

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.07.06

# 考虑紫外辐射的交互老化对 SBR 改性沥青流变性能的影响及其老化机理

陈辉强, 李成林, 孙建邦, 贺 强

(重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074)

**摘要:**考虑到紫外老化对丁苯橡胶 SBR 改性沥青性能的影响, 分别采用 2 种交互老化方式(方式一: SBR 改性沥青+旋转薄膜烘箱老化 RTFOT+加压加速老化 PAV+紫外老化 UV; 方式二: SBR 改性沥青+RTFOT+UV+PAV)制备老化沥青, 并对老化后 5 种沥青进行动态剪切流变试验 DSR、蠕变劲度试验 BBR、差示扫描量热试验 DSC 以及 IR 红外光谱分析。结果表明, 经短期老化后的 SBR 改性沥青分别经历 UV 和 PAV 老化后的流变性能比较接近, 但进一步分别经历 PAV 和 UV 老化后, 其流变性能和老化程度变化显著, UV 对于沥青的老化作用是非常明显的; 不同老化顺序的交互老化结果也大不相同; 相较于老化方式一, 老化方式二对 SBR 改性沥青流变性能影响更显著; PAV 和 UV 老化有着各自不同的老化机理, SBR 改性沥青经历交互老化的实验结果正是这 2 种不同老化机理叠加的具体体现。

**关键词:**交互老化; 改性沥青; 流变性能; 老化机理

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2019)07-054-09

## Effect of interactive aging considering ultraviolet on rheological properties of SBR modified asphalt and analysis of the aging mechanism

CHEN Huiqiang, LI Chenglin, SUN Jianbang, HE Qiang

(School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China)

**Abstract:** Considering the influence of ultraviolet aging on the properties of SBR modified asphalt, two interactive aging methods (1. SBR modified asphalt + RTFOT+PAV+UV; 2. SBR modified asphalt + RTFOT+UV+PAV) were used to prepare aged asphalt, and the five kinds of aged asphalt were tested by DSR, BBR, DSC differential heat test and IR spectroscopy. The results showed that the rheological properties of SBR modified asphalt after short-term aging were similar to that after UV aging and PAV aging respectively. However, the rheological properties and aging degree of SBR modified asphalt after further aging were significantly changed after PAV aging and UV aging respectively, and UV aging effect on asphalt was very obvious. The interactive aging results of different aging sequences were also quite different. Compared with the first aging mode, the second one had a more significant effect on the rheological properties of SBR modified asphalt. PAV and UV aging have different aging mechanisms respectively, and the experimental results of SBR modified asphalt undergoing interactive aging were the

收稿日期: 2019-05-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51708072)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51708072).

作者简介: 陈辉强(1974—), 男, 副研究员, 主要从事沥青路面结构与材料研究, (E-mail)chqlxj@126.com。

concrete embodiment of the superposition of these two different aging mechanisms.

**Keywords:** interactive aging; modified asphalt; rheological property; aging mechanism

沥青路面在长期使用过程中受到热、氧、紫外老化的影响,沥青路面的耐久性问题一直以来是广大科研工作者研究的热点问题<sup>[1-4]</sup>。由于沥青路面在使用过程中的老化作用,沥青胶结料性能衰减,导致路面的耐久性降低和使用寿命缩短。《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》规定的旋转薄膜烘箱老化试验及长期压力老化试验有效地模拟了沥青混合料拌和及运输过程中的初期老化和长期使用过程中的老化,但关于紫外老化对沥青性能的影响没有提出明确的试验方法。现有研究大多考虑了短期老化和长期老化对沥青路面的影响,但关于紫外老化及其与PAV交互老化的影响研究还未见报道。而实际上,紫外老化对沥青路面使用性能的影响是非常显著的,尤其是在高海拔山区体现得尤为突出,因此紫外老化对沥青的老化作用是不容忽视的<sup>[5-7]</sup>。SBR改性沥青以其优良的低温性能广泛应用于高海拔寒冷地区,因此,开展交互老化对SBR改性沥青性能的影响研究符合该地区的应用实际,也是非常必要的。

## 1 试验部分

### 1.1 原材料

基质沥青为韩国GS90<sup>#</sup>,SBR改性剂为山东显元化工科技有限公司,SBR改性沥青基本性能指标见表1。

表1 SBR改性沥青的技术指标  
Table 1 Basic performance indexes of SBR modified asphalt

性能指标	测试结果	测试方法
针入度(25℃,5s,100g)/0.1mm	66.2	T0604
针入度指数PI	1.52	T0604
软化点(R&B)/℃	50.3	T0606
延度(5℃)/cm	59.5	T0605
135℃粘度/Pa·s	1.68	T0625

### 1.2 仪器与设备

- 1) 紫外老化加速箱,天津市港源试验仪器厂;
- 2) 动态剪切流变仪,TA公司生产的discovery系列;
- 3) 低温弯曲蠕变仪,型号SYD-0715;
- 4) 红外光谱仪,型号TENSOR II;
- 5) 差示量热分析仪,型号DSC200F3。

### 1.3 试验方案

#### 1.3.1 室内模拟紫外老化

文中试验紫外老化箱采用PHILIPS TL 60W/10R UV紫外线灯,其紫外光辐射强度为 $500 \text{ W/m}^2$ ,该老化箱1d的实验室模拟紫外光总辐射量 $Q_R = 500 \text{ W/m}^2 \times 24 \text{ h/d} = 1.2 \text{ Wh} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。取四川省马尔康地区的地区相同时间下太阳紫外光总辐射量 $Q_Z = 0.02093 \text{ Wh} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ <sup>[8]</sup>,则该老化箱加速率 $A_u = \frac{Q_R}{Q_Z} =$

$\frac{1.2}{0.02093} = 57.33$ 。参考文献[1]关于室内老化时间的计算方法,结合马尔康地区的自然情况,以该地区平均日照7h计算,则每年日照时间约为2555h。考虑紫外灯的折减系数约为1.11,则模拟6年的紫外老化需要的室内辐照时间为:

$t = \frac{6 \times 2555 \times 1.11}{57.33} = 296.8 \approx 297 \text{ h}$ 。为确保沥青样品老化均匀,本次试样厚度为 $1 \pm 0.5 \text{ mm}$ ,如图1所示。

### 1.3.2 试样制备

将 SBR 原样沥青进行初期老化,得到 RTFOT 后的老化沥青,编号为 1<sup>#</sup>,将 1<sup>#</sup> 样品分别进行 PAV 老化和 UV 老化,得到 2<sup>#</sup> 和 3<sup>#</sup> 试样;再将 2<sup>#</sup> 试样经过 UV 老化,得到 4<sup>#</sup> 试样,将 3<sup>#</sup> 试样经过 PAV 老化,得到 5<sup>#</sup> 试样。

### 1.4 性能测试

动态剪切流变 (DSR, dynamic shear rheological test) 试验:采用应变控制模式,设置原样沥青应变值为 12%,老化沥青的应变值为 10%, $\omega=10 \text{ rad/s}$ ,温度范围 52~76 °C;

蠕变劲度试验 (BBR, bending beam rheometer):测试沥青 -12 °C 和 -18 °C 下的劲度模量  $S$  和蠕变速率  $m$  值;红外光谱 (IR, infrared spectroscopy) 试验:光谱扫描范围为 500~4 000  $\text{cm}^{-1}$ ,分辨率 4  $\text{cm}^{-1}$ ,扫描次数为 16 次;

差示扫描量热 (DSC) 试验:试验升温速率 10 °C/min,氮气流速 30 mL/min,试验起始温度 -40 °C,结束温度为 5 °C。

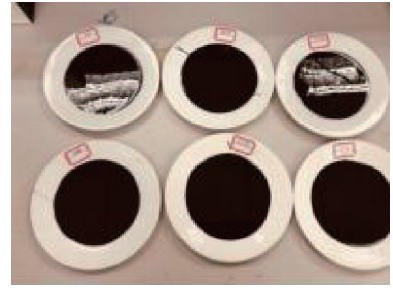


图 1 紫外老化样品

Fig. 1 Ultraviolet aging sample

## 2 结果与讨论

### 2.1 SBR 改性沥青交互老化前后的流变性能分析

#### 2.1.1 复数模量 $G^*$ 分析

复数模量  $G^*$  是表征沥青抵抗变形的总能力, $G^*$  越大,沥青高温抵抗变形能力越强<sup>[9-10]</sup>。文中采用 DSR 温度扫描试验测试了 1<sup>#</sup>~5<sup>#</sup> 沥青复数模量,测试结果如图 2 所示,其相应数据见表 2 所示。

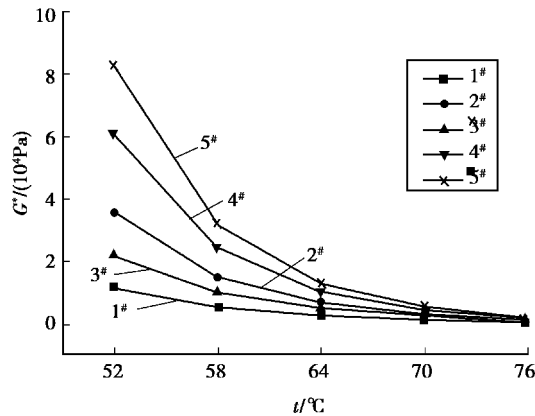


图 2 5 种沥青复数模量  $G^*$  随温度的变化规律

Fig. 2 Variation of complex modulus  $G^*$  with temperature of five kinds of asphalt

表 2 5 种沥青不同温度下的复数模量  $G^*$  /Pa

Table 2 Complex modulus  $G^*$  values of 5 kinds of asphalt at different temperatures

测试温度 $t/^\circ\text{C}$	沥青复数模量 $G^*$ /Pa				
	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>
52	11 035	36 002	22 069	60 833	82 755
58	5 068	14 791	10 136	23 905	31 682
64	2 442	6 343	4 883	9 827	12 704
70	1 196	2 850	2 392	4 243	5 358
76	598	1 271	1 195	1 817	2 241

由图 2 可见,在 52~76 °C 温度变化范围内,随着温度的升高,5 种沥青的复数模量曲线均急剧下降,最后趋于平缓,并呈现重合的趋势,表明随着温度升高,各种老化沥青抵抗高温变形的能力均显著下降,且抗变形能力差距也显著减小。这是由于随着温度的升高,沥青逐渐从弹性状态转变成黏性状态,沥青中黏性部分增多,从而使沥青恢复变形的能力减弱,抗变形能力降低。从老化方式一看,同一温度下,复数模量由小到大的顺序为:1# < 2# < 4#;从老化方式二看,复数模量由小到大的顺序为:1# < 3# < 5#,说明随着老化程度的推进,沥青中轻质组分挥发,同时沥青胶质转化为沥青质<sup>[11]</sup>,SBR 改性沥青的复数模量逐渐增大,故抵抗高温变形能力增强。相同温度下,5 种沥青的复数模量由小到大的顺序为:1# < 3# < 2# < 4# < 5#,表明老化程度和老化顺序对 SBR 改性沥青高温流变性能影响不同。比较 2# 曲线和曲线 3# 并结合表 2 数据分析得出,PAV 老化对经历了 RTFOT 老化后的 SBR 老化沥青流变性能的影响程度比 UV 老化稍显严重;比较 4# 曲线和曲线 5# 并结合表 2 数据分析可知,老化方式二对 SBR 改性沥青的影响程度要大于老化方式一。

### 2.1.2 相位角 $\delta$ 分析

相位角  $\delta$  是沥青黏性和弹性变形数量的相对指标, $\delta$  越小沥青越接近于弹性体<sup>[12]</sup>。文中采用 DSR 温度扫描试验测试了 1#~5# 沥青 52~76 °C 温度范围内的相位角,通过相位角的变化规律表征沥青老化程度,测试结果见图 3 所示,其相应数据见表 3 所示。

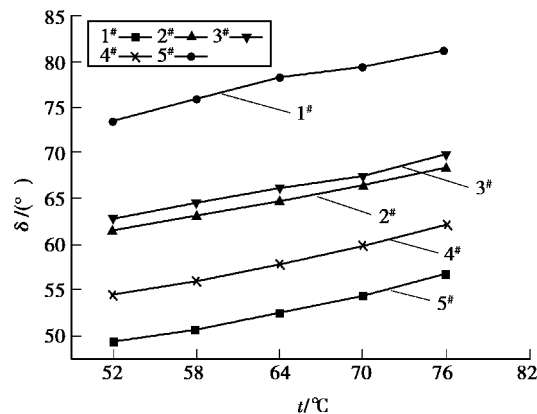


图 3 5 种沥青相位角  $\delta$  随温度的变化规律

Fig. 3 The phase Angle change trend of 5 bitumen samples at different temperatures

表 3 5 种沥青不同温度下的相位角  $\delta$  (°) 值

Table 3 The phase angles of 5 bitumen at different temperatures

测试温度 $t$ / °C	沥青复数模量 $\delta$ / (°)				
	1#	2#	3#	4#	5#
52	73.5	61.5	62.8	54.5	49.5
58	75.8	63.1	64.5	55.9	50.7
64	78.1	64.7	66.1	57.7	52.4
70	79.5	66.3	67.4	59.8	54.3
76	81.1	68.3	69.8	62.3	56.6

图 3 表明,随着温度的升高,5 种沥青的相位角均表现为逐渐增大,表明沥青逐渐从弹性体转变为黏性体,高温抗变形能力减弱。相同温度下,5 种沥青的相位角大小顺序为:1# > 3# > 2# > 4# > 5#,其变化规律排序和复数模量变化规律保持一致,老化程度和老化组合方式不同,对 SBR 改性沥青高温流变性能影响不同。由表 3 数据可以看出,以 76 °C 试验温度为例子,老化后的 4 种沥青相较于 RTFOT 老化沥青相位角依次下降了 15.8%、13.9%、23.2%、30.2%,SBR 改性沥青先经历 PAV 老化再经历紫外老化相位角下降了 7.4%,

先经历紫外老化再经历 PAV 老化相位角下降了 16.3%，进一步表明，不同老化顺序对 SBR 改性沥青的老化作用有着较显著的影响，老化方式二大于老化方式一。

### 2.1.3 车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 分析

车辙因子  $G^*/\sin \delta$  是用来表征沥青高温下抗车辙能力的指标。在试验中，采用车辙因子间接评价 SBR 改性沥青老化程度，试验结果见图 4 所示。

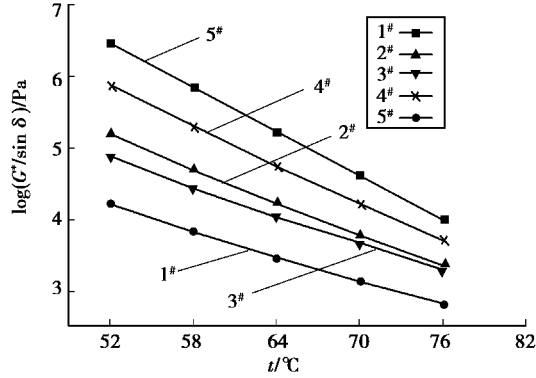


图 4 5 种沥青车辙因子随温度的变化规律

Fig. 4 Change rules of five asphalt rut factors with temperature

由图 4 可知，5 种沥青车辙因子曲线的横纵向变化规律同复数模量、相位角表现的规律一致。值得注意的是，随着温度的不断升高，5 条曲线表现为“聚拢”的趋势，这表明 SBR 改性沥青的高温流变性受老化程度的影响随着温度的升高逐渐增强，SBR 改性沥青在高温时受老化的程度较中低温严重。SBR 改性沥青经历方式一和方式二老化后最终残留物的车辙因子  $4^{\#} < 5^{\#}$ ，表明老化方式二对 SBR 改性沥青高温流变性的影响更严重。综合分析图 3 和图 4 发现， $2^{\#}$  曲线和曲线  $3^{\#}$  始终比较接近，表明 RTFOT+PAV 老化方式与 RTFOT+UV 老化方式对 SBR 改性沥青的高温流变性能和老化性能的影响程度比较接近；进一步分析比较 2 图中的  $2^{\#}$ 、 $3^{\#}$ 、 $4^{\#}$  和  $5^{\#}$  曲线发现，相对于  $2^{\#}$  和  $3^{\#}$  曲线， $4^{\#}$  和  $5^{\#}$  曲线在图中的位置发生了明显偏移，表明  $2^{\#}$  和  $3^{\#}$  试样分别进一步经历 UV 和 PAV 老化后，其流变性能和老化性能发生了显著变化。因此不难得出，单纯的 UV 和 PAV 对沥青老化几乎有着相近的贡献，忽略任何一种老化都是脱离沥青路面的实际应用情形的，不同的老化顺序对 SBR 改性沥青流变性能和老化程度的影响又各不相同。

### 2.1.4 劲度模量 $S$ 值和蠕变速率 $m$ 值分析

BBR 低温弯曲蠕变试验是通过低温弯曲流变仪自带软件进行加载试验，一般取第 60 s 的劲度模量  $S$  与蠕变速率  $m$  作为 PG 性能试验分级的依据<sup>[13-14]</sup>。文中测试了 5 种沥青分别在  $-12^{\circ}\text{C}$  和  $-18^{\circ}\text{C}$  下的劲度模量和蠕变速率，结果分别如图 5 和图 6 所示，其相应数据见表 4。

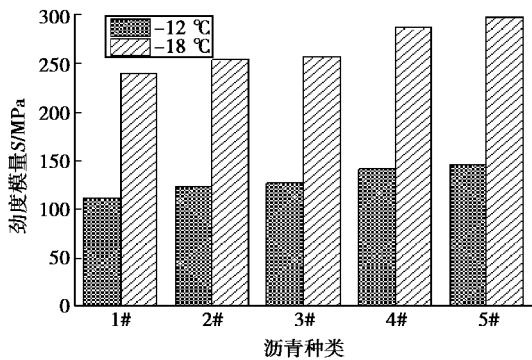


图 5 5 种沥青不同温度下的劲度模量

Fig. 5 Stiffness modulus of 5 kinds of asphalt samples at different temperatures

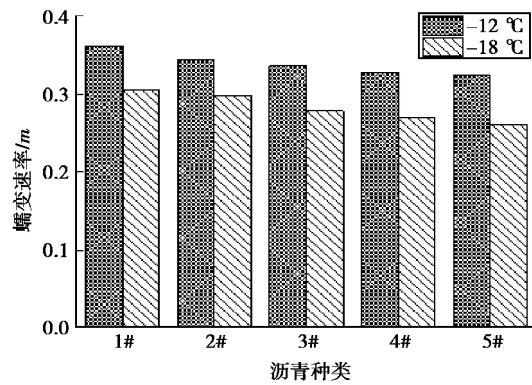


图 6 5 种沥青不同温度下的蠕变速率

Fig. 6 Creep rate of five kinds of asphalt samples at different temperatures

表 4 5 种沥青不同温度下的劲度模量  $S$  值和蠕变速率  $m$  值Table 4 Stiffness modulus  $S$  and creep rate  $m$  of five kinds of asphalt at different temperatures

试样编号	劲度模量/MPa		蠕变速率/ $m$	
	-12 °C	-18 °C	-12 °C	-18 °C
1 <sup>#</sup>	111.5	239.0	0.361	0.305
2 <sup>#</sup>	123.0	253.0	0.344	0.297
3 <sup>#</sup>	127.0	256.0	0.336	0.278
4 <sup>#</sup>	141.0	286.0	0.328	0.269
5 <sup>#</sup>	145.5	297.5	0.324	0.261

由图 5 和图 6 可见,无论是-12 °C 还是-18 °C,5 种沥青试样的劲度模量的大小顺序均表现为 1<sup>#</sup> < 2<sup>#</sup> < 3<sup>#</sup> < 4<sup>#</sup> < 5<sup>#</sup>,而蠕变速率均表现为 1<sup>#</sup> > 2<sup>#</sup> > 3<sup>#</sup> > 4<sup>#</sup> > 5<sup>#</sup>,表明老化程度和老化组合方式不同,对 SBR 改性沥青低温流变性能影响不同。无论是老化方式一还是老化方式二,随着老化程度的加深,沥青的劲度模量均逐渐增大,蠕变速率均逐渐减小,这是因为老化加速了沥青轻质组分的挥发,使得沥青材质变硬变脆,沥青的应力松弛能力变差,低温抗裂性下降。从表 4 可以看出,紫外老化对 SBR 改性沥青低温性能的影响不容忽视,具体表现为沥青经历初期老化之后,再经历紫外老化比经历 PAV 老化劲度模量增幅更大,蠕变速率减幅更大,表明相较于 PAV 老化,紫外老化对 SBR 改性沥青低温抗裂性能的影响更严重;由表 4 还可得出,以-18 °C 为例,老化后的 4 种沥青相较于 RTFOT 老化沥青劲度模量依次增加了 5.9%、7.1%、19.7%、24.5%,表明老化方式二比老化方式一对 SBR 改性沥青的低温抗裂性能影响更显著。

## 2.2 SBR 改性沥青交互老化前后机理分析

### 2.2.1 红外光谱 IR 分析

红外吸收光谱法(IR)是研究沥青及聚合物官能团性能特性最常用的方法之一<sup>[15-17]</sup>。文中采用红外光谱仪分别测试了 1<sup>#</sup>~5<sup>#</sup> 沥青 500~4 000  $\text{cm}^{-1}$  范围内的红外光谱图像,测试结果如图 7 所示。

图 7 是 5 种老化沥青的红外光谱图。在 3 440  $\text{cm}^{-1}$  处是羟基—OH 的振动吸收峰,在 1 600~1 700  $\text{cm}^{-1}$  处是苯环 C=C 双键骨架和 C=O 振动吸收峰;在 1 450  $\text{cm}^{-1}$  附近吸收峰是亚甲基—CH<sub>2</sub>—的弯曲振动和甲基 CH<sub>3</sub>—不对称弯曲振动的叠加;而在 2 900  $\text{cm}^{-1}$  附近则是饱和烃及其衍生物伸缩振动吸收峰。

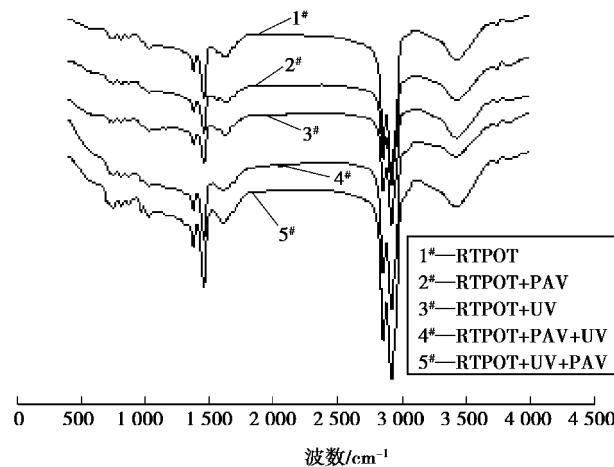


图 7 SBR 改性沥青交互老化作用后的红外光谱图

Fig. 7 Infrared spectrum of SBR modified asphalt after interactive aging

对比分析图 7 中的 2 组红外光谱曲线(1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 和 4<sup>#</sup> 以及 1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 和 5<sup>#</sup>)可以看出,相对于 1<sup>#</sup> 曲线,2<sup>#</sup> 和 4<sup>#</sup> 曲线在  $1\ 450\ \text{cm}^{-1}$  附近吸收峰明显减弱,说明 PAV 或者 UV 老化使经过 RTOFT 后的 SBR 改性沥青中亚甲基和甲基含量减少,这主要是因为老化过程是沥青轻质组分挥发减少所致;相对于 2<sup>#</sup> 曲线和 4<sup>#</sup> 曲线,3<sup>#</sup> 和 5<sup>#</sup> 曲线在  $1\ 450\ \text{cm}^{-1}$  附近吸收峰又有所增强,表明沥青中亚甲基— $\text{CH}_2$ —和甲基  $\text{CH}_3$ —含量略有增加,这主要是紫外老化使沥青中的双键发生断链进而生成了甲基和亚甲基所致;而在  $1\ 600\sim 1\ 700\ \text{cm}^{-1}$  处的特征峰变化并不明显,可能是因为老化过程中尽管生成了羰基,但同时沥青中碳碳双键  $\text{C}=\text{C}$  被破坏,导致在此处的吸收峰变化不大,也可能是因为老化过程中生成的羰基发生了部分水解生成了羟基,这可以通过对比图中  $3\ 440\ \text{cm}^{-1}$  附近的羟基吸收峰得以验证。PAV 老化与 UV 老化有着各自不同的机理:PAV 老化机理主要是沥青湿热氧化生成羰基  $\text{C}=\text{O}$ ,而 UV 老化机理主要是沥青中的碳碳双键  $\text{C}=\text{C}$  被破坏。

进一步分析图 7 中的 4<sup>#</sup> 和 5<sup>#</sup> 2 条红外曲线可知,5<sup>#</sup> 曲线在  $1\ 450\ \text{cm}^{-1}$  附近和  $3\ 440\ \text{cm}^{-1}$  附近吸收峰明显强于 4<sup>#</sup> 曲线,表明 5<sup>#</sup> 试样中亚甲基和甲基含量较大,而且同时生成了更多的由羰基转化而来的羟基,证明老化方式二对 SBR 改性沥青的老化作用强于老化方式一。

### 2.2.2 差示扫描量热分析 DSC

文中通过研究交互老化对 SBR 改性沥青玻璃态转变温度的影响来评价其低温性能<sup>[16]</sup>,进而探究交互老化对 SBR 改性沥青老化程度的影响。采用差示量热扫描法分别测试了 1<sup>#</sup>~5<sup>#</sup> 沥青试样玻璃化转变温度  $T_g$  及热焓  $\Delta H$ ,测试结果见图 8 和表 5 所示。

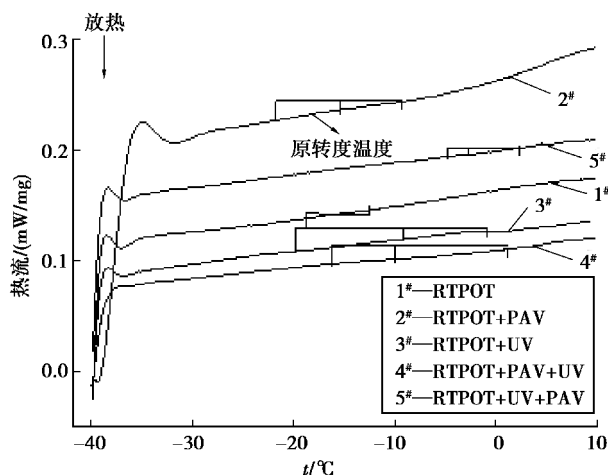


图 8 RTFOT+PAV+UV 老化下 SBR 改性沥青 DSC 曲线

Fig. 8 DSC curve of SBR modified asphalt under RTFOT+PAV+UV aging

表 5 DSC 试验结果

Table 5 DSC test results

试样编号	温度转变范围/°C	玻璃化转变温度 $T_g$ /°C	焓变 $\Delta H/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
1 <sup>#</sup>	-14.5~-12.7	-14.1	0.204
2 <sup>#</sup>	-14.4~-10.1	-12.8	0.127
3 <sup>#</sup>	-17.6~0.9	-9.9	0.152
4 <sup>#</sup>	-9.2~-1.9	-6.1	0.031
5 <sup>#</sup>	-3.8~-1.5	-2.8	0.019

从图8可知,5种沥青试样的曲线变化趋势几乎保持一致,仅在吸热峰位置和吸热面积上存在差异。随着温度的升高,沥青从玻璃态逐渐转变到高弹态,再由高弹态转变到粘流态。由表5可知,5种沥青的玻璃化转变温度  $T_g$  值  $1^\# < 2^\# < 3^\# < 4^\# < 5^\#$ ,表明随着老化程度的加深,SBR改性沥青的低温性能越来越弱;对比  $2^\#$  和  $3^\#$  试样发现,初期老化后,SBR改性沥青经历长期老化比经历紫外老化玻璃化转变温度  $T_g$  更低,表明紫外老化对SBR改性沥青低温性能影响更严重;  $T_g$  值  $4^\# < 5^\#$  表明,老化方式二对SBR改性沥青低温性能影响更严重;由  $T_g$  值大小顺序  $1^\# > 3^\# > 5^\#$  及  $1^\# > 2^\# > 4^\#$  可知,随着老化程度的加深,SBR改性沥青经过交互老化后,其低温性能进一步降低,这正是2种老化方式不同的老化机理叠加的直接体现。

### 3 结 论

1)单独的UV(辐照297h)和PAV老化对经历短期老化后的SBR改性沥青的流变性能都有显著影响,且影响效果比较接近,表明UV对于沥青的老化作用是非常明显的,因此,在高海拔地区,紫外老化对SBR改性沥青的性能影响不容忽视。

2)不同顺序的交互老化方式对经历初期老化后的SBR改性沥青的流变性能有着明显不同的影响特征,先经历PAV老化再经历紫外老化复数模量增量更大,而先经历紫外老化再经历PAV老化劲度模量增幅更大,蠕变速率减幅更大,紫外老化对SBR改性沥青低温性能的影响更严重。

3)PAV老化与UV老化有着各自不同的机理:PAV老化机理主要是沥青湿热氧化生成羰基  $C=O$ ,而UV老化机理主要是沥青中的碳碳双键  $C=C$  被破坏,交互老化的最终结果正是这2种老化机理的叠加。

#### 参考文献:

- [1] 王佳妮. 模拟紫外环境下沥青流变行为及老化机理的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.  
WANG Jiani. Study on aging mechanism and rheologic behavior of asphalt under simulate ultraviolet environment [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)
- [2] 丁彪, 柯文豪, 左兴, 等. 紫外老化对沥青及沥青混合料高低温性能的影响[J]. 新型建筑材料, 2017, 44(5): 9-12,45.  
DING Biao, KE Wenhao, ZUO Xing, et al. Effect of ultraviolet aging on high and low temperature performance of asphalt and asphalt mixture[J]. New Building Materials, 2017, 44(5): 9-12,45. (in Chinese)
- [3] Sirin O, Universily Q, Tia M, et al. Evaluation of an improved rotavapor aging apparatus using amorton flask for simulation of hot-mixing on modified asphalts [C]// International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering. Meetings of the Transportation Research Board: 2011. EPOKA University, Tirana, ALBANIA, 2011: 1-15.
- [4] 聂帅, 张登峰, 胡锦轩, 等. 基于高紫外强度下沥青混合料紫外老化的研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2018, 42(1): 149-153.  
NIE Shuai, ZHANG Dengfeng, HU Jinxuan, et al. Research on UV aging of asphalt mixture based on high intensity UV [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2018, 42(1): 149-153. (in Chinese)
- [5] 毛雪松, 黄喆, 朱凤杰. 高寒高海拔地区路面典型结构适应性研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2017, 36(8): 23-29.  
MAO Xuesong, HUANG Zhe, ZHU Fengjie. Adaptability of pavement typical structure in high altitude cold area [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2017, 36(8): 23-29. (in Chinese)
- [6] 陈尚江. 贵州高海拔地区沥青路面结构与材料适应性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.  
CHEN Shangjiang. Study on structure and material adaptability of asphalt pavement in high altitude region of Guizhou [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [7] 王强, 袁野, 欧阳春发, 等. 废旧橡胶改性沥青的老化研究现状[J]. 高分子通报, 2015(6): 19-28.  
WANG Qiang, YUAN Ye, OUYANG Chunfa, et al. Research on aging of waste rubber modified asphalt[J]. Chinese Polymer Bulletin, 2015(6): 19-28. (in Chinese)
- [8] 周允华. 中国地区的太阳紫外辐射[J]. 地理学报, 1986, 53(2):132-146.



- ZHOU Yunhua. Solar ultraviolet radiation in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1986, 53(2):132-146. (in Chinese)
- [9] Miknis F P, Pauli A T, Beemer A, et al. Use of NMR imaging to measure interfacial properties of asphalts[J]. *Fuel*, 2005, 84(9): 1041-1051.
- [10] 李超, 邬鑫, 王子豪, 等. 多聚磷酸改性沥青结合料高温流变性能[J]. *建筑材料学报*, 2017, 20(3): 469-474,488.  
LI Chao, WU Xin, WANG Zihao, et al. High temperature rheological properties of polyphosphoric acid modified asphalt binder[J]. *Journal of Building Materials*, 2017, 20(3): 469-474,488. (in Chinese)
- [11] 李立寒, 张明杰, 祁文洋, 等. 老化 SBS 改性沥青再生与机理分析[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2017, 37(3): 1-8.  
LI Lihan, ZHANG Mingjie, QI Wenyang, et al. Regeneration of aged SBS modified asphalt and its mechanism analysis [J]. *Journal of Chang'an University(Natural Science Edition)*, 2017, 37(3): 1-8. (in Chinese)
- [12] Liu X M, Li T Y, Zhang H L. Short-term aging resistance investigations of polymers and polyphosphoric acid modified asphalt binders under RTFOT aging process[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 191: 787-794.
- [13] Baldino N, Gabriele D, Rossi C O, et al. Low temperature rheology of polyphosphoric acid (PPA) added bitumen [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 36: 592-596.
- [14] 王琨, 郝培文. BBR 试验的沥青低温性能及粘弹性分析[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2016, 35(10): 1138-1143.  
WANG Kun, HAO Peiwen. Analysis of asphalt low temperature performance and viscoelasticity based on BBR test [J]. *Journal of Liaoning Technical University(Natural Science)*, 2016, 35(10): 1138-1143. (in Chinese)
- [15] Aflaki S, Hajikarimi P, Fini E H, et al. Comparing effects of biobinder with other asphalt modifiers on low-temperature characteristics of asphalt[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, 26(3): 429-439.
- [16] 徐志荣, 陈忠达, 常艳婷, 等. 改性沥青 SBS 含量的红外光谱分析[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2015, 35(2): 7-12.  
XU Zhirong, CHEN Zhongda, CHANG Yanting, et al. Application of infrared spectroscopy to detect the dosage of SBS in modified asphalt[J]. *Journal of Chang'an University(Natural Science Edition)*, 2015, 35(2): 7-12. (in Chinese)
- [17] 黄优, 刘朝晖, 李盛, 等. 沥青材料的玻璃态转变温度求解及低温性能分析[J]. *材料导报*, 2016, 30(16): 141-144,149.  
HUANG You, LIU Zhaohui, LI Sheng, et al. Glass transition temperature calculation and low-temperature property analysis of asphalt[J]. *Materials Review*, 2016, 30(16): 141-144,149. (in Chinese)

(编辑 詹燕平)