,336,500	156,600	4,493,100	149,770
170	5,126,500	159,000	5,285,500	176,183

由表 5 可知，沥青的加热能耗总体上占总能耗的 95% 以上，保温能耗占比很小。沥青的初始温度较高，因此加热相同质量的沥青的总能耗比集料更少。此外，集料与沥青加热所需的燃料质量均与温度呈良好的线性关系。本文中沥青混合物中集料和沥青的质量分别占 95.1% 和 4.9%，因此每吨沥青混合物加热所需的燃料质量为： $m_{总} = 0.951m_{af} + 0.049m_{bf}$ 。由此可以计算出不同温度下沥青混合料的燃料消耗总质量，结果见图 6。根据所拟合的曲线可以进一步计算出沥青混合物在最佳拌和温度下的燃料用量，见表 6。

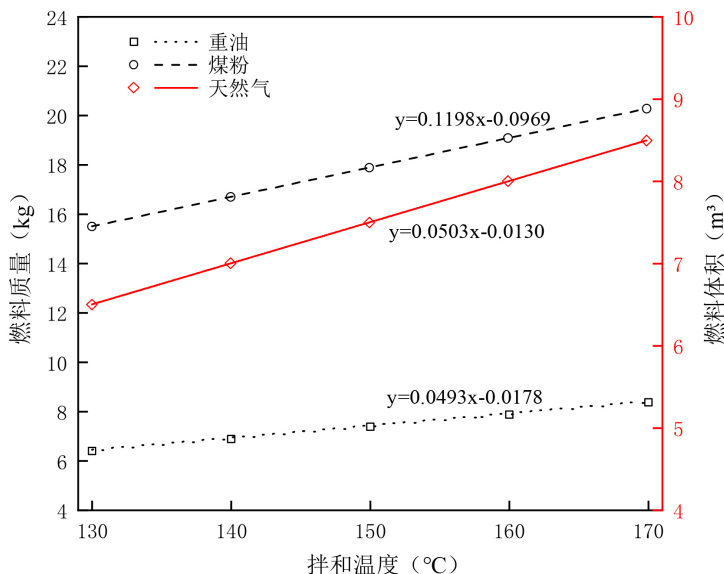


Figure 6. Fuel mass required for heating 1 ton of asphalt mixture
图 6. 每吨沥青混合物加热所需的燃料质量

Table 6. Fuel consumption of 1 ton of asphalt mixture at optimum mixing temperatures
表 6. 每吨沥青混合物在最佳拌和温度下的燃料用量

混合料类型	拌和温度(°C)	煤粉(kg)	重油(kg)	天然气(m³)
70 [#]	158	19.20	7.97	8.17
SBS	168	20.47	8.51	8.73

由图 6 可知，在不同温度下加热沥青混合料的重油消耗量远远少于煤粉，且用量与拌和温度呈良好的线性关系。70[#]沥青的黏度较小，沥青混合物所需的拌和温度较低。通过拟合曲线可以计算出在各自的最佳拌和温度下，70[#]沥青混合物可以比 SBS 沥青混合物节省 6.3% 的燃料消耗。

3.4. 压实能耗计算

根据 JTG F40-2004 中的规定，密级配沥青混合物在夏季炎热的重载交通下空隙率应控制在 4%~6% 之间。为此选定空隙率下限 6%，分析两种沥青混合物在不同温度下达到 94% 压实度时的击实次数，并将其转化为击实功，即可得出节约的压实功能耗。击实锤的质量为 4.536 kg，下落高度为 0.4572 m，根据 $W = mg \cdot h$ 可计算出击实锤每次下落的击实功为 20.3 J，进而计算出总击实功，见表 7。

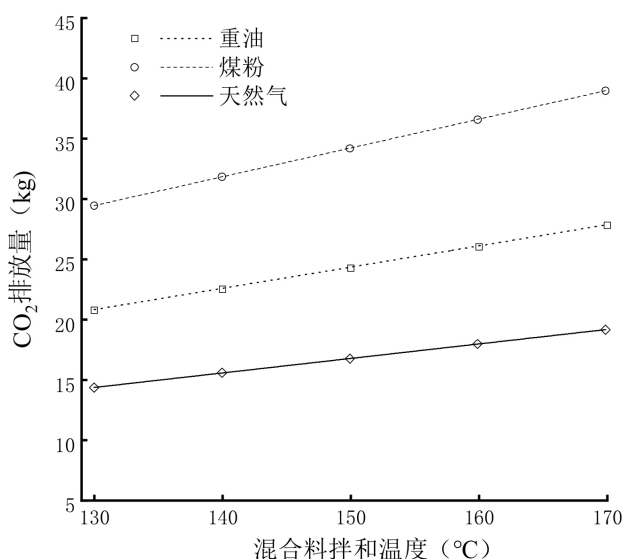
由表 7 可知，随着击实温度的上升，沥青混合物达到规定压实度所需的击实功逐渐下降，说明沥青的黏度逐渐下降，与集料之间的润滑作用增强，沥青混合物越来越容易密实成型。在 130°C~160°C 的范围内，70[#]沥青混合物可以分别比 SBS 沥青混合物节省 18.2%、21.7%、26.3% 和 26.4% 的击实功耗。

Table 7. Compaction work of asphalt mixtures at 94% compaction degree (J)**表 7.** 沥青混合料在 94% 压实度下的击实功(J)

击实温度(°C)	70 [#]	SBS	击实功变化量(%)
130	3187	3898	18.2
140	2416	3086	21.7
150	1929	2619	26.3
160	1583	2152	26.4

3.5. 排放计算

根据碳排放计算模型可以计算出 1 吨沥青混合料的原材料在加热过程中的 CO₂ 排放量，其中集料的加热温度比沥青高 10°C，结果见图 7。

**Figure 7.** Carbon emissions of heating asphalt mixture raw materials**图 7.** 沥青混合料原材料加热的碳排放

由图 7 可知，原材料加热过程中的碳排放随加热温度的升高而线性增长。在 4.9% 的最佳沥青用量下，加热集料排放的 CO₂ 占原材料加热总排放的 94%~97%，加热沥青的排放仅占 3%~6%。生产相同质量的沥青混合料，燃烧天然气的 CO₂ 排放量最少，煤粉最多，约为前者的 2 倍。根据拟合的直线可以计算出在沥青混合料各自最佳的拌和温度下、原材料加热的 CO₂ 排放量，结果见表 8。

Table 8. Carbon emission and relative coal dust reduction of asphalt mixtures at optimum mixing temperature**表 8.** 沥青混合料在最佳拌和温度下的碳排放及相对煤粉的减少量

混合料类型	拌和温度(°C)	煤粉(kg)	重油(kg)	天然气(kg)
70 [#]	158	36.09	25.69 (-28.8%)	17.65 (-51.1%)
SBS	168	38.48	27.44 (-28.7%)	18.85 (-51.0%)

由表 8 可知，与 SBS 沥青混合料相比，加热相同质量的 70[#] 沥青混合料可以减少 6.4% 的 CO₂ 排放量，

说明拌和温度的降低有利于沥青混合料在生产过程中能耗和碳排放的减少。使用不同燃料时,以煤粉为基准,重油的 CO₂ 排放量减少了约 29%,天然气减少了约 51%,说明使用天然气燃料的环保效益最好。

4. 结论

1) 沥青混合料生产过程中的能耗主要包括原材料中集料和沥青加热的燃料消耗,以及混合料在压实阶段的能耗,主要通过燃料燃烧来排放 CO₂ 等气体。

2) 沥青和集料加热所需的燃料质量与沥青混合料的拌和温度具有良好的线性关系,在相同条件下,煤粉的用量最多,重油和天然气大致相同。通过混合料拌和温度的差值得出,70[#]沥青混合料比 SBS 沥青混合料的拌和温度低 10℃,从而有效减少了 6.4% 的燃料消耗。

3) 随着击实次数的增加,沥青混合料的压实度呈快-缓慢增长的走势。在 130℃~160℃ (步长 10℃) 的初始击实温度下,达到相同压实度时,70[#]沥青混合料相比 SBS 沥青混合料依次节省了 18.2%、21.7%、26.3% 和 26.4% 的击实功。

4) 在原材料加热的过程中,70[#]沥青混合料较 SBS 沥青减少了 6.4% 的 CO₂ 排放量。在混合料拌和过程中,燃料燃烧的 CO₂ 排放量与拌和温度具有良好的线性关系,煤粉的热效率最低,燃烧排放的 CO₂ 最多,是天然气的 2 倍,每拌和 1 吨混合料,重油比煤粉降低 CO₂ 排放量约 29%,天然气降低约 51%。

基金项目

四川交建科研项目(SCJJKY-2022-119)。

参考文献

- [1] 交通部公路科学研究所. JTG 2340-2020 公路工程节能规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [2] IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge. (In Press)
- [3] Calabi-Floody, A.T., Valdés-Vidal, G.A., Sanchez-Alonso, E. and Mardones-Parra, L.A. (2020) Evaluation of Gas Emissions, Energy Consumption and Production Costs of Warm Mix Asphalt (WMA) Involving Natural Zeolite and Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). *Sustainability*, **12**, Article 6410. <https://doi.org/10.3390/su12166410>
- [4] 邱延峻, 罗浩原, 张家康, 等. 热拌与温拌沥青路面生产施工排放物对比[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2020, 40(1): 30-39.
- [5] 孟根喜, 王春. 沥青混合料热氧化产生的 CO₂ 排放量评价[J]. 公路, 2021, 66(5): 252-255.
- [6] Cass, D. and Mukherjee, A. (2011) Calculation of Greenhouse Gas Emissions for Highway Construction Operations by Using a Hybrid Life-Cycle Assessment Approach: Case Study for Pavement Operations. *Journal of Construction Engineering and Management*, **137**, 1015-1025. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000349](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000349)
- [7] 蔺瑞玉. 沥青路面建设过程温室气体排放评价体系研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2014.
- [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, 36(5): 8-15.
- [9] Wang, X., Duan, Z., Wu, L. and Yang, D. (2015) Estimation of Carbon Dioxide Emission in Highway Construction: A Case Study in Southwest Region of China. *Journal of Cleaner Production*, **103**, 705-714. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.030>
- [10] 柴明明, 李明, 齐桂才, 等. 就地热再生沥青路面建设期碳排放分析[J]. 公路交通科技, 2016, 33(10): 148-151+158.
- [11] 潘美萍. 基于 LCA 的高速公路能耗与碳排放计算方法研究及应用[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2011.