

文章编号:1001-7372(2015)08-0001-07

# ACMP 沥青温拌性能的黏温曲线分析

延西利<sup>1</sup>, 雍黎明<sup>2</sup>, 延梦璐<sup>1</sup>, 王利娟<sup>1</sup>, 蒋万星<sup>3</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 四川省交通运输厅公路局, 四川 成都 610041; 3. 四川新巩固建材有限公司, 四川 眉山 620860)

**摘要:**采用沥青黏温曲线分析法定量研究了温拌沥青的温拌性能,提出了一种具体的试验方法和相应的技术指标。试验选取3个型号的ACMP温拌沥青和2种热拌沥青(基质沥青和改性沥青),通过布氏黏度试验,测试了沥青的黏度,绘制了所选5种沥青在不同温度下的流变图,分析其流变特性,并利用黏温曲线法对比分析了温拌沥青和热拌沥青的拌和温度变化。研究结果表明:用布氏黏度计测试的黏度为动力黏度,沥青流变特性服从牛顿黏性定律;沥青黏度随温度变化的黏温曲线可用来评价沥青的温拌性能;ACMP温拌沥青的拌和温度比热拌基质沥青低10℃~20℃,具有一定的温拌性能。

**关键词:**道路工程;ACMP沥青;布氏试验;流变特性;黏温曲线;温拌性能

**中图分类号:**U414.1 **文献标志码:**A

## Analysis of Viscosity-temperature Curve About Warm Mix Property of ACMP Bitumen

YAN Xi-li<sup>1</sup>, YONG Li-ming<sup>2</sup>, YAN Meng-lu<sup>1</sup>, WANG Li-juan<sup>1</sup>, JIANG Wan-xing<sup>3</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Highway Bureau of Transportation Department of Sichuan Province, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. Sichuan Xingonggu Building Materials Technology Co., Ltd., Meishan 620860, Sichuan, China)

**Abstract:** Warm mix property of warm mix bitumen was quantitatively researched by applying the viscosity-temperature curve method, and a practical test method and corresponding technical indices were provided. 3 types of ACMP warm mix bitumen and 2 kinds of hot mix bitumen (modified and not) were chosen to measure the bitumen viscosity by applying Brookfield test, the rheological behaviour was analyzed by drawing the rheogram of those five chosen bitumens under different temperatures, and the mix temperature change of warm and hot mix bitumen was compared with the viscosity-temperature curve method. The results show that Brookfield's viscosity is the dynamic viscosity, and rheological behaviour of bitumen obeys the Newton's law of viscosity; the viscosity-temperature curve which describes the temperature variation of different bitumens in the same viscosity can be used to evaluate the warm mix property of bitumen; the mix temperature of ACMP warm mix bitumen is 10℃ to 20℃ lower than that of hot mix bitumen, so it presents a certain warm mix property.

**Key words:** road engineering; ACMP bitumen; Brookfield test; rheological behaviour; viscosity-temperature curve; warm mix property

收稿日期:2014-10-12

基金项目:四川省交通科技项目(2011A7-4-1,2012B1-1);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2011ZD013)

作者简介:延西利(1963-),男,陕西绥德人,教授,工学博士,E-mail:xili.yan@chd.edu.cn.

0 引 言

温拌沥青混合料由于具有节能减排、环境友好的技术优势,目前在路面铺筑特别是在路面养护中开始得到了应用,属于前沿技术,其研究重点主要集中于路用性能和施工工艺方面,并取得了一些宝贵成果<sup>[1-17]</sup>。但如何评价温拌沥青的温拌效果或温拌程度,尚未有一个系统的标准方法。沥青温拌技术的应用仍然局限于感性认识,通过一定的试验方法和技术指标评价沥青的温拌性能,仍为该领域的短板,需要系统研究,以期形成一个系统的技术标准。

关于沥青混合料的拌和温度,大致有一个约定俗成的认识:①热拌沥青混合料(HMA)的拌和温度在 150 ℃~180 ℃之间;②温拌沥青混合料(WMA)为 80 ℃~120 ℃;③冷拌沥青混合料(CMA)为 15 ℃~40 ℃。目前已形成较多的温拌沥青产品或技术,如硫化沥青 Thiopave、泡沫沥青 WMA-Foam、沸石矿粉 Asphalt-Min、乳化分散技术 Evotherm、Sasobit 降黏剂等<sup>[11-15]</sup>,但关于温拌性能评价方法的研究较少。此外,一些温拌沥青产品在实现混合料温拌效果的同时,又有可能降低路用技术性能,这也是一个值得关注的研究课题<sup>[12,16]</sup>。

笔者所在的研究团队从 2003 年始即开展了冷拌和温拌沥青研究,铺筑了一些实体工程<sup>[13-16]</sup>,总结了试验评价沥青温拌性能的 3 个方法:①黏温曲线法;②变温击实法;③拌和功率法。这些方法均基于现有仪器平台实现,研究成果将陆续撰文介绍,本文仅介绍黏温曲线法。

本文选取 3 个型号的 ACMP 温拌沥青和 2 种热拌沥青(70<sup>#</sup> 基质和 SBS 改性),采用布氏黏度计,测试沥青的黏度,绘制不同温度下的流变图,通过黏温曲线分析,研究沥青黏度随温度的变化规律,验证黏温曲线法的适用性。

1 ACMP 温拌沥青

用 ACMP 沥青改性剂生产的沥青为 ACMP 温拌沥青。ACMP 沥青改性剂是一种温拌改性剂,由四川新巩固建材有限公司独家研发生产<sup>[14-16]</sup>,产品命名中的英文字母是根据生产改性剂所用的 4 类主要原材料的英文首写字母确定的。

ACMP 沥青改性剂的生产以废旧汽车轮胎橡胶粉、废旧塑料粉为主要原料,再添加一部分有机助剂,采用化学法合成(图 1)。产品生产时大量使用了废旧橡胶、废旧塑料等材料,变废为宝,节约能源,

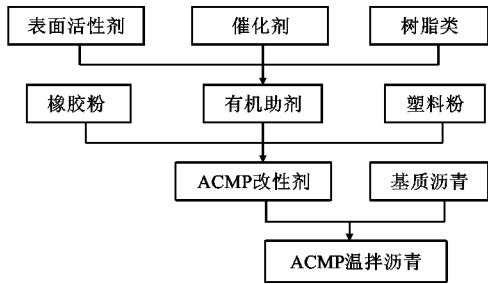


图 1 ACMP 温拌沥青的制备流程

Fig. 1 Procedure of Producing ACMP Warm Mix Bitumen

促进了环境保护,具有良好的社会经济效益。

研发 ACMP 沥青改性剂的主要目标是:废旧利用、降黏温拌,改善基质沥青的路用技术性能。通过大量工程实践,确定以 70<sup>#</sup> 沥青为基质沥青,按 ACMP 沥青改性剂的剂量不同,初步定型生产了 ACMP1, ACMP2, ACMP3 三种温拌沥青,产品的基本性状见表 1。ACMP 中基质沥青的选择,应考虑道路交通量、施工条件和气候条件等因素,符合技术规范<sup>[18]</sup>的 70<sup>#</sup>~130<sup>#</sup> A 级沥青均可使用。

表 1 3 种型号 ACMP 沥青的基本组成及物理性状

Tab. 1 Basic Compositions and Physical Characters of Three Kinds of ACMP Bitumen

沥青型号	ACMP1 沥青	ACMP2 沥青	ACMP3 沥青
70 <sup>#</sup> 基质沥青用量 (质量分数)/%	90	87	83
ACMP 改性剂用量 (质量分数)/%	10	13	17
物理性状	黑色硬质膏状	黑色软质膏状	黑色软质膏状
固化速度	快凝	中凝	慢凝

2 沥青的技术性能

对 3 个型号的 ACMP 温拌沥青(表 1)和 2 种热拌沥青(70<sup>#</sup> 基质沥青和 SBS 改性沥青),按照规范<sup>[19]</sup>进行了沥青的基本技术性能试验及老化和离析试验,试验结果见表 2。由于 ACMP 沥青质地比较柔软且呈膏状,标准温度 25 ℃时的针入度测试不可操作,故进行了低温针入度测试,同理测试了其 5 ℃时的延度,并测试了变温条件下的针入度,如图 2 所示。

薄膜老化试验结果详见文献<sup>[14]</sup>、<sup>[15]</sup>。综合分析试验结果发现,ACMP 温拌沥青具有较小的软化点和较大的延度,且薄膜耐老化性能较差,其中,ACMP2 的离析稳定性最差。由图 2 可知:除了 ACMP2 外,其余 4 种沥青的针入度温变直线相互平行,温度敏感性基本一致;在相同针入度水平时,

表 2 5 种沥青的技术性能指标

Tab. 2 Technical Indices of 5 Kinds of Bitumen

沥青种类	70# 基质 沥青	SBS 改性 沥青	ACMP1 沥青	ACMP2 沥青	ACMP3 沥青
密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	1.031	1.004	1.022	1.019	1.017
15℃延度/cm	>150.0	75.6			
5℃延度/cm			120.5	>150.0	>150.0
软化点/℃	47.8	57.3	33.3	30.7	26.1
离析 温度差/℃	0.10	1.18	1.90	7.17	0.40

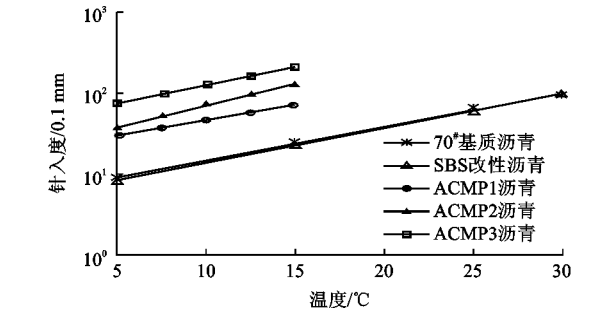


图 2 沥青针入度随温度的变化

Fig. 2 Variation of Bitumen Penetrability with Temperature  
做水平直线与针入度温度变化直线相交,分析后发现 ACMP 温拌沥青的试验温度比热拌沥青低 13℃~23℃;ACMP 温拌沥青的针入度明显大于热拌沥青。

3 黏度测试

3.1 黏度测试原理

在流变学中,剪切应力  $\tau$  与剪切应变速率  $D$  的比值称为表观黏度  $c$ 。如果  $c = \tau/D$  为常数,则  $\tau$ - $D$  具有线性关系,物质服从牛顿黏性定律<sup>[20-25]</sup>,即

$$\tau = \eta D \tag{1}$$

式中: $\eta$  为动力黏度。

若考虑重度  $\gamma$  的影响,则  $g\eta/\gamma$  定义为运动黏度,其中  $g$  为重力加速度。在中国现行规范<sup>[19]</sup>中混淆了表观黏度、动力黏度、运动黏度的概念(含单位),应引起特别注意。

布氏黏度计为转子式黏度计,转子在控温圆筒腔内同轴旋转,实现旋转剪切,按其基本原理得到剪切应力  $\tau$  的计算公式为

$$\tau = \frac{M}{2\pi h} \frac{1}{r^2} \tag{2}$$

式中: $r$  为受剪切物质距转轴中心的任意距离, $R_i \leq r \leq R_a$ , $R_i$  为转子的半径, $R_a$  为圆筒腔的半径; $M$  为

旋转剪切的扭矩; $h$  为转子的高度。

当转子的转速  $n$  确定时,可得到转子的角速度  $\Omega = 2\pi n$  及表面线速度  $V_i = \Omega R_i = 2\Omega n R_i$ 。当  $R_a - R_i$  较小时(一般为 1.0~2.0 mm),受剪切物质较薄,内部的速度场可近似为线性分布,此时,物质的剪切应变速率  $D$  为

$$D = \frac{V_i}{R_a - R_i} = \frac{\Omega}{R_a R_i^{-1} - 1} \tag{3}$$

可利用式(2)和式(3)绘制  $\tau$ - $D$  流变图,分析二者的关系,进而研究物质的黏度及流变特性。

3.2 布氏黏度试验

第 3.1 节介绍的仅是黏度测试分析的基本原理,式(3)仅当测试物质较薄时成立,实际上剪切速率的分布与物质的流变属性有关。而现行规范<sup>[19]</sup>关于沥青旋转黏度的试验测试方法(T0624—2011)采用了布氏黏度计,沥青膜一般较厚,且该黏度计的研发应用了牛顿黏性定律,通过力学原理分析得到受剪切物质的剪切应变速率  $D$  为

$$D = \frac{2\Omega R_a^2 R_i^2}{R_a^2 - R_i^2} \frac{1}{r^2} \tag{4}$$

令  $r = R_i$  (转子表面),则剪切应变速率为式(5)所示形式,即

$$D = 2\Omega \left[ 1 - \left( \frac{R_i}{R_a} \right)^2 \right]^{-1} \tag{5}$$

测试黏度时采用上海昌吉地质仪器有限公司生产的 NDJ-1D 布氏黏度计,其测量范围为 100~2×10<sup>6</sup> mPa·s(测量误差为±1%,重复性误差为±0.5%),控温范围为(20±0.1)℃~(200±0.1)℃,转子转速  $n$  可调 7 挡(转速分别为 0.5,1,2,5,10,20,50 r·min<sup>-1</sup>),配置有 4 个转子型号(21#、27#、28#、29#),其基本几何参数见表 3。

表 3 NDJ-1D 型黏度计转子几何参数

Tab. 3 Geometric Parameters for Rotors of NDJ-1D Visco-meter

转子型号	21#	27#	28#	29#
转子半径/cm	0.83	0.59	0.48	0.38
转子周长/cm	5.20	3.70	3.00	2.40
转子高度/cm	3.10	3.30	3.20	2.70
有效剪切面积/cm <sup>2</sup>	16.12	12.21	9.60	6.48
圆筒腔内半径/cm	0.95			
圆筒腔内高度/cm	8.40			

NDJ-1D 布氏黏度计运行时,可自动记录(或切换显示)转速、角速度、剪切应变速率、剪切应力、温度、表观黏度等数据。在仪器开发中,主要数据的采集应用了式(2)和式(4)的基本原理。利用式(3)和

式(5)分别计算了剪切应变速率,并与黏度计的显示值进行了对比,发现式(5)的计算值与显示值十分接近,而当转子越小(沥青膜越厚)、转速越慢时,式(3)的计算值与显示值误差越大<sup>[14]</sup>,故在研究分析时,剪切应变速率统一采用了黏度计的显示值。

不同转子、不同转速下的剪切速率取值,计算数据量较大,详见文献[14]。关于转子的选择,一般是温度较低、转速较小时采用较小的转子,反之则采用较大的转子。

按上述 7 个转速设定黏度计的旋转速度,在 75 °C~165 °C 温度范围内,对 5 种沥青的黏度进行了测试,具体试验结果详见文献[14]。通过分析发现,布氏黏度的同温实测平均值(不同转子、不同转速)与回归分析值(见本文第 4 节)的最大平均相对误差约为 3%,试验结果稳定可靠,布氏黏度可取回归分析值(表 4)。由表 4 可知:相同温度时,ACMP 温拌沥青的黏度明显小于热拌沥青;温度越高,沥青的黏度越小,衰减变化分析详见本文第 5 节。

表 4 不同温度下沥青的布氏黏度分析值

Tab. 4 Analytic Results of Brookfield's Viscosity of Bitumen at Different Temperatures

试验 温度/°C	不同沥青的黏度/(Pa·s)				
	70# 基质沥青	SBS 改性沥青	ACMP1 沥青	ACMP2 沥青	ACMP3 沥青
75			10.130	8.150	5.919
90	8.771	36.470	3.205	3.095	2.044
100				1.698	1.096
105	2.708	10.760	1.275	1.250	0.781
110				0.918	0.642
120	1.032	3.590	0.579	0.566	0.399
135	0.461	1.448	0.295	0.289	0.222
150	0.232	0.613	0.163	0.150	
165		0.336			

## 4 流变特性分析

与普通力学中的应力-应变图一样,在流变学中通常采用应力-应变速率图和黏度-速率图等,统称为流变图,本文采用  $\tau$ - $D$  流变图。

绘制的流变图见图 3。由图 3 可以看出:①黏度的测试值在  $\tau$ - $D$  图中呈线性变化,且基本上过原点,表明沥青材料服从牛顿黏性定律,布氏黏度即为动力黏度;②线性回归直线的斜率值可表征动力黏度的大小;③温度越高,黏度越小,沥青黏度随温度的变化情况见图 4;④相同温度条件下,不同沥青具有不同的黏度值,详见图 4。

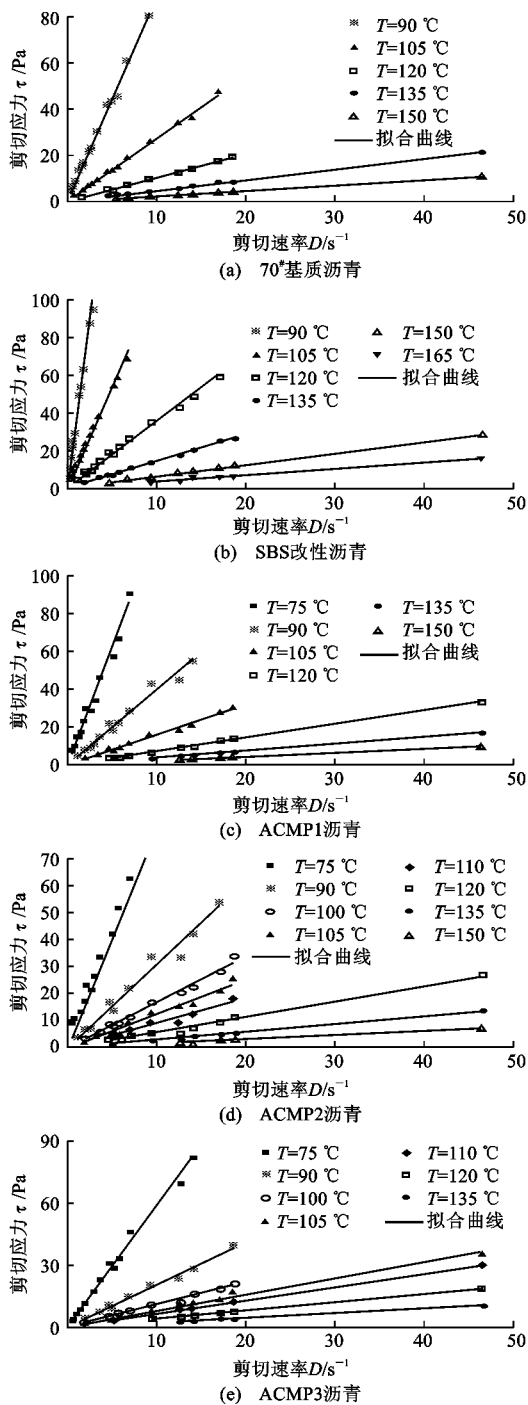


图 3 沥青在不同温度下的流变图及回归分析结果  
Fig. 3 Rheograms of Bitumen at Different Temperatures and Regression Analysis Results

通过数值计算发现,设定试验温度  $T$  时,不同转子、不同转速下测试的黏度值与其平均值有较大的相对误差,可达 25%,该平均值与  $\tau$ - $D$  回归直线的斜率相近,二者的最大相对误差约为 3%,可见,单点测试黏度的准确性较差,宜采用流变图  $\tau$ - $D$  回归直线的斜率值作为其黏度的分析值,具体见表 4。

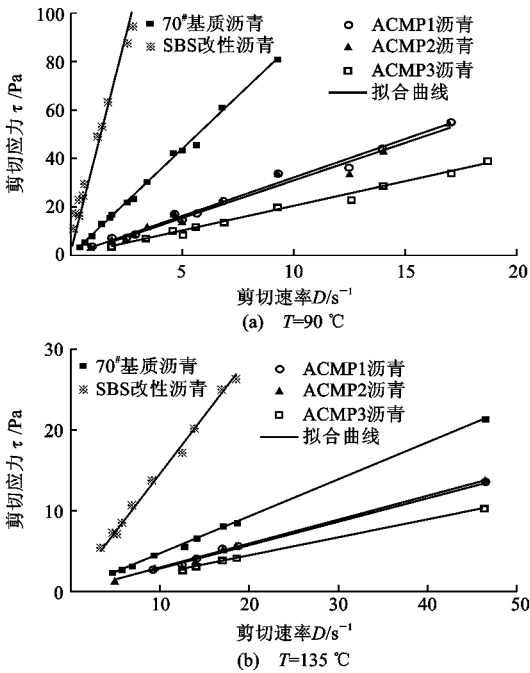


图 4 不同沥青的流变图  
Fig. 4 Rheograms of Different Bitumens

5 温拌性能的黏度分析

5.1 黏温曲线分析

沥青的黏度决定了其混合料的拌和温度。沥青黏度越小,混合料越容易拌和,消耗的拌和功率也越少,允许拌和的温度可以更低。沥青黏度随温度升高而衰减变化的曲线称为黏温曲线,是定量评价沥青拌和温度的重要方法之一[7,8,12-16]。根据表 4 所列的布氏黏度测试值,绘制 5 种沥青的黏温曲线见图 5,沥青黏度随温度变化的回归分析见表 5。

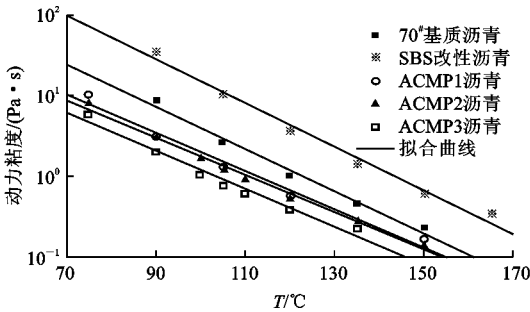


图 5 不同沥青的黏温曲线  
Fig. 5 Viscosity-temperature Curves of Different Bitumens

由图 5 可知:①不同沥青具有不同的布氏黏度, SBS 改性沥青的黏度最大, ACMP3 的黏度最小, ACMP1 与 ACMP2 的黏温曲线基本重合;② ACMP 温拌沥青的黏度小于热拌沥青,但减小的幅度没有改性沥青增加的幅度大;③沥青黏度随温度的

表 5 沥青黏度随温度变化的回归分析  
Tab. 5 Regression Analysis of Bitumen Viscosity Variation with Temperature

沥青种类	回归关系	决定系数 $R^2$
70# 基质沥青	$\lg(\eta)=3.223-0.026T$	0.985 0
SBS 改性沥青	$\lg(\eta)=3.911-0.027T$	0.984 3
ACMP1 沥青	$\lg(\eta)=2.671-0.024T$	0.981 7
ACMP2 沥青	$\lg(\eta)=2.549-0.023T$	0.989 3
ACMP3 沥青	$\lg(\eta)=2.459-0.024T$	0.975 9

衰减变化规律符合传统试验结果[22-25],即半对数坐标系下的线性关系,可表示为

$$\lg(\eta)=b-aT \tag{6}$$

式中: $a, b$  为回归系数。

由表 5 可知:不同沥青的黏温回归直线的斜率值相差较小,平均为 0.025,最大相对误差为 8%,表明不同沥青的黏度温度敏感性大致相同,在图 5 中呈大致相互平行的直线;沥青黏度取决于外加剂的介入,如改性剂、温拌剂等。

5.2 拌和温度分析

目前,确定拌和温度的方法有拌和扭矩[9]、变温击实[13-16]和拌和功率法等,但唯一成熟的方法[7,8,18]是黏温曲线法,即通过沥青的黏度确定拌和温度,但其只适用于基质沥青,有待进一步细化深入。

规范[18]中规定的热拌基质沥青的拌和黏度范围为 $(0.17\pm0.02)\text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,认为在此黏度范围内,沥青混合料的拌和和易性较好,拌和质量有保证。黏度位于 $[0.15\text{ Pa}\cdot\text{s},0.19\text{ Pa}\cdot\text{s}]$ 区间内时,按表 5 所列的回归关系式,并结合图 4,分别计算 5 种沥青的拌和温度范围及其中值,结果见表 6。

表 6 不同沥青的拌和温度分析  
Tab. 6 Analysis of Mix Temperature of Different Bitumens

沥青种类	拌和温度范围/℃	拌和温度中值/℃
70# 基质沥青	151~155	153
SBS 改性沥青	171~175	173
ACMP1 沥青	141~145	142
ACMP2 沥青	142~146	144
ACMP3 沥青	132~136	134

计算得出了热拌、温拌、SBS 改性沥青混合料的拌和温度[13-16],再结合表 6 可以发现:①利用黏温曲线法确定基质沥青的拌和温度约为 153 ℃,与现场生产相一致;②以 70# 基质沥青为基准, SBS 改性沥青的拌和温度增加了约 20 ℃,而 ACMP 温拌沥青平均降低了约 13 ℃;③ ACMP 温拌沥青的拌和温度比基质沥青降低约 10 ℃~20 ℃,具有一定的温拌效果。

另外,对于 SBS 改性沥青的拌和温度,规范<sup>[18]</sup>不建议使用黏温曲线法。然而据本文研究,在保证黏度测试的准确性基础上,即采用流变图中  $\tau D$  直线的斜率值作为黏度分析值,仍然可以使用黏温曲线法确定拌和温度。按此方法测试 SBS 改性沥青的黏度并绘制黏温曲线,确定出的拌和温度为  $171\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 175\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,基本上可与目前工程生产相匹配。

综上所述,在能够较准确地确定沥青黏度的前提下,基质沥青和改性沥青的拌和温度可与工程生产相匹配。结合第 2 节变温针入度试验结果,分析发现:对于 ACMP 温拌沥青的降温效果,变温针入度评价结果(降温  $13\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ )与黏温曲线评价结果(降温  $10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )较为一致,二者或有内在的关联,但这种规律不适用于 SBS 改性沥青。

## 6 结 语

(1)采用黏温曲线法评价沥青的温拌性能具有较好的科学性和适用性,是重要的试验评价方法之一,与变温击实法和拌和功率法相结合,会是一个完整的评价体系,后二者正在研究之中。

(2)沥青材料在流变图  $\tau D$  中,布氏黏度试验结果基本上呈过原点的直线,沥青服从牛顿黏性定律,黏度即为动力黏度。

(3)一定温度下,不同转子、不同转速测试的单点布氏黏度值准确性较差,误差较大,宜采用  $\tau D$  直线的斜率值作为黏度的分析值。

(4)相同基质的各种沥青,具有大致相同的黏度温度敏感性,不同沥青的黏度值取决于沥青外加剂的介入,如改性剂、温拌剂等。

(5)ACMP 温拌沥青具有较小的黏度,拌和温度比热拌基质沥青降低约  $10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,具有一定的温拌性能,可满足干线公路的技术要求,也可用于高等级公路的应急抢修工程<sup>[16]</sup>。

(6)常规针入度法不再适合于温拌沥青,宜采用低温或变温试验对当前技术标准进行修订;需开展各种沥青的布氏黏度与工程生产拌和温度的匹配性研究,以期制定稳健可行的技术标准。

## 参考文献:

## References:

[1] 张智强,严世祥,周进川,等.温拌沥青混合料技术探讨[J].重庆建筑大学学报,2008,29(6):113-116.  
ZHANG Zhi-qiang, YAN Shi-xiang, ZHOU Jin-chuan, et al. The Study on the Technology of Warm

Mix Asphalt[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 29(6): 113-116.

[2] 郭平,祁峰,弥海晨.温拌沥青混合料的路用性能[J].长安大学学报:自然科学版,2010,30(3):10-13.  
GUO Ping, QI Feng, MI Hai-chen. Road Performance of Warm Mix Asphalt Mixture[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(3): 10-13.

[3] NEJAD F M, AZARHOOSH A, HAMED G H, et al. Rutting Performance Prediction of Warm Mix Asphalt Containing Reclaimed Asphalt Pavements[J]. Road Materials and Pavement Design, 2014, 15(1): 207-219.

[4] MENAPACE I, MASAD E, LITTLE D, et al. Microstructural, Chemical and Thermal Analyses of Warm Mix Asphalt[C]//MASSIMO L M, PAPAGIANNA-KIS T. Sustainability, Eco-efficiency, and Conservation in Transportation Infrastructure Asset Management. London: CRC Press, 2014: 157-168.

[5] SUN H. Comparative Analysis on Hot and Warm Mix Asphalt Pavement Performance[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 204-208: 1834-1842.

[6] KIM Y, LEE J, BACK C, et al. Performance Evaluation of Warm and Hot Mix Asphalt Mixtures Based on Laboratory and Accelerated Pavement Tests[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2012, 2012: 1-9.

[7] 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):16-21.  
WEI Jian-guo, WANG Zhao-lun, FU Qi-lin. Determination Method of Warm Mix Asphalt Mixture Construction Temperature[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2013, 33(6): 16-21.

[8] 陈骁,杨平,吴亚中,等.基于粘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.  
CHEN Xiao, YANG Ping, WU Ya-zhong, et al. Construction Temperature Indicators for Asphalt Mixture Based on Viscosity-temperature Properties of Asphalt Mortar[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(2): 45-51.

[9] 裴建中,刘国柱,姜超平.沥青混合料工作和易性的扭矩测试仪:中国,201020213557[P].2010-12-29.  
PEI Jian-zhong, LIU Guo-zhu, JIANG Chao-ping. Torque Tester of Workability of Asphalt Mixture: China, 201020213557[P]. 2010-12-29.

[10] 裴建中,邢向阳.温拌沥青混合料施工技术研究[J].

- 筑路机械与施工机械化,2010,27(3):41-44.
- PEI Jian-zhong, XING Xiang-yang. Study on Construction Technology of Warm Mix Asphalt[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2010, 27(3):41-44.
- [11] 《中国公路学报》编辑部. 中国道路工程学术研究综述·2013[J]. 中国公路学报,2013,26(3):1-36.  
Editorial Department of *China Journal of Highway and Transport*. Review on China Road Engineering Research:2013 [J]. *China Journal of Highway and Transport*,2013,26(3):1-36.
- [12] 刘至飞,吴少鹏,陈美祝,等. 温拌沥青混合料现状及存在问题[J]. 武汉理工大学学报,2009,31(4):170-173.  
LIU Zhi-fei, WU Shao-peng, CHEN Mei-zhu, et al. Status and Problems of Warm Mix Asphalt[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*,2009,31(4):170-173.
- [13] 金晓晴. LB(冷拌冷铺)沥青及其路面修补技术研究[D]. 西安:长安大学,2005.  
JIN Xiao-qing. Research on LB Asphalt (Cold Mix and Cold Laid) and Mending Technique[D]. Xi'an: Chang'an University,2005.
- [14] 延梦璐. 沥青的布氏粘度测试及流变特性分析[D]. 西安:长安大学,2013.  
YAN Meng-lu. Brookfield Viscosity Testing and Analysis of the Rheological Properties of the Asphalt [D]. Xi'an:Chang'an University,2013.
- [15] 杨超. ACMP 改性沥青的温拌特性研究[D]. 西安:长安大学,2013.  
YANG Chao. Research on the Warm Mix Characteristics of ACMP Modified Asphalt[D]. Xi'an:Chang'an University,2013.
- [16] 杜鹏. ACMP 温拌沥青混合料的路用性能研究[D]. 西安:长安大学,2013.  
DU Peng. The Study of the Performance of ACMP Warm Mix Asphalt[D]. Xi'an:Chang'an University, 2013.
- [17] ZHENG J L, HUANG T. Study on Triaxial Test Method and Failure Criterion of Asphalt Mixture[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition*,2015,2(2):93-106.
- [18] JTG F40—2004,公路沥青路面施工技术规范[S].  
JTG F40—2004, Technical Specifications for Construction of Highway Asphalt Pavements[S].
- [19] JTG E20—2011,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].  
JTG E20—2011, Standard Test Methods of Bitumen and Bituminous Mixtures for Highway Engineering [S].
- [20] BARNES H A, HUTTON J F, WALTERS F. An Introduction to Rheology [M]. New York: Elsevier, 1989.
- [21] DI BENEDETTO H, YAN X L. Mechanical Behaviour of Bituminous Mixes and Criterion for the Maximum Stress [J]. *Materials and Structures*, 1994, 27(137):539-547.
- [22] DI BENEDETTO H. Bituminous Pavement Material [M]. Paris: Hermes-Lavoisier Science Publications, 2005.
- [23] 延西利,马凤槐,李满仓,等. 超常温下沥青材料的动力粘性研究[J]. 西安公路交通大学学报,1999,19(3):6-9.  
YAN Xi-li, MA Feng-huai, LI Man-cang, et al. Study on the Dynamic Viscosity of Pure Bitumen at Super-ambient Temperature [J]. *Journal of Xi'an Highway University*,1999,19(3):6-9.
- [24] 延西利,梁春雨,艾涛,等. 基于沥青与石料界面剪切的粘塑性流变模型研究[J]. 土木工程学报,2014,47(2):136-144.  
YAN Xi-li, LIANG Chun-yu, AI Tao, et al. Analysis of Visco-plastic Model of Shear Strength Between Bitumen and Stone [J]. *China Journal of Civil Engineering*,2014,47(2):136-144.
- [25] MAGGIORE C, AIREY G, MARSAC P. A Dissipated Energy Comparison to Evaluate Fatigue Resistance Using 2-Point Bending [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition*, 2014, 1(1):49-54.