

# 紫外老化对 SBS-MCR 复合改性沥青 流变性能影响规律研究

叶向前, 邹晓翎, 田发富

(重庆交通大学 土木工程学院, 重庆市 400074)

**摘要:**为研究紫外老化作用对 SBS-改性胶粉(MCR)复合改性沥青路用性能的影响,通过改进的紫外老化试验箱模拟沥青胶结料在实际路用过程中的紫外辐射作用,借助常规试验方法分析紫外老化对沥青常规指标的影响,采用 DSR 和 BBR 试验分析紫外老化后沥青样品的高、低温以及疲劳流变性能变化规律。结果表明:随着紫外老化时长的增加,SBS-MCR 复合改性沥青的 25 ℃针入度、5 ℃延度指标有显著下降,60 ℃动力黏度则显著提升,软化点表现为明显的两阶段老化特性。经长期紫外老化后的 SBS-MCR 复合改性沥青车辙因子  $G^*/\sin \delta$  明显提高,但高温条件下的变形恢复能力降低;紫外老化可增大沥青弯曲劲度模量  $S$  和降低蠕变恢复率  $m$ ,整体来讲沥青的低温流变性能降低;此外,紫外老化对沥青疲劳流变性能产生了不利影响。

**关键词:**道路工程; 紫外老化; 复合改性; 流变性能

**中图分类号:** U414

**文献标志码:** A

SBS-改性胶粉(MCR)复合改性沥青因其路用性能优良,被广泛应用于高等级公路<sup>[1-2]</sup>。由于长期暴露在热、氧、紫外辐射的环境中,沥青胶结料老化而引起的沥青路面病害是导致路面损坏的主要原因之一<sup>[3-4]</sup>。JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》采用旋转薄膜加热试验(RTFOT)和加压加速老化试验(PAV)对沥青路面材料在拌和、运输、施工及长期使用过程中的老化作用进行了有效的模拟,但关于紫外老化(UV)对沥青胶结料路用性能的影响尚缺乏明确的试验方法。韩明哲等<sup>[5]</sup>对 SBS 改性沥青的热—光—氧老化机理进行了综述,指出沥青的光老化主要由紫外辐射引起;宋家乐等<sup>[6]</sup>采用红外光谱图和荧光显微镜分析了 SBS 改性沥青的微观老化机理,但并未考虑紫外辐射对 SBS 改性沥青老化的影响。现有关于沥青胶结料老化的研究大多数采用了 RTFOT 或 PAV 法,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,特别是在紫外辐射较强的高海拔地区,紫外辐射对沥青胶结料老化作用不容忽视<sup>[7]</sup>。基于此,将 SBS-MCR 复合改性沥青经 RTFOT 老化+不同时长的紫外老化(UV)处理后制备试样,采用常规指标试验及流变学试验手段,研究紫外老化对 SBS-改性胶粉复合改性沥青流变性能影响,系统分析经紫外老化处理后的 SBS-MCR 复合改

性沥青路用性能变化规律。

## 1 材料与试验

### 1.1 原材料

基质沥青为重交 70# 道路石油沥青,改性胶粉(MCR)目数为 60,SBS 改性剂型号为线型 YH-791,SBS-MCR 复合改性沥青的技术指标见表 1。

表 1 SBS-MCR 复合改性沥青技术指标

技术指标	单位	检测结果	试验方法
针入度(25 ℃,5 s,100 g)	0.1 mm	46.8	T0604
软化点(环球法)	℃	79.3	T0606
延度(5 cm/min,5 ℃)	cm	26.4	T0605
60 ℃动力黏度	Pa·s	15 530	T0620

### 1.2 试验方案

#### 1.2.1 紫外老化试验箱

参照文献[8]中紫外老化试验箱的改进方法,对恒温养生箱进行改进。该设备带有温度调节装置和通风装置,研究采用 PHILIPS TL 80W/10R UV 紫外照度计。通过实时监测,确定试验设备的控制因素如下:

(1) 平均紫外辐射强度为 1 000 W/m<sup>2</sup>。

- (2) 箱内温度控制为 45 ℃ 左右。
- (3) 紫外光照时长可自行设定。
- (4) 通风充足。

1.2.2 试样制备

对 SBS-MCR 复合改性沥青进行 RTFOT 老化处理后,得到样品 A。将样品 A 加热至熔融状态,倒入表面涂有硅脂的铁盘中,用铲刀刮平并控制沥青薄膜的厚度为 1 mm 左右。待沥青薄膜冷却至室温后,将薄片裁成 20 cm×20 cm 的沥青样品。

1.2.3 紫外老化时间换算与工况确定

依据文献[7],经过 6 年的模拟紫外老化试验后,SBR 改性沥青的流变性能和老化程度变化显著,考虑到 SBS-MCR 改性沥青与 SBR 改性沥青的相似性,同时为了充分保证紫外老化作用效果,将样品的模拟紫外老化时长定为 7 年。改进后紫外老化箱 1 d 的紫外总辐射量  $Q_1=1\,000\text{ W/m}^2\times24\text{ h/d}=2.4\text{ W}\cdot\text{h}/(\text{cm}^2\cdot\text{d})$ 。以云南省昆明市为例,该地区相同时间下的紫外总辐射量  $Q_2=0.023\,78\text{ W}\cdot\text{h}/(\text{cm}^2\cdot\text{d})^{[9]}$ ,则老化箱加速系数  $k=Q_1/Q_2=2.4/0.023\,78\approx100.93$ 。采用文献[7]中关于紫外老化时间换算的方法,结合云南省昆明市的自然情况,日平均光照时间为 8 h,则每年光照总时长约为 2 920 h。紫外照度计的折减系数取 1.05,则模拟 1 年的室外紫外老化需要的辐射时长为: $t=(1\times2\,920\times1.05)/100.93\approx31\text{ h}$ (按大值取整)。将沥青样品 A 分别进行 31 h、62 h、93 h、124 h、155 h、186 h、217 h 的 UV 老化,得到编号为 B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、B<sub>3</sub>、B<sub>4</sub>、B<sub>5</sub>、B<sub>6</sub>、B<sub>7</sub> 的样品,依次模拟试样经历 1 年、2 年、3 年、4 年、5 年、6 年、7 年的室外紫外老化过程。

1.3 路用性能测试

1.3.1 常规性能试验

依据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,对经紫外老化处理后的 SBS-MCR 复合改性沥青进行常规性能试验,测试指标包括 25 ℃ 针入度、5 ℃ 延度、软化点、60 ℃ 动力黏度。

1.3.2 多重应力蠕变恢复试验(MSCR)

对沥青样品进行多重应力蠕变恢复试验(MSCR),转子直径 25 mm,转子平行板间距 1 mm。设定 0.1 kPa 和 3.2 kPa 两个蠕变应力水平,每种应力水平下进行 200 s 的连续测试,共计 10 个周期,一个周期内包含 1 s 的加载过程和 9 s 的恢复过程,试验温度设定为 60 ℃。

1.3.3 温度扫描试验

将动态剪切流变仪(DSR)设为应变控制模式,应

变水平为 12%,设定加载频率为 10 rad/s,扫描范围为 52~76 ℃,温度间隔为 6 ℃,每档温度稳定 6 min 后进行测试。试验过程对样品进行 20 个周期的正弦震荡波加载。在计算动态剪切模量  $G^*$  和相位角  $\delta$  时,选用后 10 个加载周期的数据,然后计算车辙因子  $|G^*|/\sin\delta$ 。

1.3.4 时间扫描试验(TS)

时间扫描试验结果可以很好地反映沥青胶结料的疲劳损伤特性及抵抗荷载反复作用的能力,且与沥青混合料疲劳性能具有很强的相关性<sup>[10]</sup>。该文采用 DSR 对样品进行时间扫描试验,采用 5% 应变控制模式,转子直径 25 mm,转子平行板间距 1 mm,试验温度 20 ℃,扫描频率为 10 rad/s,采用  $N_{50}$  作为疲劳性能评价指标。

1.3.5 低温弯曲流变试验(BBR)

采用 TE-BBR 型低温弯曲梁流变仪对经紫外老化后的沥青样品进行低温弯曲流变试验(BBR)。试验方法参照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中的相关规定。基于时-温等效原理,试验结果选取 60 s 时对应的荷载和形变值,设置试验温度为-12 ℃和-18 ℃。沥青胶结料低温开裂评价指标选取蠕变劲度 S 和蠕变速率  $m$ 。

2 结果与讨论

2.1 紫外老化对沥青常规指标的影响

对经过不同紫外老化时长处理的沥青样品分别测试了 25 ℃ 针入度、5 ℃ 延度、软化点、60 ℃ 动力黏度,结果见表 2,并将 25 ℃ 针入度、5 ℃ 延度、60 ℃ 动力黏度与紫外老化时长进行拟合,结果如图 1 所示。

表 2 紫外老化后的沥青性能

样品 编号	25 ℃ 针入 度/(0.1 mm)	5 ℃ 延度/cm	软化点/ ℃	60 ℃ 动力黏 度/(Pa·s)
A	44.1	21.5	80.7	19 568
B <sub>1</sub>	41.7	15.9	82.5	23 140
B <sub>2</sub>	40.3	10.3	84.9	29 041
B <sub>3</sub>	38.6	6.4	86.2	35 253
B <sub>4</sub>	37.9	5.8	89.3	36 496
B <sub>5</sub>	37.2	4.3	87.1	37 738
B <sub>6</sub>	37.0	3.9	86.0	38 825
B <sub>7</sub>	36.8	3.7	85.0	39 912

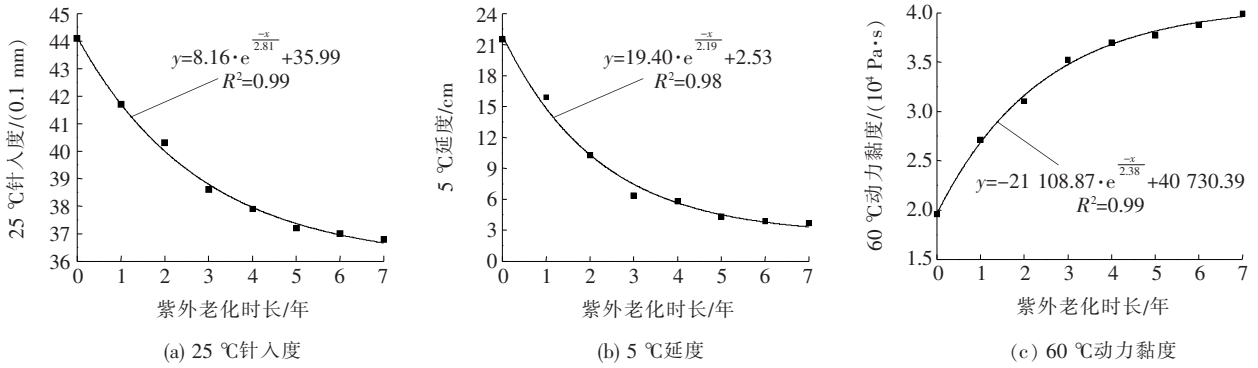


图 1 紫外老化后 SBS-MCR 复合改性沥青常规指标

由表 2、图 1 可知:25 °C 针入度与 5 °C 延度表现出相似规律,即随着紫外老化时间的延长,两个指标均出现不同程度的减小,紫外老化 7 年后,针入度指标减小了 16.5%,延度指标减小了 82.8%,两个指标的减小主要集中在紫外老化前 3 年内完成,后期因紫外老化造成的指标下降很小,此外指标变化预测方程与试验值的相关性很高( $R^2 \geq 0.98$ ),说明用指数形方程预测紫外老化引起的针入度及延度衰减是可行的;软化点的变化趋势则表现为先上升再下降,具有较为明显的两阶段老化特征;对于 60 °C 动力黏度指标,随着紫外老化程度的增加,黏度指标逐渐增大,前期增大速率明显高于后期,样品 B<sub>7</sub> 比样品 A 的黏度增加了 103.97%,说明紫外老化对沥青的黏度影响显著,同时黏度指标的变化规律可由图 1(c)中预测方程很好地表征( $R^2 = 0.99$ )。

2.2 紫外老化对沥青流变性质的影响

2.2.1 复数模量  $G^*$  与相位角  $\delta$  分析

SHRP 研究指出,高温条件下复数模量  $G^*$  与沥青的劲度呈正相关关系,即  $G^*$  值越大,沥青的劲度越大,越不容易产生流动变形;沥青的相位角  $\delta$  越大,沥青中的黏性成分占比越高,在产生高温流动形变后越不容易恢复。该文通过 DSR 温度扫描试验测试了样品 A、B<sub>1</sub>、B<sub>3</sub>、B<sub>5</sub>、B<sub>7</sub> 的复数模量  $G^*$  与相位角  $\delta$ ,其变化规律见图 2、3。

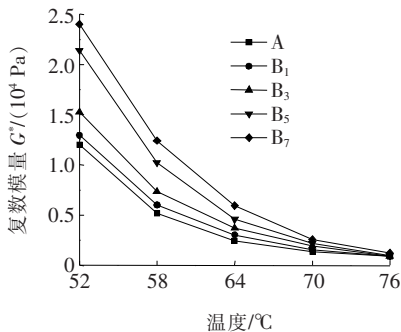


图 2 紫外老化后沥青复数模量变化规律

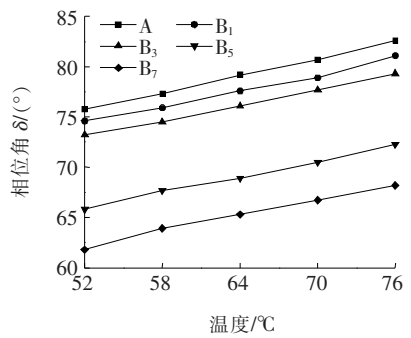


图 3 紫外老化后沥青相位角变化规律

由图 2、3 可知:随着温度的升高,经紫外老化处理的沥青胶结料的复数模量  $G^*$  逐步减小,其衰变规律接近指数分布,而相位角  $\delta$  则呈线性逐步增大。同一温度下,复数模量大小排序为:  $B_7 > B_5 > B_3 > B_1 > A$ , 相位角大小排序为:  $A > B_1 > B_3 > B_5 > B_7$ , 可知:随着紫外老化时长的增加,沥青复数模量增加,相位角减小,表明沥青抵抗流动变形的能力增强。样品 B<sub>3</sub> 的  $G^*$  与  $\delta$  值与样品 B<sub>5</sub> 之间存在明显差异, B<sub>5</sub> 的 52 °C 复数模量测试结果约是 B<sub>3</sub> 的 1.27 倍,表明紫外老化 5 年后 SBS-MCR 复合改性沥青的黏弹组分变化很大,沥青的高温性能提升显著。

2.2.2 车辙因子分析

美国 SHRP 沥青性能分级指标指出车辙因子 ( $G^* / \sin \delta$ ) 能够很好地表征沥青胶结料的高温性能,车辙因子越大,沥青胶结料的抗车辙变形能力越强。紫外老化处理后,沥青样品的车辙因子指标均有不同程度的提升(图 4)。

由图 4 可知:同一温度下,车辙因子大小排序为:  $B_7 > B_5 > B_3 > B_1 > A$ , 表明紫外老化作用提升了沥青胶结料的抗车辙能力。随着试验温度的升高,5 条曲线逐渐有聚拢趋势,表明随着温度的升高, SBS-MCR 复合改性沥青流变性能受紫外老化作用的影响逐渐增强。紫外老化 5 年后,  $G^* / \sin \delta$  大幅度提高,样品 B<sub>5</sub>

在 64 ℃时的测试结果较 B<sub>3</sub> 提高了约 1.29 倍,但是在测试温度提升后, $G^*/\sin\delta$  迅速衰减。图 4 结果也说明,紫外老化作用对 SBS-MCR 复合改性沥青高温流变性能影响显著,因此在实际的路用性能测试中,忽略紫外老化作用的影响是不符合实际路用情况的。

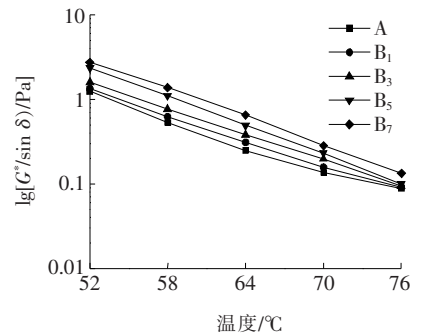


图 4 紫外老化后沥青车辙因子变化规律

2.2.3 高温蠕变特性分析

文献[11]指出蠕变恢复率指标  $R$  和不可恢复蠕变柔量  $J_{nr}$  与改性沥青高温路用性能具有很好的相关性。为了更准确地对紫外老化后沥青样品在较大应力下的非线性流变响应进行分析,对样品进行 MSCR 试验后,选择蠕变恢复率指标  $R$  和不可恢复蠕变柔量  $J_{nr}$  对样品的高温流变性能进行评价。

蠕变恢复率  $R$  与沥青胶结料的弹性变形潜力具有良好的相关性, $R$  值越大则沥青的弹性恢复能力越强。该研究对样品在 0.1 kPa 和 3.2 kPa 应力条件下的  $R$  值进行了测试,结果如图 5 所示。

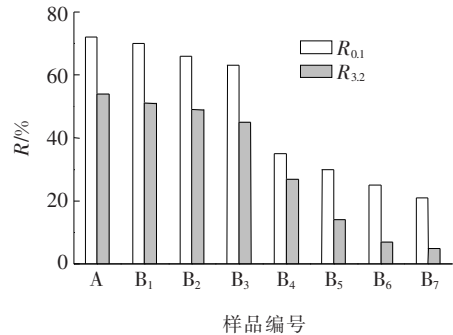


图 5 紫外老化后沥青蠕变恢复率  $R$  变化规律

由图 5 可知:① 经紫外老化处理后沥青的蠕变恢复率  $R$  值随老化时长的增加逐渐降低,在紫外老化后的前 3 年, $R$  值降低并不明显,在紫外老化 5 年后,样品  $R$  值下降显著,紫外老化 7 年后,样品丧失大部分弹性;② 在高温低应力水平下(0.1 kPa, 60 ℃),紫外老化对沥青弹性变形的影响程度比高温高应力条件下(3.2 kPa, 60 ℃)小。

不可恢复蠕变柔量  $J_{nr}$  能够很好地表征沥青在高

温荷载作用下的变形程度, $J_{nr}$  越大则沥青的变形程度越大,相应的高温性能越差。图 6 为不同应力水平条件下紫外老化沥青样品不可恢复蠕变柔量  $J_{nr}$  与老化时长的回归曲线。

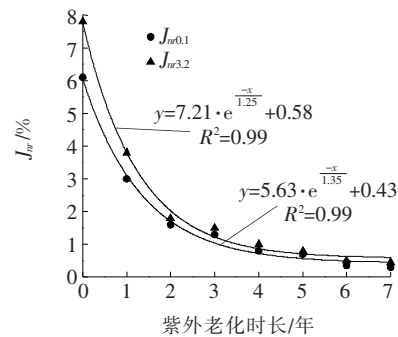


图 6 紫外老化后沥青不可恢复蠕变柔量  $J_{nr}$  变化规律

由图 6 可知:应力水平越高, $J_{nr}$  越大,随着紫外老化程度的加深,沥青抵抗变形的能力增强, $J_{nr}$  指标的降低规律符合指数分布,说明紫外老化作用可以增强沥青胶结料的高温抗车辙能力,且在经历紫外老化 3 年后提升效果尤为明显。

2.2.4 劲度模量  $S$  和蠕变速率  $m$  分析

SHRP 计划指出,蠕变劲度模量指标  $S$  能够很好地表征沥青的低温柔性, $S$  值越大,低温柔性越差,在实际的路用过程中越容易开裂;蠕变速率指标  $m$  则与沥青的低温劲度模量具有很好的相关性, $m$  值越大,材料在低温环境中具有越强的应力松弛性,产生低温开裂的可能性越小。该文对经紫外老化后的样品进行 -12 ℃和 -18 ℃的低温弯曲蠕变试验,测试样品的劲度模量  $S$  和  $m$  值,结果如表 3 所示。

表 3 紫外老化后沥青的劲度模量  $S$  和蠕变速率  $m$

样品编号	劲度模量 $S$ /MPa		蠕变速率 $m$	
	-12 ℃	-18 ℃	-12 ℃	-18 ℃
A	110.5	235.1	0.385	0.320
B <sub>1</sub>	111.8	238.7	0.380	0.317
B <sub>2</sub>	113.7	244.0	0.372	0.312
B <sub>3</sub>	116.9	252.2	0.361	0.306
B <sub>4</sub>	120.0	257.3	0.348	0.298
B <sub>5</sub>	124.2	265.0	0.333	0.286
B <sub>6</sub>	130.7	276.0	0.318	0.273
B <sub>7</sub>	140.4	289.5	0.300	0.260

由表 3 可知:

(1) SBS-MCR 复合改性沥青的劲度模量  $S$  随紫外老化时长的增加逐渐增大,温度越低,不同紫外老化时长的劲度模量  $S$  差异越明显。而  $m$  值的变化规律则与



S 值相反,温度越高,不同沥青样品之间  $m$  值差异越大。这说明,在低温状态下劲度模量  $S$  可以作为区分紫外老化后 SBS-MCR 复合改性沥青低温性能的指标,而在负温状态下,相对高温时,可以选择  $m$  值作为区分紫外老化后 SBS-MCR 复合改性沥青低温性能的指标。

(2) 随着紫外老化程度的加深,劲度模量  $S$  逐渐增大,蠕变速率  $m$  逐渐减小,这是由于紫外老化使沥青中的轻质组分挥发,沥青变硬变脆,应力松弛性能下降,易产生低温开裂病害。整体来讲,紫外老化对 SBS-MCR 复合改性沥青低温流变性能的影响比较明显,以  $-18^{\circ}\text{C}$  试验条件为例,紫外老化 7 年后,样品的劲度模量  $S$  值增长了 23.14%,蠕变速率  $m$  降低了 18.75%。

### 2.3 紫外老化对沥青疲劳性能的影响

孙大权等<sup>[12]</sup>研究了不同沥青疲劳寿命指标的区分度及相关性,指出采用复数剪切模量降至 50% 的荷载作用次数  $N_{f50}$  可以很好地对沥青胶结料的疲劳寿命进行判定。该文对样品进行时间扫描后,选取  $N_{f50}$  作为沥青疲劳性能的评价指标。图 7 为紫外老化时长与 SBS-MCR 复合改性沥青疲劳寿命  $N_{f50}$  的回归曲线。

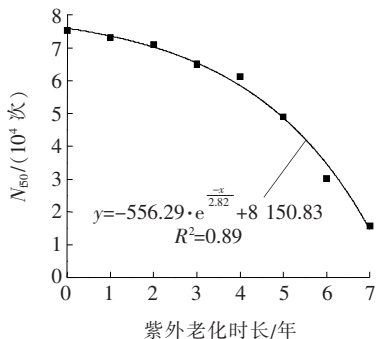


图 7 紫外老化对沥青疲劳性能的影响规律

由图 7 可知:在紫外老化前期(1~3 年),沥青疲劳寿命衰减并不明显,随着紫外老化时长的增加,沥青疲劳寿命衰减速率不断增加,且衰减幅度降低显著,紫外老化 7 年后样品的疲劳寿命衰减了 79.07%,表明紫外老化对沥青胶结料的结构强度具有破坏作用,降低了 SBS-MCR 复合改性沥青的疲劳寿命。

## 3 结论

(1) 长期的紫外老化作用可显著降低 SBS-MCR 复合改性沥青的  $25^{\circ}\text{C}$  针入度、 $5^{\circ}\text{C}$  延度指标,提升沥青的  $60^{\circ}\text{C}$  动力黏度指标,而沥青的软化点指标则表现出明显的两阶段老化特征。

(2) 长期紫外老化作用可明显提升 SBS-MCR 复

合改性沥青在高温条件下抵抗车辙变形的能力,但沥青胶结料轻质组分挥发,脆化严重,丧失了大部分的弹性恢复能力,产生形变后不易恢复。

(3) 在低温条件下,可以选用劲度模量  $S$  指标来评价紫外老化作用对 SBS-MCR 复合改性沥青低温流变性能的影响,而在负温状态下,相对高温时,蠕变恢复率  $m$  则可以很好地表征沥青的低温流变特性。

(4) 紫外老化作用能够显著降低 SBS-MCR 复合改性沥青的低温流变性能。

(5) 在紫外老化 3 年后,SBS-MCR 复合改性沥青疲劳寿命缩减幅度较小,紫外老化 7 年后,沥青的疲劳寿命缩减了 79.07%,表明紫外老化作用对 SBS-MCR 复合改性沥青疲劳寿命影响显著。

### 参考文献:

- [1] 杨倡珍,张允宝. 老化 CR/SBS 复合改性沥青混合料弯曲疲劳特性试验研究[J]. 中外公路,2020,40(4):311-318.
- [2] 刘梦梅,韩森,任万艳,等. 橡胶和 SBS 对排水沥青混合料性能影响的试验研究[J]. 中外公路,2018,38(3):269-274.
- [3] 金大中,钱国平,白献萍,等. 沥青紫外光老化研究进展[J]. 中外公路,2019,39(5):209-214.
- [4] 包建业. 胶粉对 SBS 改性沥青流变特性及微观结构的影响[J]. 中外公路,2019,39(3):251-255.
- [5] 韩明哲,李祖仲,赵泽鹏,等. SBS 改性沥青老化及防老化研究进展[J]. 科技导报,2016,34(18):101-105.
- [6] 宋家乐,何璐,王欣,等. SBS 改性沥青的 RTFOT 微观老化机理[J]. 公路交通科技,2020,37(2):1-7.
- [7] 陈辉强,李成林,孙建邦,等. 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[J]. 重庆大学学报,2019,42(7):54-62.
- [8] 梁远禄,彩雷洲,赵立东. 紫外老化对树脂沥青混合料性能影响[J]. 公路,2019,64(6):252-255.
- [9] 周允华. 中国地区的太阳紫外辐射[J]. 地理学报,1986,41(2):132-146.
- [10] BAHIA H U, HANSON D I, ZENG M, et al. Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design [M]. Washington D. C.: Ransportation Research Oard,2001.
- [11] D'ANGELO J, KLUTTZ R, DONGRE R N, et al. Revision of the Superpave High Temperature Binder Specification: the Multiple Stress Creep Recovery Test [J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists,2007,76(2):123-162.
- [12] 孙大权,林添坂,曹林辉. 基于动态剪切流变试验的沥青疲劳寿命分析方法[J]. 建筑材料学报,2015,18(2):346-350.