

## 橡胶沥青紫外光老化性能试验研究

肖鹏 吴美平 蒋德安

(扬州大学建筑科学与工程学院,扬州,225127)

**摘要:**为了研究橡胶沥青紫外光老化后的性能变化,使用布氏粘度仪、动态剪切流变仪、弯曲流变仪测试紫外光老化后的橡胶沥青的软化点、粘度、疲劳因子、蠕变劲度和蠕变速率。试验结果表明:随着紫外光老化时间的延长,橡胶沥青高温稳定性有所提高,抗疲劳开裂能力和低温性能逐渐降低。紫外老化温度高于 60 °C 时,橡胶沥青受紫外光老化和热氧老化共同作用,软化点和粘度增幅较大,抗疲劳开裂能力和低温性能也受到显著影响。通过灰关联分析可知,随着紫外光老化时间的延长和老化温度的上升,橡胶沥青老化后的抗疲劳开裂能力和低温性能受到显著影响。同时得出蠕变速率不适合作为评价沥青紫外光老化后性能变化的结论。

**关键词:**橡胶沥青;紫外光老化;抗疲劳开裂能力;低温性能;灰关联分析

**中图分类号:**U414.1      **文献标志码:**A      **文章编号:**1005-2615(2013)01-0152-05

## Study on Properties of Ultraviolet Aged Rubber Asphalt

Xiao Peng, Wu Meiping, Jiang Dean

(College of Architecture Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, 225127, China)

**Abstract:** In order to study performances of the rubber asphalt after ultraviolet aging, softening point, viscosity, fatigue factor, creep stiffness and rate of creep are tested through Brinell viscometer, dynamic shear rheometer (DSR) and bending beam rheometer (BBR). The results show that with the increasing of aging time the high temperature stability of aged asphalt is improved and that anti-fatigue cracking performance and low temperature performance of rubber asphalt decline gradually. When aging temperature is higher than 60 °C, rubber asphalt is effected by thermooxidative aging and ultraviolet aging. Incremental ranges of softening point and viscosity are great, anti-fatigue cracking performance and low temperature performance of rubber asphalt are apparently affected. Through the gray relationship analysis, with the increase of aging time and aging temperature, the impact on anti-fatigue cracking performance and low temperature performance of rubber asphalt is significant. At the same time, the rate of creep is not fit for evaluating the performance of asphalts after ultraviolet aging.

**Key words:** rubber asphalt; ultraviolet aging; anti-fatigue cracking performance; low temperature performance; gray relationship analysis

用废旧轮胎胶粉对道路沥青进行改性,既可以改善沥青的性能,有效提高路面的使用性能,又能解决废旧轮胎造成的环境污染问题,达到了资源再利用目的<sup>[1-3]</sup>。沥青在贮运、加工、施工及使用过程中,由于长时间地暴露在空气中,在风雨、温度变

化、紫外光等自然条件的作用下,会发生一系列的物理及化学变化。此时,沥青中除含氧官能团增多外,其他的化学组成也有所变化,最后使沥青逐渐硬化变脆开裂,不能继续发挥其原有的作用<sup>[4-5]</sup>,直接影响路面的使用寿命。根据光氧化机理,沥青材

**基金项目:**国家自然科学基金(51178409)资助项目。

**收稿日期:**2012-07-04;**修订日期:**2012-09-06

**通信作者:**肖鹏,男,教授,1961 年出生,E-mail: xp8833@yzu.edu.cn。

料收到紫外线辐射后,它的 C-H、C-O、C-C 键断裂生成自由基,自由基与氧反应<sup>[6]</sup>。柳浩等<sup>[7]</sup>研究认为紫外光老化和热氧老化对沥青性能的影响是不一样的。本文通过室内模拟试验研究了橡胶沥青在热、氧、光环境因素组合作用老化后性能变化,为延长橡胶沥青路面使用寿命提供理论依据和技术支持。

本文改变紫外老化的时间和温度,分别对橡胶沥青进行紫外光老化试验,对老化后沥青试样进行动态剪切流变仪(DSR)和弯曲梁流变试验(BBR),分析沥青的软化点、粘度、疲劳因子、蠕变劲度和蠕变速率,得出橡胶沥青的老化性能。

## 1 原材料与制备工艺

橡胶沥青所用原材料和制备工艺参见文献[8]。改性沥青制备工艺见图 1。

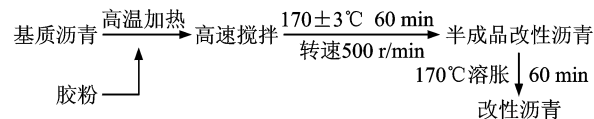


图 1 改性沥青制备工艺

## 2 试验方法

### 2.1 动态剪切流变试验

沥青的流变性能试验在马尔文公司生产的 CVOD 动态剪切流变仪(DSR)上进行。试验方法按照 AASHTO 要求进行,长期老化后沥青试验采用应变控制模式,应变值为 1%, $\omega=10$  rad/s。

### 2.2 弯曲梁流变试验

采用 AASHTO MP5 试验方法,试验温度为  $-12$  °C 和  $-18$  °C。采用经短期老化和长期老化后的沥青试样,在试验时间为 60 s 时,用弯曲梁流变仪(BBR)测量沥青的蠕变劲度  $S$  和蠕变速率  $m$ 。

### 2.3 老化试验与性能测试

#### 2.3.1 薄膜烘箱老化试验

短期老化采用沥青薄膜加热试验模拟,按公路工程沥青及沥青混合料试验规程 JTJ052-2000 中有关规定,在  $163$  °C 温度下薄膜加热 5 h。

#### 2.3.2 紫外光老化试验

紫外光老化试验采用波长为 365 nm 的 GHF125W-03 型汞灯,将薄膜烘箱老化后的沥青试样分装于样盘中,每个样盘中沥青样品重 20 g,沥青膜厚度约为 1 mm。紫外强度约为  $1.949 \times 10^4$   $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ,控制紫外灯的照射时间每天从早上

7:30 至晚上 23:30,总计照射 16 h,间隔 8 h。测试老化后沥青的软化点、粘度、疲劳因子以及蠕变劲度  $S$  和蠕变速率  $m$ 。

## 3 紫外光参数对沥青性能的影响

选取紫外老化时间和紫外老化温度的参数范围分别为 16~96 h 和  $40\sim 100$  °C,进行紫外光老化试验。

### 3.1 老化时间和老化温度对沥青高温性能的影响

软化点和粘度在某种程度上与沥青的高温温度性能有密切关系。不同紫外光老化时间和老化温度后橡胶沥青软化点和粘度试验结果分别见表 1 和图 2。从表 1 可以看出,橡胶沥青的软化点和粘度随着紫外光老化时间的延长逐渐增加;紫外光老化 1 d 到紫外光老化 2 d,软化点和粘度增长缓慢,紫外光老化 3 d 后,由于增长速率较快,因为紫外光老化刚开始只发生在沥青表层,紫外光老化 3 d 后,沥青表面开始出现小细纹,老化开始不仅仅发生在沥青表层<sup>[9]</sup>。由图 2 可知,紫外老化温度从  $40$  °C 到  $60$  °C,橡胶沥青的软化点和粘度稍有升高,变化幅度较小;从  $60$  °C 变化到  $100$  °C,其软化点和粘度变化显著,变化幅度较大。说明老化温度高于  $60$  °C 时,紫外光老化的同时发生了热氧老化,导致沥青老化程度加深。

表 1 不同紫外光老化时间下橡胶沥青紫外光老化性能指标

紫外老化时间/d	0	1	2	3	4	5	6
软化点/°C	68.0	70.9	71.2	73.2	75.9	77.5	78.1
170 °C 粘度 /(Pa·s)	1.420	1.565	1.760	1.870	1.935	2.060	2.145

同时由图 2 和表 1 分析可知,紫外老化后橡胶沥青的软化点和粘度都有所增长,表明老化后橡胶沥青的高温稳定性能出现增强的趋势。

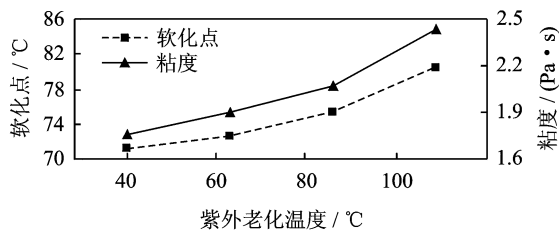


图 2 不同紫外老化温度下软化点和粘度试验结果

### 3.2 老化时间和老化温度对沥青抗疲劳开裂性能的影响

SHRP 规定沥青材料的疲劳因子值不大于

5 MPa。老化后沥青疲劳因子越大,说明沥青抗疲劳开裂能力越差。表2和图3分别给出了紫外老化后橡胶沥青疲劳因子试验结果。结合表2和图3可知,25℃疲劳因子小于对应老化条件下19℃疲劳因子,说明温度较低时,沥青抵抗疲劳开裂能力较差。

表2 不同紫外光老化时间后橡胶沥青的疲劳因子

紫外光老化时间/d		0	1	2	3	4	5	6
测试温度	25℃	0.954	1.149	1.158	1.28	1.354	1.513	1.645
	19℃	2.183	2.409	2.558	2.762	2.972	3.105	3.225

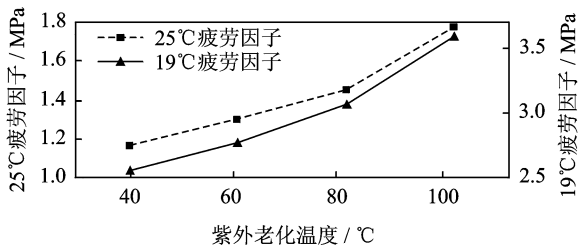


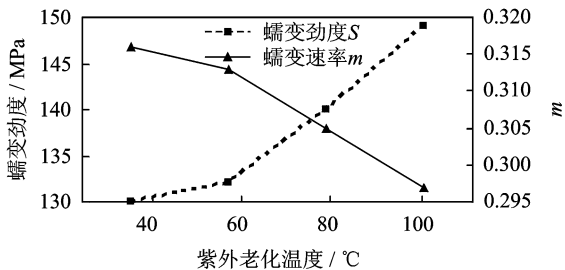
图3 不同紫外老化温度下疲劳因子试验结果

随着紫外光老化时间的延长,疲劳因子呈增加趋势,紫外光老化1 d到老化2 d,增长幅度较小,紫外光老化3 d后,疲劳因子增长幅度相对较快。结果表明,随着紫外老化时间的延长,沥青的抗疲劳开裂性逐渐降低。

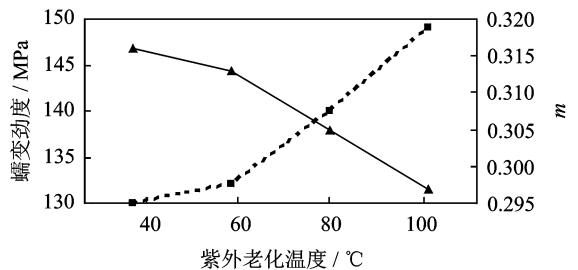
紫外老化温度从40℃到100℃逐渐升高,疲

表3 不同紫外光老化时间后沥青的蠕变劲度和蠕变速率

紫外光老化时间/d		0	1	2	3	4	5	6	
测试温度	-12℃	S/MPa	60.1	64.2	68.1	72.1	77.9	80.5	81.8
	<i>m</i>	0.373	0.367	0.361	0.354	0.338	0.328	0.323	
-18℃	S/MPa	123	126	130	139	143	150	153	
	<i>m</i>	0.327	0.324	0.316	0.313	0.307	0.301	0.295	



(a) 测试温度为-12℃



(b) 测试温度为-18℃

图4 不同紫外老化温度下橡胶沥青的蠕变劲度和蠕变速率

劳因子变化幅度也逐渐增大。同时可以得出,当 $T \leq 60^\circ\text{C}$ 时,沥青的抗疲劳开裂能力降低甚微,而 $T > 60^\circ\text{C}$ 时,橡胶沥青受紫外光老化和热氧老化共同作用,沥青的抗疲劳开裂能力衰减较大。

### 3.3 老化时间和老化温度对沥青低温性能的影响

SHRP规范采用弯曲流变试验来评价沥青的低温性能,用 $S$ 和 $m$ 值作为表征参数<sup>[10]</sup>。 $S$ 值为蠕变劲度模量, $S$ 值越小,表明沥青低温性能越好; $m$ 值表征蠕变劲度随时间变化的速率, $m$ 值越大,说明对温度应力的消散能力越好。

不同紫外光老化时间和老化温度后橡胶沥青BBR试验结果分别见表3和图4。从表3可知,在两种温度下,蠕变劲度都是随着紫外老化时间的增长而增大,蠕变速率则逐渐变小,说明随着老化时间的增加,橡胶沥青的低温性能和对温度应力的消散能力随着老化时间的延长而逐渐降低,这也是低温开裂更多发生在沥青路面服务期后期的原因。由图4所示,当紫外老化温度低于 $60^\circ\text{C}$ 时,蠕变劲度和蠕变速率的变化甚微,而老化温度大于 $60^\circ\text{C}$ 时,蠕变劲度和蠕变速率发生显著变化,结果表明老化温度高于 $60^\circ\text{C}$ 时,热氧老化作用显著增强,在紫外老化和热氧老化共同作用下,橡胶沥青的低温性能和对温度应力的消散能力受到显著影响。

由表3和图4对比可知,紫外老化后橡胶沥青的 $-12^\circ\text{C}$ 蠕变劲度小于 $-18^\circ\text{C}$ 时对应老化条件下的蠕变劲度, $-12^\circ\text{C}$ 的蠕变速率高于 $-18^\circ\text{C}$ 的蠕变速率,由此说明温度越低,橡胶沥青低温性能越差。

## 4 紫外光老化参数的灰关联分析

灰关联分析主要是寻求系统中各因素之间的主要关系,找出影响目标值的主要因素,从而掌握事物的主要特征。灰关联分析将因素间相对变化的情况用关联度来描述。如果两种因素在发展过程中相对变化基本一致,则两者关联度就大,反之,两者关联度就小。

由于系统中各因素的物理意义不同,导致数据的量纲不一致,这样比较时就难以得到准确的结果,为了便于分析,保证各因素具有等效性和同序性,因此本研究选用区间值化对原始数据进行处理,使之量纲一化和归一化。记经数据变换的母数列为 $\{x_0(t)\}$ ,子数列为 $\{x_i(t)\}$ ,在时刻 $t=k$ 时, $\{x_0(k)\}$ 与 $\{x_i(k)\}$ 的关联系数 $\{\xi_{0i}(k)\}$ 用下式计算

$$\{\xi_{0i}(k)\} \equiv \frac{\Delta_{\min} + \rho\Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \rho\Delta_{\max}} \quad (1)$$

式中: $\Delta_{0i}(k)$ 为 $k$ 时刻两个序列的绝对值,即 $\Delta_{0i}(k) = |x_0(k) - x_i(k)|$ ;  $\Delta_{\max}, \Delta_{\min}$ 分别为各个时刻的绝对差中的最大值与最小值; $\rho$ 为分辨系数,其作用在于提高关联系数之间的差异显著性, $\rho \in (0, 1)$ ,一般情况取 $0.1 \sim 0.5$ ,通常取 $0.5$ 。

$$\gamma_{0i} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi_{0i}(k) \quad (2)$$

式中: $\gamma_{0i}$ 为子序列 $i$ 与母序列 $0$ 的关联度; $N$ 为序列的长度即数据个数。

因为关联度不是唯一的,所以关联度本身的多少不是关键,而各关联度大小的排列顺序更为重要,这便得关联序。将 $m$ 个子序列对同一母序列的关联度按大小顺序排列起来,便组成关联序,记为 $\{\gamma\}$ ,它反映了对于母序列来说,各个子序列的“优劣”关系。在紫外光老化试验中,改变紫外光老化时间和紫外老化温度,进行紫外光老化试验,老化后各性能指标经灰关联分析后得到的关联度见表4。

表 4 沥青紫外光老化后性能指标关联度汇总

老化参数	软化点	170 °C 粘度	疲劳因子		蠕变劲度 S		蠕变速率 m	
			25 °C	19 °C	-12 °C	-18 °C	-12 °C	-18 °C
老化时间	0.878 8	0.903 0	0.855 2	0.942 8	0.900 9	0.926 5	0.466 3	0.505 8
老化温度	0.852 5	0.874 0	0.885 1	0.886 8	0.927 2	0.866 9	0.445 9	0.458 2

由表4可知,紫外光老化时间对各指标的影响序列为:19 °C 疲劳因子 > -18 °C 蠕变劲度 > 170 °C 粘度 > -12 °C 蠕变劲度 > 软化点 > 25 °C 疲劳因子 > -18 °C 蠕变速率 > -12 °C 蠕变速率。结果表明:橡胶沥青经紫外光老化后,与紫外光老化时间的关联度最大的是19 °C 疲劳因子,其次是蠕变劲度。同时橡胶沥青各性能指标与紫外老化温度的关联度排序:-12 °C 蠕变劲度 > 19 °C 疲劳因子 > 25 °C 疲劳因子 > 170 °C 粘度 > -18 °C 蠕变劲度 > 软化点 > -18 °C 蠕变速率 > -12 °C 蠕变速率。橡胶沥青紫外光老化后的各性能指标受紫外老化温度影响最大的是-12 °C 蠕变劲度,其次是疲劳因子。即随着紫外光老化时间的延长和老化温度的上升,橡胶沥青老化后的抗疲劳开裂能力和低温性能受到显著影响。

橡胶沥青各性能指标与紫外光参数关联度最小的是蠕变速率且关联度值在0.5左右,即在紫外光老化中,紫外老化时间和老化温度的改变与沥青老化后蠕变速率的改变相关性较低,说明蠕变速率

不适合评价沥青紫外光老化后的性能变化。

## 5 结 论

(1)紫外老化3 d后,软化点、粘度和疲劳因子增幅较大,说明紫外光老化后橡胶沥青的高温稳定性有所提高以及抗疲劳开裂能力逐渐衰弱。随着紫外光老化时间的延长,橡胶沥青老化程度越来越严重,蠕变劲度S呈现增长的趋势,蠕变速率m表现出降低的趋势,说明低温性能随着老化时间增长逐渐降低。

(2)紫外老化温度低于60 °C,橡胶沥青老化后性能变化幅度较小;紫外老化温度高于60 °C时,橡胶沥青受紫外光老化和热氧老化共同作用,软化点和粘度增幅较大,抗疲劳开裂能力和低温性能也受到显著影响。

(3)通过灰关联分析可知,橡胶沥青经紫外光老化后,与老化时间的关联度最大的是19 °C 疲劳因子,其次是蠕变劲度;受老化温度影响最大的是-12 °C 蠕变劲度,其次是疲劳因子。说明随着紫外光老化时间的延长和老化温度的上升,橡胶沥青

老化后的抗疲劳开裂能力和低温性能受到显著影响。

(4)橡胶沥青各性能指标与紫外光参数关联度最小的是蠕变速率且关联度值在 0.5 左右,说明蠕变速率不适合评价沥青紫外光老化后的性能变化。

#### 参考文献:

- [1] Baek S H, Kim H H, Doh Y S, et al. Estimation of high-temperature properties of rubberized asphalt using chromatograph[J]. Journal of Civil Engineering, 2009,13(3):161-167.
- [2] Ahmet T, Cafer C, Abdulkadir C A. Determination of the optimum conditions for tire rubber in asphalt concrete[J]. Building and Environment, 2005, 40(11):1492-1504.
- [3] Lee S J, Amirkhanian S, Putman B, et al. A laboratory study of the effects of compaction on the volumetric and of rutting properties of CRM asphalt mixtures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007,19(12):1079-1089.
- [4] 黄维蓉. 道路建筑材料[M]. 北京:人民交通出版社, 2011:140-173.  
Huang Weirong. Road construction materials[M]. Beijing: China Communication Press, 2011:140-173.
- [5] 秦利萍. 基于红外光谱分析方法的沥青老化机理研究[J]. 道路工程, 2011,8(15):75-79.  
QIN Liping. Aging mechanism of asphalt based on infrared spectrum method[J]. Highway Engineer-  
ing, 2011,8(15):75-79.
- [6] 庞凌. 沥青紫外光老化特性研究[D]. 武汉:武汉理工大学材料科学与工程学院, 2008.  
Pang Ling. Research on the ultraviolet radiation aging characteristics of asphalt[D]. Wuhan: materials science and Engineering of Wuhan University of Technology, 2008.
- [7] Liu Hao, Wang Jiani, Tan Yiqiu. Study on influence of asphalt performance for ultraviolet aging[J]. Science Technology and Engineering, 2010,10(19):4679-4686.
- [8] Xiao Peng, Wu Meipin, Shi Shanshan, et al. Comparative study on water aging of rubber asphalt and TOR rubber asphalt[C]//The 2nd International Conference on Civil Engineering, Architecture and Building materials. Yantai, China: [s. n.], 2012:1383-1386.
- [9] 吴美平. 不同环境作用下橡胶沥青老化性能试验研究[D]. 扬州:扬州大学建筑科学与工程学院, 2011.  
Wu Meiping. Experimental research on the aging characteristics of asphalt Rubber under different environmental effects[D]. Yangzhou: Yangzhou University College of Civil Science and Engineering, 2011.
- [10] 谭忆秋, 王佳妮. 沥青结合料紫外老化机理[J]. 中国公路学报, 2008,21(1):19-24.  
Tan Yiqiu, Wang Jiani. Ultraviolet aging mechanism of asphalt binder[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008,21(1):19-24.

