

沥青种类对混合料拌和流动性的影响

刘 勇¹, 王静梅¹, 田永锋^{2*}, 王钰洁²

¹四川高速公路建设开发集团有限公司, 四川 成都

²长安大学, 公路学院, 陕西 西安

Email: *598126298@qq.com

收稿日期: 2021年5月30日; 录用日期: 2021年6月22日; 发布日期: 2021年6月29日

摘 要

为了模拟沥青混合料的拌和流动性, 认识沥青种类对拌和流动参数及和易性的影响, 试验选取了70#基质沥青、SBS改性沥青、橡胶沥青、Evotherm温拌沥青、ACMP1和ACMP2温拌沥青等6种不同性质的沥青, 配制了AC-13C型沥青混合料, 利用自主开发的一种变速拌和试验装置, 在不同拌和温度(140℃~180℃)和不同拌和速率(20~50 r·min⁻¹)下, 对6种不同沥青混合料进行了变速拌和试验, 测试了拌和功率, 绘制了拌和功率-拌和速率流变图, 建立了拌和流动模型, 分析了混合料的拌和流动参数(拌和塑限 F 与拌和黏度 λ), 定义并研究了混合料的拌和和易性指数。研究表明: 拌和功率与拌和速率具有很好的线性相关性, 拌和流变特性服从线性黏塑性的宾汉模型; 不同沥青种类的混合料具有相同的拌和流动模型, 但拌和流动参数值有较大变化, 从而影响了拌和的和易性; 基于拌和流动参数 F 和 λ , 可以定量评价混合料的拌和和易性, 定义和易性指数为流动模型直线对拌和速率之面积的倒数; 与70#基质沥青混合料相比, SBS改性沥青和橡胶沥青混合料的和易性指数降低了9.8%~21.4%, 温拌沥青混合料的和易性指数提高了8.4%~35.4%; 拌和温度由140℃升高到180℃时, 拌和和易性指数提高了21.5%~49.1%。

关键词

道路工程, 沥青混合料, 沥青种类, 变速拌和试验, 拌和流动性, 和易性指数

Impact of Bitumen Types on Mixing Flow Behavior of Mixtures

Yong Liu¹, Jingmei Wang¹, Yongfeng Tian^{2*}, Yujie Wang²

¹Sichuan Expressway Construction & Development Group Co., Ltd., Chengdu Sichuan

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

Email: *598126298@qq.com

*通讯作者。

Abstract

In order to simulate the mixing flow behavior of bituminous mixture, and to recognize the influence of bitumen type on the mixing flow parameters and its workability, six types of 70# matrix bitumen, SBS modified bitumen, rubber modified bitumen, Evotherm and ACMP1 and ACMP2 warm bitumen are selected to prepare AC-13C asphalt mixtures, respectively. Using a self-developed experimental device of mixing power measurement at variable velocity, the variable mixing velocity experiment was carried out on the six different asphalt mixtures at different mixing temperatures (140°C~180°C) and mixing velocities (20~50 r·min⁻¹), the mixing powers were recorded, the mixing power-mixing velocity diagrams were drawn, the mixing flow model was established, and the mixing flow parameters of the mixtures (mixing plastic limit F and mixing viscosity λ) were analyzed, and the mixing workability index of the mixtures was defined and studied. The result shows that the mixing power has an obvious linear correlation with mixing velocity, the mixing rheological model obeys the linear visco-plastic Bingham's model. The mixing flow behavior is same for different bitumen mixtures, but the values of mixing rheological parameters are changed, thus the workability is influenced. Based on the mixing flow parameters F and λ , the mixing workability of asphalt mixture could be quantitatively evaluated by defining the workability index as the area reciprocal of the Bingham's line with mixing velocity. Compared to 70# matrix asphalt mixture, the workability indexes of SBS modified asphalt and rubber asphalt mixture decrease by 9.8% and 21.4% respectively, and the workability indexes of warm mix asphalt mixture increase by 8.4%~35.4%; When the mixing temperature increases from 140°C to 180°C, the mixing workability indexes for all mixtures increase by 21.5%~49.1%.

Keywords

Road Engineering, Asphalt Mixture, Bitumen Type, Mixing Experiment with Variable Velocity, Mixing Flow Behavior, Workability Index

Copyright © 2021 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

沥青混合料广泛应用于路面工程, 在拌和及摊铺过程中, 应具有良好的施工流动性, 以保证工程质量。影响沥青混合料施工流动性的主要因素有沥青种类、沥青用量、级配类型和作业温度等[1]-[6]。论文研究所采用的沥青种类是指基质沥青、温拌沥青、SBS 改性沥青、橡胶改性沥青等不同技术性能的沥青, 在现有研究成果的基础上, 重点研究沥青种类对混合料拌和流动性的影响。拌和流动特性不仅描述了混合料拌和流动的力学性质, 也可以反映其拌和的和易性。

拌和和易性描述的是混合料拌和的难易程度, 目前仍然停留在宏观的定性概念上, 并无具体的定量指标和规范性的评价方法。但行业研究人员从未停止过对拌和和易性定量分析的探索, 并取得了一些研究成果, 兼顾了实用技术和力学原理, 如拌和扭矩法、拌和功率法、流变模型法等[1]-[14]。

关于沥青混合料拌和和易性的定量描述, 最早是 Marvillet 和 Bougault 试验测试了搅拌叶片在特定转

速($22 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$)下的扭矩值,以扭矩值的大小来评价混合料的拌和和易性[2]。侯曙光以转速 $30 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下的拌和扭矩值的倒数定义了和易性指数,试制了测试设备,并获得了专利授权[6]。Wang 和 Zhao 等通过测试拌和扭矩值,研究了温拌沥青混合料的技术性能,分析了温拌剂掺量对混合料和易性的影响[7] [8]。延西利等自行开发了变速拌和试验装置,建立了“拌和功率-拌和速率”流变图,基于流变模型理论,定义了拌和和易性指数为拌和黏度的倒数,但并未考虑沥青种类对拌和和易性的影响[1]。其它一些研究[9]-[17]通过拌和扭矩值或压实度分析了特定沥青混合料的和易性及施工质量控制要素,未涉及新的和易性评价方法。

大量关于沥青混合料拌和和易性的研究,取得了有价值的成果,但均为设定转速下的单点扭矩值测试。在试验中,受拌和设备整体刚度和扭矩传感器精度及标定的影响,扭矩测试值离散性较大,同时由于是单点扭矩值,不能应用流变模型理论引入拌和流动参数,缺乏理论分析基础。事实上,对于黏性极为显著的沥青混合料,其拌和流动特性必然与拌和速率有关,应通过拌和流动模型来分析其拌和和易性。

论文研究团队自行开发了一种变速拌和试验装置,可以设定不同的拌和温度,测试对应于不同拌和速率的拌和功率,分析“拌和功率-拌和速率”流变图,以流变学理论为基础,研究混合料的拌和流动特性,初步取得了一些研究成果[1] [5]。本文针对 6 种不同技术性能的沥青种类,制备了 AC-13C 型沥青混合料,在 5 个拌和温度和 4 个拌和速率下进行了变速拌和试验,通过分析拌和流动特性及其流变模型,基于拌和流动参数定义了拌和和易性指数,研究了沥青种类对混合料拌和和易性的影响。

2. 沥青种类及黏度测试

2.1. 沥青的种类

试验研究采用了 6 种不同技术性能的沥青:70#基质沥青、SBS 改性沥青、橡胶沥青、Evotherm 温拌沥青、ACMP1 温拌沥青和 ACMP2 温拌沥青。基础沥青均为 70#基质沥青,SBS 改性剂的剂量为 4%,40 目废旧橡胶粉掺量为 20%,按常规方法制备了 SBS 改性沥青和橡胶沥青[4];采用高速旋转搅拌设备制备了温拌沥青,Evotherm、ACMP1 和 ACMP2 三种温拌剂的剂量依次为 0.6%、6%、10%。按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011),测试了上述各种类沥青的基本技术性能,结果见表 1。

Table 1. Basic technical indexes of different kinds of bitumen

表 1. 不同种类沥青的基本技术指标

沥青种类	针入度/0.1 mm	软化点/°C	15°C 延度/cm	10°C 延度/cm	5°C 延度/cm
70#基质	70.6	48.0	>100	82.6	/
SBS	74.2	68.4	/	/	36.7
橡胶	61.2	68.7	60.9	/	/
Evotherm	71.4	47.9	40.8	/	/
ACMP1	83.2	43.8	/	135.5	/
ACMP2	98.3	38.1	/	>150	/

2.2. 沥青的布氏黏度

试验采用布氏旋转黏度计,在 8 个试验温度(120°C 、 130°C 、 135°C 、 140°C 、 150°C 、 160°C 、 170°C 、 180°C)下,按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011),测试了上述 6 种沥青的布氏黏度[18] [19] [20] [21],试验结果见表 2。

Table 2. Rotational viscosity of different bitumen at different temperatures (Pa·s)**表 2.** 不同沥青在不同温度下的布氏黏度(Pa·s)

沥青种类	温度/°C							
	120	130	135	140	150	160	170	180
70#基质	0.855	0.580	0.488	0.381	0.241	0.168	0.111	0.082
SBS	2.428	1.560	1.271	0.949	0.590	0.402	0.245	0.155
橡胶	3.658	2.388	2.068	1.617	1.118	0.692	0.485	0.360
Evotherm	0.858	0.562	0.494	0.389	0.256	0.163	0.113	0.081
ACMP1	0.533	0.380	0.312	0.260	0.176	0.119	0.085	0.061
ACMP2	0.469	0.321	0.278	0.242	0.160	0.116	0.081	0.060

由表 2 可以看出, 沥青黏度随温度升高而明显减小; 与 70#基质沥青相比, SBS 沥青和橡胶沥青的黏度明显较大; 表面活性剂型温拌剂 Evotherm 的掺入, 对基质沥青的黏度影响很小(但会影响混合料的拌和黏度, 见后续分析); 有机降黏型温拌剂 ACMP1 和 ACMP2 的掺入, 对基质沥青有明显的降黏效果。

3. 混合料的变速拌和试验

3.1. 沥青混合料的制备

针对上述 6 种沥青, 试验研究制备了 AC-13C 型沥青混合料, 碎石和矿粉均由石灰岩轧制或磨细加工而成, 碎石的压碎值为 10.6%、表观相对密度为 2.715 g/cm³。按照《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004)的规定, 采用马歇尔试验法确定最佳油石比, 6 种沥青混合料的最佳油石比均在 4.8%~5.0%之间, 变化幅度较小。事实上, 当混合料的级配类型确定后, 集料的比表面积也为一定值, 在理论上对沥青的吸附及薄膜形成具有一致性。因此, 试验研究对 6 种沥青混合料的油石比统一取值 4.9%。

3.2. 变速拌和试验

试验采用研究团队自行开发的“变速拌和功率测试试验装置”[1][5], 其特点为: 采用较大功率的马歇尔拌和设备, 在现有平台上增加了变速拌和系统、功率测试系统和数据储存系统, 可通过控制面板进行转速调节, 实现沥青混合料的变速拌和及其功率测试。

在不同拌和温度和不同拌和速率下, 对 6 种沥青混合料进行了变速拌和功率测试, 基本试验参数见表 3, 拌和功率的测试结果见表 4。由表 4 可以看出, 沥青混合料的拌和功率随拌和速率的增大而增加, 随拌和温度的升高而减小, 拌和功率的大小反映了混合料拌和的难易程度。

Table 3. Test scheme of different mixing velocities for bituminous mixtures**表 3.** 沥青混合料的变速拌和试验参数

沥青混合料种类	70#基质、SBS、橡胶、Evotherm、ACMP1、ACMP2
级配类型	AC-13C
沥青用量/%	4.9
混合料拌和质量/kg	12
拌和温度/°C	140、150、160、170、180
拌和速率/(r·min ⁻¹)	20、30、40、50

Table 4. Testing result of mixing power for bituminous mixtures (W)**表 4.** 沥青混合料的变速拌和功率测试结果(W)

混合料	拌和温度/℃	拌和速率/(r·min ⁻¹)			
		20	30	40	50
70#基质沥青	140	139.1	187.9	247.3	303.1
	150	119.3	162.0	210.8	254.3
	160	107.9	147.8	185.0	228.2
	170	101.8	138.9	175.9	211.7
	180	96.9	131.6	168.5	201.7
SBS 改性沥青	140	160.8	218.5	279.6	350.3
	150	142.8	193.5	252.6	309.3
	160	131.0	174.1	222.3	279.2
	170	113.2	161.3	204.5	238.0
	180	105.8	148.7	184.1	217.9
橡胶沥青	140	165.0	231.1	299.1	360.3
	150	145.7	208.1	266.1	317.3
	160	137.3	186.1	241.2	292.1
	170	124.5	165.8	212.0	260.6
	180	115.7	151.1	192.6	235.8
Evotherm 温拌沥青	140	116.9	167.1	216.5	254.6
	150	103.1	146.8	187.8	223.2
	160	99.1	136.4	169.5	209.9
	170	95.3	127.3	163.1	199.9
	180	91.8	122.8	155.6	191.4
ACMP1 温拌沥青	140	109.2	153.0	193.2	242.7
	150	100.4	138.3	174.3	220.2
	160	96.0	130.8	165.3	206.9
	170	91.1	123.8	156.4	196.0
	180	86.3	122.9	153.2	186.5
ACMP2 温拌沥青	140	98.9	144.8	182.7	221.3
	150	90.7	134.5	169.5	203.4
	160	89.1	127.9	164.4	194.4
	170	86.4	121.1	156.5	187.0
	180	82.0	118.0	148.4	178.7

4. 试验结果分析

4.1. 拌和流动特性

分析表 4 试验结果发现, 无论是哪一种沥青混合料, 在任一设定的拌和温度下, 拌和功率随着拌和速率的增大而线性增加(图 1), 反映了拌和流动的线性黏塑性性质; 在相同拌和速率下, 拌和功率随着拌和温度的升高而显著减小, 本质上揭示了混合料拌和黏性的温度敏感性, 温度是一个重要影响因素。

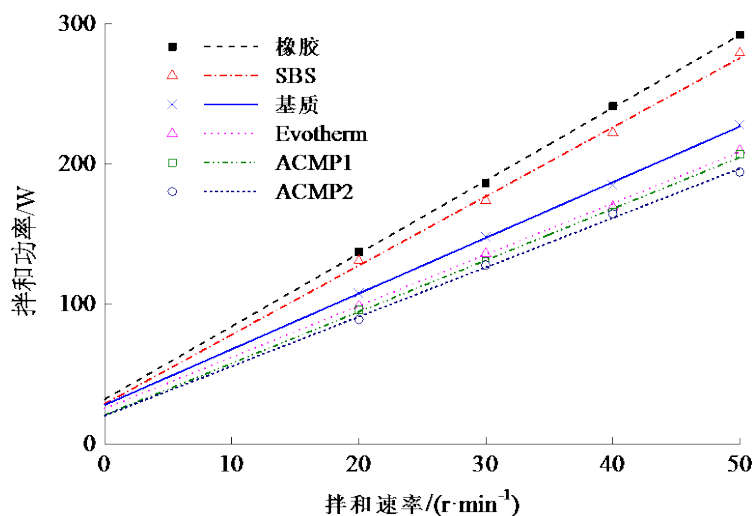


Figure 1. Mixing rheogram of different asphalt mixtures (160°C)
图 1. 不同沥青混合料的拌和流变图(160°C)

事实上,由表 4 的试验结果可以绘制出大量类似于图 1 的分析图。若记拌和功率为 P 、拌和速率为 V ,则各种沥青混合料在给定温度下的拌和流动规律可写为

$$P = F + \lambda \cdot V \quad (1)$$

式中: F 和 λ 为拌和流动参数; F 称为拌和塑限,表示图 1 中直线的截距; λ 称为拌和黏度,表示图 1 中直线的斜率;图 1 即为拌和流变图,也称 P - V 流变图。

由此可见,不同沥青混合料在给定温度下具有相同的拌和流动规律[4],区别只在于拌和流动参数 F 和 λ 的数值不同。这些分析研究结果符合传统文献所介绍的研究结果[22] [23] [24]。

式(1)所描述的拌和流动特性,在物理属性和力学原理上,正好契合了宾汉(Bingham)模型,如图 2,说明沥青混合料的拌和流动特性服从 Bingham 模型,是一种线性黏塑性流动。宾汉模型的本构方程为

$$\tau = f + \eta \cdot D \quad (2)$$

式中: τ ——剪切应力; D ——剪切速率; f ——材料的内在塑限; η ——材料的黏度。

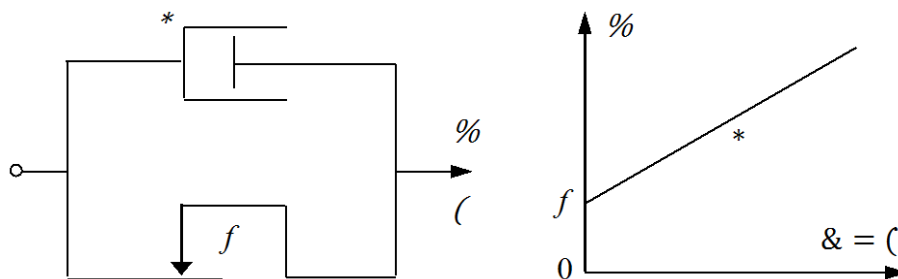


Figure 2. Bingham model and its rheogram
图 2. 宾汉模型及其流变图

4.2. 拌和流动参数

式(1)中的拌和塑限 F 和拌和黏度 λ 称为拌和流动参数。对试验结果(表 4)进行线性回归分析,相关系数大于 0.99,得到不同沥青混合料在不同温度下的 F 和 λ 值见表 5 和表 6。

Table 5. Mixing plastic limit F of asphalt mixtures (W)
表 5. 沥青混合料的拌和塑限 F 值(W)

沥青混合料	试验温度/°C				
	140	150	160	170	180
70#基质	26.4	27.6	28.3	28.8	26.7
SBS 改性	31.9	29.0	29.1	33.1	34.0
橡胶沥青	35.0	33.8	32.3	31.6	33.2
Evotharm	26.8	24.7	25.7	24.0	24.3
ACMP1	20.2	19.9	21.3	20.3	21.5
ACMP2	20.2	19.0	20.6	19.7	19.6

Table 6. Mixing viscosity of asphalt mixtures ($60 \text{ J}\cdot\text{r}^{-1}$)
表 6. 沥青混合料的拌和黏度 λ 值($60 \text{ J}\cdot\text{r}^{-1}$)

沥青混合料	试验温度/°C				
	140	150	160	170	180
70#基质	5.51	4.54	3.97	3.67	3.51
SBS 改性	6.30	5.59	4.93	4.18	3.72
橡胶沥青	6.54	5.72	5.19	4.50	4.01
Evotharm	4.63	4.01	3.66	3.49	3.31
ACMP1	4.41	3.94	3.67	3.47	3.33
ACMP2	4.05	3.73	3.52	3.37	3.21

分析表 5 和表 6 所列数据可以看出: 1) 沥青混合料的拌和塑限随温度的变化并不明显, 与不同温度下的平均值相比, 其最大相对误差小于 8.3%; 2) 在试验温度范围内, 沥青混合料的拌和黏度随温度的升高而明显减小, 6 种沥青混合料的降幅在 21%~41%之间; 3) SBS 沥青和橡胶沥青混合料的拌和塑限和拌和黏度明显高于基质沥青混合料, 表明其拌和流动性变差; 4) 温拌沥青混合料的拌和塑限和拌和黏度明显小于基质沥青混合料, 表明其拌和流动性变好。

5. 沥青对拌和流动参数的影响

不同种类的沥青, 由于其自身针入度、软化点和布氏黏度等技术性能或温拌作用机理的不同, 对沥青的技术性能或混合料的拌和流动性, 直接和间接地产生不同程度的影响, 最终直接影响着沥青混合料的拌和和易性。如前所述, 沥青混合料的拌和流动性服从宾汉模型, 这样就引入了拌和塑限 F 和拌和黏度 λ 两个流动参数, 所以沥青种类对混合料拌和和易性的影响, 实际上就是对拌和流动参数的影响。

由表 5 所列的拌和塑限试验结果可以看出: 若取同类沥青混合料在各个温度下拌和塑限的平均值, 那么可以发现 SBS 沥青和橡胶沥青混合料的拌和塑限比基质沥青混合料增加了 14.0%~20.4%, 而 3 种温拌沥青混合料的拌和塑限减小了 8.9%~28.1%, 表明沥青种类对混合料的拌和塑限具有较大的影响。结合表 2 所示的布氏黏度测试结果, 说明沥青的黏度越大, 混合料的拌和塑限也越大。

由表 6 所列的拌和黏度试验结果可以看出: 随着拌和温度由 140°C 升高到 180°C, 沥青混合料的拌和黏度衰减由快转缓并有收敛趋势; 对比分析各个温度下的拌和黏度, 对于黏度较高的 SBS 沥青和橡胶沥青, 其混合料的拌和黏度也比基质沥青混合料增加了 6.0%~30.7%, 说明沥青的黏度越大, 混合料的拌和黏度也越大; 对于三种温拌沥青而言, 其混合料的拌和黏度减少了 5.1%~26.5%。

事实上, 沥青的黏度 η 和混合料的拌和黏度 λ 之间必然存在着某种内在的联系, 主要是由沥青转化为沥青粉砂浆(mortar and mastic)在起主导作用, 这是我们下一步需要研究的内容。取表 2 中 140℃~180℃ 时沥青的黏度 η 和表 6 中混合料的拌和黏度 λ , 绘制 η - λ 对比图(由于不同沥青的黏度相差较大, 故绘制成两个图, 如图 3)。从图 3 可以发现: 沥青的黏度与沥青混合料的拌和黏度之间具有良好的线性相关性, 相关系数大于 0.97, 沥青的黏度越大, 混合料的拌和黏度也越大; 随着沥青黏度的增大, 不同沥青混合料之间的拌和黏度差异会不断增大, 从而反映了研究沥青黏度的重要性。

值得注意的是, Evotherm 温拌沥青的布氏黏度, 相对于 70# 基质沥青而言并没有多大变化(表 2), 但其温拌沥青混合料的拌和黏度(表 6), 则在 140℃ 时降低了 16.0%、在 180℃ 时降低了 5.7%, 这是由于 Evotherm 是一种表面活性剂型沥青温拌剂, 原理上不改变基础沥青的技术性能, 如针入度、软化点和黏度等不会改变, 但由于表面活性剂的介入, 会在温拌沥青与集料的微界面上产生活性或活化作用, 减小了界面摩阻力, 降低了混合料的拌和黏度, 实现了沥青混合料的温拌[25] [26]。相反地, 有机降黏型沥青温拌剂如 ACMP 的掺入, 本质上改变了基础沥青的技术性能, 通过降低沥青的黏度, 来直接降低混合料的拌和黏度, 从而实现温拌的目的。这两种沥青温拌剂的作用机理是不同的。

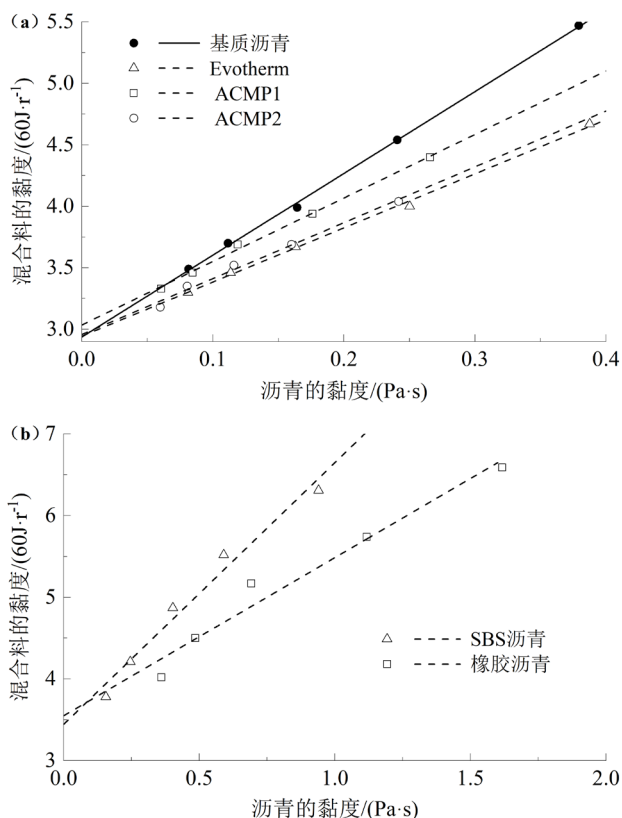


Figure 3. Changing rules of mixture viscosity with bitumen viscosity. (a) Matrix bitumen and three kinds of warm bitumens; (b) SBS modified bitumen and rubber bitumen

图 3. 混合料黏度随沥青黏度的变化规律。(a) 基质沥青和 3 种温拌沥青; (b) SBS 改性沥青和橡胶沥青

6. 拌和和易性分析

由上述分析可知, 沥青混合料的拌和塑限 F 与拌和黏度 λ 两个流动参数, 从本质上决定了混合料的

拌和流动性能，从而也反映了其拌和和易性。混合料拌和的拌和塑限和拌和黏度越小，拌和所消耗的能量越少，拌和的和易性越好，反之亦然。也就是说，在如图4所示的拌和流变图中，直线的截距 F 和斜率 λ 共同决定了混合料的拌和和易性。因此，为了同时考虑这两个流动参数，根据能量消耗原理，用图4中的面积 A 的倒数百分数来综合定量评价混合料拌和的难易程度，即定义拌和和易性指数(I_w)为

$$I_w = \frac{100}{A} \quad (3)$$

目前常用的拌和设备为马歇尔拌和锅，拌和速率约为 $48 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ，故取接近此值的整数作为计算拌和速率，即取 $V = 50 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ，来计算不同沥青混合料的和易性指数，如下式(4)，计算结果见表7。

$$I_w = \frac{100}{A} = \frac{100}{25(2F + 50\lambda)} \quad (4)$$

式中： I_w 的量纲为%； F 的量纲为W； λ 的量纲为 $60 \text{ J}\cdot\text{r}^{-1}$ 。

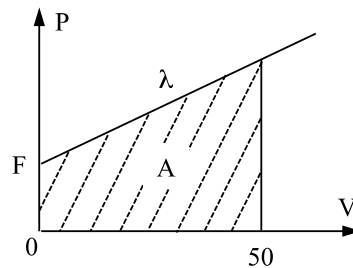


Figure 4. Mixing energy analysis of bituminous mixture
图4. 沥青混合料的拌和能耗分析

分析表7数据可以发现：当拌和温度由 140°C 升高到 180°C 时，对于研究所采用的6种沥青而言，其混合料的和易性指数增加幅度为 $21.5\% \sim 49.1\%$ ；在相同拌和温度下，与70#基质沥青混合料相比，SBS改性沥青和橡胶沥青混合料的和易性指数降低了 $9.8\% \sim 21.4\%$ ，三种温拌沥青混合料的和易性指数则提高了 $8.4\% \sim 35.4\%$ ；其中，沥青种类对应的和易性指数大小排序为：ACMP2、ACMP1、Evotherm、70#基质沥青、SBS沥青、橡胶沥青，沥青种类对混合料和易性指数的影响显而易见。

Table 7. Workability index of asphalt mixtures (%)

表7. 沥青混合料的和易性指数(%)

沥青混合料	拌和温度/ $^\circ\text{C}$				
	140	150	160	170	180
70#基质	12.18	14.17	15.68	16.59	17.47
SBS改性	10.56	11.85	13.13	14.53	15.75
橡胶沥青	10.08	11.31	12.33	13.88	14.99
Evotherm	14.03	16.01	17.05	17.98	18.68
ACMP1	15.33	16.89	17.69	18.68	19.09
ACMP2	16.49	17.82	18.42	19.22	20.03

7. 结语

1) 沥青混合料的拌和功率与拌和速率具有很好的线性关系，拌和流动性服从线性黏塑性的宾汉模

型, 从理论上引入了拌和塑限和拌和黏度两个流动参数。

2) 综合考虑两个拌和流动参数, 在拌和流变图中, 定义拌和和易性指数为拌和流动直线对拌和速率坐标轴的面积倒数百分数, 考虑了混合料黏滞性对速率的依赖性。

3) 沥青种类不同, 其黏度也不同, 黏度从根本上决定了混合料的拌和黏度及和易性, 沥青的黏度越小, 混合料的拌和黏度也越小, 和易性越好, 且沥青的黏度与混合料的黏度呈良好的正相关性。

4) 与 70[#]基质沥青混合料相比, 高黏的 SBS 沥青和橡胶沥青混合料的拌和黏度较大, 和易性较差, 而沥青温拌技术的应用, 在同温度下可以极大地改善混合料的和易性。

5) 对于论文研究选用的 6 种沥青种类, 其混合料的拌和和易性指数由大到小依次排序为: ACMP2、ACMP1、Evotherm、70[#]基质沥青、SBS 改性、橡胶沥青。

6) 下一步需要研究沥青混合料的级配类型(如 AC-13、AC-20、SMA、OGFC 等)和沥青粉砂浆对拌和和易性及强度构成的影响。

基金项目

陕西省重点研发计划(2020GY-304), 四川仁沐高速公路科研计划(SIC-RMLM-06-QT-023)。

参考文献

- [1] 延西利, 田辉黎, 延喜乐, 游庆龙, 艾涛. 沥青混合料的变速拌和功率测试与拌和流变模型[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(3): 1-7.
- [2] Marvillet, J. and Bougault, P. (1979) Workability of Bituminous Mixes-Development of a Workability Meter. *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings*, **48**, 91-110.
- [3] Gudimetta, J.M., Allen Cooley Jr., L. and Ray Brown, E. (2004) Workability of Hot-Mix Asphalt. *Transportation Research Record*, **1891**, 229-237. <https://doi.org/10.3141%2F1891-27>
- [4] 李昂. 不同性质沥青混合料的变速拌和和易性指数研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2017.
- [5] 田辉黎. 沥青混合料变速拌和的试验特性研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2015.
- [6] 侯曙光. 热拌与温拌沥青混合料和易性试验[J]. 南京工业大学学报: 自然科学版, 2011, 33(5): 36-39.
- [7] Wang, Ch., Hao P., Ruan F., Zhang, X. and Adhikari, S. (2013) Determination of the Production Temperature of Warm Mix Asphalt by Workability Test. *Construction and Building Materials*, **48**, 1165-1170. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.097>
- [8] Zhao G. and Guo P. (2012) Workability of Sasobit Warm Mixture Asphalt. *Energy Procedia*, **16**, 1230-1236. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.01.196>
- [9] Ali, A., Abbas, A., Nazzal, M., Alhasan, A., Roy, A. and Powers, D. (2014) Workability Evaluation of Foamed Warm-Mix Asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **26**, 1-6.
- [10] Roozbahany, E.G. and Partl, M.N. (2016) A New Test to Study the Flow of Mixtures at Early Stages of Compaction. *Materials and Structures*, **49**, 3547-3558.
- [11] 汪德才, 郝培文, 刘娜, 张海伟, 李志刚. 乳化沥青冷再生混合料和易性指标及影响因素[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(6): 919-925.
- [12] 刘国柱. 沥青混合料拌和流变特性研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2011.
- [13] 郭平. 乳化型温拌剂研发及其混合料评价体系研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2011.
- [14] 张琛, 汪海年, 尤占平, 李廉. 橡胶沥青混合料和易性与压实特性的相关性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(1): 202-208.
- [15] 徐剑敏. 改性沥青施工温度确定及对路用性能的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2013.
- [16] 季社鹏. 沥青混合料工作性及施工质量控制研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2012.
- [17] 刘胜林. 基于流变理论的施工精细化控制[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2013.
- [18] 延梦露. 沥青的布氏黏度测试及流变特性分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2014.
- [19] 延西利, 雍黎明, 延梦璐, 王利娟, 蒋万星. ACMP 沥青温拌性能的粘温曲线分析[J]. 中国公路学报, 2015, 28(8):

1-7.

- [20] 安晓燕, 李美江. 橡胶沥青黏度试验方法研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2011, 7(1): 94-97.
- [21] 朱江浪, 安海新, 刘巨明, 李昂, 延西利. 不同沥青混合料的拌和黏度及和易性[J]. 土木工程, 2018, 7(6): 950-958.
- [22] 安静. 桥面铺装环氧沥青混合料拌和流变特性研究[J]. 新型建筑材料, 2019, 46(5): 29-32.
- [23] 马凤雪, 张久鹏, 刘国柱. 沥青混合料拌和流变参数的确定[J]. 公路, 2012(9): 5-8.
- [24] Anjan Kumar, S., Sarvanan, U., Murali Krishnan, J. and Veeraragavan, A. (2014) Rheological Characterisation of Modified Binders at Mixing and Compaction Temperature. *International Journal of Pavement Engineering*, **15**, 767-785. <https://doi.org/10.1080/10298436.2013.851792>
- [25] European Asphalt Pavement Association (EAPA) (2014) The Use of Warm Mix Asphalt. European Asphalt Pavement Association, Brussels.
- [26] 延西利, 艾涛, 夏泽沛, 金晓晴. 表面活性剂型沥青温拌剂的研发及应用技术研究[R]. 成都: 四川省交通运输厅, 2020.