

沥青温拌性能的变速拌和试验评价研究

延喜乐¹, 宋 乐², 王钰洁³, 孙 毅², 延西利^{3*}

¹陕西省榆林市公路局, 陕西 榆林

²四川广绵高速公路有限责任公司, 四川 广元

³长安大学公路学院, 陕西 西安

收稿日期: 2025年4月6日; 录用日期: 2025年4月27日; 发布日期: 2025年5月8日

摘 要

沥青温拌技术的应用符合节能减碳发展战略, 在沥青路面铺筑中逐渐得到了较多应用。为了定量评价沥青温拌剂的温拌效果, 论文研究采用70#沥青和SBS改性沥青为基础沥青, 添加表面活性类温拌剂Alube (掺量0.7%)和有机降黏类温拌剂ACMP (掺量7%), 制备了温拌沥青及其AC-13沥青混合料, 测试了温拌沥青的技术性能, 利用自主开发的沥青混合料变速拌和试验装置, 试验研究了在不同温度下, 沥青混合料的拌和流动特性, 理论上提出了沥青混合料的拌和流动模型, 基于混合料的等黏温度差, 评价了温拌沥青的温拌效果。研究结果表明: (1) 沥青混合料的拌和流动性服从宾汉流变模型, 变速拌和试验从流变理论上引入了拌和塑限与拌和黏度两个流动参数, 通过分析混合料的黏温曲线及等黏温度差, 能够定量评价温拌沥青的温拌性能; (2) 有机降黏类温拌剂ACMP使得沥青的针入度和延度增大、软化点和黏度下降, 而表面活性类温拌剂Alube对沥青的技术性能几乎没有影响; (3) 温拌剂能够改善沥青混合料的拌和流动性, 降低混合料的拌和温度17℃~25℃, 表明变速拌和试验能够有效评价温拌混合料的温拌效果, 值得推荐标准化应用; (4) 有机降黏类温拌剂的掺入, 对同类沥青混合料的路用性能略有弱化, 而表面活性类温拌剂对沥青混合料的路用性能则有所改善。

关键词

沥青路面, 沥青温拌剂, 变速拌和试验, 拌和流动模型, 等黏温度, 温拌效果

Study on Evaluation of Warm Mixing Asphalt Effect by Variable Speed Mixing Test

Xile Yan¹, Le Song², Yujie Wang³, Yi Sun², Xili Yan^{3*}

¹Highway Bureau of Yulin, Yulin Shaanxi

²Sichuan Guang-Mian Expressway Co., LTD., Guangyuan Sichuan

³School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

Received: Apr. 6th, 2025; accepted: Apr. 27th, 2025; published: May 8th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 延喜乐, 宋乐, 王钰洁, 孙毅, 延西利. 沥青温拌性能的变速拌和试验评价研究[J]. 土木工程, 2025, 14(5): 970-980. DOI: 10.12677/hjce.2025.145105

Abstract

The application of warm mixing asphalt technology conforms to the development strategy of energy saving and carbon reduction, and it has been gradually applied in asphalt pavement. In order to quantitatively evaluate the warm mixing effect of warm mixing asphalt additive, this paper used 70# asphalt and SBS modified asphalt as the base asphalt, added chemical additive Alube (content 0.7%) and organic additives ACMP (content 7%), prepared warm mixing asphalt and its AC-13 asphalt mixture, and tested the technical performance of warm mixing asphalt. The mixing flow characteristics of asphalt mixture at different temperatures were studied experimentally by using the self-developed variable speed mixing test device of asphalt mixture. The mixing flow model of asphalt mixture was proposed theoretically. Based on the equal-viscosity temperature difference of the mixture, the warm mixing effect of warm mixing asphalt was evaluated. The results show that: (1) Mixing flowability of asphalt mixture follows Bingham rheological model. Two flow parameters, mixing plastic limit and mixing viscosity, are introduced from rheological theory in the variable speed mixing test. By analyzing the viscosity-temperature curve and equal-viscosity temperature difference of the mixture, the warm mixing performance of warm mixing asphalt can be evaluated quantitatively. (2) ACMP increases the penetration and durability of asphalt, and decreases the softening point and rotational viscosity, while Alube has little effect on the technical properties of asphalt. (3) The warm mixing agent can improve the mixing flow of asphalt mixture and reduce the mixing temperature of the mixture by 17°C~25°C, indicating that the variable speed mixing test can effectively evaluate the warm mixing effect of the warm mixing mixture, and it is worth recommending standardized application; (4) The addition of organic additive weakened the pavement performance of similar asphalt mixture slightly, while the chemical additive improved the pavement performance of asphalt mixture.

Keywords

Asphalt Pavement, Warm Mixing Asphalt Additive, Variable Speed Mixing Test, Mixing Flow Model, Equal-Viscosity Temperature, Warm Mixing Effect

Copyright © 2025 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

沥青温拌技术是一种新兴的绿色铺面技术, 与同类热拌沥青混合料相比, 温拌沥青混合料的拌和生产温度通常可以降低 20°C~30°C [1] [2]。沥青温拌技术应用于路面工程中, 对节能减碳、促进劳动保护、低温环境施工、保证工程质量等方面具有积极意义。从上个世纪末始, 沥青温拌技术即引起沥青及路面研究人员的高度重视, 开发了温拌剂产品及温拌沥青应用技术, 二十多年来在世界范围内逐渐得到了广泛应用。

沥青温拌技术的应用, 通常采用添加剂技术(温拌剂)和发泡技术两个技术手段, 目前在低温地区沥青路面铺筑中大多使用了沥青温拌剂。沥青温拌剂有有机降黏类温拌剂(organic additives)和表面活性类温拌剂(surfactant 或称 chemical additives)两种类型, 前者的掺量一般为沥青质量的 5%~9%, 后者为 0.5%~0.9%, 使用时与沥青机械混合即可[3]-[7]。

尽管国内外对于温拌剂的开发和温拌沥青的相关性能测试有许多成熟成果, 但温拌沥青的温拌效果到底怎么样? 目前还没有一个统一的试验评价方法, 更没有一个基于力学理论上的试验评价方法, 现阶段仅有一个美国于 2005~2006 年发布的变温压实试验技术指南[5]-[7], 是一个工程经验方法。由于温拌剂

产品类型有表面活性类和有机降黏类之分，其温拌的技术原理也不尽相同[1]，现有研究分析大多采用了黏温曲线法、变温压实法和拌和扭矩法来定量评价温拌效果[7]-[14]，但在实际工程应用中温拌效果到底如何，目前基本上仍然是一个模糊的概念，仍需要从流变理论上探讨这一问题。

沥青混合料是一种典型的黏滞性物质，在力学理论上，黏性物质的力学行为必然依赖于激励速率，且具有温度敏感性[15][16]。因此，对沥青混合料的拌和流动性分析，就需要控制拌和温度、变化不同的拌和速率进行测试，即采用变速拌和试验[17]-[19]，拌和速率越大，拌和扭矩或拌和功率越大。通过拌和流变图分析，建立拌和流变模型，研究模型参数及拌和流动特性，进而揭示混合料的温拌性能。有机降黏类温拌剂通过降低沥青的黏度而间接降低混合料的拌和黏度，表面活性类温拌剂则直接降低混合料的拌和黏度，二者最终都是降低了混合料的拌和黏度，从而实现温拌。因此，变速拌和试验不仅能够利用流变力学理论解答沥青混合料的拌和流动特性，而且能够同时适用于表面活性类和有机降黏类两种沥青温拌剂[1]。

论文研究利用自主开发的沥青混合料变速拌和试验装置，采用两种类型的沥青温拌剂(表面活性类 Alube 和有机降黏类 ACMP)，制备了温拌沥青及其混合料 AC-13，开展了沥青混合料的变速拌和试验研究。根据试验结果，分析“拌和功率-拌和速率”流变图，建立沥青混合料的拌和流动模型，引入拌和塑限与拌和黏度两个流动参数。最后，基于拌和黏度的等黏温度差分析，从理论上确定沥青温拌剂在混合料拌和过程中的温拌效果，以证明这种试验评价方法从理论分析到试验评价的可行性。

2. 试验材料

试验研究以 70#基质沥青和 SBS 改性沥青为基础沥青，采用课题组自主研发的表面活性类 Alube 和有机降黏类 ACMP 两种沥青温拌剂，制备了四种温拌沥青，对温拌沥青和石灰岩集料的技术指标进行了相关测试，对 AC-13 型沥青混合料进行了配合比设计。

2.1. 沥青及温拌剂

按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011) [20]，测试了基础沥青的技术性能，结果(见表 1)表明符合沥青路面施工技术规范[21]要求。

Table 1. Test values of technical index for bitumen 70# and SBS bitumen
表 1. 70#基质沥青和 SBS 改性沥青的技术指标实测值

测试指标	70#基质沥青	SBS 沥青	试验方法
针入度(25°C, 100 g, 5 s) /0.1 mm	76.4	76.1	T 0604-2011
延度(5°C, 5 cm/min)/cm	46	39	T 0605-2011
软化点/°C	47	84	T 0606-2011
密度(15°C)/(g·cm ⁻³)	1.023	1.021	T 0603-2011

沥青温拌剂 Alube 和 ACMP 的基本技术性状见表 2。两大类温拌剂的温拌原理为：表面活性类温拌剂 Alube 能够降低沥青的表面张力，提升沥青的润湿能力，改善沥青与集料之间的接触关系，提升沥青对集料的裹覆能力。在混合料的拌和及摊铺碾压过程中降低沥青与矿料的界面接触角，降低混合料的流动黏度，达到沥青混合料温拌的目的。表面活性类温拌剂的掺量较少，一般控制在沥青质量的 1%以内。

有机降黏类温拌剂 ACMP 中含有一定的油溶性活性剂，能够形成树脂断链型胶团结构，从而让沥青形成流动液态凝胶，能够在保证沥青和混合料的性能不受明显影响的前提下，实现混合料的温拌。在光照和空气的作用下，能够在混合料的碾压和摊铺过程中发生结链反应，使 ACMP 温拌沥青混合料中的粗树脂发生转变，形成高分子树脂，大幅度提升沥青混合料的强度，继而提高路面的承载能力，保证沥青

路面的使用性能。这类温拌剂的掺量一般控制在沥青质量的 10%以内。

Table 2. Technical index of warm mix additives
表 2. 沥青温拌剂的基本技术性能

温拌剂	25℃密度(g/cm³)	黏度 Pa·s	胺值(mg/g)	色相	固含量(%)
Alube	1.05	0.7 (25℃时)	500	淡黄色液体	≥99
ACMP	0.94~1.04	2.6 (45℃时)	/	黑色黏稠液体	/

2.2. 温拌沥青

温拌沥青的制备采用搅拌混合法,温拌剂的掺量为温拌剂与沥青的质量比,Alube 掺量为 0.7%,ACMP 掺量为 7%。利用烘箱将基础沥青加热至 120℃~130℃,然后根据沥青质量准确称取温拌剂的质量,将温拌剂加入到沥青中,设定剪切搅拌机转速 1500 转/分钟,剪切搅拌 15 min,制备得到温拌沥青。为了方便识别沥青试样及其混合料,对各不同沥青试样做了识别编号(见表 3)。

Table 3. ID label of different bitumen samples
表 3. 不同温拌改性沥青试样的编号

基础沥青	温拌剂	温拌剂特性	温拌剂掺量/%	试样编号
70#沥青	无	/	0	70#
	Alube	表面活性类	0.7	70-A
	ACMP	有机降黏类	7	70-P
SBS 沥青	无	/	0	SBS
	Alube	表面活性类	0.7	SBS-A
	ACMP	有机降黏类	7	SBS-P

按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011) [20],测试了不同沥青试样(表 3)的针入度、延度、软化点和布氏旋转黏度,试验结果见表 4。试验结果表明,温拌剂掺入 70#基质沥青和 SBS 改性沥青中后,有机降黏类温拌剂的掺入显著增大了基础沥青的针入度和延度、大幅减小了软化点和黏度;而表面活性类温拌剂对基础沥青的技术指标影响很小,最大变化量小于 3%。

Table 4. Technical index of different bitumen samples
表 4. 不同沥青试样的技术指标

沥青试样	70#	70-A	70-P	SBS	SBS-A	SBS-P
针入度/0.1 mm	76.4	76.2	132	76.1	76.3	133.2
15℃延度/cm	46	47	65	39	40	70
软化点/℃	47	45.5	39	84	82.5	77
135℃布氏黏度/Pa·s	0.417	0.414	0.278	1.282	1.265	0.840

2.3. 集料及沥青混合料

沥青混合料由沥青和碎石集料混合组成,试验所用集料为陕西泾阳天裕制砂厂提供的石灰岩,石灰岩集料分为 0~5 mm 的机制砂、5~10 mm 的细碎石和 10~15 mm 的粗碎石三档,矿粉与集料属于同一批

次，由石灰岩轧制而成。按照《公路工程集料试验规程》(JTGE42-2004) [22]，对集料和矿粉的相关技术指标进行试验检测，所有测试结果均符合施工技术规范[21]的相关要求。

利用上述三档集料和矿粉，进行了 AC-13 型混合料回配设计，采用马歇尔试验，确定出 70#沥青和 SBS 改性沥青混合料的最佳油石比分别为 4.9%和 5.1%。同时，掺加温拌剂的四种沥青混合料的最佳沥青用量与其各自所对应的基础沥青混合料的最佳沥青用量一致。

3. 变速拌和试验

表征沥青温拌效果的试验评价方法目前仅有美国的变温压实法[5]-[7]。这个方法不仅试验操作繁琐，试验周期较长，工作强度大，而且仍为工程经验法，更主要的是没有考察热拌混合料的流动特性，没有从理论上回答沥青温拌的力学原理问题。对此，论文研究课题组自主开发了一种“变速拌和功率测试”装置，在不同拌和速率和不同拌和温度下测试沥青混合料的拌和功率。利用流变模型理论，分析不同沥青混合料的拌和流动参数(拌和黏度、拌和塑限)，进一步分析拌和流动特性，并最终确定各类型温拌剂的温拌效果。拌和黏度越小，所消耗的搅拌功率越少，混合料的拌和流动性越好，沥青的温拌效果越明显。

变速拌和试验装置以传统马歇尔拌和设备为平台，进行了技术改装，主要是采用大功率的 380V 三相异步变频电机，加装了变速拌和系统、功率测试系统和数据存储系统，变速拌和试验装置的具体结构体系和技术性能详见文献[17] [23]，可用来分析沥青混合料的拌和流动性和温拌沥青的温拌性能。

变速拌和试验基于流变学理论，根据设定的拌和速率与测试的拌和功率，绘制流变图，分析沥青混合料的拌和流变特性。影响混合料拌和功率的主要因素有混合料的质量、混合料的拌和温度、拌和时的速率以及拌和的时间等。混合料质量的选取考虑了搅拌桨插入深度一半以上，且可以满足一块车辙板的质量，多次调试试验发现以 12 kg 为宜。拌和温度的选取综合考虑了基质沥青和 SBS 改性沥青的生产温度。拌和速率在设备的搅拌速率可调节范围内(15~60 r·min⁻¹)整数设定。拌和时间按马歇尔拌和试验规程[20]规定的 3 min 控制。具体试验方案如表 5 所示。

Table 5. Execute program for variable speed mixing test
表 5. 变速拌和试验的实施方案

类别	内容
级配类型	AC-13，石灰岩集料
沥青种类	70 [#] , 70-A, 70-P, SBS, SBS-A, SBS-P
油石比	70 [#] 沥青 4.9%、SBS 沥青 5.1%
混合料质量	12 kg
拌和温度/℃	140, 150, 160, 170, 180
拌和速率/r·min ⁻¹	20, 30, 40, 50

4. 拌和流动特性

试验研究在五个不同的拌和温度下(表 5)，对所选的六种沥青混合料(表 3)，进行了变速拌和试验，测试了不同拌和速率对应的拌和电功率，试验结果见图 1~5，这五个图示的分析坐标为“拌和功率 - 拌和速率”，即为沥青混合料的拌和流变图[17]-[19]。由图 1~5 可以看出，在给定试验温度下，拌和功率与拌和速率之间具有很好的线性关系。从而说明，沥青混合料的拌和流动方程为一条不过坐标原点、具有正截距和正斜率的直线，记为：

$$P = F + \lambda \cdot V \tag{1}$$

式中： P ——拌和功率(W)； V ——拌和速率(r/min)； F ——直线的截距(W)； λ ——直线的斜率(60 J/r)。

在流变学中，通常把剪切应力(τ)和剪切应变速率($\dot{\gamma}$)的坐标图定义为流变图[16]。在物理意义上，剪切应变速率与拌和速率、剪切应力与拌和功率所描述的流动特性是对应的，只是定量取值不同而已。这样一来，公式(1)所描述的流动方程就完全契合了宾汉黏塑性流动模型。从而由试验结果表明，沥青混合料的拌和流动特性服从线性黏塑性的宾汉流变模型，可用拌和塑限 F 和拌和黏度 λ 两个流动参数来描述。拌和黏度(λ)为拌和温度(T)的函数，温度越高，拌和黏度越小。

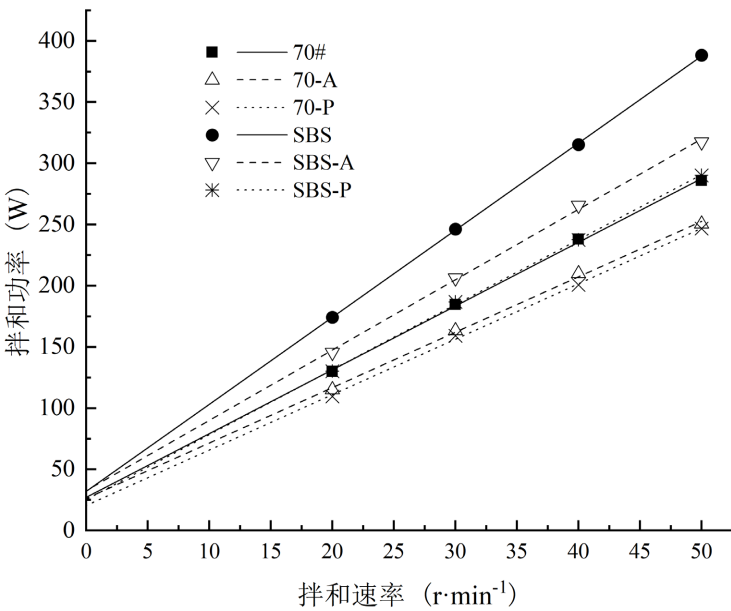


Figure 1. Mixing rheograph of different mixtures at 140°C
图 1. 不同沥青混合料 140℃时的拌和流变图

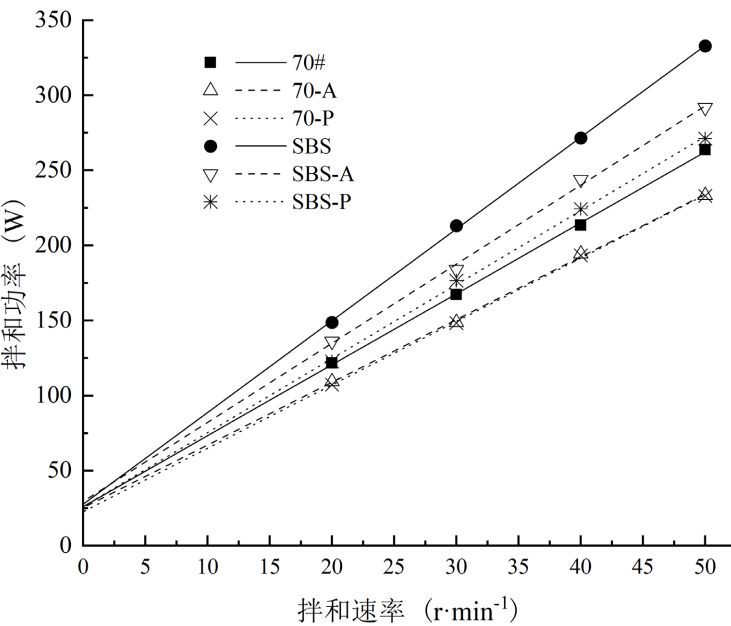


Figure 2. Mixing rheograph of different mixtures at 150°C
图 2. 不同沥青混合料 150℃时的拌和流变图

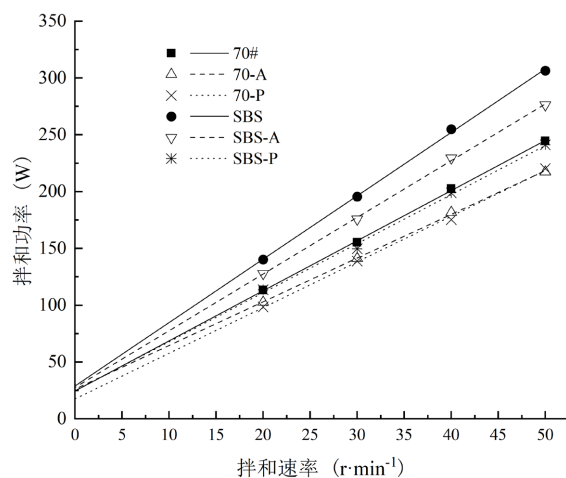


Figure 3. Mixing rheograph of different mixtures at 160°C

图 3. 不同沥青混合料 160℃时的拌和流变图

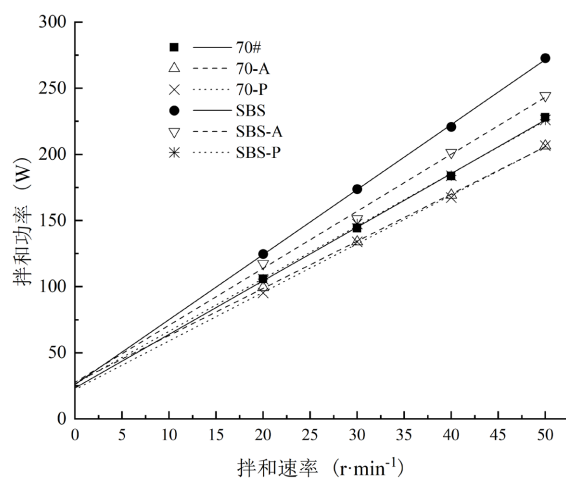


Figure 4. Mixing rheograph of different mixtures at 170°C

图 4. 不同沥青混合料 170℃时的拌和流变图

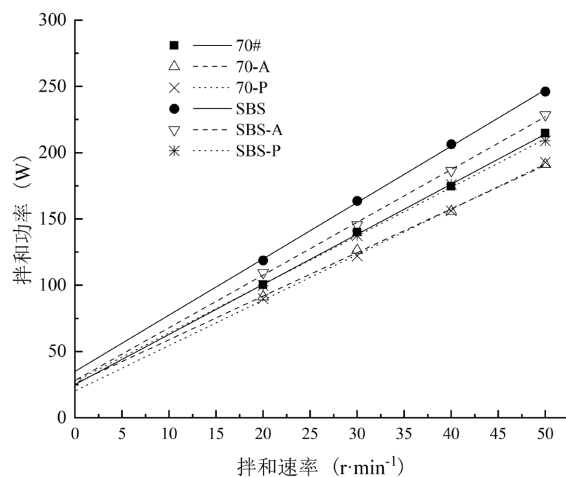


Figure 5. Mixing rheograph of different mixtures at 180°C

图 5. 不同沥青混合料 180℃时的拌和流变图

5. 温拌效果分析

通过分析图 1~5 所示的试验结果(拌和流变图),可以发现: (1) 相同温度下, SBS 沥青混合料的流动直线斜率(拌和黏度)总是大于 70#沥青混合料, 符合常规认知; (2) 温拌沥青混合料的流动直线斜率(拌和黏度)总是小于所对应的沥青混合料; (3) 拌和温度越高, 沥青混合料的流动直线斜率越小, 亦即拌和黏度越小, 越易于拌和, 和易性变好。这样的一些基本认识, 让我们很容易联想到了沥青的黏温曲线图[9], 可以通过试验结果(图 1~5), 求得各沥青混合料在不同温度下拌和黏度(直线的斜率), 绘制混合料的黏温曲线图, 再根据等黏度差计算, 从理论上定量分析沥青的温拌效果。

因此, 对图 1~5 的试验结果进行线性回归分析, 具有很好的线性相关性($R^2 > 0.99$)。回归结果得到直线斜率, 亦即沥青混合料的拌和黏度, 结果见表 6。再根据表 6 数据, 绘制混合料的黏温曲线图, 见图 6。由图 6 可以看出: 在半对数坐标系中, 随着拌和温度的升高, 沥青混合料的拌和黏度呈线性减小; 相同拌和黏度时, 温拌沥青混合料的拌和温度大幅降低; 相同温度时, 温拌沥青混合料的拌和黏度明显减小。

Table 6. Mixing viscosity of each bituminous mixtures at different mixing temperatures ($60 \text{ J}\cdot\text{r}^{-1}$)
表 6. 各沥青混合料在不同温度下的拌和黏度($60 \text{ J}\cdot\text{r}^{-1}$)

混合料类别	拌和温度				
	140°C	150°C	160°C	170°C	180°C
70#	5.25	4.71	4.38	4.01	3.78
70-A	4.38	4.12	3.83	3.57	3.33
70-P	4.40	3.96	3.73	3.52	3.29
SBS	7.11	6.11	5.58	4.85	4.20
SBS-A	5.35	4.86	4.58	4.13	3.69
SBS-P	5.31	4.93	4.32	3.98	3.66

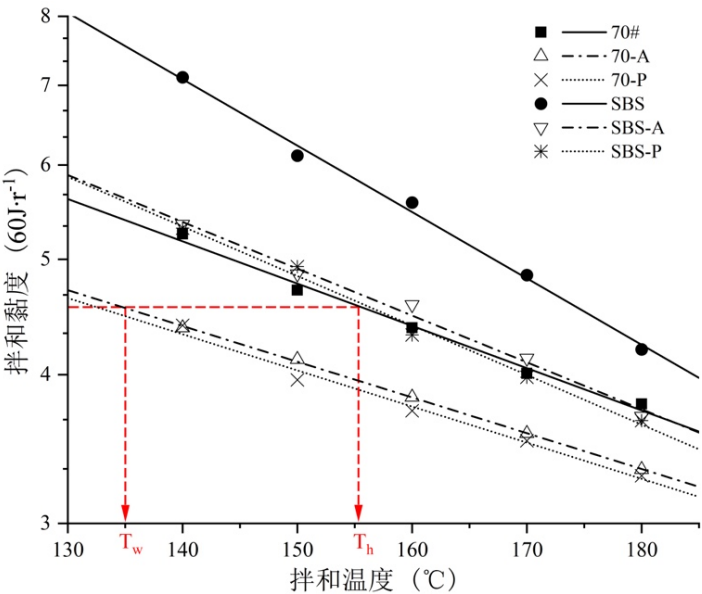


Figure 6. Mixing viscosity-temperature curve of different bituminous mixtures
图 6. 不同沥青混合料拌和的黏温曲线图

对图 6 所示的黏温曲线进行半对数线性回归(相关系数在 0.98 以上), 即可得到沥青混合料黏温曲线的数学表达式如下:

$$\lg \lambda = a - b \cdot T \quad (2)$$

式中: λ 为沥青混合料的拌和黏度, 单位 $60 \text{ J} \cdot \text{r}^{-1}$; T 为拌和温度, 单位 $^{\circ}\text{C}$; a , b 为回归参数。

这样, 对于热拌和温拌两种沥青混合料, 当设定相同的拌和黏度(λ_e)时, 如果通过试验结果确定了回归参数 a 和 b , 那么热拌和温拌混合料的拌和温度差 ΔT 即可由式(3)计算得到, 这个温度差 ΔT 即为温拌剂对沥青的温拌效果。通常称 ΔT 为等黏温度差。

$$\Delta T = T_h - T_w = \frac{1}{b_h} (a_h - \lg \lambda_e) - \frac{1}{b_w} (a_w - \lg \lambda_e) \quad (3)$$

式中: 下标 h 表示热拌混合料; 下标 w 表示温拌混合料; 其它符号同前。

以沥青路面施工技术规范[21]的推荐值为例, 当取普通沥青的黏度范围为 $0.17 \pm 0.02 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时, 在图 6 中对应的混合料拌和温度范围为 $151^{\circ}\text{C} \sim 155^{\circ}\text{C}$, 此时拌和黏度范围为 $4.67 \sim 4.83$ (单位 $60 \text{ J} \cdot \text{r}^{-1}$)。以此拌和黏度的下限和上限值作为混合料等拌和黏度(λ_e)值, 计算各沥青混合料对应的拌和温度, 结果如表 7。

Table 7. Mixing temperatures of different mixtures by variable speed mixing test
表 7. 变速拌和法确定混合料的拌和温度

混合料类型	拌和温度范围/ $^{\circ}\text{C}$	拌和温度中值/ $^{\circ}\text{C}$
70 [#]	151~155	153
70-A	129~133	131
70-P	126~130	128
SBS	168~171	169
SBS-A	150~154	152
SBS-P	148~152	150

由表 7 数据可以看出:(1) 总体来讲, 改性沥青混合料的拌和温度高于基质沥青混合料约 $10^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$, 符合常规认识, 也表明变速拌和试验评价方法的有效性;(2) 添加温拌剂后, 70[#]沥青混合料的拌和温度降低约 $22^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$, SBS 沥青混合料的拌和温度降低约 $17^{\circ}\text{C} \sim 19^{\circ}\text{C}$, 表明相同温拌剂掺量时, 对基质沥青的温拌效果要更好一些;(3) 在本试验研究给出的温拌剂掺量下, 有机降黏类温拌剂的温拌效果要略好于表面活性类温拌剂约 $2^{\circ}\text{C} \sim 3^{\circ}\text{C}$, 当然, 温拌效果与温拌剂的掺量密切相关[18]。

由此可见, 应用变速拌和试验和流变学理论, 测试沥青混合料的拌和黏度, 通过混合料的黏温曲线分析和等黏温度差计算, 定量确定沥青混合料的拌和温度, 最终能够定量评价温拌沥青的温拌效果, 表明变速拌和试验对定量评价沥青温拌效果的可行性和实用性, 值得推荐应用。

6. 路用性能检验

另外, 按照沥青混合料试验规程[20], 论文研究还测试了各沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性和水稳定性, 检验了温拌沥青混合料的路用性能, 测试结果见表 8。由表 8 所列数据可以看出:(1) 各沥青及温拌沥青混合料的路用技术性能都能满足沥青路面施工技术规范[21]的要求;(2) 表面活性类温拌剂 Alube 对原沥青混合料的路用性能有所改善和提升, 而有机降黏类温拌剂 ACMP 则有略微弱化, 但只是相对于原沥青混合料而言, 并不影响工程技术使用要求[24]-[26]。

Table 8. Experimental results of pavement performance for warm 70# asphalt mixtures
表 8. 温拌 70# 基质沥青混合料的路用技术性能测试结果

沥青混合料	马歇尔稳定度 MS/kN	动稳定度 DS/次/mm	低温弯拉强度 R_B /MPa	低温弯拉应变 $\varepsilon_B/\mu\varepsilon$	残留稳定度 $MS_0/\%$	劈裂强度比 TSR/%
70#	12.5	1595	5.82	2587	87.5	81.0
70-A	13.2	2695	7.75	3140	90.5	85.0
70-P	8.7	1435	6.09	2499	86.8	80.4
SBS	13.8	4577	7.89	3590	93.2	86.2
SBS-A	14.1	4662	9.21	3932	94.6	88.2
SBS-P	10.2	4126	7.22	3860	87.8	82.6

7. 结语

(1) 变速拌和试验从理论上揭示了沥青混合料的拌和流动特性, 服从宾汉流变模型; 通过分析混合料的黏温曲线及等黏温度差, 能够定量评价温拌沥青的温拌效果, 该试验评价方法值得推荐应用。

(2) 两种类型的沥青温拌剂, 对基础沥青技术性能的影响不同, 有机降黏类温拌剂使得沥青的针入度、延度等增大, 软化点、布氏黏度等减小, 而表面活性类温拌剂则基本上不改变沥青的技术性能。

(3) 有机降黏类温拌剂的掺量为 7% 时和表面活性类温拌剂的掺量为 0.7% 时, 二者具有大致相同的温拌效果, 降低拌和温度约 17℃~25℃; 温拌剂对基质沥青比对 SBS 沥青有更好的温拌效果。

(4) 在路用技术性能方面, 温拌沥青混合料均能满足规范要求; 相对于原沥青混合料, 有机降黏类温拌剂略微弱化了路用性能, 表面活性类温拌剂则有一定程度的改善与提升。

(5) 下一步需要标准化变速拌和试验方法, 在工程实践中推广应用。

参考文献

- [1] 延西利, 郑涛, 蒋双全, 等. 沥青温拌技术分类及温拌效果的试验评价方法. 材料导报, 2024, 38(4): 80-87.
- [2] EAPA (2014) Position Paper. The Use of Warm Mix Asphalt. European Asphalt Pavement Association.
- [3] Capitão, S.D., Picado-Santos, L.G. and Martinho, F. (2012) Pavement Engineering Materials: Review on the Use of Warm-Mix Asphalt. *Construction and Building Materials*, **36**, 1016-1024.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.038>
- [4] Kim, Y., Lee, J., Baek, C., Yang, S., Kwon, S. and Suh, Y. (2012) Performance Evaluation of Warm- and Hot-Mix Asphalt Mixtures Based on Laboratory and Accelerated Pavement Tests. *Advances in Materials Science and Engineering*, **2012**, Article ID: 901658. <https://doi.org/10.1155/2012/901658>
- [5] Hurley, G.C. and Prowell, B.D. (2005) Evaluation of Aspha-Min Zeolite for Use in Warm Mix Asphalt. NCAT Report 05-04.
- [6] Hurley, G.C. and Prowell, B.D. (2005) Evaluation of Sasobit for Use in Warm Mix Asphalt. NCAT Report 05-06.
- [7] Hurley, G.C. and Prowell, B.D. (2006) Evaluation of Evotherm for Use in Warm Mix Asphalt. NCAT Report 06-02.
- [8] 陈骁, 杨平, 吴亚中, 等. 基于黏温特性的沥青混合料施工温度指标[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2012, 32(2): 45-51.
- [9] 延西利, 雍黎明, 延梦璐, 等. 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.
- [10] Abed, A., Thom, N. and Grenfell, J. (2019) A Novel Approach for Rational Determination of Warm Mix Asphalt Production Temperatures. *Construction and Building Materials*, **200**, 80-93.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.082>
- [11] Wang, C., 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>
- [12] 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.

-
- [13] Wu, C.F., Zeng, M.L., Wang, M.W., *et al.* (2010) Determination of the Mixing and Compaction Temperatures for Warm Mix Asphalt with Sasobit. *Journal of Hunan University (Natural Science Edition)*, **37**, 1-5.
- [14] 魏建国, 王兆仑, 付其林. 温拌沥青混合料施工温度确定方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2013, 33(6): 17-20.
- [15] Di Benedetto, H. (2005) *Matériaux Routiers Bitumineux 2*. Lavoisier-Hermès Science Publications.
- [16] 延西利. 道路材料流变学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Yan, X., Wang, Y., Li, K., Jiang, S. and Pu, J. (2022) Variable Speed Mixing Test and Mixing Flowability of Asphalt Mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, **24**, Article 2108545.
<https://doi.org/10.1080/10298436.2022.2108545>
- [20] 中华人民共和国行业标准. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20-2011 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [21] 中华人民共和国行业标准. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40-2004 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [22] 中华人民共和国行业标准. 公路工程集料试验规程: JTG E42-2005 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [23] 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.
- [24] 四川省地方标准. ACMP 温拌改性沥青应用技术(DB51/T 2512 2018) [S]. 成都: 四川省质量技术监督局, 2018.
- [25] Menapace, I., Masad, E., Little, D., Kassem, E. and Bhasin, A. (2014) Microstructural, Chemical and Thermal Analyses of Warm Mix Asphalt. In: *Sustainability, Eco-Efficiency, and Conservation in Transportation Infrastructure Asset Management*, CRC Press, 157-168.
- [26] 杜鹏. ACMP 温拌沥青混合料的路用性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2014.