

表面活性剂型沥青温拌剂Alube的技术性能研究

李宇昊^{1*}, 蒋勇², 刘万春³, 霍永茂⁴, 蒋双全³, 田建文⁴

¹长安大学公路学院, 陕西 西安

²安康市交通建设投资集团有限公司, 陕西 安康

³四川公路桥梁建设集团有限公司, 四川 成都

⁴榆林市公路局, 陕西 榆林

收稿日期: 2023年5月9日; 录用日期: 2023年5月29日; 发布日期: 2023年6月13日

摘要

为了研究新型表面活性剂型沥青温拌剂Alube对沥青技术性能的影响, 并与常用的同类温拌剂Evotherm进行对比, 分别将其掺入70#沥青中配制不同掺量的温拌沥青。通过试验测试了温拌沥青的接触角、三大指标、布氏黏度和复数模量等, 并通过变速拌和试验研究了温拌沥青混合料拌和流动特性, 分析了其温拌效果。结果表明: Alube与Evotherm均基本不改变沥青的三大指标和布氏黏度, 而是直接降低混合料的拌和黏度; 两种温拌剂均提高了沥青的复数模量G*, 改善了沥青的高温抗变形能力。变速拌和试验结果表明Alube和Evotherm温拌效果良好, 70#沥青在0.7%的Alube和Evotherm剂量下可分别降低拌和温度约21°C和14°C。

关键词

道路工程, 沥青混合料, Alube温拌剂, 黏温特性, 路用性能

Study on Technical Properties of Surfactant-Based Asphalt Warm Mix Additive Alube

Yuhao Li^{1*}, Yong Jiang², Wanchun Liu³, Yongmao Huo⁴, Shuangquan Jiang³, Jianwen Tian⁴

¹School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

²Ankang Transportation Investment Construction and Development Group Co. Ltd., Ankang Shaanxi

³Sichuan Road and Bridge Construction Group Co. Ltd., Chengdu Sichuan

⁴Highway Administrative Bureau of Yulin City, Yulin Shaanxi

*通讯作者。

文章引用: 李宇昊, 蒋勇, 刘万春, 霍永茂, 蒋双全, 田建文. 表面活性剂型沥青温拌剂 Alube 的技术性能研究[J]. 土木工程, 2023, 12(6): 713-722. DOI: 10.12677/hjce.2023.126080

Abstract

In order to study the influence of the new surfactant-based asphalt warm mix additive Alube on technical properties of asphalt, and compare it with the similar warm mix additive Evotherm which is commonly used, they were mixed into 70# asphalt to prepare different dosages of warm mix asphalt. Then the contact angle, three indexes and Brinell viscosity of warm mix asphalt were tested. The mixing flow characteristics of warm mix asphalt mixture were studied by variable speed mixing test, and the mixing effect and road performances of warm mix asphalt mixture were analyzed. The results showed that Alube and Evotherm did not change the three indexes of asphalt and Brinell viscosity, but directly reduced the mixing viscosity of the asphalt mixture. The results of variable speed mixing test showed that the warm mix effect of Alube and Evotherm was good. The mixing temperature of 70# asphalt could be reduced by about 21°C and 14°C respectively at 0.7% Alube and Evotherm dosage. In addition, the road performance of the mixture was improved by both warm mix additives.

Keywords

Road Engineering, Asphalt Mixture, Warm Mix Additive Alube, Viscosity-Temperature Characteristics, Road Performance

Copyright © 2023 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

沥青路面具有开放交通早、易于维修养护等优势[1], 但传统的热拌沥青混合料在生产施工过程中存在诸多弊端如较高的施工温度和能源消耗等。温拌技术改善了这一弊端, 目前温拌技术分为发泡技术、有机降黏技术和表面活性剂型温拌技术[2] [3]。相比于前两种技术对沥青技术性能的影响, 表面活性剂型温拌剂对沥青的基本性能几乎无影响, 主要在沥青与集料的粘结界面起作用, 因此具有广阔的发展前景[4] [5] [6]。

表面活性剂型沥青温拌剂由美国维实伟克公司首次研发并命名为 Evotherm [7], 此后国外学者经过不断尝试研发了其他表面活性剂型温拌剂, 其中常见的还有法国阿科玛公司的 Cecabase RT 温拌剂和荷兰阿克苏诺贝尔公司的 Rediset 温拌剂等。目前已经对表面活性剂型温拌剂做了大量研究, Biswajit K. Bairgi 等人[8]通过汉堡车辙和冻融劈裂试验研究了泡沫沥青、Evotherm 温拌沥青和 Cecabase 温拌沥青混合料的性能, 结果表明其抗车辙性能和抗剥落性能相近, $TSR \geq 0.85$ 。Gordon D. Airey 等[9]研究了 Rediset 温拌沥青的流变特性和黏附性能。结果表明, Rediset 温拌剂降低沥青的表面自由能, 增加沥青的拉伸强度, 从而降低沥青混合料水敏感性。赵黎明等[10]通过对比分析了 5 种试验方法是否适用于评价表面活性剂型温拌剂降温效果。试验表明体积指标法和旋转压实曲线法较可靠, 黏温曲线不适用, 拌和电流法基本可行, 但需改进拌和设备。

本文通过研究一种 Alube 国产的表面活性剂型温拌剂对沥青技术性能、流变性能及对混合料路用性能的影响, 用变速拌和试验评价了 Alube 的温拌效果, 有利于对国产表面活性剂型温拌剂的研发和推广, 具有重要的现实意义。

2. 试验

2.1. 材料与仪器

2.1.1. 试验材料

本文选择了最常用的 70[#]沥青, 由陕西宝利有限公司提供, 70[#]沥青的延度符合规范《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004) [11]中 C 类的要求。

Alube 温拌剂是成都鑫利公路材料开发有限公司研发的一款表面活性剂型沥青温拌剂。Alube 为粘稠状液体; 气味为草香味, 相比于 Evotherm 的气味更清淡。其物理性状见表 1。为了考察不同剂量下的 Alube 对沥青及混合料技术性能的影响, 和技术性能随剂量增加的变化规律, 本文确定其添加剂量为 0.3%、0.5%、0.7%、0.9%。

为考察温拌剂 Alube 与目前市场上成熟的表面活性剂型温拌剂技术性能之间的差异, 选择了美国维实伟克公司研发的第三代表表面活性剂型温拌剂 Evotherm 3G 与之对比。

温拌沥青试样制备方法为: 将 70[#]沥青加热至流动状态(135℃), 按比例将温拌剂按所需比例加入沥青中, 充分搅拌均匀即可, 基质沥青和各温拌沥青的编号见表 2。

Table 1. Physical properties of warm mix additive Alube

表 1. Alube 温拌剂的物理性状

型号	黏度/(mPa.s, 25℃)	胺值/(mg·g ⁻¹)	色相	固含量/%
Alube ¹	400~900	400~600	淡黄色	≥99
Alube ²	100~500	200~600	棕红色	≥99

Table 2. Number of asphalt and warm mix asphalt samples

表 2. 沥青及温拌沥青试样编号

基础沥青	温拌剂	剂量/%	沥青试样	试样编号
	\	\	70 [#] 沥青	70 [#] 沥青
70 [#] 基质沥青	Evotherm	0.7	70 [#] + Evotherm	70-E
	Alube	0.3、0.5、0.7、0.9	70 [#] + Alube	70-A _{0.3} 、70-A _{0.5} 、70-A _{0.7} 、70-A _{0.9}

2.1.2. 仪器

FM300 高剪切分散乳化机; 光学接触角测量仪; NDJ-1C 型布氏旋转黏度计; DHR-2 型动态剪切流变仪; 变速拌和试验装置等。

2.1.3. 沥青混合料的制备

Table 3. AC-13 composite gradation

表 3. AC-13 合成级配

级配类型	筛孔尺寸/mm									
AC-13	0.075	0.15	0.3	0.6	1.18	2.36	4.75	9.5	13.2	16
合成级配	5	8	11	16	24	34	58	81	98	100
级配上限	8	15	20	28	38	50	68	85	100	100
级配中值	6	10	14	19	27	37	53	77	95	100
级配下限	4	5	7	10	15	24	38	68	90	100

本文对 70# 沥青进行配合比设计, 温拌沥青混合料采用对应基础沥青混合料的配合比。本文选用集料和矿粉统一采用石灰岩, 其技术性能均满足《公路工程集料试验规程》的相关要求。按规范给出的马歇尔配合比设计方法进行配合比设计, 选择沥青混合料级配为 AC-13C 型, 其合成级配见表 3。经计算, 70# 沥青混合料的最佳油石比为 4.8%。

2.2. 试验方法

2.2.1. 接触角试验

将一滴液体滴在固体表面上, 因为体系的性质不同, 液体在固体表面上的形状将会不同[12]。固、气、液三相交界处的气-液界面和固-液界面之间的夹角称为接触角, 用 θ 表示。液滴在水平方向上需保持力的平衡, 则 γ_{sg} 、 γ_{lg} 、 γ_{sl} 及 θ 的关系有:

$$\gamma_{sg} - \gamma_{sl} = \gamma_{lg} \cos \theta \quad (1)$$

该方程即为润湿方程, 也叫杨氏方程。结合接触角示意图和润湿方程可知, 接触角越小, 润湿性越好, 当接触角为 180° 时, 液体完全不润湿; 当接触角为 0° 时, 液体可自动在固体表面铺展。因此, 可用液体在固体表面上达到平衡时的接触角大小来判断和评价润湿情况。

本文采用躺滴法测定沥青的接触角, 采用仪器为光学接触角测量仪[13]。其基于两个假设: 一是液滴是沿中轴对称的, 二是只有界面张力和重力的影响。将 70-A 温拌沥青加热至流动状态(135°C), 将其放入 140°C 烘箱内进行预热后, 然后在载玻片上滴少量温拌沥青, 用刮刀以下拖法将沥青均匀涂抹在载玻片上。

2.2.2. 布氏黏度试验

沥青的黏度是评价沥青技术性质的重要指标之一, 影响着沥青混合料拌和压实的难易程度。沥青黏度越高, 沥青混合料之间的粘结力越大, 拌和压实难度提高。选用 NDJ-1D 型布氏旋转黏度仪, 在 $110\sim 160^\circ\text{C}$ 下测试温拌沥青的剪切应力和剪切速率的关系, 从而求得沥青的黏度。

2.2.3. 变速拌和试验

沥青混合料的拌和难易程度与混合料的流动变形性能息息相关, 不同温度和不同速率下拌和的能量消耗可反映沥青混合料的拌和流动特性, 进而反映沥青混合料的和易性。在本试验中, 能量的消耗即为功率的消耗。变速拌和试验可测定不同温拌沥青混合料在各温度下、不同拌和速率下拌和功率, 研究分析不同温拌沥青的拌和流变特性[14] [15]。

变速拌合试验装置对现有马歇尔拌和设备进行改造, 在此基础上增加变速拌和系统、功率测试系统和数据储存系统。可通过控制面板调节转速, 以实现不同速率下拌和沥青混合料的目的, 并进行功率测试、记录、存储测试数据。本文试验选择的试验温度定为 140°C 、 150°C 、 160°C 、 170°C 、 180°C , 拌和速率分别为 20、30、40、50 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$, 拌和时间为 180 s。

3. 试验结果与分析

3.1. 接触角试验结果

各沥青试样的测试结果见表 4, 可以看出所有试验结果的变异系数在 0.5%~1.9% 之间, 表明试验有较好的重复性。

一般将 90° 作为润湿与否的分界点, $\theta > 90^\circ$, 称为不润湿, $\theta < 90^\circ$, 称为润湿。从表中数据可知, 70# 沥青的接触角都大于 90° , 表明常温下的沥青与水不润湿。加入 Alube 后, 70# 温拌沥青的接触角有所降低。表明 Alube 增大了沥青的亲水性, 且剂量越大, 幅度越大。

Table 4. Results of contact angles between different asphalt and water
表 4. 不同沥青与水的接触角测试结果

不同沥青	接触角均值/ $^{\circ}$	标准差	变异系数
70 [#] 沥青	101.36	1.23	0.012
70-A _{0.3}	100.53	0.68	0.007
70-A _{0.5}	99.90	0.52	0.005
70-A _{0.7}	99.09	0.56	0.006
70-A _{0.9}	98.28	0.70	0.007

3.2. 三大指标试验结果

按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)中试验方法测定不同温拌沥青的 25℃ 针入度、15℃ 延度和软化点, 结果如表 5。

由下表可知, 添加 Alube 后, 沥青的针入度变化微小。随着 Alube 剂量的增加, 沥青的针入度都以细微的幅度增大, 但其增幅几乎可以忽略, 可能是本身 Alube 为液态状稀释了沥青导致的。添加 Alube 后, 随着剂量的增加, 70[#]沥青的延度有着细微的增大。Alube 和 Evotherm 的加入都对 70[#]沥青的软化点影响很小。综上, Alube 的加入对沥青的三大指标影响很小, 基本不改变沥青的基本性能。

Table 5. Results of three indexes of different asphalt
表 5. 不同沥青三大指标试验结果

不同沥青	针入度(25℃, 5 s)/0.1 mm	延度(15℃)	软化点
70 [#] 沥青	76.4	46	47
70-A _{0.3}	76.8	46	47
70-A _{0.5}	76.7	47	47
70-A _{0.7}	76.2	47.5	45.5
70-A _{0.9}	76.9	48	45
70-E	76.9	47	46.5

3.3. 布氏黏度试验结果

各沥青在 110~160℃ 下, 不同剪切速率下的黏度值如表 6 所示。

Table 6. Viscosity of 70[#] asphalt sample at different temperatures (Pa·s)
表 6. 温拌 70[#]沥青试样各温度下的黏度(Pa·s)

不同沥青	温度/ $^{\circ}$ C					
	110	120	130	140	150	160
70 [#] 沥青	1.448	0.912	0.521	0.316	0.204	0.148
70-A _{0.3}	1.437	0.908	0.518	0.315	0.204	0.149
70-A _{0.5}	1.425	0.880	0.517	0.316	0.201	0.135
70-A _{0.7}	1.420	0.899	0.515	0.311	0.199	0.139
70-A _{0.9}	1.407	0.892	0.494	0.303	0.195	0.136
70-E	1.441	0.887	0.517	0.311	0.198	0.134

由上表可知, 添加 Alube 后, 在同一温度和同一剪切速率下, 沥青所受的剪应力有着细微的减小, 说明 Alube 温拌剂细微的降低了沥青的黏度, 随剂量的增大有所增大。总体上, 表面活性剂型温拌剂 Alube 和 Evotherm 都对沥青的黏度几乎无影响。

3.4. 变速拌和试验结果

将各 Alube 温拌沥青和 Evotherm 温拌沥青的拌和功率汇总于表 7。

Table 7. Mixing power of asphalt mixture at different mixing temperatures and rates (W)

表 7. 沥青混合料在不同拌和温度和速率下的拌和功率(W)

混合料类型	拌和温度 T/°C	拌和速率/(r·min ⁻¹)			
		20	30	40	50
70#沥青	140	129.4	185.2	238.7	286.5
	150	122.4	168.0	212.2	264.5
	160	115.1	156.0	203.5	245.3
	170	106.6	145.0	185.3	226.8
	180	100.4	140.7	175.3	214.9
70-A _{0.3}	140	125.9	175.0	221.4	274.7
	150	111.7	161.0	199.9	245.7
	160	109.1	149.5	188.5	232.4
	170	102.1	142.4	176.0	215.5
	180	96.0	131.3	162.1	200.0
70-A _{0.5}	140	116.6	165.4	209.8	256.1
	150	113.1	151.6	195.0	239.8
	160	104.4	143.3	185.2	220.0
	170	97.5	132.0	170.5	203.0
	180	94.5	124.9	166.8	194.4
70-A _{0.7}	140	112.3	159.1	204	243.2
	150	106.9	145.0	189.5	227.1
	160	98.4	134.8	173.1	206.5
	170	96.2	129.1	162.7	198.2
	180	89.9	124.1	152.7	187.4
70-A _{0.9}	140	108.9	147.0	192.5	232.2
	150	102.6	142.3	181.1	217.7
	160	95.8	129.8	160.1	202.5
	170	92.3	128.0	157.6	192.3
	180	87.8	122.2	150.6	182.0
70-E	140	116.1	161.7	208.1	251.8
	150	108.2	154.0	191.7	233.4
	160	101.7	140.8	175.9	217.1
	170	100.6	134.0	170.1	208.7
	180	92.5	123.4	159.2	189.9

拌和功率不仅由沥青混合料所受内部剪切的应力决定，还受拌和温度、拌和速率的影响。拌和功率随拌和速率的变化情况反映了沥青混合料的拌和流动特性。将上表的测试结果进行线性回归，绘制“拌和功率 - 拌和速率”流变图，如图 1 所示。

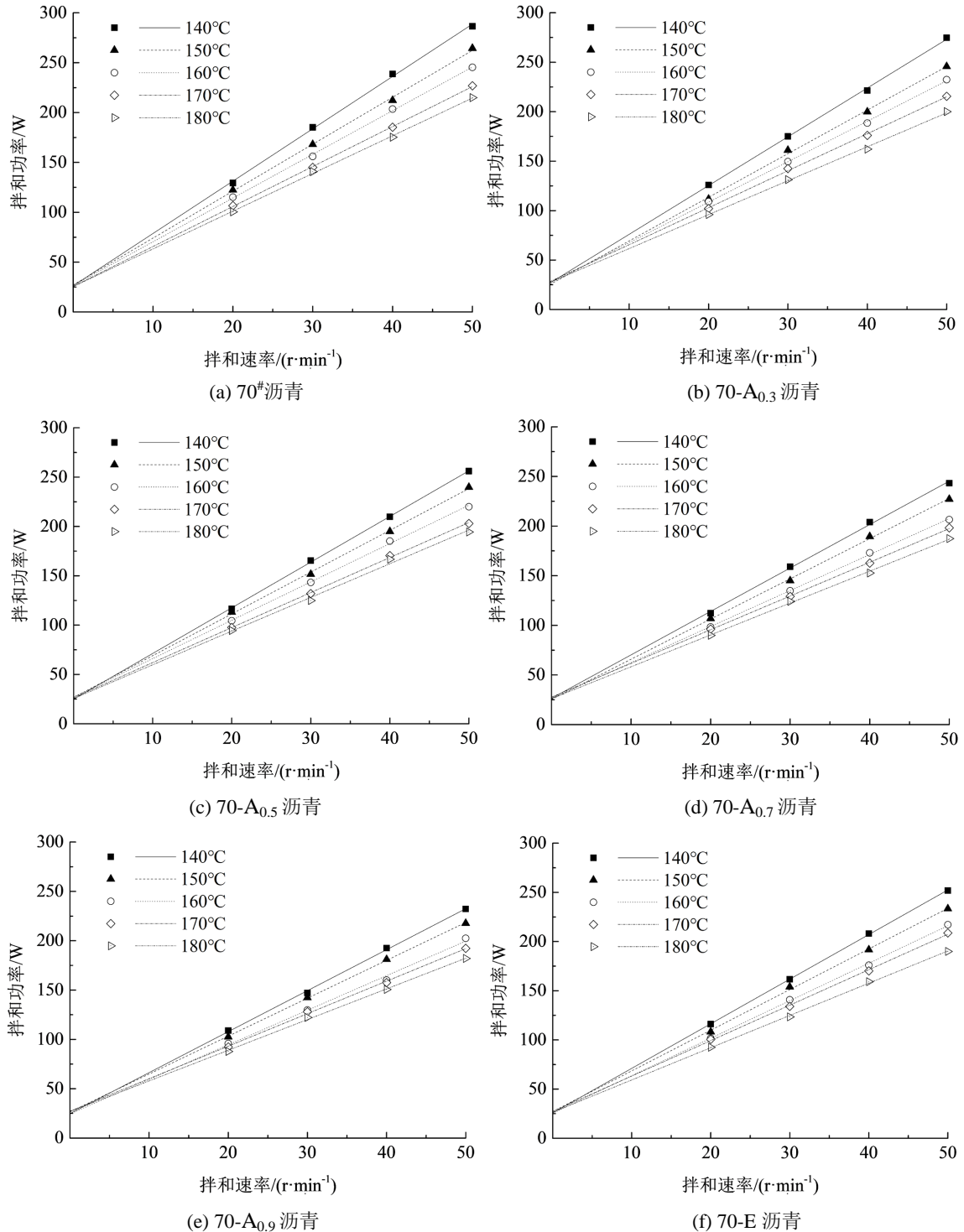


Figure 1. Mixing power - mixing rate rheological diagram of warm mix asphalt

图 1. 温拌沥青的拌和功率 - 拌和速率流变图

从“拌和功率 - 拌和速率”流变图中可以看出：各沥青混合料的流变图反映出同一规律，即拌和功率与拌和速率呈线性关系。当拌和速率为零时，其截距为正值，此时的拌和功率反映了沥青混合料由静止变为运动状态所需的能量，也就是沥青混合料运动变形所需克服的内在塑限；斜率在一定程度上反映了沥青混合料拌和的难易程度。因此，将 F 称为拌和塑限，表示直线的截距； λ 称为拌和黏度，表示直线的斜率。

Alube、Evotherm 对拌和塑限影响很小，添加 Alube、Evotherm 后，沥青混合料的拌和黏度都降低。究其原因，表面活性剂型温拌剂不改变沥青的组成，只是起到润滑作用，降低了沥青混合料颗粒之间摩擦，即只对混合料之间的粘结力 c 的影响较大。

3.5. 温拌效果评价

基于混合料流变图，以 $V = 50 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、流动变形直线、坐标轴形成封闭区域(图 2)，计算其面积，公式如式(2)；以面积的倒数的百分率作为和易性指数，如式(3)。标准试验中，沥青混合料拌和锅的拌和公转速率为 $48 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。故选择拌合速率 $V = 50 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 作为参照。

$$S = \frac{1}{2}V(F + F + \lambda V) = 25(2F + 50) \quad (2)$$

$$I = \frac{100}{S} = \frac{2}{F + 25\lambda} \quad (3)$$

式中： V 为拌和速率($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)； F 为内在塑限(W)； λ 为拌和黏度(60 J/r)； S 为面积($\text{kW}\cdot\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)。

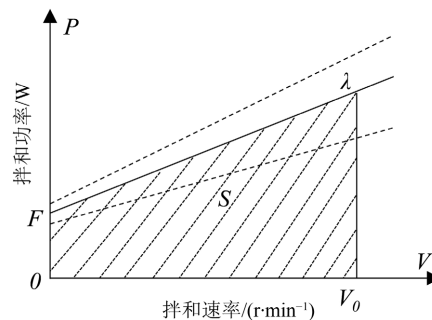


Figure 2. Workability index
图 2. 和易性指数

将各沥青混合料流变参数 F 、 λ 带入上式求得拌和和易性指数，见表 8。

Table 8. Mixing workability index of 70[#] warm mix asphalt mixture
表 8. 温拌 70[#]沥青混合料的拌和和易性指数

混合料类型	拌和温度 $T/^\circ\text{C}$				
	140	150	160	170	180
70 [#] 沥青	12.70	13.82	14.69	15.89	16.66
70-A _{0.3}	13.34	14.76	15.51	16.44	17.69
70-A _{0.5}	14.22	15.09	16.08	17.35	18.02
70-A _{0.7}	14.72	15.80	17.10	17.76	18.79
70-A _{0.9}	15.55	16.32	17.86	18.25	19.13
70-E	14.38	15.33	16.56	17.05	18.44

从表中数据可知, 温度越高, 沥青混合料的和易性指数越高, 沥青混合料越容易拌和。添加 Alube 和 Evotherm 后, 沥青混合料的和易性指数都明显提高, 表明其都有效改善了沥青混合料的和易性。

同沥青混合料的拌和和易性指数相同, 可认为它们的拌和难易程度相当。能确定合理的以此为基准的和易性指数范围, 便可通过公式 $I_r = a + bT$ 求出任何类型沥青混合料的拌和温度。以 70#沥青为基准, 拌和温度范围为 153℃~158℃, 代入可求出其他温拌沥青混合料的拌和温度, 通过与 70#沥青对比可确定不同温拌剂的降温效果。考虑经济效益、温拌效果等因素, 采用 0.7%剂量的 Alube 来验证温拌沥青混合料的温拌效果, 如表 9 所示。

Table 9. Reduction of mixing temperature of asphalt mixtures at different temperatures
表 9. 各温拌沥青混合料的拌和温度降低值

混合料类型	拌和温度降低值/℃
70#沥青	\
70-A _{0.7}	21
70-E	16

由表可知, Alube 具有良好的温拌效果, 相对于 70#沥青拌和温度降低 21℃, Evotherm 则降温 16℃, 说明添加剂量都为 0.7%时, Alube 的温拌效果优于 Evotherm。

4. 结论

1) Alube 和 Evotherm 作为表面活性剂型温拌剂对沥青技术性能几乎无影响, 但能增大沥青的亲水性, 减小其接触角。

2) 沥青混合料的拌和流动特性符合线性黏弹性流动特性, 拌和流动参数拌和塑限 F 、拌和黏度 λ 反映了沥青混合料的流动特性。Alube 和 Evotherm 都降低了温拌沥青混合料的 F 和 λ , 改善了混合料的拌和流动性。

3) 通过拌和和易性指数(I)评价了不同温拌混合料拌和和易性。结果表明 Alube 和 Evotherm 改善了沥青混合料的拌和和易性, 且 Alube 强于 Evotherm。

4) 确定了两种温拌剂的降温效果, 0.7%剂量下的 Alube 和 Evotherm 可分别降低其拌和温度约 21℃和 14℃, Alube 的温拌效果优于 Evotherm。

基金项目

安康市科技项目(AK2021-GY-13), 四川路桥项目(KY2021srbg-10-12)。

参考文献

- [1] 环保沥青再出发[J]. 中国公路, 2015(7): 80.
- [2] 罗伯特·海利, 马提亚·诺尔廷. 温拌技术的发展与现状[J]. 城市道桥与防洪, 2009(10): 53-56+136.
- [3] 梁波, 张海涛, 梁缘, 等. 温拌技术在沥青中的应用研究进展[J/OL]. 交通运输工程学报: 1-24. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1369.U.20230321.1527.002.html>, 2023-06-07.
- [4] 李德超. 温拌沥青混合料技术综述[J]. 石油沥青, 2008, 22(5): 1-5.
- [5] 董昭, 徐书东, 柳久伟, 等. 不同类型温拌剂对沥青性能影响[J]. 山东大学学报(工学版), 2023, 53(1): 18-24.
- [6] 刘金亮, 王正同, 侯英杰, 侯仁辉. 不同温拌剂的改性沥青流变特性微观分析[J]. 公路交通科技, 2022, 39(9): 23-32.
- [7] 陈伟. 温拌沥青混合料在海底隧道中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东建筑大学, 2012.

- [8] Bairgi, B.K., Syed, I.A. and Tarefder, R.A. (2017) Evaluation of Rutting and Stripping Potential of WMA with Different Additives. *International Conference on Sustainable Infrastructure 2017*, New York, 26-28 October 2017.
- [9] Zhang, J., Airey, G.D., Grenfell, J. and Yao, Z. (2017) Laboratory Evaluation of Rediset Modified Bitumen Based on Rheology and Adhesion Properties. *Construction and Building Materials*, **152**, 683-692.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.037>
- [10] 赵黎明, 颜加俊, 段冲. 表面活性类温拌剂降温效果评价方法研究[J]. 公路, 2016, 61(12): 210-213.
- [11] 中华人民共和国交通部. JTG F40-2004 公路沥青路面施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [12] 赵豫生. 季铵盐类表面活性剂温拌沥青混合料性能[J]. 公路交通科技, 2012, 29(8): 20-24.
- [13] 彭文举, 黄宇, 陈洪亮. 表面能理论在沥青与沥青混合料中应用研究进展[J]. 中外公路, 2017(S1): 92-96.
- [14] 延西利, 田辉黎, 延喜乐, 等. 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.
- [15] 唐真喜. 不同类型沥青混合料的拌和流动特性[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2018.