

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2021.12.048

# 基于动态剪切流变试验的沥青高温性能评价

金跃飞

(上海市城市综合管理事务中心, 上海市 200000)

**摘要:** 沥青的高温稳定性作为沥青路面材料设计的输入参数之一, 能够保证沥青路面使用寿命内不发生严重车辙病害。为了探究沥青的高温黏弹性行为, 选取三种基质沥青和两种改性沥青, 利用动态剪切流变仪(DSR)对其高温性能进行测试。对比了不同沥青的软化点、PG 高温分级结果和多应力重复蠕变试验(MSCR)实验结果的一致性。试验结果表明, 采用不同实验所得的结果具有一致性, 改性沥青的高温性能优于基质沥青。改性沥青的软化点、车辙因子( $G^*/\sin \delta$ )和蠕变回复率( $R$ )均大于基质沥青, 而不可回复蠕变柔量( $J_{nr}$ )小于基质沥青。此外, 基于 DSR 的测试指标相比针入度和软化点能够更好地表征沥青的黏弹性性能, 并且更好地模拟在实际路面上车辙的产生发展过程。

**关键词:** 沥青胶结料; PG 高温等级; 车辙因子; 多应力重复蠕变回复试验

**中图分类号:** U416.217

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2021)12-0170-04

## 0 引言

沥青材料具有温度依赖性, 对于沥青路面而言, 保证其高温稳定性是材料选择和结构设计的重要考虑因素之一。为了评价沥青的高温性能, 各国学者相继提出了基于软化点、PG 高温分级以及重复蠕变试验(MSCR)的评价方法。SHRP 于 1993 年提出了用流变学指标定量沥青在低、中、高温下的黏弹性性能, 得到其性能分级(Performance Graded)。该评价体系确立十几年以来仍在不断进行更新与修订, 为了有效评价改性沥青胶结料的性能, 美国公路合作研究课题 NCHRP 9-10 提出了 MSCR 实验<sup>[1,2]</sup>。近年来随着我国公路建设事业的发展 and 沥青路面研究的深入, 提出了以实测软化点和黏度作为沥青的高温性能指标(石油沥青采用 60℃ 动力黏度, 聚合物改性沥青采用 135℃ 运动黏度), 同时考虑气候分区和老化等因素。

针对沥青这种具有温度和时间依赖性的黏弹性材料, 上述测试方法均是基于流变学进行的, 但是在测试原理上有着较大的不同。基于经验的针入度和软化点测试方法一方面没有考虑材料应用的气候条件、地理位置等因素, 均在标准条件下进行测试, 另一方面测试结果与沥青路面性能是通过经验性的关系而建立的, 没有很好的理论依据并且与实际路面

受力和破坏情况有较大差别<sup>[3]</sup>。研究表明<sup>[4,5]</sup>实测软化点与 SHRP 高温性能指标的关联性较差, 因此能否采用软化点代替车辙因子仍然存在争议。Superpave 沥青设计体系改进了以上的不足, 较好的模拟了沥青实际拌合、摊铺、碾压过程中性能的变化, 其性能指标车辙因子基于剪切变形计算得到有较好的理论基础。但是, MSCR 试验采用的重复加载-卸载过程更能模拟实际路面种车辆荷载的作用形式<sup>[6]</sup>。此外, 基于应力控制的蠕变回复试验能够更好的模拟和分析在高荷载作用下, 沥青的非线性黏弹性行为, 从而更好地反映沥青的抗车辙能力<sup>[2]</sup>。

依据《公路沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011), 对 5 种沥青的针入度和软化点进行测试。依据 AASHTO M320, 采用 DSR 对 5 种沥青的高温等级进行测试, 依据 AASHTO T350, 采用 DSR 进行 MSCR 实验, 计算不可恢复蠕变柔量和回复率, 对比不同评价指标之间的差异。

## 1 试验材料与方法

本文中采用的 5 种沥青均为工程界采用沥青, 其中三种为基质沥青(命名为沥青 A~C), 两种为改性沥青(命名为沥青 D 和沥青 E)。针入度、软化点分别按照《公路沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的 T 0604—2011、T0606—2011 进行标准测试。

### 1.1 旋转薄膜烘箱老化

采用旋转薄膜烘箱对沥青进行短期老化, 以模拟

收稿日期: 2021-04-18

作者简介: 金跃飞(1968—), 男, 学士, 工程师, 从事道路沥青生产工作。

沥青在拌和、运输和摊铺压实过程中的老化行为。根据《公路沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)T 0610—2011 的要求,在试验前将烘箱在  $163 \pm 0.5^\circ\text{C}$  下预热不小于 16 h。称取质量为  $35 \pm 0.5\text{ g}$  的沥青,倒入老化瓶,将盛有沥青的老化瓶水平插入旋转烘箱,在  $163^\circ\text{C}$  的温度下以 15 r/min 的速度旋转 85 min 并持续吹入流量为 240 L/h 的热空气。短期老化后的沥青用于沥青高温 PG 分级实验和 MSCR 实验。

### 1.2 动态剪切流变测试

动态剪切流变仪(DSR)用于描述沥青在不同温度下的粘弹性行为特征。美国 Superpave 沥青胶结料性能规范中,利用试验温度下的车辙因子  $G^* \sin \delta$  来描述沥青路面抵抗永久变形的能力,在最高路面设计温度下,其值越大表示沥青的不可恢复变形越小,越有利于抵抗车辙的产生。对于原样沥青要求该值不小于 1.0 kPa,对于 RTFO 短期老化的沥青要求不小于 2.2 kPa。本文选用的初始测试温度为  $58^\circ\text{C}$ ,  $6^\circ\text{C}$  为温度梯度确定高温性能分级,对于原样沥青和短期老化沥青控制应变分别为 12% 和 10%,加载频率均为 10 rad/s。

但是,上述的分级体系对于改性沥青胶结料存在不适用性,在 SHRP 的后续研究中提出了多应力重复蠕变试验(Multi-Stress Creep Test)来补充评价沥青胶结料的黏弹性性能,该测试同样采用 DSR 进行测试。根据 AASHTO TP 70-10 的要求,多应力重复蠕变试验依次在 0.1 kPa 和 3.2 kPa 两个应力水平下,对沥青样品进行 10 个周期的连续加卸载测试,每个周期加载 1 s,卸载 9 s,通过记录测试过程中的应变,计算得到蠕变回复率  $R$  和不可回复的蠕变柔量  $J_m$ 。如图 1 所示,在试验过程中,记蠕变开始时的应变为  $\epsilon_0$ ,蠕变结束时的应变为  $\epsilon_c$ ,蠕变回复结束时的应变记为  $\epsilon_r$ ,则实际的蠕变应变为  $\epsilon_1 = \epsilon_c - \epsilon_0$ ,而不可回复的蠕变  $\epsilon_{10} = \epsilon_r - \epsilon_0$ ,当剪切应力为  $\tau$  时,蠕变回复率  $R = (\epsilon_1 - \epsilon_{10}) / \epsilon_1$ ,不可回复蠕变柔量  $J_m = \epsilon_{10} / \tau$ 。本文选用的试验温度为  $58^\circ\text{C}$ ,对五种沥青胶结料进行了多应力重复蠕变测试。

## 2 结果分析

### 2.1 针入度和软化点结果分析

将测试得到的五种沥青胶结料针入度( $25^\circ\text{C}$ )和软化点的结果见表 1。

针入度间接反映沥青材料稠度,也在早期研究

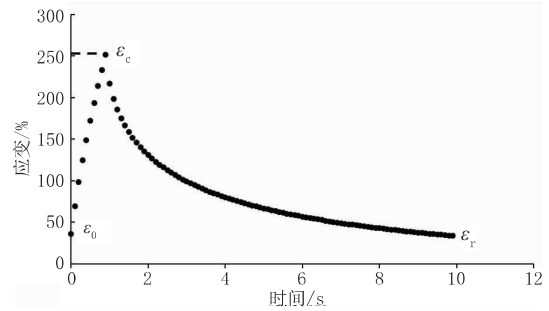


图 1 计算示意图

表 1 针入度和软化点测试结果

测试项目	基质沥青			改性沥青	
	A	B	C	D	E
针入度( $25^\circ\text{C}$ )/0.1 mm	85	68	63	48	54
软化点/ $^\circ\text{C}$	45.5	47.0	47.5	85.5	82.0

中用来确定沥青等级。针入度值越大,沥青材料越软,稠度越小,沥青的标号越大。表 1 表明,三种基质沥青的针入度均大于改性沥青,按照针入度分级为 #90、#70 和 #70。

软化点反映沥青达到给定黏度所需的温度,反映了沥青的高温稳定性。表 1 结果表明:三种基质沥青的软化点低于  $50^\circ\text{C}$ ,而改性沥青的软化点均高于  $80^\circ\text{C}$ ,由此可以认为相比之下改性沥青具有较好的高温性能。

### 2.2 沥青高温性能分级(PG)

依据 DSR 实验结果,计算五种原样和短期老化的沥青在不同温度下的复数剪切模量  $G^*$  和相位角  $\delta$ ,进而计算其车辙因子,确定阈值 1.0 kPa (原样)和 2.2 kPa (短期老化)条件下最不利的高温等级。不同温度下的复数剪切模量、相位角和车辙因子分别汇总于图 2、图 3 和图 4。

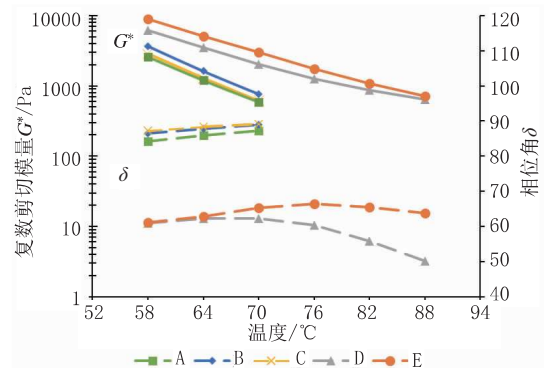


图 2 原样沥青复数剪切模量和相位角

由图 2 和图 3 可知,基质沥青与改性沥青均随着温度的升高,其复数剪切模量逐渐减小,抗变形能力逐渐降低。相比而言,基质沥青的复数剪切模量小于改性沥青,两者相差约为 2~3 倍,主要原因是改性沥青中聚合物改性剂能够有效抵抗变形。对比短

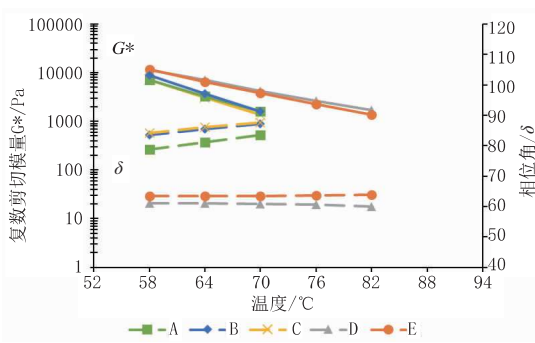


图3 短期老化沥青复数剪切模量和相位角

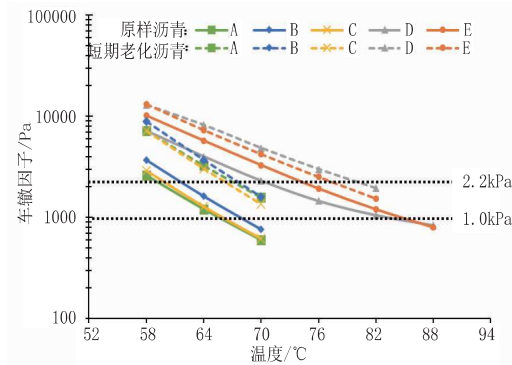


图4 车辙因子:原样沥青和短期老化沥青

期老化前后,五种沥青的测试结果可以发现,短期老化后,沥青的复数剪切模量增加,这是由于热老化导致了沥青中沥青质、胶质等大分子含量增多,沥青硬化,从而模量增大。

相位角可用于描述沥青的黏弹特性,相位角越大沥青黏性部分比例越大、弹性部分比例越小,因此容易产生不可回复的应变。从图2~3显示,基质沥青

的相位角随着温度的升高而增大,而改性沥青的相位角上升趋势不明显,甚至还出现了下降的趋势,如76℃~88℃,沥青D的相位角从60°下降到50°,主要原因是由于改性沥青中的聚合物对温度不敏感,从而影响整体的黏弹性行为。总的来说,#90及#70基质沥青的相位角相比改性沥青在各个温度要大20°~25°,而短期老化后,基质沥青的相位角下降了2°~3°,而改性沥青的相位角下降不明显,还出现了增加的趋势。

图4所示为计算得到的车辙因子以及由此确定的失败温度,从图中可以看出基质沥青的车辙因子与改性沥青的有较大差距,并且随着温度的升高,其差值逐渐增大,表明改性沥青能够更好的抵抗永久变形,尤其是在较高的服役温度下。另外,无论是基质还是改性沥青,其短期老化后车辙因子均增大,不同来源的沥青有着不同的增大程度,但基本都增大2~3倍左右。根据原样沥青车辙因子大于1.0 kPa以及短期老化车辙因子大于2.2 kPa可以确定各自的PG分级。其中基质沥青均为PG64,改性沥青均为PG76。

### 2.3 多应力重复蠕变试验结果分析

对五种短期老化前后的沥青进行了多应力重复蠕变试验,试验温度为58℃,应力为0.1 kPa和3.2 kPa。测试过程中应变百分比随时间变化的趋势如图5、图6所示,根据相应的公式可以计算得到对应的蠕变回复率R和不可回复蠕变柔量,汇总见表2。

表2 MSCR 测试结果

应力水平 /kPa	蠕变参数	原样沥青					短期老化沥青				
		A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
0.1	R/%	3.40	1.10	1.00	95.18	88.10	13.40	4.90	3.90	96.33	98.30
	J <sub>nr</sub>	3.69	2.94	3.79	0.05	0.05	1.06	1.20	1.45	0.03	0.01
3.2	R/%	-0.10	-0.20	-0.40	79.18	83.70	4.90	1.80	1.10	85.31	97.90
	J <sub>nr</sub>	4.26	3.18	4.08	0.22	0.08	1.28	1.34	1.61	0.07	0.02

回复率R反映了沥青胶结料的黏弹性性能,由图5、图6和表2可知,在两个应力水平下,基质沥青的R值均小于改性沥青,主要原因是改性沥青种的聚合物网络增加了沥青整体的弹性和模量,导致在高温条件下产生较小的应变并且能够回复大多数应变,减少了永久变形。另外,应力水平越大,不同沥青的R值越小,表明重载条件对沥青路面的高温性能有着不利的影响。此外,短期老化能够提高沥青胶结料的回复率,提高的程度与沥青的来源相关,沥青A和沥青E相比其他三种沥青提高较多。

不可回复蠕变柔量作为蠕变模量的倒数,用于

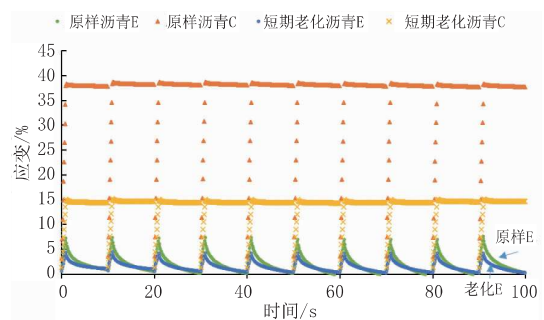


图5 应力水平0.1 kPa下的应变随时间的变化

评价沥青胶结料的高温性能,越小表明沥青抵抗高温变形的能力越强。从表2可知,改性沥青的远小于基质沥青,两者相差有60倍左右,如沥青A的不可

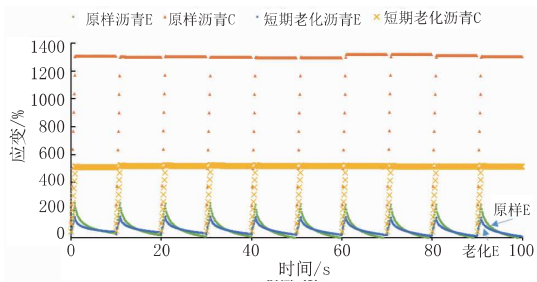


图6 应力水平 3.2 kPa 下的应变随时间变化

回复蠕变柔量为 3.69,而沥青 D 则为 0.05。另外,与回复率呈现的规律相同,在相同温度下,增加应力水平,沥青的不可回复蠕变柔量相应增大;短期老化后沥青变硬,不可回复蠕变柔量减小,从而提高沥青的高温性能。

### 3 结 论

本节中利用针入度、软化点指标,车辙因子以及回复率、不可回复蠕变柔量指标对五种沥青的高温性能进行了分析,可得结论如下:

(1)基质沥青和改性沥青在高温条件下的黏弹性行为存在较大差别,基质沥青的针入度、相位角和不可回复蠕变柔量大于改性沥青,而软化点、车辙因子和蠕变回复率小于改性沥青。表明改性沥青具有较好的抗高温车辙的能力,且不同评价指标具有一致性。

(2)通过比较三种黏弹性测试方法对于不同沥青得到的结果可以发现,尽管不同测试方法所得到的规律相似,即改性沥青具有较好的高温稳定性,但是车辙因子与不可回复蠕变柔量具有明确的物理意义,能够客观表征沥青胶结料的黏弹性性能。

(3)改性沥青由于掺入了一定的聚合物改性剂,其性能受到沥青与改性剂共同作用的影响,研究表明,高温条件下改性沥青的相位角变化不同于基质沥青的变化趋势,从而影响其黏弹性性能。因此,在今后的研究中可以考虑不同类型改性剂在一定温度范围内对沥青相位角的影响。

#### 参考文献:

[1] 周庆华,贾渝.沥青胶结料高温性能试验方法的评价[J].长安大学学报(自然科学版),2008,28(2):9-12.

[2] 王超,张金喜,宋萍萍,等.基于多应力蠕变回复试验的沥青结合料高温性能评[J].北京工业大学学报,2013,39(12):1849-1854.

[3] 张凌波,时敬涛,康剑翘,等.沥青常规指标与 PG 分级指标的关联关系研究[J].公路,2016(2):172-176.

[4] 王鹏,曾凡奇,黄晓明.沥青高温性能指标的灰色关联度分析 [J].交通运输工程学报,2006,6(3):32-36.

[5] 靳燕.Superpave 与针入度体系在沥青胶结料性能评价中的差异分析[J].黑龙江交通科技,2015(6):64-65.

[6] Xiaolin Li, Liyan Shan, Yiqiu Tan. Analysis of different indices for high-and low-temperature properties of asphalt binder[J]. Construction and Building Materials, 2015(83): 70-76.

## 《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: [cdq@smedi.com](mailto:cdq@smedi.com)