

# 树脂类与弹性体类高黏改性沥青零剪切黏度研究

陶家清<sup>1</sup>,于晓涛<sup>2,3</sup>,柴冲冲<sup>4</sup>,王海朋<sup>5</sup>,颜川奇<sup>2,3\*</sup>

(1.中国市政工程西南设计研究院总院有限公司,四川 成都 610081;2.西南交通大学 土木工程学院,四川 成都 610031;  
3.西南交通大学 道路工程四川省重点实验室,四川 成都 610031;4.上海城建日沥特种沥青有限公司,上海市 200436;  
5.四川省公路规划勘察设计研究院有限公司,四川 成都 610030)

**摘要:**为了更好地评价热塑性弹性体和热塑性树脂类两类高黏沥青的高温性能,该文对不同掺量的高黏沥青(3%、5%、8%)进行针入度、软化点、低温延度及黏温曲线测试等常规试验检测以及零剪切黏度( $\eta_{ZSV}$ )流变试验分析,并对两类高黏沥青采用TEM进行机理分析。特别地,研究不同试验频率以及拟合模型对 $\eta_{ZSV}$ 拟合效果的影响,最后,利用 $\eta_{ZSV}$ 试验结果对高黏改性沥青的改性效果进行评价。结果表明:0.01~100 Hz为最适合 $\eta_{ZSV}$ 试验测试的频率范围;测试基质沥青以及弹性体高黏沥青时可采取简化模型替代标准模型,而树脂类高黏沥青则建议使用Cross标准模型拟合;两类高黏改性沥青与 $\eta_{ZSV}$ 、软化点以及延度都具有良好的相关性,但与针入度相关性较差。

**关键词:**道路工程;高黏改性沥青;零剪切黏度( $\eta_{ZSV}$ );频率范围;流变模型

**中图分类号:**U414

**文献标志码:**A

## 0 引言

随着沥青路面大量建设,夏季路面高温车辙变形日益严重,为改善这一问题,现常采用高黏改性沥青作为沥青胶结料<sup>[1-2]</sup>。同时为了更好地评价高黏改性沥青结合料的高温性能,世界各国都提出了多种评价方法,如美国SHRP计划提出的车辙因子和欧洲地区的零剪切黏度(Zero Shear Viscosity,  $\eta_{ZSV}$ )<sup>[3-4]</sup>。

现有研究表明:目前大多数关于高黏沥青的研究集中在黏度指标的研究,对高黏改性沥青性能的关键评价指标为60℃的动力黏度和布氏旋转黏度<sup>[5]</sup>,但是高黏改性剂中聚合物相对分子量巨大,高黏改性沥青具有比普通沥青更强的非牛顿性,因此试验中经常会出现同一种高黏改性沥青的60℃动力黏度和布氏旋转黏度试验结果差异性极大,且试验结果不具备重复性,造成的评价也不准确<sup>[6]</sup>。随着动态剪切流变试验(DSR)的发展,目前国内外有不少研究从流变学角度对高黏改性沥青的黏弹性进行了

分析,如Liao等<sup>[7]</sup>选用60℃动力黏度与零剪切黏度指标对高黏改性沥青的黏度特性评价,发现零剪切黏度更适用于评价高黏改性沥青;吕大春等<sup>[8]</sup>对高黏改性剂与多种基质沥青配伍性研究,发现 $\eta_{ZSV}$ 评价效果更好;刘斌清等<sup>[9]</sup>对3种高黏改性沥青及基质沥青从能量以及零剪切黏度角度评价沥青的黏弹特性,最终认为Carreau模型拟合的 $\eta_{ZSV}$ 值或残余应变更适用于高黏改性沥青高温性能的评价;银花等<sup>[10]</sup>通过动态频率扫描和稳态剪切试验对5种沥青进行测试,发现零剪切黏度与不可恢复蠕变柔量差及车辙因子的关联性最好,3个指标均能较好地评价沥青高温性能;国外也有许多学者对零剪切黏度( $\eta_{ZSV}$ )和低应变剪切黏度(Low Shear rate,  $\eta_{LSV}$ )进行过试验研究,结果表明 $\eta_{ZSV}/\eta_{LSV}$ 可以作为沥青高温性能的评价指标之一<sup>[11-14]</sup>;但是 $\eta_{ZSV}/\eta_{LSV}$ 受测试频率区间、拟合模型、试验精度条件等诸多因素影响,导致没有统一的试验标准。不同的测试频率区间以及拟合模型均会对 $\eta_{ZSV}$ 产生不同的影响,但对这两类因素对 $\eta_{ZSV}$ 产生多大影响的研究甚少。

收稿日期:2022-11-20

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(编号:52008353,);四川省青年科技创新研究团队项目(编号:2021JDTD0023)

作者简介:陶家清,男,硕士,教授级高工.E-mail:460326509@qq.com

\*通信作者:颜川奇,男,博士,副教授.E-mail:ycq@swjtu.edu.cn

综上所述,本文对高黏改性沥青进行常规性能指标测试以及动态振荡流变测试(0.1~100 Hz、0.01~100 Hz、0.001~100 Hz),在不同频率下,对热塑性弹性体和热塑性树脂类两类高黏改性沥青进行 $\eta_{zsv}$ 测试,对测试结果进行Cross模型以及Carreau模型拟合。提出适用于高黏改性沥青的最佳拟合频率区间以及拟合模型,以期高黏改性沥青高温流变学方面的研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验原材料

通过试验室优选,本文选取埃索 70# 基质沥青(E70)制备高黏沥青。选取两类具有代表性的高黏改性剂:热塑性树脂类改性剂以及热塑性弹性体类改性剂。改性剂基本参数见表1。

表1 两类高黏改性剂基本参数

| 性质   | 单位                | 测试方法        | 高黏改性剂    |           |
|------|-------------------|-------------|----------|-----------|
|      |                   |             | 热塑性树脂改性剂 | 热塑性弹性体改性剂 |
| 熔滴点  | ℃                 | ASTM D-3054 | 132.8    | —         |
| 熔融指数 | g/(10 min)        | GB/T 3682.1 | —        | 3.12      |
| 硬度   | dmm               | ASTM D-5    | <0.5     | <0.5      |
| 密度   | g/cm <sup>3</sup> | ASTM D-1505 | 0.998    | 0.914     |
| 产品形状 |                   | —           | 粉末       | 粉末        |
| 颜色   |                   | —           | 白色       | 蓝色        |

1.2 制备工艺

经反复试验对比,决定以控制同样的掺入工艺以及掺入量进行沥青改性。在165~170℃以3%、5%和8%的内掺量,转速为500 r/min匀速搅拌1 h,最终制备工艺如图1所示。

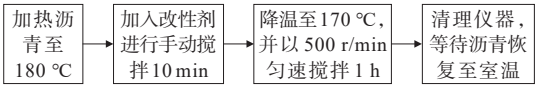


图1 制备高黏改性沥青工艺流程

1.3 试验方法

为对两类改性剂增黏的机理进行分析,对基质沥青、弹性体高黏沥青以及树脂类高黏沥青进行透射电子显微镜(Transmission Electron Microscopy, TEM)扫描并分析。

为了探索不同种类高黏改性剂对基质沥青的改

性效果,在参照规范和已有研究的基础上,分别对制备好的6种高黏沥青(E70+3%树脂、E70+5%树脂、E70+8%树脂、E70+3%弹性体、E70+5%弹性体、E70+8%弹性体)以及基质沥青进行针入度试验、软化点试验、5℃延度试验及135℃、175℃布氏黏度试验。因为高黏改性剂分子含量大,造成高黏改性沥青在60℃时具有很强的非牛顿性。在60℃真空管中,高黏改性沥青受阻严重,多次试验结果不具备重复性。因此本文不考虑60℃动力黏度,而采取零剪切黏度( $\eta_{zsv}$ )进行评价。

采用美国TA公司生产的DHR-3型动态剪切流变仪(DSR)进行动态振荡试验,试验均选用直径25 mm的平行板,板间距为1 000  $\mu$ m,试验温度60℃,频率扫描范围分别为0.1~100 Hz、0.01~100 Hz以及0.001~100 Hz。

2 试验结果与分析

2.1 TEM试验

采用透射电子显微镜(TEM)对基质沥青以及不同高黏沥青进行透射试验,可以观察其内部结构如图2所示<sup>[15]</sup>。

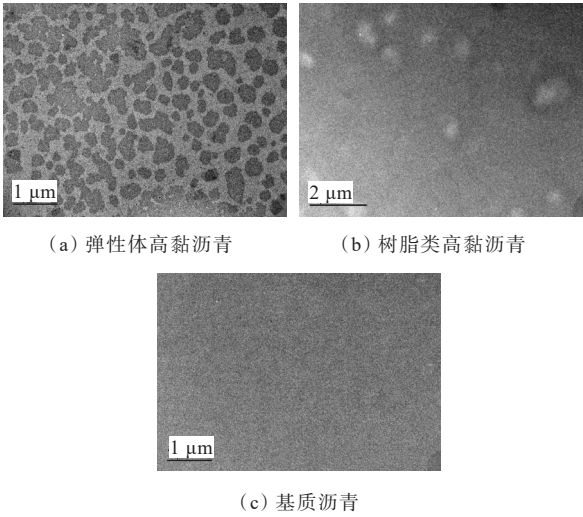


图2 基质沥青以及两类高黏改性沥青的TEM试验结果

由图2可知:基质沥青的结构并不明显,而高黏改性剂的加入会使沥青结构有明显的变化,如弹性体高黏沥青内部产生海岛结构,而树脂类高黏沥青内部出现晶体。因此,可以推测树脂类高黏改性沥青主要由内部的晶体达到高黏的效果,而弹性体改性沥青则通过类似SBS的海岛结构与基质沥青

形成三维弹性结构,从而达到高黏的改性效果。

## 2.2 常规性能指标试验

### 2.2.1 针入度试验

针入度反映了沥青材料的软硬及黏稠程度,针入度越小代表沥青越硬,反之代表沥青较软<sup>[16]</sup>。对基质沥青以及不同掺量下高黏沥青进行针入度试验,结果如图3所示。

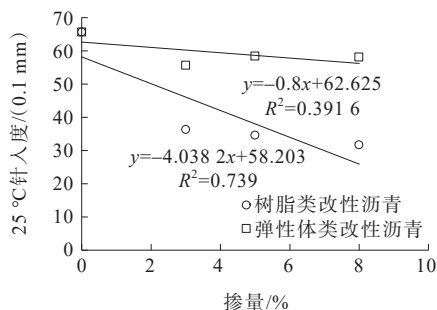


图3 不同高黏改性剂掺量对沥青针入度的影响

树脂类改性剂的加入使沥青变硬,且随着掺量增加更加明显。弹性体类改性剂的加入也使沥青针入度减小,但是降幅程度不如树脂类改性剂明显,针入度基本维持在60(0.1 mm)左右。不同类别的高黏改性剂,采用相同工艺和掺量情况下,改性后沥青性质会根据改性剂原本属性发生明显的变化。树脂类改性剂主要通过硬化结晶的方式提升沥青模量,对于针入度的影响明显;弹性体类改性剂则在沥青内部形成三维弹性网络,主要增强沥青弹性,因此对针入度影响稍小。

### 2.2.2 软化点试验

软化点是表征高温时沥青从黏塑性状态转变成黏流态的临界温度,是评价沥青高温性能的重要指标<sup>[17]</sup>。高温性能越好的沥青胶结料,往往具有更高的软化点。对基质沥青以及不同掺量下高黏沥青进行软化点试验,结果如图4所示。

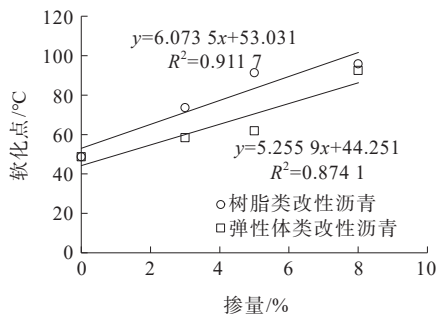


图4 不同高黏改性剂掺量对沥青软化点的影响

由图4可知:两类高黏改性剂的加入都可以使沥青的软化点提高,且随着掺量增加而增加。同等掺量下,树脂类高黏沥青的软化点略高于弹性体高黏沥青。但两者软化点升高的原理不一样,树脂类高黏沥青因为其本身的结晶硬化提高了相态转变时所需要的热量,从而软化点得到提高;而弹性高黏改性剂在沥青内部形成了三维弹性网络结构,而破坏一个网络结构需要吸收更多的热量,软化点因此得到提高。

### 2.2.3 5℃延度试验

沥青低温延度代表沥青在低温条件下抵抗外力作用时的能力。沥青低温延度越大,代表沥青低温抗裂性越好,反之则越差<sup>[18]</sup>。对基质沥青以及不同掺量下高黏沥青进行延度试验,结果如图5所示。

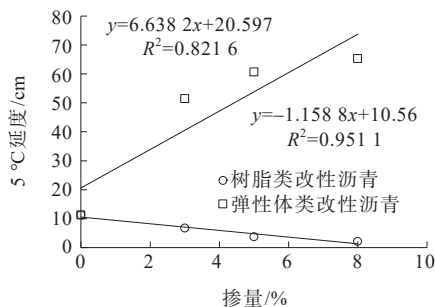


图5 不同高黏改性剂掺量对沥青延度的影响

由图5可知:两类高黏改性剂的加入使沥青的低温延度产生了明显的变化。树脂类改性剂的加入使沥青抗裂性变差,延度随着掺量增加而减小。弹性体高黏沥青延度随掺量的增加而增加,抗裂性得到增强。其原因是树脂类高黏沥青中含有更多的蜡含量,蜡含量的增加会使得沥青变硬,达到模量增加的效果,但低温抗开裂效果差,脆性也更加明显,因此树脂类高黏沥青低温延度较差。弹性体类高黏沥青因本身具有的三维弹性结构,除非高温将其弹性结构破坏,那么在低温下三维结构也同样存在,且具有一定的回弹效果,因此弹性体高黏沥青低温延度得到增加。

### 2.2.4 135℃、175℃布氏黏度试验

黏度代表沥青的黏滞性,直接反映沥青在高温下的抗永久变形性能<sup>[19]</sup>。布氏旋转黏度对施工和易性有巨大影响,尤其是高黏改性沥青需要更高的温度来使其具有足够的流动性进行拌和与施工。一般利用“等黏原则”确定拌和以及压实温度,规定拌和温度应该为黏温曲线中黏度为 $(0.17 \pm 0.02) \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 所



对应的温度,压实温度为黏温曲线中黏度为 $(0.31 \pm 0.03) \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 所对应的温度<sup>[20]</sup>。基质沥青以及高黏沥青试样的黏温拌和曲线如图6所示。

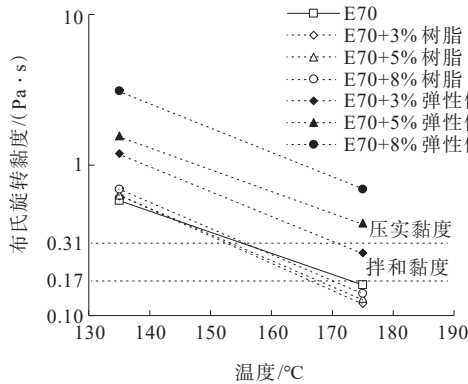


图6 高黏改性沥青的黏温曲线

由图6可知:两类高黏改性剂的加入对基质沥青原本的黏温曲线产生了较大影响,树脂类改性剂加入减小了基质沥青的布氏旋转黏度,即拌和及压实温度随改性剂的加入而下降。弹性体类改性剂加入提高了基质沥青的布氏旋转黏数值,且随掺量增加而增加,施工时所需拌和及压实的温度也随之增加。其原因是,树脂类改性剂的熔点在 $132.8^\circ\text{C}$ 左右,高温下熔解从而降低了沥青的黏度;而弹性体高黏沥青形成的三维弹性结构破坏需要更高的温度,弹性体高黏沥青的结构破坏比树脂类高黏沥青的结晶体熔化需要更多的热量,因此,在 $135\sim 175^\circ\text{C}$ 范围内存在热塑性弹性体高黏沥青的布氏旋转黏度普遍大于热塑性树脂类高黏沥青。

### 2.3 零剪切黏度( $\eta_{zsv}$ )振荡试验

零剪切黏度是频率无限接近于0时的黏度极限值,通过动态模式加载试验获得,由于DSR检测设备不可能达到实际的频率为0,因此往往采用流变学模型进行拟合获得 $\eta_{zsv}$ ,常用的模型有Cross模型和Carreau模型。

Cross标准模型描述的是伪塑性非牛顿流体的应力应变关系,即:

$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta'_0 - \eta_\infty} = \frac{1}{1 + (k\omega)^m} \quad (1)$$

Carreau标准模型表达式为:

$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta'_0 - \eta_\infty} = \frac{1}{[1 + (k\omega)^2]^{m/2}} \quad (2)$$

式中: $\eta$ 为黏度; $\eta'_0$ 为零剪切黏度; $\eta_\infty$ 为无限剪切黏

度,称为第二牛顿区域黏度; $\omega$ 为频率; $k$ 为常数,具有时间量纲的材料参数; $m$ 为常数,无量纲材料参数。

#### 2.3.1 不同频率范围拟合对高黏改性沥青 $\eta_{zsv}$ 的影响

首先基于Cross标准模型研究不同测试频率对 $\eta_{zsv}$ 计算结果的影响规律。采用动态频率扫描试验测定基质沥青以及改性沥青在 $60^\circ\text{C}$ 下的黏度,并对测试频率段( $0.1\sim 100 \text{ Hz}$ 、 $0.01\sim 100 \text{ Hz}$ 、 $0.001\sim 100 \text{ Hz}$ )采用式(1)进行拟合,拟合的 $\eta_{zsv}$ 结果如图7~9所示,拟合的 $\eta_{zsv}$ 值以及相关见表2。

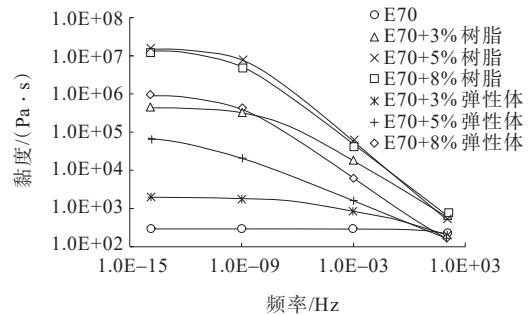


图7 0.1~100 Hz范围高黏改性沥青 $\eta_{zsv}$ 拟合结果

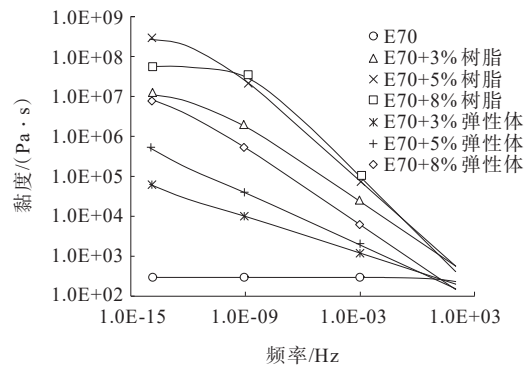


图8 0.01~100 Hz范围高黏改性沥青 $\eta_{zsv}$ 拟合结果

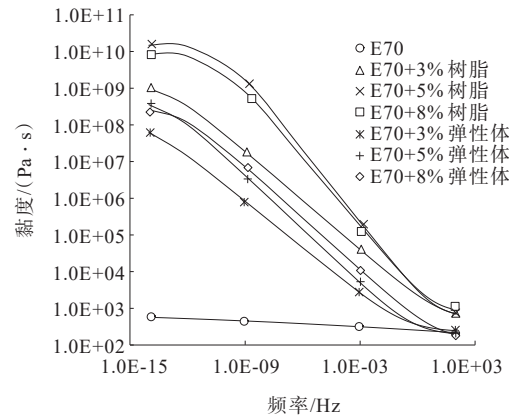


图9 0.001~100 Hz范围高黏改性沥青 $\eta_{zsv}$ 拟合结果

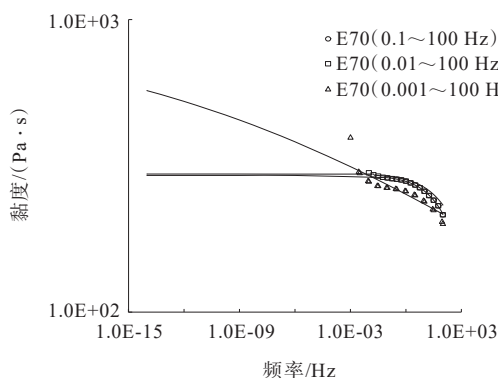
从图7~9可以看出:随着拟合区间的增加,图中低频率下的黏度也随之增加,普遍有树脂类高黏沥

表 2 Cross 标准模型在不同频率下  $\eta_{zsv}$  的拟合效果

| 沥青试样       | 0.1~100 Hz                            |       | 0.01~100 Hz                           |       | 0.001~100 Hz                          |       |
|------------|---------------------------------------|-------|---------------------------------------|-------|---------------------------------------|-------|
|            | $\eta_{zsv}/(\text{Pa}\cdot\text{s})$ | $R^2$ | $\eta_{zsv}/(\text{Pa}\cdot\text{s})$ | $R^2$ | $\eta_{zsv}/(\text{Pa}\cdot\text{s})$ | $R^2$ |
| E70        | 2.93E+02                              | 0.999 | 2.96E+02                              | 0.995 | 9.15E+02                              | 0.825 |
| E70+3% 树脂  | 4.41E+05                              | 0.998 | 1.21E+07                              | 0.979 | 1.40E+09                              | 0.995 |
| E70+5% 树脂  | 1.49E+07                              | 0.982 | 5.62E+07                              | 0.974 | 1.49E+10                              | 0.987 |
| E70+8% 树脂  | 1.36E+07                              | 0.987 | 1.26E+08                              | 0.975 | 8.48E+09                              | 0.993 |
| E70+3% 弹性体 | 2.08E+03                              | 0.999 | 2.13E+05                              | 0.989 | 1.42E+08                              | 0.919 |
| E70+5% 弹性体 | 5.72E+04                              | 0.999 | 1.40E+06                              | 0.985 | 5.04E+08                              | 0.968 |
| E70+8% 弹性体 | 4.70E+05                              | 0.999 | 1.07E+07                              | 0.983 | 3.04E+08                              | 0.987 |

青的黏度大于弹性体高黏沥青黏度。从图 7 中可以看到:0.1~100 Hz 测试频率范围内,试验所测的数据量较少,对于拟合过程中的初值选取会有极大的要求,拟合出的曲线很快就进入了平台区,所测的  $\eta_{zsv}$  值较其余测试频率明显偏小。

由表 2 可知:Cross 模型在测试频率范围为 0.001~100 Hz 时所拟合的基质沥青  $\eta_{zsv}$  值出现了明显的增大且  $R^2$  只有 0.825。对不同频率下的基质沥青  $\eta_{zsv}$  拟合见图 10。从图 10 可以看出:基质沥青在测试区间(0.1~100 Hz、0.01~100 Hz)所拟合的曲线很快进入平台区,反而在更宽的测试频率范围(0.001~100 Hz)下所拟合的曲线并未出现平台区,其原因可能是基质沥青黏度太小,仪器在低频率测试过程中不能满足最低的信噪比要求,所测的黏度值失真,导致最终模型拟合的  $\eta_{zsv}$  结果可信度较低。

图 10 不同频率下基质沥青  $\eta_{zsv}$  的 Cross 标准模型拟合

综合图 7~10 和表 2 可知:Cross 模型在不同的频率范围,都具有良好的相关性。0.1~100 Hz 虽然拟合相关系数  $R^2$  最好,但存在数据量偏少,拟合过程中对初值要求比较严格;0.001~100 Hz 区间范围大,数据量多,但是测量低黏度沥青时存在数据失真。0.01~100 Hz 区间具有良好的相关系数( $R^2 > 0.9$ )。因此,推荐

采用 0.01~100 Hz 作为  $\eta_{zsv}$  测试的频率区间。

### 2.3.2 不同拟合模型对高黏改性沥青 $\eta_{zsv}$ 的影响

在进行  $\eta_{zsv}$  流变模型模拟时常认为黏度  $\eta'_0 \gg \eta \gg \eta_\infty, \eta_\infty$  忽略不计,故有以下简化模型:

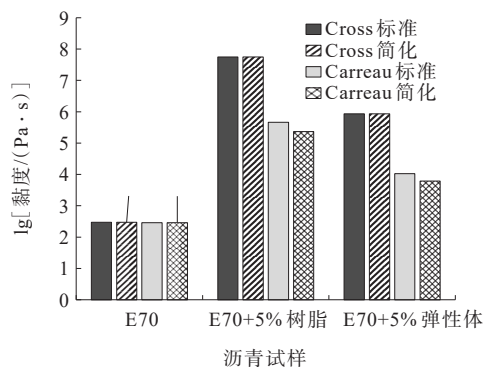
Cross 简化模型:

$$\eta = \frac{\eta'_0}{1 + (k\omega)^m} \quad (3)$$

Carreau 简化模型:

$$\eta = \frac{\eta'_0}{[1 + (k\omega)^2]^{m/2}} \quad (4)$$

对基质沥青以及两类改性剂掺量为 5% 的高黏沥青试样,采用 Cross 标准模型、Carreau 标准模型及其各自的简化模型进行  $\eta_{zsv}$  拟合分析,取频率为 0.01~100 Hz,结果如图 11 和表 3 所示。

图 11 基于不同模型拟合得到的  $\eta_{zsv}$  值

从图 11 与表 3 可知:对基质沥青而言,当测试频率范围为 0.01~100 Hz 时,4 种流变模型所拟合的  $\eta_{zsv}(\eta'_0)$  结果基本一致。对树脂类高黏沥青而言, Cross 标准模型与其简化模型所拟合的  $\eta_{zsv}$  结果基本一致,但 Carreau 标准模型所拟合的  $\eta_{zsv}$  比其简化模型所拟合的  $\eta_{zsv}$  值高出约 2 倍(图 11 采用对数纵坐标,因此柱状图差异较小)。类似地,在弹性体高黏

沥青中也存在这一差异性。

表3展示了差异性出现的原因,对于Cross标准模型及其简化模型而言,其拟合的 $\eta_{zsv}$ 远远大于其拟合出的无限剪切黏度 $\eta_{\infty}$ 。3种不同沥青样品在Cross模型拟合过程中均可满足 $\eta'_0 \gg \eta_{\infty}$ 的假设,因此在Cross标准模型以及简化模型拟合的结果上是一致

的;另一方面,由于树脂类高黏沥青中存在结晶体,以及弹性体高黏沥青中存在三维弹性结构,导致Carreau标准模型拟合获得的无限剪切黏度 $\eta_{\infty}$ 数值较大且不可忽略,此时不能满足假设 $\eta'_0 \gg \eta_{\infty}$ 。这正是Carreau标准模型与其简化模型拟合的 $\eta_{zsv}$ 产生差异性的主要原因。

表3 0.01~100 Hz下标准模型与简化模型中的拟合参数以及相关系数

| 沥青试样      | Cross标准   |                 |       | Cross简化   |                 |       | Carreau标准 |                 |       | Carreau简化 |                 |       |
|-----------|-----------|-----------------|-------|-----------|-----------------|-------|-----------|-----------------|-------|-----------|-----------------|-------|
|           | $\eta'_0$ | $\eta_{\infty}$ | $R^2$ | $\eta'_0$ | $\eta_{\infty}$ | $R^2$ | $\eta'_0$ | $\eta_{\infty}$ | $R^2$ | $\eta'_0$ | $\eta_{\infty}$ | $R^2$ |
| E70       | 2.96E+02  | 3.20E-09        | 0.995 | 2.96E+02  | 0               | 0.995 | 2.89E+02  | 1.00E-3         | 0.970 | 2.89E+02  | 0               | 0.970 |
| E70+5%树脂  | 5.62E+07  | 2.98E-03        | 0.974 | 5.62E+07  | 0               | 0.974 | 4.57E+05  | 5.37E+02        | 0.997 | 2.32E+05  | 0               | 0.974 |
| E70+5%弹性体 | 8.53E+05  | 1.32E-07        | 0.985 | 8.53E+05  | 0               | 0.958 | 1.06E+04  | 1.13E+02        | 0.985 | 6.11E+03  | 0               | 0.958 |

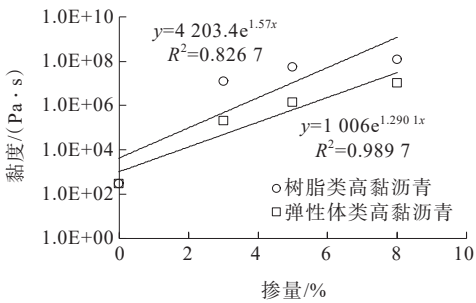
综上所述,所有拟合模型对基质沥青 $\eta_{zsv}$ 拟合结果一致;在高黏沥青中明显存在Cross模型拟合值大于Carreau模型;对于Carreau模型而言,其在高黏沥青拟合过程中不能满足假设 $\eta'_0 \gg \eta_{\infty}$ ,造成Carreau标准模型及其简化模型拟合结果相差较大;Cross标准模型及其简化模型对基质沥青以及高黏沥青的拟合结果基本一致。

2.3.3 不同掺量下的 $\eta_{zsv}$ 相关性分析

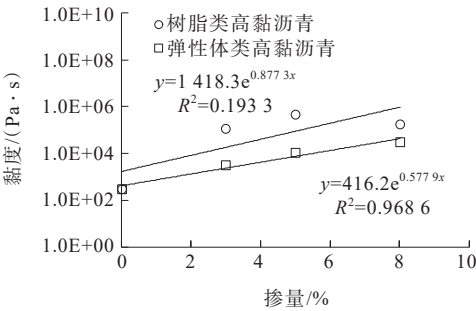
在测试频率范围为0.01~100 Hz下,采用Cross标准模型以及Carreau标准模型拟合计算高黏沥青的 $\eta_{zsv}$ 。然后研究不同改性剂掺量与 $\eta_{zsv}$ 的相关性,结果如图12所示。

从图12可以看到: $\eta_{zsv}$ 与高黏改性沥青掺量有着良好的相关性;无论Cross模型还是Carreau模型拟合的 $\eta_{zsv}$ ,都存在树脂类高黏沥青的 $\eta_{zsv}$ 大于弹性体高黏沥青;对于树脂类高黏沥青而言,随着掺量(3%、5%、8%)的增加,Cross标准模型中拟合的 $\eta_{zsv}$ 值分别为基质沥青的40 878倍、189 864倍、425 675倍,而Carreau标准模型拟合的 $\eta_{zsv}$ 分别为基质沥青的366倍、1 534倍、582倍;对于弹性体高黏改性沥青而言,随着掺量(3%、5%、8%)的增加,Cross标准模型中拟合的 $\eta_{zsv}$ 值分别为基质沥青的719倍、4 729倍、36 148倍,而Carreau标准模型拟合的 $\eta_{zsv}$ 分别为基质沥青的10倍、35倍、101倍。可以得到,两类高黏改性剂都可以提升基质沥青的 $\eta_{zsv}$ ,但树脂类高黏沥青的 $\eta_{zsv}$ 提升程度较为明显。

综上所述,无论是Cross标准模型还是Carreau标准模型拟合结果,树脂类改性剂对基质沥青 $\eta_{zsv}$ 提



(a) Cross标准模型



(b) Carreau标准模型

图12 改性剂掺量与 $\eta_{zsv}$ 的相关性(0.01~100 Hz)

升效果更明显。

3 结论

采用相同的工艺和掺量制备热塑性树脂类高黏沥青和热塑性弹性体类高黏沥青,进行TEM图像检测、常规指标试验,对不同频率进行 $\eta_{zsv}$ 试验并使用Cross标准模型及简化模型、Carreau标准模型以及简化模型进行拟合分析,得到以下结论:

(1) TEM扫描显示:基质沥青中基本没有结构

存在,树脂类和弹性体类高黏沥青分别通过结晶体与三维海岛结构实现高黏的改性效果。

(2) 两类高黏沥青都可以提升高温性能,但树脂类高黏沥青会使得沥青变硬,低温下脆性增加明显,弹性体高黏沥青低温性能更优。从黏温曲线来看,树脂类高黏沥青施工和易性更佳。

(3) 关于  $\eta_{ZSV}$  的测试频率范围:0.1~100 Hz 范围数据量偏少,对初值要求比较严格;0.001~100 Hz 范围数据量大,但是测量低黏度沥青时存在数据失真的情况。推荐采用 0.01~100 Hz 作为  $\eta_{ZSV}$  测试的频率区间。

(4) 对比不同  $\eta_{ZSV}$  拟合模型发现:高黏沥青中明显存在 Cross 模型拟合值大于 Carreau 模型;Carreau 模型在高黏沥青拟合过程中不能满足假设  $\eta'_0 \gg \eta_\infty$ ,造成 Carreau 标准模型及其简化模型拟合结果相差较大;Cross 标准模型及其简化模型对基质沥青以及高黏沥青的拟合结果基本一致。

(5) 关于高黏沥青的  $\eta_{ZSV}$  评价:从 Cross 标准模型及 Carreau 标准模型拟合结果来看,树脂类改性剂对基质沥青的  $\eta_{ZSV}$  有着更明显的提升效果;但树脂类高黏沥青  $\eta_{ZSV}$  随掺量增加,提升效果逐渐放缓;弹性体高黏沥青  $\eta_{ZSV}$  与其掺量有着良好的线性关系。

#### 参考文献:

- [1] 何志敏.复合改性 UTAC 薄层罩面在北京高速公路中的应用[J].中外公路,2018,38(2):75-79.
- [2] 李强,王永维,李桂琴,等.彩色树脂抗滑薄层罩面技术在青海省道 S103 的应用研究[J].中外公路,2018,38(3):39-43.
- [3] 杨军,戴鹏,于良溟,等.排水性沥青路面上中面层层间结合状况研究[J].Journal of Southeast University (English Edition),2007,23(4):588-593.
- [4] PETERSEN D R, LINK R E, SHENOY A. Model-fitting the master curves of the dynamic shear rheometer data to extract a rut-controlling term for asphalt pavements[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2002, 30(2): 95.
- [5] 张雪韬,陈淑萍,任德良,等.高粘度改性沥青的老化性能研究[J].武汉理工大学学报,2011,33(1):79-81.
- [6] 李立寒,耿韩,孙艳娜.高黏度沥青黏度的评价方法与评价指标[J].建筑材料学报,2010,13(3):352-356,362.
- [7] LIAO M C, CHEN J S. Zero shear viscosity of bitumen-filler mastics[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(12): 1672-1680.
- [8] 吕大春,谢泽华,刘斌清,等.高黏改性剂与基质沥青配伍性研究[J].公路,2021,66(1):51-59.
- [9] 刘斌清,吕大春,张争奇,等.高黏改性沥青高温黏弹特性指标区分度分析[J].建筑材料学报,2020,23(3):692-699.
- [10] 银花,李凯.沥青零剪切黏度与高温流变参数灰色关联分析[J].建筑材料学报,2020,23(1):108-113,121.
- [11] MOREA F, AGNUSDEI J O, ZERBINO R. The use of asphalt low shear viscosity to predict permanent deformation performance of asphalt concrete[J]. Materials and Structures, 2011, 44(7): 1241-1248.
- [12] MOREA F, AGNUSDEI J O, ZERBINO R. Comparison of methods for measuring zero shear viscosity in asphalts[J]. Materials and Structures, 2010, 43(4): 499-507.
- [13] MOREA F, ZERBINO R, AGNUSDEI J. Improvements on asphalt mixtures rutting performance characterization by the use of low shear viscosity[J]. Materials and Structures, 2013, 46(1): 267-276.
- [14] 黄维蓉,任海生,杨东来.高黏度改性沥青的研发与制备工艺研究[J].中外公路,2019,39(6):216-220.
- [15] CHEN J S, LIAO M C, SHIAH M S. Asphalt modified by styrene-butadiene-styrene triblock copolymer: Morphology and model[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002, 14(3): 224-229.
- [16] 李晓燕,平路,汪海年,等.基于国内外试验方法的橡胶沥青性能测试[J].交通运输工程学报,2015,15(1):10-17.
- [17] 曾梦澜,赵宇,潘浩志,等.欧洲岩沥青改性沥青结合料使用性能试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2016,43(5):125-130.
- [18] ZENG M L, PAN H Z, ZHAO Y, et al. Evaluation of asphalt binder containing castor oil-based bioasphalt using conventional tests[J]. Construction and Building Materials, 2016, 126: 537-543.
- [19] POLACCO G, FILIPPI S, MERUSI F, et al. A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2015, 224: 72-112.
- [20] 沈金安.《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》修订介绍[J].公路,1994,39(1):12-16.