

宽温度域内沥青动态流变性能试验研究^{*}王成皿¹, 白献萍², 钱国平², 方建勤¹

(1. 广东省长大公路工程有限公司, 广东 广州 510620; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004)

摘要: 采用 MCR301 型流变仪测试了沥青在 $-30\sim 170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 较宽连续温度域内的动态流变性能指标, 揭示了沥青储能模量、损失模量、相位角、抗车辙因子、复数粘度和振动粘度随温度的变化规律, 探讨了不同扫描频率及老化等因素对沥青动态流变性能的影响, 为研究沥青材料动粘弹性提供测试方法, 并为沥青动态流变性能研究提供参考。

关键词: 公路; 沥青; 动态剪切; 储能模量; 相位角; 振动粘度; 抗车辙因子

中图分类号: U416.03

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)03-0063-03

沥青是一种复杂的多相体系复合材料, 在不同温度下呈现不同的状态及性质, 由低温到高温, 依次经历弹性状态、粘弹性状态、流动态, 其性能变化相当复杂。基质沥青性能的优劣直接关系到沥青路面使用性能的好坏, 故有必要从沥青动粘弹特性角度进行沥青路面及沥青胶结料力学响应研究。

近年来, 沥青胶结料的动态流变性能已成国内外研究热点。动态流变试验以 DSR 为主, 但传统的 DSR 试验采用的频率固定, 且只能测定 $-20\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的沥青动态流变指标。奥地利安东帕公司推出的 MCR301 流变仪的测试温度范围宽, 可达 $-100\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, 可克服传统 DSR 试验的上述缺陷。为此, 该文引入 MCR301 流变仪, 采用不同扫描频率, 测试老化前后沥青在 $-30\sim 165\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的流变性能指标, 研究其变化规律。

1 试验方案

1.1 原材料

采用中海油泰州 70# 基质沥青, 并对其进行旋转薄膜加热试验 (RTFOT), 基质沥青及 RTFOT 老化沥青的常规指标见表 1。

1.2 试验方法

采用 MCR301 型流变仪对基质沥青和经短期老化的沥青进行温度扫描试验, 分析温度对沥青储能模量、损失模量、相位角、抗车辙因子、复数粘度、振动粘度等动态流变性能的影响程度。采用 1、5 Hz 两种扫描频率, 在 $-30\sim 170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为间隔进行扫描测试。

表 1 70# 沥青常规指标试验结果

试验项目	试验结果
针入度/(0.1 mm)	65
延度/cm	86
软化点/ $^{\circ}\text{C}$	50
针入度指数	-0.476
60 $^{\circ}\text{C}$ 动力粘度/(Pa·s)	224
蜡含量/%	1.2
闪点/ $^{\circ}\text{C}$	330
质量变化/%	-0.03
RTFOT 后 残留针入度比/%	63
残留延度/cm	7

2 试验结果分析

2.1 储能模量

储能模量 G' 是复数弹性模量 G^* 的实数部分, 亦称为振动弹性模量, 表征材料在变形过程中能量的贮藏与释放, 反映沥青弹性成分的大小。图 1 为不同工况下沥青储能模量与温度的关系曲线, 图 2 为 5 Hz 扫描频率下老化对沥青储能模量的影响。

由图 1 可知: 扫描频率对沥青储能模量 G' 有较

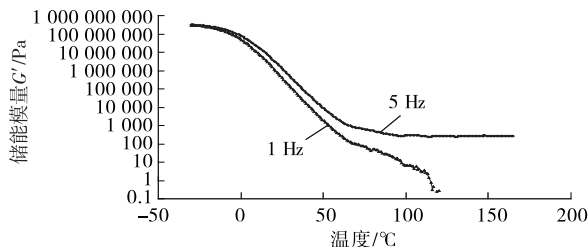


图 1 不同扫描频率下沥青储能模量与温度的关系

^{*} 基金项目: 广东省交通运输厅重大工程类科技项目(2013-01-002)

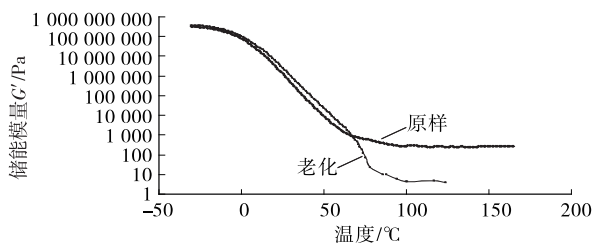


图2 5 Hz扫描频率下老化对沥青储能模量的影响

大影响,5 Hz扫描频率下的 G' 大于1 Hz扫描频率下的 G' ,且随着温度的升高,不同频率下 G' 相对差别越明显; G' 随着温度的增加而减小,且呈变缓趋势;不同温度下 G' 差值相对较大,可达 10^8 Pa。可见,沥青在中低温状态下弹性成分占主要部分,随着温度升高,弹性能力逐渐下降。

由图2可知:在中低温($-30 \sim 70$ °C)时,基质沥青的储能模量与老化沥青的储能模量差别不明显;当温度升高至 70 °C以上时,两者的差别越来越大,老化沥青的储能模量小于基质沥青的储能模量。

2.2 损失模量

损失模量 G'' 是复数弹性模量 G^* 的虚数部分,表征材料在变形过程中由内部摩擦产生的以热的形式散失的能量,反映沥青粘性成分的大小。图3为沥青损失模量与温度的关系曲线,图4为5 Hz扫描频率下老化对沥青损失模量的影响。

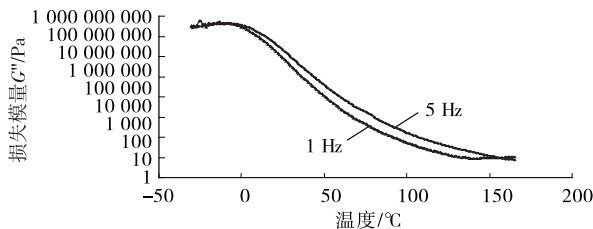


图3 不同扫描频率下沥青损失模量与温度的关系

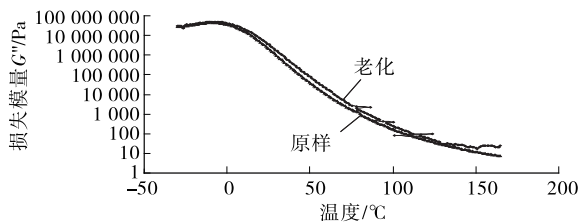


图4 5 Hz扫描频率下老化对沥青损失模量的影响

由图3可知:沥青的损失模量会受到扫描频率的影响,扫描频率为1 Hz时的损失模量小于5 Hz时的损失模量; 0 °C以下时沥青的损失模量随着温度的升高稍微增大, 0 °C以上时损失模量则随温度的升高而减小,且呈变缓趋势;低温时沥青的损失模

量较大,高、低温时的损失模量差达 10^7 Pa。

由图4可知:在整个温度范围内,基质沥青与老化沥青的损失模量差别不大,说明老化对沥青粘性成分的影响不大。

2.3 相位角

相位角反映沥青弹性与粘性成分之间的比例,相位角越小,说明沥青更富弹性,在施加荷载撤离后变形更容易恢复,产生的永久变形越小;反之则相反。图5为不同扫描频率下沥青在各温度下的相位角,图6为5 Hz扫描频率下老化对相位角的影响。

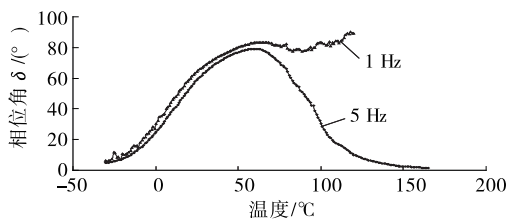


图5 不同扫描频率下相位角与温度的关系

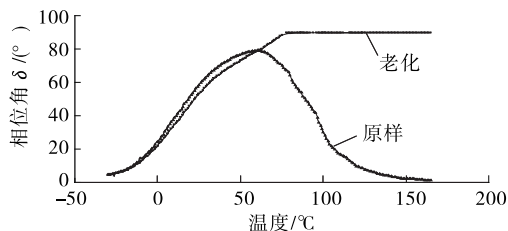


图6 5 Hz扫描频率下老化对相位角的影响

由图5可知:在 $0 \sim 50$ °C时,沥青结合料的相位角随温度的升高而增大,基本不受扫描频率的影响;但在 50 °C以上时,受扫描频率的影响较大,5 Hz扫描频率下沥青的相位角随着温度的升高而降低,1 Hz扫描频率下相位角则在 80° 上下波动。

2.4 抗车辙因子

美国SHRP提出以抗车辙因子 $G^* / \sin \delta$ 评价沥青的高温稳定性,其表征沥青性质的粘性成分,数值越大,沥青的流动变形越小。图7为不同扫描频率下沥青抗车辙因子与温度的关系,图8为5 Hz扫描频率下老化对沥青抗车辙因子的影响。

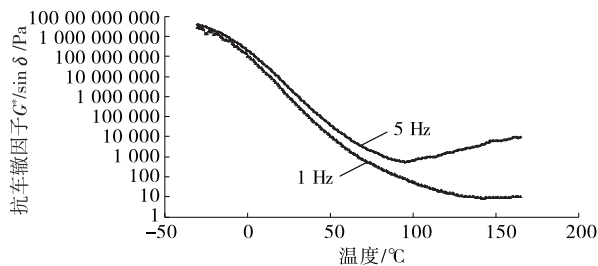


图7 不同扫描频率下沥青抗车辙因子与温度的关系

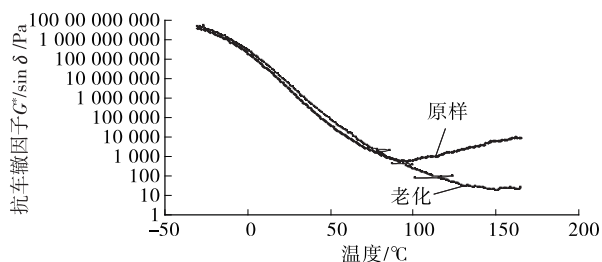


图 8 5 Hz 扫描频率下老化对沥青抗车辙因子的影响

由图 7 可知:沥青的抗车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 随温度的升高而减小,在不同温度下 $G^*/\sin\delta$ 相差较大,由 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 10^9 Pa 衰减至 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 $10^2\sim 10^3\text{ Pa}$ 。 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时受扫描频率的影响相对较大,扫描频率为 1 Hz 时 $G^*/\sin\delta$ 随温度升高而减小,但衰减幅度趋于稳定且不超过一个数量级;扫描频率为 5 Hz 时, $G^*/\sin\delta$ 仍随温度升高而增大,但幅度不大,亦未超过一个数量级。

由图 8 可知:温度在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下时,老化对沥青抗车辙因子的影响不大;在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上高温阶段,老化对抗车辙因子的影响较明显,基质沥青的抗车辙因子随温度的增加而增加,老化沥青的抗车辙因子随温度的增加而减小,但变化幅度均未超过一个数量级。

2.5 粘度

粘度是表征沥青胶结料抗车辙性能的指标,粘度越大则沥青的弹性恢复性能越好,残留的永久变形越小。因沥青的粘度受温度影响较大,无法采用常规测试方法一次性测得 $-30\sim 165\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时沥青的粘度,故采用 MCR301 流变仪进行测试。图 9 为不同扫描频率下沥青复数粘度 η^* 与温度的关系,图 10

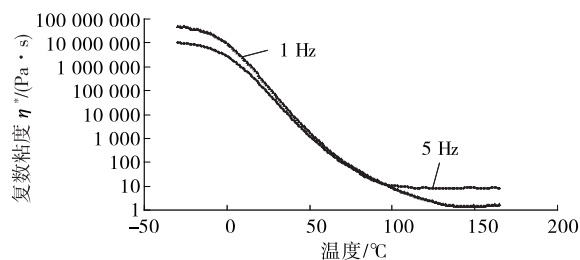


图 9 不同扫描频率下沥青复数粘度与温度的关系

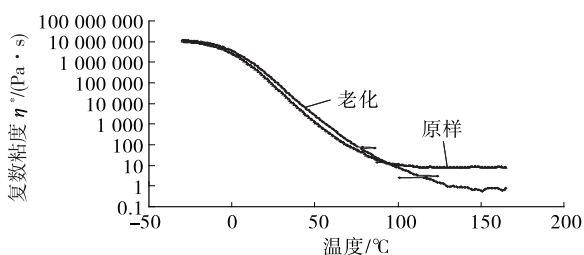


图 10 5 Hz 扫描频率下老化对沥青复数粘度的影响

为 5 Hz 扫描频率下老化对沥青复数粘度的影响。

由图 9 可知:沥青的粘度会受扫描频率及温度的影响。沥青的粘度在整个温度范围内呈衰减趋势,且低温粘度与高温粘度相差很大, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下时沥青粘度达 $10^7\sim 10^8\text{ Pa}\cdot\text{s}$, $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时则急剧衰减至 $1\sim 10\text{ Pa}\cdot\text{s}$; $-30\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 5 Hz 扫描频率下的粘度小于 1 Hz 下的粘度, $100\sim 160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时则相反。

由图 10 可知:老化会对沥青粘度产生一定影响。 $0\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,基质沥青与老化沥青的粘度差值相对较小,且老化沥青的粘度略大; $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时,老化沥青的粘度小于基质沥青粘度。

由于沥青具有粘弹特性,在振动荷载下,粘度无法真实地反映沥青的流变性能。为此,引入振动粘度指标,将振动情况下的复数粘度表示为牛顿流体的表达形式[见式(1)、式(2)]。振动粘度反映沥青粘性造成的能量损失,即材料抵抗变形的能力,振动粘度越大,沥青抗变形的能力越好。图 11 为不同扫描频率下沥青振动粘度与温度的关系,图 12 为 5 Hz 扫描频率下老化对振动粘度的影响。

$$D = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{\tau}{\eta^*} \quad (1)$$

$$\eta^* = \eta' - i\eta'' \quad (2)$$

式中: η' 为沥青的振动粘度。

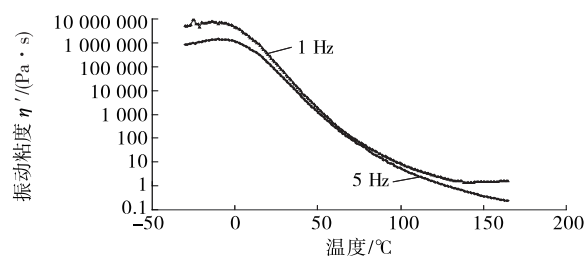


图 11 不同扫描频率下沥青振动粘度与温度的关系

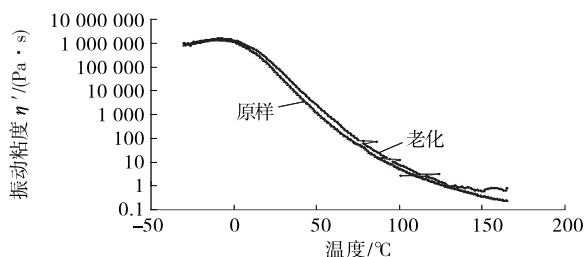


图 12 5 Hz 扫描频率下老化对沥青振动粘度的影响

由图 11 可知: $-30\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,沥青振动粘度随温度的升高而略微增大,对温度变化的敏感性不高; $0\sim 165\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,振动粘度随温度的升高而大幅衰减,

(下转第 69 页)

由表8可知:随着胶粉掺量的增加,采用干法所制橡胶沥青混合料的疲劳寿命呈上升趋势,但其值远小于另外两种添加方式;湿法与干湿复合法所制混合料的疲劳寿命均在20%胶粉掺量时达到最大值,且最大值干湿复合法为湿法的105.5%。说明干湿复合法所制混合料的疲劳性能优于另两种方式。

3 结论

(1) 各种胶粉添加方式所制混合料的动稳定次数均在20%胶粉掺量时达到最大值,且干法小于干湿复合法,干湿复合法略小于湿法,湿法所制沥青混合料的高温性能好于其他两种方法。

(2) 干法所制橡胶沥青混合料的低温性能不如湿法与干湿复合法,干湿复合法所制橡胶沥青混合料的弯拉应变在20%胶粉掺量时达到最大值,20%掺量时干湿复合法所制混合料的低温性能优于湿法,继续增加胶粉掺量,湿法所制混合料的低温性能继续增长并超过干湿复合法。

(3) 湿法与干湿复合法所制橡胶沥青混合料的水稳定性明显优于干法,最佳胶粉掺量皆为20%左右;20%掺量时干湿复合法的水稳定性略优于湿法。

(4) 干法所制混合料的疲劳性能远不如湿法与干湿复合法,且干湿复合法与湿法所制混合料的疲

劳性能皆在胶粉掺量20%时最优;干湿复合法所制橡胶沥青混合料的疲劳性能优于湿法。

(5) 综合考虑各项试验结果,胶粉最佳掺量为20%。橡胶沥青混合料在胶粉掺量为20%时的路用性能,干湿复合法优于干法,与湿法接近。但干湿复合法可减少添加于沥青中的胶粉量,从而减轻橡胶沥青施工和易性差的缺点;也可减少集料中橡胶,从而减少混合料粘附性差的缺点。因此,干湿复合法若可通过其他方法提高干、湿法所加胶粉比例,则在施工上优于湿法。

参考文献:

- [1] 陈梦,张涛.废胶粉改性沥青用于道路工程的研究进展[J].山西交通科技,2016(2).
- [2] 杨建伟.浅议橡胶沥青的应用[J].交通科技,2011(增刊2).
- [3] 吴生海.干湿复合橡胶沥青路面关键技术研究[D].西安:长安大学,2014.
- [4] 朱永.干法橡胶沥青混合料 SMA 的应用研究[D].南京:东南大学,2015.
- [5] JTG E20—2011,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].

收稿日期:2017-01-02

(上接第65页)

温度敏感性明显。5 Hz 扫描频率下的振动粘度小于1 Hz 下的振动粘度。

由图12可知:老化对沥青振动粘度的影响不明显,老化后沥青的振动粘度略大于基质沥青。

3 结论

(1) 在中间温度范围内,沥青各动态流变性能指标的温度敏感性较强,随温度升高而大幅度减小。

(2) 扫描频率对沥青动态流变性能指标测试有一定影响,尤其是在高温(100℃以上)时,扫描频率变化引起沥青动态流变性能指标测试结果发生明显变化。

(3) 老化对沥青动态流变性能的影响主要体现在高温阶段,在100℃以上时,基质沥青和老化沥青的动态流变性能指标存在较大差异。

参考文献:

- [1] 詹小丽,张肖宁,卢亮.沥青低温粘弹性能的预测[J].吉

林大学学报:工学版,2008,38(3).

- [2] 陈华鑫,陈拴发,王秉纲.SBS改性沥青低温粘度的动态剪切流变测试方法[J].同济大学学报:自然科学版,2009,37(4).
- [3] 薛连想.环氧沥青的粘弹特性[J].华南理工大学学报:自然科学版,2008,36(10).
- [4] 何立平.基于DMA方法的橡胶沥青粘弹特性和高温性能研究[D].西安:长安大学,2014.
- [5] 常明丰.基于颗粒物质力学的沥青混合料细观特性研究[D].西安:长安大学,2013.
- [6] 陈华鑫,王秉纲.SBS改性沥青车辙因子的改进[J].同济大学学报:自然科学版,2008,36(10).
- [7] 徐晶,张蓉,徐清.沥青车辙因子在高温范围的经验回归关系[J].公路,2004(3).
- [8] 田小革,郑健龙,张起森.老化对沥青结合料粘弹性的影响[J].交通运输工程学报,2004,4(1).
- [9] 马庆丰,辛雪,范维玉,等.聚磷酸改性沥青流变性能及改性机制研究[J].中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(6).

收稿日期:2017-01-16