

文章编号:1672-9331(2019)01-0022-06

# 不同老化程度下沥青流变力学性能

杨三强<sup>1</sup>, 饶奇<sup>2</sup>, 史向英<sup>3</sup>

(1.河北大学 建筑工程学院, 河北 保定 071002; 2.新疆农业大学 交通与物流工程学院,  
新疆 乌鲁木齐 830052; 3.河北建设集团股份有限公司, 河北 保定 071002)

**摘要:** 为了确定不同老化程度下的一种90号道路石油沥青对温度敏感度的变化,以及评价不同老化程度下沥青的流变力学性能,借助剪切模量、劲度模量和车辙因子等流变性能指标,通过弯曲蠕变劲度试验(BBR)与流变性质试验(DSR)法,利用沥青路面表面温度模型,得到了沥青在不同老化程度下的流变力学性能变化与沥青适用性指标。研究结果表明,沥青老化会提高沥青车辙因子对温度的敏感程度,影响程度在52.87%左右;沥青老化会降低沥青弯曲蠕变劲度对温度的敏感程度,短期老化与压力老化的影响程度分别为5%和21%;沥青的老化使得沥青的蠕变曲线斜率 $m$ 平均下降8.21%。

**关键词:** 沥青老化; 剪切模量; 劲度模量; 车辙因子; 疲劳因子

中图分类号: U414

文献标识码: A

## Rheological mechanical properties of asphalt under different aging levels

YANG San-qiang<sup>1</sup>, RAO Qi<sup>2</sup>, SHI Xiang-ying<sup>3</sup>

(1.Architectural Engineering Institute, Hebei University, Baoding 071002,China; 2.Traffic and Logistics Engineering Institute, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052,China;  
3.Hebei Construction Group Co. Ltd., Baoding 071002)

**Abstract:** In order to determine the change of temperature sensitivity of a No. 90th Road oil asphalt under different aging levels, and to evaluate the rheological mechanical properties of asphalt under different aging levels, by means of rheological performance indexes such as shear modulus, stiffness modulus and rutting factor, the change of rheological mechanical properties and asphalt applicability index of asphalt under different aging degree were obtained by using the surface temperature model of asphalt pavement by bending creep stiffness test (BBR) and rheological property test (DSR) method. The results show that the aging of asphalt will improve the sensitivity of asphalt rutting factor to temperature, the influence degree is about 52.87%, the aging of asphalt will reduce the sensitivity of asphalt bending creep stiffness to temperature, and the influence degree of short-term aging and pressure aging is 5% and 21%, respectively. The aging of asphalt makes the creep curve slope  $m$  of asphalt decrease by 8.21% on average.

**Key words:** asphalt aging; shear modulus; stiffness modulus; rut factor; fatigue factor

收稿日期:2018-11-07

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(E2018201106);河北省高层次人才培养项目(B2017005024);河北省教育厅基金科研重点项目(ZD2016073)

通讯作者:杨三强(1980—),男,四川绵阳人,河北大学教授,博士,主要从事公路路基、路面材料等方面的研究。  
E-mail:ysq0999@163.com

近年来,随着经济与汽车工业的高速发展,公路的保有量与通达性都得到了快速提升,机动车数量与轴重也在快速增加,这些都给道路带来了巨大的压力。沥青作为沥青面层的重要胶结料,以上情况的出现对沥青的流变力学性能指标提出了新的要求。沥青老化是路面服务质量下降的主要原因之一。近几年来,国内外学者对沥青老化后的指标变化进行了许多研究,通过 TFOT、RT-FOT、PAV 等试验方法来模拟沥青的老化过程,并对老化后的沥青进行针入度、延度指标试验。兰州交通大学的张智豪<sup>[1]</sup>提出,随着沥青老化程度的增加,沥青的针入度与延度成指数减小,沥青的软化点成指数增加。河北工业大学的李宁利提出,沥青的抗老化能力应综合短期老化与长期老化两个阶段考虑。但是,现有的研究对老化后沥青流变力学指标与温度的关系研究甚少,而沥青老化后,环境温度变化对其力学性能的影响直接关系到沥青路面的质量,所以对老化后沥青的流变指标与环境温度关系的研究就十分重要<sup>[2]</sup>。

因此,作者借助剪切模量、劲度模量和车辙因子等流变性能指标,通过弯曲蠕变劲度试验(BBR)和流变性质试验(DSR)法,对不同老化程度下沥青的流变力学指标进行研究,研究的核心是把环境温度与沥青的流变力学性能相结合,并浅析环境温度对不同老化程度下沥青流变力学性能的影响。

## 1 沥青力学性能指标试验

### 1.1 沥青试样

根据沥青路面摊铺特点以及路面使用时的受力类型,结合沥青在自然环境下的老化程度,采用三种不同老化程度的沥青进行试验。这三种沥青分别为:①原样沥青,其模仿的是生产后经过运输、装卸和储存的沥青;②短期老化沥青,经过 TFOT 或 RTFOT 高温老化后的沥青,其模仿的是经过拌和与高温摊铺后发生短期老化的沥青;③长期老化沥青,经过 RTFOT 高温老化,老化后的残留物继续通过压力老化试验仪进行温度为 100℃、压力为(2.1±0.1)MPa 的高温压力老化试验,其模仿的是经过数年使用与曝晒后的长期老化沥青,老化程度为三种沥青中最高。

### 1.2 试验内容

沥青流变性质试验的目的是检测沥青的高温稳定性与中等温度抗疲劳性能。试验通过复数剪切模量  $G^*$  和相位角  $\delta$  来表征沥青的黏弹性质。车辙因子为  $G^*/\sin \delta$ ,其数值表征沥青抗车辙变形能力的强弱,数值偏小则意味着沥青的抗车辙变形能力较差。沥青的疲劳性能指标采用损失剪切模量  $G''=G^* \sin \delta$  表示, $G^* \sin \delta$  越小则表示沥青在重复荷载作用下的能量损失越少,沥青的抗疲劳性能越好。

沥青弯曲蠕变劲度试验的目的是检测沥青的低温抗开裂性能。试验通过弯曲蠕变劲度模量  $S$  和蠕变曲线斜率  $m$  来表征沥青的低温抗开裂性。在低温环境下,沥青蠕变劲度模量  $S$  不断增大,沥青就会越来越脆。 $m$  值表征沥青的应力松弛性和时间敏感度, $m$  值过小则表示沥青应力松弛性较差。

## 2 沥青适用性分析

### 2.1 路面高温设计模型

路面高温设计温度为路面 7 d 最高平均路面温度,其决定性因素为道路表面的热气流,使用路面下 20 mm 处的温度作为计算结果,SHRP 提出了温度设计模型<sup>[3]</sup>:

$$T_{20\text{ mm}} = (T_{\text{air}} - 0.006\ 18\ L_{\text{at}}^2 + 0.228\ 9L_{\text{at}} + 42.2) \times 0.954\ 5 - 17.78。 \quad (1)$$

LTPP 带有概率的高温计算模型为:

$$T_{\text{pav1}} = 54.32 + 0.78\ T_{\text{air1}} - 0.002\ 5\ L_{\text{at}}^2 - 15.141 \times \ln(H + 25) + Z(9 + 0.61\ \sigma_{\text{air1}}^2)0.5。 \quad (2)$$

根据式(1)和式(2)即可计算出道路所在地区的路面高温设计温度。

### 2.2 路面低温设计模型

SHRP 研究人员最开始提出路面低温设计温度为年平均最低气温<sup>[4]</sup>:

$$T_{\text{min}} = T_{\text{air2}}。 \quad (3)$$

在对路面低温设计温度的研究中,加拿大的研究人员提出了如下低温设计模型<sup>[5]</sup>:

$$T_{\text{min}} = 0.859\ T_{\text{air2}} + 1.7。 \quad (4)$$

LTPP 推荐模型为:

$$T_{\text{pav2}} = -1.56 + 0.72\ T_{\text{air3}} - 0.004\ L_{\text{at}}^2 + 6.26 \ln(H + 25) - Z(4.4 + 0.52\ \sigma_{\text{air3}}^2)0.5。 \quad (5)$$

从上可以看出,在相同的环境下,SHRP 公式所计算得出的数值较 LTPP 公式所计算得出的数值相对保守。因此,建议在道路路面设计中使用 SHRP 公式计算出的路面低温设计温度。按此温度选择相应 PG 等级的沥青,道路出现病害的几率会更少。在新疆、西藏等容易出现高寒、温差大的地区,建议使用 SHRP 公式来计算路面低温设计温度。

### 2.3 沥青适用性实例分析

新疆处于我国内陆地区,四面被山脉包围,远

离海洋,具有温带大陆性气候,昼夜温差大,日照强,降水少,气候相对干燥。新疆被分为北疆与南疆,相对而言,北疆的降水量大于南疆,南疆的气温高于北疆。新疆准噶尔盆地北缘一月份最低气温曾达到 $-50.05^{\circ}\text{C}$ ,而新疆吐鲁番七月份最高气温曾达到 $49.5^{\circ}\text{C}$ ,被人们称为“火焰山”。因为准噶尔盆地北缘与吐鲁番的气温具有代表性,均出现过极端气温,所以选择新疆地区准噶尔盆地北缘与吐鲁番为研究对象,进行沥青适用性分析。分析结果见表1和表2。

表1 吐鲁番沥青适用性分析

Table 1 The applicability analysis of Turpan asphalt cementing material

地区	7月平均最高气温/ $^{\circ}\text{C}$	纬度/ $(^{\circ})$	路面设计温度/ $^{\circ}\text{C}$		交通量/ (辆 $\cdot\text{d}^{-1}$ )	行车速度/(km $\cdot\text{h}^{-1}$ )		
			高温	低温		<20	20~70	>70
吐鲁番	40.2 $^{\circ}\text{C}$	41 $^{\circ}12'$ ~ 43 $^{\circ}40'$	59.40	-27.44	<1 000	PG70-28	PG64-28	PG64-28
					1 000~3 000	PG76-28	PG70-28	PG64-28
					>3 000	PG76-28	PG76-28	PG70-28

表2 富蕴县沥青适用性分析

Table 2 Applicability analysis of Fuyun county asphalt binder

地区	1月平均最低气温/ $^{\circ}\text{C}$	纬度/ $(^{\circ})$	路面设计温度/ $^{\circ}\text{C}$		交通量/ (辆 $\cdot\text{d}^{-1}$ )	行车速度/(km $\cdot\text{h}^{-1}$ )		
			高温	低温		<20	20~70	>70
富蕴县	-50.7 $^{\circ}\text{C}$	45 $^{\circ}00'$ ~ 48 $^{\circ}03'$	51.30	-41.90	<1 000	PG58-46	PG52-46	PG52-46
					1 000~3 000	PG64-46	PG58-46	PG52-46
					>3 000	PG64-46	PG64-46	PG58-46

准噶尔盆地北缘富蕴县位于新疆地区北部、阿勒泰地区东端,北纬 $45^{\circ}00'$ ~ $48^{\circ}03'$ ,年降水量189.6 mm。富蕴县属于大陆性寒温带干旱气候,冬季严寒而漫长,无霜期短。

吐鲁番位于新疆地区中部,北纬 $41^{\circ}12'$ ~ $43^{\circ}40'$ ,年降雨量不足20 mm。吐鲁番属于独特的温暖带大陆性干旱荒漠气候,四面高山,增热快,散热慢<sup>[6,7]</sup>。

### 3 沥青流变力学性能试验分析

选用某90号A级基质沥青,对其老化前后的性能指标进行测定,试验结果如表3所示。

借助剪切模量、劲度模量和车辙因子等指标,对不同老化程度下沥青的温度敏感度进行分析。

试验结果见表4~7,分析结果见图1~4。

试验结果表明,沥青的高温等级为64 $^{\circ}\text{C}$ ,高于传统分级中沥青的软化点指标。高温会导致不同老化程度下沥青的车辙因子下降,不同老化程度的沥青在相同温度变化下的流变指标的变化程度有所不同。试验温度平均每上升1 $^{\circ}\text{C}$ ,原样沥青的车辙因子下降0.22 kPa;试验温度平均每升高1 $^{\circ}\text{C}$ ,短期老化沥青的车辙因子下降0.418 kPa。短期老化下,沥青的车辙因子对温度的敏感度要大于原样沥青,原样沥青的车辙因子对温度的敏感度为短期老化沥青的52.87%左右,故温度的变化更容易影响老化后的沥青。

中等温度时,温度的升高会导致压力老化后沥青疲劳因子的下降,试验温度平均每升高1 $^{\circ}\text{C}$ ,压力老化后的沥青疲劳因子会下降513.425 kPa<sup>[8]</sup>。

表 3 基质沥青性能指标

Table 3 Performance index of matrix asphalt

试验项目	试验结果	指标要求
针入度(25 ℃, 5 s, 100g)/(0.1 mm)	86.7	80~100
延度(15 ℃, 5 cm • min <sup>-1</sup> )/cm	>100	≥100
软化点(TR&B)/℃	48.20	≥45
闪点/℃	266	≥245
15 ℃密度/(g • cm <sup>-3</sup> )	0.991	实测
60 ℃动力黏度/(Pa • s)	222	≥160
溶解度/%	99.8	≥99.5
质量变化/%	-0.123 33	≤±0.8
TFOT 后残留物		
针入度比(25 ℃)/%	72.7	≥57
延度(15 ℃, 5 cm/min)/cm	>100	≥20

表 4 原样沥青 DSR 试验结果

Table 4 Original asphalt DSR test results

试验温度/℃	试验项目	原样沥青 试验结果	$G^*/\sin \delta$ 指标要求
58	$G^*/\text{kPa}$	3.46	≥1.0 kPa 符合要求
	$\delta/(^{\circ})$	82.6	
	$G^*/\sin \delta$	3.49	
64	$G^*/\text{kPa}$	1.65	≥1.0 kPa 符合要求
	$\delta/(^{\circ})$	84.1	
	$G^*/\sin \delta$	1.66	
70	$G^*/\text{kPa}$	0.831	<1.0 kPa 不符合要求
	$\delta/(^{\circ})$	85.1	
	$G^*/\sin \delta$	0.834	

表 5 短期老化沥青 DSR 试验结果

Table 5 Results of short-term aging asphalt DSR test

试验温度/℃	试验项目	短期老化沥青 试验结果	$G^*/\sin \delta$ 指标要求
58	$G^*/\text{kPa}$	6.44	≥2.2 kPa 符合要求
	$\delta/(^{\circ})$	78.4	
	$G^*/\sin \delta$	6.57	
64	$G^*/\text{kPa}$	3.09	≥2.2 kPa 符合要求
	$\delta/(^{\circ})$	80.8	
	$G^*/\sin \delta$	3.13	
70	$G^*/\text{kPa}$	1.54	<2.2 kPa 不符合要求
	$\delta/(^{\circ})$	82.8	
	$G^*/\sin \delta$	1.55	

表 6 压力老化沥青 DSR 试验结果

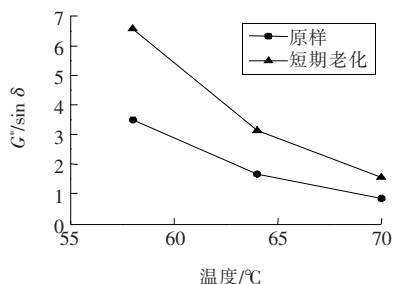
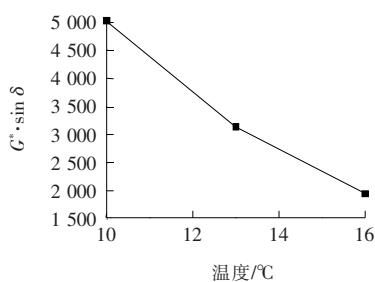
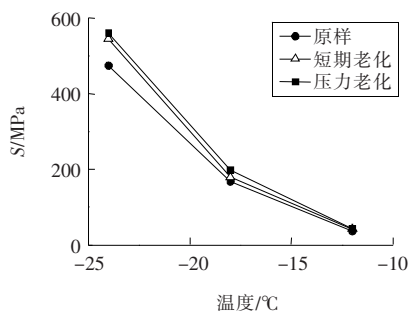
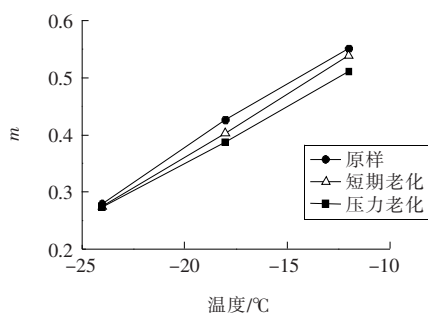
Table 6 Test results of pressure aging asphalt DSR

试验温度/℃	试验项目	试验结果	$G^* \cdot \sin \delta$ 指标要求
16	$G^*/\text{kPa}$	2 355	≤5 000 kPa 符合要求
	$\delta/(^{\circ})$	55.9	
	$G^* \cdot \sin \delta$	1 950.08	
13	$G^*/\text{kPa}$	3 890	≤5 000 kPa 符合要求
	$\delta/(^{\circ})$	53.7	
	$G^* \cdot \sin \delta$	3 135.06	
10	$G^*/\text{kPa}$	6 455	>5 000 kPa 不符合要求
	$\delta/(^{\circ})$	51.2	
	$G^* \cdot \sin \delta$	5 030.63	

表 7 原样沥青、短期老化沥青和压力老化沥青 BBR 试验结果

Table 7 Original asphalt, short-term aging, pressure aging asphalt BBR test results

试验温度/℃	试验项目	原样沥青 试验结果	短期老化 试验结果	压力老化 试验结果	指标要求
-12	S/MPa	36.30	42.30	43.55	$S \leq 300.0$ $m \geq 0.300$
	$m$	0.551	0.539	0.511	
-18	S/MPa	167.50	179.50	198.50	$S \leq 300.0$ $m \geq 0.300$
	$m$	0.426	0.403	0.387	
-24	S/MPa	474.50	546.00	560.00	$S \leq 300.0$ $m \geq 0.300$
	$m$	0.279	0.2745	0.274	

图1 不同老化程度沥青  $G^*/\sin \delta$  随测试温度变化情况Fig. 1 Variation of asphalt  $G^*/\sin \delta$  with test temperature in different aging degree图2 压力老化程度沥青  $G^* \cdot \sin \delta$  随测试温度变化情况Fig. 2 Pressure aging degree the variation of asphalt  $G^* \cdot \sin \delta$  with test temperature图3 不同老化程度沥青弯曲蠕变劲度模量  $S$  随测试温度变化情况Fig. 3 Variation of asphalt flexural creep stiffness modulus  $S$  with test temperature in different aging degree图4 不同老化程度沥青蠕变曲线斜率  $m$  随测试温度变化情况Fig. 4 Variation of asphalt creep curve slope  $m$  with test temperature in different aging degree

试验结果表明,沥青的低温等级为 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。温度降低会导致不同老化程度下沥青的弯曲蠕变劲度模量  $S$  增大,原样沥青、短期老化沥青、压力老化沥青在降低 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,其弯曲蠕变劲度模量  $S$  分别增长了 $1\,307\%$ 、 $1\,291\%$ 、 $1\,286\%$ 。原样沥青的弯曲蠕变劲度模量  $S$  对温度的敏感度略大于短期老化沥青与压力老化沥青,短期老化、压力老化对沥青的弯曲蠕变劲度模量  $S$  的影响程度分别为 $5\%$ 和 $21\%$ 。<sup>[9,10]</sup>

温度降低会导致沥青的蠕变曲线斜率  $m$  减小,原样沥青、短期老化沥青、压力老化沥青在温度下降 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,其蠕变曲线斜率  $m$  分别下降了 $49.4\%$ 、 $49.1\%$ 、 $46.4\%$ 。原样沥青的蠕变曲线斜率  $m$  对温度的敏感度大于短期老化沥青、压力老化沥青。在同等试验温度下,沥青的老化使得沥青的蠕变曲线斜率  $m$  平均下降了 $8.21\%$ 。<sup>[11]</sup>

DSR、BBR 的试验结果表明,该90号A级基质沥青按PG法分级应为PG64-18。结合前文中对新疆两地区沥青适用性分析可以看出,该沥青的低温性能不能满足新疆寒冷地区路面设计的低温要求,故不适用于新疆寒冷地区。

## 4 结论

作者借助剪切模量、劲度模量和车辙因子等流变性能指标,对不同老化程度下的沥青流变力学性能进行了评定,得出以下结论。

1) 温度上升 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,短期老化过程会提高沥青车辙因子对温度的敏感性,原样沥青的车辙因子对温度的敏感度为短期老化沥青的 $52.87\%$ 左右。

2) 温度下降 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,短期老化、压力老化对沥青的弯曲蠕变劲度模量  $S$  的影响程度分别为 $5\%$ 和 $21\%$ 。老化过程会导致沥青的  $m$  值对温度敏感度降低,沥青老化使得沥青的蠕变曲线斜率  $m$  平均下降了 $8.21\%$ 。

3) 该90号A级基质沥青无法满足我国西北荒漠地区的低温要求。在道路设计中,应尽量选择与该地区低温要求接近的基质沥青或使用改性沥青。

## 〔参考文献〕

- [1] 张智豪.短期老化对胶粉改性沥青高温性能的影响[J].现代化工,2018,38(9):105-109,111.  
ZHANG Zhi-hao.Effect of short-term aging on high temperature performance of rubber powder modified asphalt [J].Modern Worker,2018,38(9):105-109,111.
- [2] 孙岳.短期老化对 TPS 改性沥青性能影响研究[J].公路,2018,63(4):212-217.  
SUN Yue.Study on the effect of short-term aging on the performance of TPS modified asphalt [J].Highway,2018,63(4):212-217.
- [3] 曾俊铖.福建省高速公路沥青结合料性能等级研究[J].公路交通科技,2018,35(6):8-13,29.  
ZENG Jun-cheng.Study on performance grade of asphalt bonding material of expressway in Fujian Province [J].Road Traffic Technology,2018,35(6):8-13,29.
- [4] 朱耀庭,汪晓红,段艺萍.江西省道路沥青 PG 分级研究[J].公路,2016,61(5):20-27.  
ZHU Yao-ting, WANG Xiao-hong, DUAN Yi-ping. Study on the classification of road asphalt PG in Jiangxi Province [J].Highway,2016,61(5):20-27.
- [5] 张凌波,时敬涛,康剑翘.沥青常规指标与 PG 分级指标的关联关系研究[J].公路,2016,61(2):172-176.  
ZHANG Ling-bo, SHI Jing-tao, KANG Jian-qiao. Study on the relationship between asphalt conventional index and PG grading Index [J].Highway,2016,61(2):172-176.
- [6] 张海涛,高丹丹,马盛盛,等.基于 PG 的黑龙江省沥青路面气候分区与标准的研究[J].公路交通科技,2017,34(12):9-15.  
ZHANG Hai-tao, GAO Dan-dan, MA Sheng-sheng, et al.Study on climatic zoning and standard of asphalt pavement in Heilongjiang Province based on PG [J].Road Traffic Technology,2017,34(12):9-15.
- [7] 曹林涛.江西省高速公路沥青路面温度特征与沥青 PG 分级[J].公路,2015,60(8):14-20.  
CAO Lin-tao.Temperature characteristics of asphalt pavement of expressway in Jiangxi Province and grading of asphalt PG [J].Highway,2015,60(8):14-20.
- [8] 李曙斌.试验条件对沥青胶浆流变特性影响研究[J].中外公路,2018(5):246-249  
LI Shu-bin.Study on the effect of test conditions on rheological characteristics of asphalt slurry [J].Chinese and Foreign Highways,2018(5):246-249.
- [9] 郭娟.高 RAP 掺量热再生沥青混合料动态流变性能研究[J].公路,2018,63(9):242-248.  
GUO Juan.Study on dynamic rheological properties of high rap doped thermal recycled asphalt mixture [J].Highway,2018,63(9):242-248.
- [10] 罗蓉.DCLR 改性沥青的流变力学性质[J].中国公路学报,2018,31(6):165-171.  
LUO Rong.Rheological mechanical properties of modified asphalt in DCLR [J].Journal of Chinese Highway,2018,31(6):165-171.
- [11] ZHANG Hai-tao, LIU Hong-wei, ZHANG Zhen-de. Study on the mechanism of the repeated asphalt ageing and recycling based on the macro-performance [J]. Road Materials and Pavement Design, 2016,17(4):76-81.