**文章编号:**1007-9629(2025)04-0385-08

# 间歇式紫外光老化对沥青性能的影响

王佳妮<sup>1,2</sup>, 纪曼曼<sup>2</sup>, 薛忠军<sup>3,\*</sup>, 柳 浩<sup>4</sup>, 张家荣<sup>2</sup>

(1.北京建筑大学北京市城市交通基础设施建设工程技术研究中心,北京 100044;2.北京建筑大学 土木与交通工程学院,北京 100044;3.北京市道路工程质量监督站,北京 100076;

4.北京市政路桥建材集团有限公司,北京 102600)

摘要:为探究自然环境中昼夜交替对沥青老化的影响,设计了间歇式紫外光老化试验,利用动态剪切 流变仪、弯曲梁流变仪及原子力显微镜对间歇式紫外光老化沥青的流变性能进行了研究.结果表明: 与持续式紫外光老化相比,间歇式紫外光老化对沥青流变性能影响更显著,经间歇式紫外光老化后 沥青的高低温流变性能劣化更严重,中温条件下流动性更差,温度敏感性更低;相同深度下,沥青蜂 状结构数量和蜂状结构总面积更少,老化物质在沥青内部扩散更充分,老化程度更大. 关键词:道路工程;沥青;间歇式;紫外光老化;流变性能;扩散

**中图分类号:**U414 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.04.012

## Effect of Light-Dark Alternating UV Aging Condition on Asphalt Performance

WANG Jiani<sup>1,2</sup>, JI Manman<sup>2</sup>, XUE Zhongjun<sup>3,\*</sup>, LIU Hao<sup>4</sup>, ZHANG Jiarong<sup>2</sup>

(1. Beijing Engineering Research Center for Urban Transportation Infrastructure Construction, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. Beijing Road Engineering Quality Supervision Station, Beijing 100076, China; 4. Beijing Municipal Road and Bridge Building Materials Group Co., Ltd., Beijing 102600, China)

Abstract: To investigate the effects of diurnal alternation in natural environments on asphalt aging, a light-dark alternating ultraviolet(UV) aging test was designed. The rheological properties of asphalt subjected to light-dark alternating UV aging were explored using dynamic shear rheometer, bending beam rheometer, and atomic force microscope. The results indicate that compared to continuous UV aging, the light-dark alternating UV aging has a more significant effect on the rheological properties of asphalt. After light-dark alternating UV aging, the base asphalt exhibits more severe deterioration in its rheological performance at both high and low temperatures, with poorer fluidity and lower temperature sensitivity at moderate temperatures. At the same depth, the number and total area of the honeycomb structures in the asphalt are decreased, indicating deeper diffusion of aged substances within the asphalt and a higher degree of aging.

**Key words:** road engineering; asphalt; light-dark alternating; UV aging; rheological property; diffusion

紫外光老化是造成沥青路面路用性能减弱的重 要原因之一<sup>11</sup>.国内外学者采用室内加速老化模拟沥 外光老化研究多考虑光照强度、温度、湿度以及光照

青材料的紫外光老化行为[24].目前,沥青室内加速紫

收稿日期:2024-05-31;修订日期:2024-08-21

基金项目:北京市自然科学基金资助项目(8222014);国家自然科学基金资助项目(52108391);河北省自然科学基金资助项目(E2019203559) 第一作者:王佳妮(1975—),女,吉林长春人,北京建筑大学教授级高级工程师,硕士生导师,博士.E-mail:wangjiani3328@126.com 通讯作者:薛忠军(1974—),男,吉林白山人,北京市道路工程质量监督站教授级高级工程师,博士.E-mail:xuezhongjun@126.com

与湿度等条件的耦合作用<sup>[5-6]</sup>,然而昼夜交替紫外光间 歇作用却鲜有被考虑.昼夜交替是自然环境普遍存在 的现象,暗黑阶段亦对聚合物材料老化产生影响,因 此自然老化过程中的光-暗交替是重要的因素之一. Grossman<sup>[7]</sup>在研究室内风化与自然风化之间的关系 时,在室内环境模拟中加入了暗黑阶段,以强调紫外 光辐射的周期性,这样更贴近自然环境.

沥青老化是物理化学作用下由表及里的过程. 流变性能可以较好地表征沥青紫外光老化特性.动态剪切流变仪(DSR)试验、弯曲梁流变仪(BBR)试 验等是构建沥青老化与性能衰退联系的直接研究途 径<sup>[8-10]</sup>,原子力显微镜(AFM)等微观探测技术能够定 性或定量分析沥青的老化过程<sup>[11-12]</sup>.上述试验可以较 深入地研究光-暗交替模型下紫外光老化对沥青性 能的影响.

本文设计了室内光-暗交替的间歇式紫外光老 化试验,以持续式紫外光老化为对照组,按照辐照总 量相等的原则,通过宏微观试验比较两种光老化方 式下沥青的老化程度,探究间歇式紫外光老化对沥 青流变性能的影响,为室内沥青紫外光老化模拟试 验的发展提供理论支撑和依据,并为后续抗老化措 施的研究提供参考.

## 1 紫外光老化试验设计

### 1.1 试验参数的确定

1.1.1 光-暗时长比例

根据中国统计年鉴计算,2003~2022年北京地

区年均日照时间为7h左右,即24h内辐照时长占比 约为1/3.据此设定间歇式紫外光老化中单周期光照 与暗黑时长比例为1:2.

#### 1.1.2 紫外光老化温度及湿度

紫外光老化温度的设计主要考虑沥青路面在夏 季昼与夜能达到的最高温度.将光照阶段老化温度 设置为60℃,暗黑阶段温度设置为20℃,相对湿度 RH控制在30%~50%.

1.1.3 其他紫外光老化条件

采用紫外线加速耐候试验机进行室内紫外光老 化试验,老化区域处紫外光强度为11×10<sup>3</sup>μW/cm<sup>2</sup>. 老化过程中持续送风,使老化区域的氧含量、压强等 参数与模拟区域环境一致.老化试样厚度为(1.50± 0.05) mm.

#### 1.2 室内老化试验条件

间歇式和持续式紫外光老化试验参数示意图见 图1.在辐照强度相同的区域放置试样,为保证样品 辐照均匀,避免光强衰减,老化过程定期互换试样位 置并测试光照强度.除间歇式紫外光老化在光照老 化后设置低温暗黑阶段,其他参数如光强、温度、湿 度及通风模式等保持一致.

基于光辐照总量相等的原则,对持续式紫外光 老化与间歇式紫外光老化沥青分别进行紫外老化试 验.不同紫外光老化方式下老化时长设计见表1.当 试样达到预设老化时长后,立即取出进行相关试验. 后文讨论中老化时长均以光照时长计.



图1 间歇式和持续式紫外光老化试验参数示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of light-dark alternating and continuous UV aging test parameters

	表1	不同紫外光老化方式下老化时长设计
Tabla 1	Agin	ng duration design of different UV aging modes

Aging mode	Light or dark		Aging du					
Continuous UV aging	Light	120	240	360	480			
Tight doub alternation TIV aging	Light	120	240	360	480			
Light-dark alternating UV aging	Dark	240	480	720	960			

## 2 试验

#### 2.1 原材料

基质沥青为不同油源的70号基质沥青(Q70、 K70)以及90号基质沥青(Z90),其性能指标见表2.

表 2 基质沥青的性能指标 Table 2 Performance indexes of basic asphalts

I		Basic asphalt			
Item	Q70	K70	Z90	method	
Penetration(100 g, 25 °C)/(0.1 mm)	68	70	89	T0604	
Softening point/°C	44	45	42	T0606	
Ductility(15 °C)/cm	>100	>100	>100	T0605	

## 2.2 试验方法

#### 2.2.1 DSR试验

采用 TA AR1500EX 型 DSR,在 60 ℃下对沥青 进行多重应力蠕变恢复试验.在 0.1 kPa下进行 20次 蠕变-恢复循环,每1个循环内加载1 s、卸载9 s;再在 3.2 kPa下完成10次蠕变-恢复循环,每1个循环内加 载1 s、卸载9 s.用蠕变恢复率 R<sub>0.1</sub>来比较不同紫外光 老化方式对沥青高温性能的影响.

采用流动性试验来表征不同紫外光老化方式下

沥青在中温条件下流动性的变化.该试验应变控制 方式、频率扫描,应变为0.1%,温度为30、40℃,频率 范围0.01~10.00 Hz.

## 2.2.2 BBR试验

采用 ATS SYD-0627型 BBR 在 -10 °C下 对小 梁施加 0.98 N的荷载,加载时长为 240 s,以蠕变劲度 S、劲度变化速率 m 及合成指标 m/S 评价不同紫外光 老化方式下沥青低温性能的变化.

#### 2.2.3 AFM试验

采用 Bruker Dimension ICON型 AFM, Bruker Tap150A 探针, 共振频率为150 kHz, 探针半径为 8 nm, 扫描速率为1 Hz, 扫描范围为20 µm×20 µm, 试验温度为25℃. 探测不同紫外光老化方式下不同 深度老化沥青切片的表面特征.

## 3 结果与讨论

#### 3.1 高温流变性能分析

不同紫外光老化方式下沥青的蠕变恢复率见图 2.由图2可知:随着老化时长的增加,沥青黏性成分 逐渐向弹性成分转变,3种沥青的蠕变恢复率均呈现 增高的趋势;间歇式紫外光老化下沥青在高温流变



Fig. 2  $R_{0.1}$  of asphalts under different UV aging modes

方面表现出较明显的老化,K70和Q70沥青的蠕变恢 复率呈现近似线性增长规律,而其持续式紫外光老 化下呈指数型增长;老化480h后,间歇式紫外光老 化与持续紫外光老化沥青蠕变恢复率之差未达老化 沥青的20%;在整个老化过程中,间歇式紫外光老化 下Z90沥青的蠕变恢复率明显高于其持续式紫外光 老化下.综上,3种沥青蠕变恢复率的变化均体现出 间歇式紫外光老化对沥青高温性能的影响比持续式



紫外光老化下更大.

#### 3.2 中温流动性分析

在中温区,对不同紫外光老化方式下老化480h 后的沥青和未老化沥青进行频率扫描,得到其剪切 应力-剪切速率(τ-γ)曲线,结果见图3.由图3可见,3 种沥青 τ-γ曲线的斜率均随着剪切速率的增大逐渐 减小.由此可见,沥青是典型的假塑性流体,应满足 幂律方程:



□ Unaged K70; ● Continuous UV aging, K70; ▲ Light-dark alternating UV aging, K70;
 ▼ Unaged Q70; ● Continuous UV aging, Q70; ▲ Light-dark alternating UV aging, Q70;
 ▷ Unaged Z90; ● Continuous UV aging, Z90; ★ Light-dark alternating UV aging, Z90
 图 3 不同紫外光老化方式下沥青的剪切应力-剪切速率曲线
 Fig. 3 τ-γ curves of asphalts under different UV aging modes(aging duration=480 h)

$$\tau = K\gamma^n$$
 (1) 化后沥

式中:K为稠度系数;n为非牛顿指数.K、n均为拟合参数.

用式(1)对不同紫外光老化方式下沥青的流动曲 线进行拟合(拟合度*R*<sup>2</sup>≥0.99),得到沥青的稠度系数*K* 和非牛顿指数*n*,结果见表 3. 由表 3 可见:紫外光老化 后,沥青的稠度系数增大,且间歇式紫外光老化后沥青 稠度系数增长速率更快;在40℃下,经间歇式紫外光老 化后沥青的稠度系数约为持续式紫外光老化后的 1.36~1.42倍;在30℃下,间歇式紫外光老化后K70沥 青的稠度系数是其持续式紫外光老化后的134%;Q70 和Z90沥青经间歇式紫外老化后稠度系数均大于其持 续式紫外老化后.综上,3种沥青稠度系数的变化表明 间歇式紫外光老化后的流动阻力更大,流动性更差,更 黏稠.这也与Ilaria等<sup>[13]</sup>和Villegas-Villegas等<sup>[14]</sup>在包 含暗黑阶段沥青老化试验中的结果一致.

	表 3	个同紫外光老化万式下沥青的椆皮糸数和非牛顿指数
Table 3	K and n	f asphalt under different UV aging modes(aging duration=480 h)

	K70			Q70				Z90				
Aging method	30 ℃		40 °C		30 ℃		40 °C		30 ℃		40 ℃	
	n	K	n	K	n	K	n	K	n	K	n	Κ
Unaged	0.77	13 581	0.89	1 515	0.78	11 785	0.84	1 504	0.79	9 447	0.88	815
Continuous UV aging	0.74	30 382	0.78	9 277	0.75	31 876	0.79	8 218	0.77	24 621	0.83	5 150
Light-dark alternating UV aging	0.69	40 782	0.72	12 588	0.69	32 471	0.72	11 500	0.71	24 734	0.74	7 325

沥青非牛顿指数n的变化表明老化使沥青在中 温区的温度敏感性较小.黏度η对温度T的依赖性可 由Arrhenius方程表示为:

 $\eta = A \exp(E_{\gamma}/RT) = A' \exp(E_{\tau}/RT)$  (2) 式中: $A \setminus A'$ 均为黏度常数, Pa·s;  $E_{\gamma} \setminus E_{\tau}$ 分别为在恒定 剪切速率、剪切应力下的黏度活化能, J/mol; R 为气 体常数,取8.32 J/(mol·K);T为绝对温度,K.

对于幂律方程流体,有*E*,=*nE*..活化能是黏性流体流动时用于克服分子间作用力的能量障碍,等于每1 mol运动单元流动时所需的能量.活化能越大, 黏度对温度越敏感,感温性越强.间歇式紫外光老化后不同油源及标号沥青的*n*值均明显减小,感温性

降低.

#### 3.3 低温流变性能分析

沥青老化后低温应力松弛能力降低,蠕变劲度S 和劲度变化速率 m均可表征沥青老化后低温流变性 能的变化.不同紫外光老化方式下沥青的蠕变劲度 和劲度变化速率见表4.由表4可见,3种沥青在两种 老化方式下的m值及持续式紫外光老化蠕变劲度均 在老化360h后趋于平缓;间歇式紫外光老化480h 后沥青的蠕变劲度仍呈现持续增加的趋势,尚未达 到平稳态.由此可见,与持续式紫外光老化相比,间 歇式紫外光老化使沥青弹性成分增加更多,黏性成 分减少更大,从而导致沥青低温性能降低.

表4 不同紫外光老化方式下沥青的蠕变劲度和劲度变化速率 Table 4 S and m value of asphalts under different UV aging modes

	A size of strength		m value				
Aging mode	Aging duration/n	K70	<b>Q</b> 70	Z90	K70	Q70	Z90
Unaged	0	68.79	63.10	51.08	0.50	0.51	0.50
	120	83.88	123.47	61.70	0.43	0.46	0.43
Continuous UV origin	240	113.59	130.15	102.16	0.44	0.42	0.40
Continuous U v aging	360	171.37	161.04	125.04	0.37	0.37	0.39
	480	172.94	160.21	131.18	0.34	0.35	0.38
	120	106.57	109.16	81.84	0.48	0.45	0.46
Light doub alternation IIV aging	240	141.91	152.30	104.89	0.42	0.40	0.41
Light-dark alternating U v aging	360	173.84	177.36	120.04	0.36	0.35	0.37
	480	189.72	186.12	132.25	0.35	0.36	0.37

*m*/S是能同时兼顾低温变形性能与应力松弛能力的指标,且可以更好地表征沥青的低温流变性能<sup>[15-17]</sup>.不同紫外光老化方式下沥青的*m*/S值见图4.

由图4可见:3种沥青的m/S值均随着老化时长的增加而逐渐降低,低温性能减弱;间歇式紫外光老化后3种沥青的m/S值均低于同光照时长下持续式紫外光





老化沥青,低温流变性更差;间歇式紫外光老化下,沥 青老化240h时低温性能的劣化是其480h的3.8~6.3 倍;间歇式和连续式紫外光老化对沥青低温流变性 的影响在老化480h时基本接近.劲度模量在持续式 紫外光老化360h后趋于稳定,间歇式紫外光老化至 480h后仍持续增加,低温性能持续降低.综上所述,间 歇式紫外光老化对沥青低温性能的劣化更严重.

结合3种基质沥青流变特性发现,间歇式紫外光 老化对90号沥青高低温性能的影响明显大于其对70 号沥青,这是由于高标号沥青轻质组分更多,为间歇 式紫外老化发挥其优势提供了充分的物质条件,因 此间歇式紫外老化对其作用更加明显.两种油源的 70号基质沥青也存在一定差异,但差异较小,标号更 能体现沥青内油分及胶质成分的比例.在间歇式紫 外老化作用下,标号对沥青流变性变化的影响大于 油源的影响.

#### 3.4 AFM 微观特征分析

紫外光在沥青表面作用强烈,内部沥青不受紫 外线辐射<sup>[2]</sup>,而沥青的紫外光老化深度可达1000 μm 以上<sup>[18]</sup>,深处沥青的紫外光老化是由表层老化和内 部未老化沥青之间的扩散运动<sup>[19]</sup>引起的.为比较分 析不同紫外老化方式对沥青老化及扩散程度的差 别,以老化时长240 h的Z90沥青为例,其不同深度*d* 区域的AFM形貌见图5.由图5可见:持续式紫外光 老化沥青不同深度的形貌与未老化沥青蜂状结构外 形特征相似,分布较均匀,平面较平滑且无凸凹起 伏;间歇式紫外光老化后沥青呈现出凹凸不平的表 面形态,光滑度明显降低.



图 5 Z90沥青不同深度区域的AFM形貌 Fig. 5 AFM morphologies of Z90 asphalt regions at different depths(aging duration=240 h)

在AFM 微观形貌分析中,蜂状结构及周边相态 与沥青四组分分布有关,蜂状结构主要为沥青质,其 周边分布着轻质组分<sup>[20]</sup>.经间歇式紫外光老化后的沥 青,蜂状结构有聚集的趋势,蜂状结构数量减少,单 一蜂状结构面积大幅增大,沥青质在沥青中的聚集 更显著,这在一定程度上增大了老化沥青的黏度和 高温抗车辙性能.蜂状结构的聚集使周边沥青褶皱 更多更密,相态颜色更加不均匀,表明出现某种程度 的相态分离,这与宏观老化沥青的低温流变性更差 相一致.

用 Nanoscope Analysis 与 Image J 软件对沥青切 片形貌图进行处理,识别出蜂状结构数量 N 及蜂状 结构总面积A,结果见图6.由图6可见:在相同深度 下,间歇式紫外光老化沥青蜂状结构数量及蜂状结 构总面积小于持续式紫外光老化沥青,这是由于间 歇式紫外光老化后沥青蜂状结构发生团聚融合,形 成尺寸更大的蜂状结构,其数量及面积减小,可见间 歇式紫外光老化沥青的老化程度更大;当深度为 300、800、1 300 µm时,间歇式紫外光老化的蜂状结 构数量分别是其持续式紫外光老化的71%、68%、 49%,蜂状结构面积分别是持续式紫外光老化71%、 69%、59%.综上,随着深度的加深,间歇紫外光老化 的作用会更加明显.

间歇式紫外光老化是在持续式紫外光老化的基



图 6 Z90 沥青不同深度下的蜂状结构数量及面积

Fig. 6 N and A of honeycomb structures at different depths of Z90 asphalt(aging duration=240 h)

础上,将紫外光持续辐照改为间歇式辐照,增设了无 光低温的暗黑阶段.在此阶段,沥青因无紫外线辐照 而不发生光氧化反应,但老化沥青的扩散行为持续 进行,含有大量芳香分的轻质组分更加活跃,向上挥 发扩散<sup>[6,21]</sup>,沥青质等向下扩散.暗黑阶段为老化沥 青扩散提供了更充裕的时间,使组分扩散范围更深、 程度更大,并为下一循环的光氧化反应提供了更多 的轻质组分,促使沥青老化程度增大,从而导致间歇 式紫外光老化后沥青的流变性能低于其持续式紫外 光老化后.

## 4 结论

(1)在相同辐射强度和辐射总量下,间歇式紫 外光老化对沥青流变性能影响比持续式紫外光老 化更大.间歇式紫外光老化沥青的高中温流变性能 在老化全过程作用显著,其蠕变恢复率和稠度系数 均高于持续式紫外光老化沥青,流动性和温度敏感 性降低;间歇式紫外光老化后沥青的劲度变化速 率/蠕变劲度(m/S)值普遍低于同光照时长的持续 式紫外光老化沥青,间歇式紫外光老化对低温性能 影响更大.

(2)间歇式紫外光老化沥青内部微观结构与持续式光老化后存在明显差异.在相同深度处,持续式紫外光老化沥青微观结构与未老化沥青相似,而间歇式紫外光老化沥青的微观结构更加凹凸不平,老化特征更加明显,蜂状结构数量及蜂状结构总面积均低于持续式紫外光老化沥青.

(3)间歇式紫外光老化以光-暗交替的方式模拟 了自然环境的昼夜循环.暗黑阶段的存在为老化沥 青的扩散行为提供了更充裕的时间,使得老化沥青 扩散深度更大,增加了沥青整体的紫外老化程度,流 变性劣化更严重.

#### 参考文献:

- [1] 郭猛,任鑫,焦峪波,等.沥青及沥青混合料老化与抗老化研 究综述[J].中国公路学报,2022,35(4):41-59.
   GUO Meng, REN Xin, JIAO Yubo, et al. Review of aging and antiaging of asphalt and asphalt mixtures[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(4):41-59.(in Chinese)
- [2] 谭忆秋,王佳妮,冯中良,等.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, FENG Zhongliang, et al. Ultraviolet aging mechanism of asphalt binder[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008,21(1):19-24.(in Chinese)
- [3] LUO M.Study of asphalt performance impact with ultraviolet aging
   [J].IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,
   2017, 231(1):012107.
- [4] 崔世超,王岚.紫外老化对温排胶粉改性沥青砂浆开裂特性的 影响[J].建筑材料学报,2022,25(3):285-293.
  CUI Shichao, WANG Lan. Effect of ultraviolet aging on cracking characteristics of warm mix crumb rubber modified asphalt mortar
  [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(3):285-293.(in Chinese)
- [5] ZENG W B, WU S P, WEN J, et al. The temperature effects in aging index of asphalt during UV aging process [J]. Construction and Building Materials, 2015, 93:1125-1131.
- [6] POLO-MENDOZA R, MARTINEZ-ARGUELLES G, WALUBITA L F, et al. Ultraviolet ageing of bituminous materials: A comprehensive literature review from 2011 to 2022
   [J]. Construction and Building Materials, 2022, 350:128889.
- GROSSMAN G W. Correlation of laboratory to natural weathering
   [J]. Journal of Coatings Technology, 1977, 49(633):45-54.
- [8] 范世平,朱洪洲,钟伟明.基于DSR试验的生物重油再生沥青 流变性能评价[J].建筑材料学报,2022,25(3):320-326.
   FAN Shiping, ZHU Hongzhou, ZHONG Weiming. Rheological property evaluation of heavy bio-oil recycled asphalt based on DSR test [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(3): 320-326.(in Chinese)
- [9] 席晗, 孔令云. 紫外老化沥青分子构成变化及其与流变性能和 化学组成的构效关系[J]. 材料导报, 2025, 39(6):86-94.

XI Han, KONG Lingyun. Structure-activity relationship between molecular structure change and its rheological properties and chemical composition of UV aged asphalt[J]. Materials Reports, 2025, 39(6):86-94.(in Chinese)

- [10] FENG Z G, WANG S J, BIAN H J, et al. FTIR and rheology analysis of aging on different ultraviolet absorber modified bitumens[J]. Construction and Building Materials, 2016, 115: 48-53.
- [11] XING C W, LIU L P, CUI Y, et al. Analysis of base bitumen chemical composition and aging behaviors via atomic force microscopy-based infrared spectroscopy[J]. Fuel, 2020, 264: 116845.
- [12] 屈鑫,丁鹤洋,汪海年.道路沥青老化评价方法研究进展[J]. 中国公路学报,2022,35(6):205-220.
  QU Xin, DING Heyang, WANG Hainian. The state-of-the-art review on evaluation methods of asphalt binder aging[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(6):205-220.(in Chinese)
- [13] ILARIA M, EYAD M . Evolution of the microstructure of unmodified and polymer modified asphalt binders with aging in an accelerated weathering tester[J]. Journal of Microscopy, 2016, 263(3):341-356.
- [14] VILLEGAS-VILLEGAS R E, BALDI-SEVILLA A, AGUIAR-MOYA J P, et al. Analysis of asphalt oxidationby means of accelerated testing and environmental conditions [J]. Transportation Research Record, 2018, 2672(28):244-255.
- [15] ZENG W B, WU S P, PANG L, et al. Research on ultra violet

(UV) aging depth of asphalts[J]. Construction and Building Materials, 2018, 160:620-627.

- [16] LIU S T, CAO W D, SHANG S J, et al. Analysis and application of relationships between low-temperature rheological performance parameters of asphalt binders[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(4):471-478.
- [17] 杨丽娟,龙念泉,王岚,等.基于Burgers模型的温拌胶粉沥青 胶浆低温流变特性[J].建筑材料学报,2022,25(12):1313-1320. YANG Lijuan, LONG Nianquan, WANG Lan, et al. Low-temperature rheological properties of warm-mixed crumb rubber asphalt mortar based on burgers model[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(12):1313-1320.(in Chinese)
- [18] CHEN Z H, ZHANG H L, DUAN H H. Investigation of ultraviolet radiation aging gradient in asphalt binder [J]. Construction and Building Materials, 2020, 246:118501.
- [19] 胡锦轩.沥青紫外老化行为及其老化动力学研究[D].武汉:武 汉理工大学,2018.

HU Jinxuan. Research on ultraviolet ageing performance andageing dynamic of bitumen[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.(in Chinese)

- [20] LI R, WANG P Z, XUE B, et al. Experimental study on aging properties and modification mechanism of Trinidad lake asphalt modified bitumen[J]. Construction and Building Materials, 2015, 101:878-883.
- [21] YU M, WU S P, CHEN M Z. Experimental investigation of the volatilization of asphalts under different conditions [J]. Advanced Materials Research, 2012, 1662(463/464):69-75.

#### (上接第384页)

- [29] 蒋正武,孙振平,王培铭.电化学沉积法修复钢筋混凝土裂缝的 机理[J].同济大学学报(自然科学版),2004,32(11):129-134. JIANG Zhengwu, SUN Zhenping, WANG Peiming. Mechanism on rehabilitation of cracks in reinforced concrete using electrodeposition technique [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 32(11):129-134. (in Chinese)
- [30] LIAU L C K, LIN Y H, PENGY J. Fabrication pathways of p-n Cu<sub>2</sub>O homojunction films by electrochemical deposition processing[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2013, 117

(50):26426-26431.

- [31] QIU P, XU S W, ZHANG K, et al. Influence of deposition potential on the photoelectrochemical cathodic protection behavior of n-type Cu@Cu<sub>2</sub>O films[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2021, 882:114984.
- [32] XU Y, XU N, GUO M Z, et al. Effect of electrodeposition methods of cuprous oxide on antibacterial properties of concrete
   [J]. Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition, 2023, 38(4):823-833.