

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2023.08.011

厂拌热再生混合料回收沥青老化特性对新沥青 诱导老化的研究

李 强

(重庆巫镇高速公路有限公司, 重庆 400041)

摘要:为探究厂拌热再生沥青混合料中新旧沥青的老化进程及老化机理,模拟再生混合料的拌和与使用过程,首先测试了基质沥青、回收沥青以及新旧沥青三种试样依次经历旋转薄膜烘箱老化试验 RTFOT 和加速加压老化试验 PAV 之后各自的动力粘度与路用性能,对比分析了热再生中新旧沥青在老化过程中的宏观性能衰减规律,进而采用红外光谱和差示量热分析扫描等微观测试手段探明了新旧沥青的老化进程与老化机理。测试结果表明,先后经历 RTFOT 老化和 PAV 老化之后,回收沥青的粘度上升最显著,低温性能下降也十分迅速,但新旧沥青的动力粘度与低温性能变化幅度均远远高于基质沥青,证明其老化速率较基质沥青快;新旧沥青在经历 RTFOT 老化和 PAV 老化过程中,除新沥青和回收沥青各自独立的老化外,还存在一种介于二者之间的化学作用,即回收沥青中某些活性基团对新沥青的老化进程具有较明显的促进作用,称之为“诱导老化”,这种诱导老化通过改变基质沥青的老化进程而改变其老化机理。

关键词:热再生混合料;回收沥青;诱导老化;老化特性;老化机理

中图分类号:U414.6

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2023)08-112-08

Research on aging characteristics of recycled asphalt and its induced aging of new asphalt from hot in-plant recycled asphalt mixture

LI Qiang

(Chongqing Wuzhen Corporation Limited, Chongqing 400041, P. R. China)

Abstract: In order to explore the aging process and mechanism of new asphalt in plant hot-mixed recycled asphalt mixture, the dynamic viscosity and partial road performance of the recycled asphalt, the mixture of new and old asphalt and the matrix asphalt after RTFOT aging and PAV aging were tested. The macroscopic performance attenuation law of the mixture of new and old asphalt during the aging process in thermal regeneration was compared and analyzed. After that, the aging process and mechanism of the mixture of new and old asphalt were explored by infrared spectroscopy and differential calorimetric analysis scanning. The results show that RTFOT aging and PAV aging make the viscosity of recycled asphalt rise significantly and the low temperature performance decline rapidly. After RTFOT aging and PAV aging, the change range of dynamic viscosity and low-temperature performance of the mixture of new and old asphalt is much higher than that of the matrix asphalt,

收稿日期:2022-05-17

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:李强(1983—),男,高级工程师,主要从事道路绿色新材料应用方向研究,(Email)wjxycwb@126.com。

which proves that the aging rate is faster than that of matrix asphalt. Meanwhile, microscopic analysis show that in addition to the independent aging of new asphalt and recycled asphalt, there is also a chemical effect between them, that is, some active groups in recycled asphalt have a more obvious promotion effect on the aging process of new asphalt, here called induced "aging". This induced aging changes the aging mechanism of the matrix asphalt by changing the aging process of it.

Keywords: hot recycled asphalt mixture; recycled asphalt; induced aging; aging characteristics; aging mechanism

中国公路建设经过 20 余年的快速发展,无论是高速公路还是普通道路里程,均已成为世界第一^[1]。但伴随着以沥青路面为主导的道路里程和使用年限不断增加,旧沥青路面大修过程中产生废旧沥青混合料的再生利用问题也变得日益迫切。尽管旧沥青混合料的回收利用方式有厂拌热再生、就地热再生及冷再生等,但厂拌热再生由于其相对严格的工艺条件和可靠的施工质量仍然是目前废旧沥青混合料循环利用最主要的方式^[2-5]。国内外诸多学者就厂拌热再生技术开展了诸多研究,Elkashef M、祝谭雍^[6-7]等系统研究了热再生混合料的设计方法;查旭东、陈静云等^[8-9]重点研究了 RAP 对再生混合料性能的影响规律;王杰、Bowers B F 等^[10-12]对 RAP 的变异性开展了系统研究;李敬敬、王永宁等^[13-14]对再生混合料的微观结构进行研究。这些研究成果主要体现在两个方面:一类是通过添加外加剂(如再生剂)的方式和优化厂拌热再生的生产与施工工艺,实现提高热再生混合料路用性能目的;另一类是通过微观手段研究再生老化机理、新旧沥青的融合机制或者再生沥青与新旧集料的界面粘附特性问题。对于回收沥青在热再生混合料的生产、施工和长期使用过程中自身老化及其对新沥青老化进程与老化机理的影响研究成果还较少,因此,关于厂拌热再生混合料中新沥青的老化进程与机理,存在认识上的局限。室内试验测得的热再生沥青混合料的路用性能数据往往并不差,至少满足规范要求,但热再生沥青路面的使用耐久性与新沥青路面相比还存在较大差距。热再生沥青混合料在生产和使用过程中,回收沥青中的某些活性基团对基质沥青的老化具有较强诱导作用,加速新沥青老化,导致再生沥青路面的使用耐久性能不佳。笔者首先模拟热再生混合料的生产和使用过程,以回收沥青与新沥青为参比,测试回收沥青与新沥青的混合物依次经历旋转薄膜烘箱加热(RTFOT)老化和加压老化试验箱(PAV)老化之后其动力粘度和低温性能,分析该新旧沥青混合物在老化前后的性能变化规律,首次提出回收沥青对新沥青的“诱导老化”;通过微观测试技术分析论证新旧沥青中回收沥青对新沥青存在较明显诱导老化作用。这种诱导老化加剧厂拌热再生混合料中新沥青的快速老化进程,导致其路用性能急速衰减。

1 实验部分

1.1 原材料

- 1)回收沥青:由重庆渝遂高速公路废弃混合料经离心抽提制得;
 - 2)新沥青:中海 70# 基质沥青;
 - 3)新旧沥青:回收沥青与新沥青按 3:7 的质量比均匀混合而成。
- 其相关技术性能指标列于表 1。

表 1 基质沥青和回收沥青的技术指标

沥青种类	25 °C 针入度/(0.1 mm)	15 °C 延度/cm	软化点/°C
新沥青	63.3	135.3	48.9
回收沥青	35.3	17.4	63.1
新旧沥青	51.6	97.2	54.3

1.2 性能测试与表征

动力粘度试验:采用 Brookfield 粘度计按 GBT22235—2008 液体黏度的测定标准测试 3 种沥青老化前后在 120 °C 的动力粘度;低温弯曲蠕变(BBR)试验:测试 3 种沥青试验老化前后在 -12 °C 和 -18 °C 下的劲度模

量 S 和蠕变速率 m 值;低温柔性试验:参照建筑防水涂料试验方法 GB/T16777—2008 分别测试 3 种沥青试验老化前后的低温柔性;红外光谱(IR)试验:采用 Bruker 公司生产的 VERTEX 70 红外分析仪分别测出 3 种沥青试验老化前后的红外谱图,光谱扫描范围 $4\ 000\text{--}500\ \text{cm}^{-1}$,分辨率为 $4\ \text{cm}^{-1}$,扫描次数为 16 次;差示扫描量热(DSC)试验:采用 TA Q20 型差示扫描量热仪分别测试了 3 种沥青试验老化前后的玻璃化转变温度,氮气氛围,升温速率为 $10\ \text{°C}/\text{min}$ 。

2 结果与讨论

2.1 动力粘度测试

沥青的老化程度与它的动力粘度紧密相关,随着沥青老化程度的加深,其动力粘度也会随之增大。分别测试了新沥青、回收沥青及新旧沥青原样以及先后经历 RTFOT 老化和 PAV 老化后的 $120\ \text{°C}$ 时动力粘度,结果见表 2 和图 1。

表 2 3 种沥青老化前后动力粘度的变化情况

Table 2 Dynamic viscosity changes of three kinds of asphalt before and after aging

沥青种类	原样	RTFOT 后	上升百分比/%	RTFOT+PAV 后	上升百分比/%
新沥青	0.140	0.199	42.1	0.410	192.8
回收沥青	0.381	1.350	254.3	2.775	628.3
新旧沥青	0.158	0.262	65.8	0.590	273.4

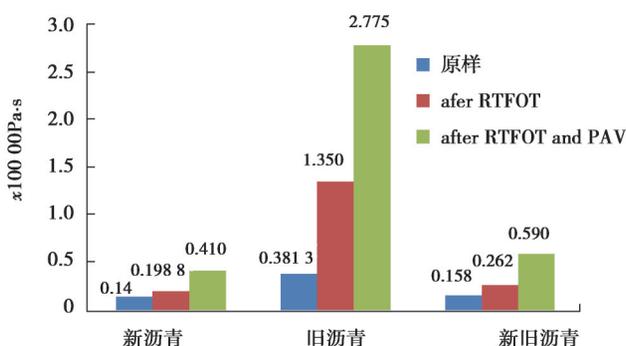


图 1 3 种沥青老化前后在 $120\ \text{°C}$ 时的动力粘度

Fig. 1 Dynamic viscosity of the three asphalts at $120\ \text{°C}$ before and after aging

由图 1 可以看出,3 种沥青依次经历 RTFOT 老化和 PAV 老化之后,其 $120\ \text{°C}$ 时的动力粘度均出现了不同程度升高,尤其是长期老化对沥青粘度的影响十分明显。对比发现,回收沥青依次经历 RTFOT 老化和 PAV 老化之后,其动力粘度增幅非常显著,表明其老化速度非常迅速,即回收沥青抗老化能力十分低下,并不适合直接用作厂拌热再生的胶结料;新沥青与新旧沥青原样的动力粘度较接近,但依次经历 RTFOT 老化和 PAV 老化之后,新沥青的动力粘度分别升高了 42.1% 和 192.8%,新旧沥青的动力粘度分别升高了 65.8% 和 273.4%,增长幅度明显高于新沥青。对比分析新沥青和旧沥青在老化过程中的粘度变化情况发现,新沥青与旧沥青的初始粘度相差不大,其差值仅为 $18\ \text{mPa}\cdot\text{s}$,经历 RTFOT 老化之后,其差值达到了 $63\ \text{mPa}\cdot\text{s}$,进一步经历 PAV 老化之后,其差值达到了 $180\ \text{mPa}\cdot\text{s}$,表明同样的老化条件作用下,旧沥青的老化速率明显高于新沥青。

通过 3 种沥青试样依次经历 RTFOT 老化和 PAV 老化之后的动力粘度变化情况可以推理得出,在 RTFOT 老化和 PAV 老化过程中,回收沥青不仅自身的老化迅速,而且通过某种化学作用加速了新沥青的老化进程,这种现象对 RAP 的再生循环利用极为不利,也是目前厂拌热再生技术必须要解决的关键问题。

2.2 BBR 低温弯曲性能

采用 BBR 低温弯曲蠕变试验测得蠕变速率和劲度模量来评价沥青的低温性能^[15]。将新沥青、回收沥青及新旧沥青原样先后经历 RTFOT 和 PAV 老化得到的残留物进行 BBR 低温弯曲试验,测试它们在不同老化阶

段的蠕变速率和劲度模量,试验结果列于表3。

表3 3种沥青 BBR 试验结果
Table 3 BBR test results of the three asphalts

老化类型	沥青种类	-12 °C		-18 °C	
		劲度模量 S/MPa	m	劲度模量 S/MPa	m
原样	新沥青	116	0.316	131	0.282
	新旧沥青	142	0.291	208	0.258
	回收沥青	163	0.257	279	0.223
RTFOT 老化后	新沥青	135	0.299	228	0.268
	新旧沥青	171	0.271	334	0.225
	回收沥青	182	0.231	347	0.212
RTFOT+PAV 老化后	新沥青	159	0.278	276	0.243
	新旧沥青	202	0.244	405	0.217
	回收沥青	211	0.209	429	0.188

表3结果表明,3种沥青经历 RTFOT 老化后,-12 °C和-18 °C时的劲度模量 S 值均显著上升,经历 PAV 老化后,其劲度模量继续增大,表明沥青产生变形所需的应力增大,沥青表现出的脆性也随之增大;而3种沥青先后经历 RTFOT 老化和 PAV 老化后,其 -12 °C和-18 °C的温度条件下蠕变速率 m 值呈现出与劲度模量相反的变化规律,表明随着老化程度逐渐深入,3种沥青的应力松弛能力发生了不同程度降低,低温抗裂性能发生了明显劣化。然而,尽管3种沥青的原样及其经过老化之后的劲度模量和蠕变速率发生了显著变化,但其变化幅度如下规律:无论是 RTFOT 老化还是 PAV 老化,-12 °C和-18 °C 2个温度下的劲度模量和蠕变速率变化幅度顺序均为:新旧沥青>回收沥青>基质沥青,且依次经历 RTFOT 老化和 PAV 老化后,新旧沥青的劲度模量和蠕变速率与回收沥青比较接近,前者明显高于基质沥青,而后者则明显低于基质沥青。

分析3种沥青的 BBR 试验结果还发现,回收沥青的加入引起基质沥青在 RTFOT 老化和 PAV 老化过程中劲度模量及蠕变速率的突变,由此提出猜测:在新旧沥青先后经历 RTFOT 老化和 PAV 老化的过程中,除了基质沥青和回收沥青各自老化外,还存在特殊的化学作用,这种化学作用在加速基质沥青的老化进程,改变了基质沥青的老化机理,这种特殊的化学作用为“诱导老化”。

2.3 低温柔性分析

高分子材料的低温柔性与老化程度呈线性负相关。将新沥青、新旧沥青及回收沥青3种试样及其经历 RTFOT 老化和 PAV 老化后的试样溶解于二甲苯中,再涂刷于厚度为 100 mm×10 mm×0.5 mm 的铝片上,控制涂膜厚度为 0.1±0.05 mm,完全固化后置于-20 °C的冰箱中恒温 2 h,取出试件绕 $\phi 15$ 的圆管弯曲 180°,观察其开裂情况(见图2),以评价其低温柔性^[6],测试结果见表4。

对比观察发现,新沥青及新旧沥青原样均未出现任何裂纹,而回收沥青开裂较明显,表明新沥青及新旧沥青具有优良的低温柔性,回收沥青低温柔性较差;经历 RTFOT 老化后的裂纹情况表明,相对于新沥青,新旧沥青的低温柔性劣化迅速;进一步经历 PAV 老化后,尽管新沥青也出现了较明显开裂,但裂纹较细且分布均匀,而新旧沥青和回收沥青低温开裂进一步增强,裂纹不仅多,且粗,表明其低温柔性严重下降,展现了显著的脆性特征。依次经历 RTFOT 老化和 PAV 老化之后,相对于新沥青,新旧沥青的低温柔性劣化速度明显更快,并最终接近于回收沥青。低温柔性试验结果表明,回收沥青不仅自身低温柔性较差,抗老化能力弱,少量回收沥青还可能会加速新沥青的老化进程,不利于厂拌热再生沥青路面的耐久性。

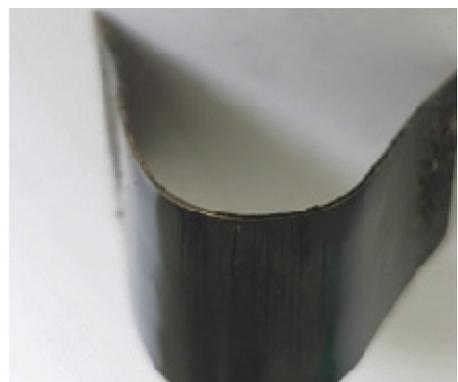


图2 180°低温弯曲之后的沥青试样

Fig. 2 Asphalt samples after bending at 180°

表4 3种沥青试样老化前后的裂纹情况

Table 4 Cracks of three asphalt samples before and after aging

沥青种类	原样	经历 RTFOT 老化	经历 RTFOT+PAV 老化
新沥青	无	很少且细	较多且细
新旧沥青	无	较多较粗	较多很粗
回收沥青	较多	很多较粗	很多很粗

2.4 诱导老化的红外光谱分析

作为一种分析材料化学结构最常用的方法,红外光谱法可用于材料的定性和定量分析材料化学官能团的种类与结构^[17]。分别对基质沥青、新旧沥青及回收沥青老化前后的化学官能团进行测试,定性分析官能团种类及其吸收峰强弱变化情况,定量计算官能团吸收峰的面积变化而探究其微观老化机理。

2.4.1 红外光谱定性分析

为了验证回收沥青对基质沥青的诱导老化作用,分别将3种沥青原样、经RTFOT老化和PAV老化之后的试样进行红外光谱分析,其红外光谱图见图3~5。在 1700 cm^{-1} 附近范围内是羰基 $\text{C}=\text{O}$ 振动吸收峰,在 1600 cm^{-1} 附近范围内是苯环骨架及其不饱和双键的伸缩振动吸收峰;在 1450 cm^{-1} 附近吸收峰是亚甲基 $-\text{CH}_2-$ 的弯曲振动和甲基 $-\text{CH}_3$ 的不对称弯曲振动叠加,而在 1030 cm^{-1} 波数附近吸收峰归属于亚砷基 $\text{S}=\text{O}$ 伸缩振动。

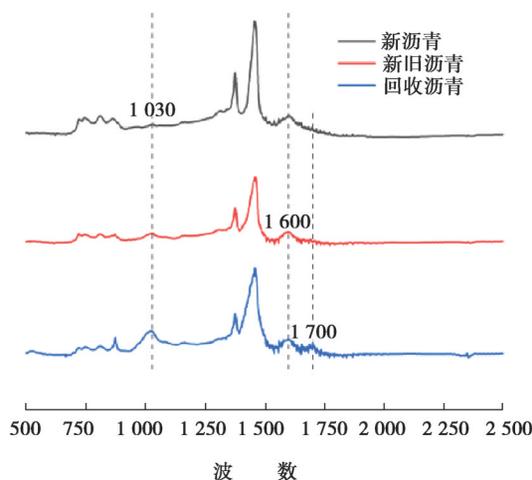


图3 3种沥青原样的红外光谱图

Fig. 3 Infrared spectra of three original asphalts

图3中3种沥青原样的红外光谱图的主要区别就 1030 cm^{-1} 与 1700 cm^{-1} 附近的吸收峰强度而言,回收沥青>>新旧沥青>基质沥青,表明回收沥青原样中含有的羰基 $\text{C}=\text{O}$ 和亚砷基 $\text{S}=\text{O}$ 最多,基质沥青中这2种基团基本没有,证明沥青的老化程度与羰基和亚砷基的含量存在较大相关性,因为沥青中的硫元素和碳元素在老化过程分别被氧化成亚砷基 $\text{S}=\text{O}$ 和羰基 $\text{C}=\text{O}$ 。图4是3种沥青原样分别经历了RTFOT老化后的红外光谱图。相对于图3和4中的红外谱图中回收沥青和新旧沥青在 1030 cm^{-1} 与 1700 cm^{-1} 附近的吸收峰均出现了显著增强,而基质沥青在此处的吸收峰强度则无明显变化,表明RTFOT老化对基质沥青的老化作用并不显著,而对新旧沥青和回收沥青的老化作用则相当显著。图5是这3种沥青先后经历RTFOT老化和PAV老化之后的红外光谱图,对比分析图4和5发现,PAV老化使这3种沥青在 1030 cm^{-1} 与 1700 cm^{-1} 附近的吸收峰增强,就增强的程度而言,基质沥青最小,新旧沥青和回收沥青较接近。新旧沥青原样中回收沥青的质量比仅为30%,而在RTFOT老化和PAV老化过程中的老化速度却与回收沥青相当接近,而与基质沥青相比则相去甚远,证明在新旧沥青的老化进程中,不是纯粹的回收沥青和基质沥青各自独立的RTFOT老化和PAV老化,必定存在一种因二者相互作用而加速了新沥青老化进程的化学作用,即回收沥青中的活性成分(如活泼自由基)诱导基质沥青加速老化。

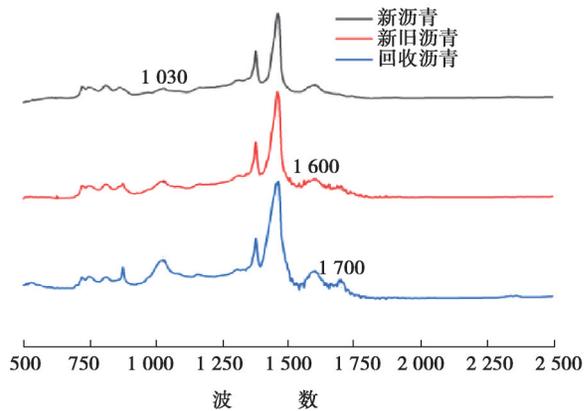


图 4 3 种沥青经 RTFOT 老化后的红外光谱图
Fig. 4 Infrared spectra of three asphalts after RTFOT aging

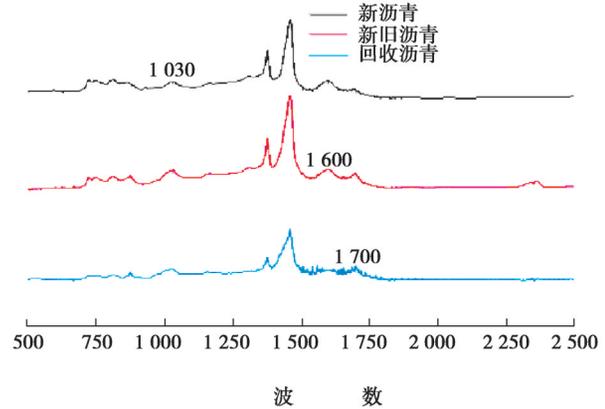


图 5 3 种沥青经 RTFOT 老化和 PAV 老化的红外光谱图
Fig. 5 Infrared spectra of three asphalts after RTFOT and PAV aging

2.4.2 红外光谱定量分析

为证实新旧沥青在老化过程中诱导老化的存在,同时考虑沥青在老化过程中发生较显著变化的特征官能团主要有羰基和亚砷基,通过计算这 2 种官能团在老化前后的峰面积变化情况来表征各自的老化进程及老化机理。为了消除各个试样在制样过程中的差异引起误差,引入官能团指数的概念。官能团指数是指某一官能团吸收峰的面积与某一波数范围内所有官能团面积的比值^[14-15],官能团指数是羰基 C=O 和亚砷基 S=O 吸收峰的面积与 2 000~600 cm⁻¹ 波峰区域的面积之和的比值,吸收峰的面积运用 origin8.0 软件通过积分求得。官能团指数按下式计算

$$I_{X=O} = \frac{A_{X=O}}{\sum A_{2000-600 \text{ cm}^{-1}}} \quad (1)$$

式中, $X = C, S$ 。

首先对图 3~5 中羰基、亚砷基和苯环在 2 000~600 cm⁻¹ 波峰区域积分,计算 3 种官能团指数,所得结果见表 5、图 6 和图 7。

表 5 3 种沥青老化前后的特征官能团指数

Table 5 Characteristic functional group index of three asphalt before and after aging			
沥青种类	特征官能团系数 I	羰基指数 $I_{C=O}$	亚砷基指数 $I_{S=O}$
基质沥青	原样	0.011 3	0.028 1
	RTFOT	0.043 2	0.039 3
	RTFOT+PAV	0.053 0	0.050 6
新旧沥青	原样	0.037 0	0.050 4
	RTFOT	0.079 8	0.049 0
	RTFOT+PAV	0.095 4	0.064 6
回收沥青	原样	0.055 9	0.081 3
	RTFOT	0.085 6	0.072 8
	RTFOT+PAV	0.097 8	0.058 5

分析图 6 和 7 及表 5 的试验结果可以看出,基质沥青依次经历 RTFOT 老化和 PAV 老化,其亚砷基指数持续增大,表明基质沥青中的硫元素在老化过程中陆续被氧化成亚砷基;回收沥青在依次经历 RTFOT 老化和 PAV 老化过程中其亚砷基的变化规律与基质沥青正好相反,这是因为回收沥青中的硫元素主要以亚砷基的形态存在,在老化过程中部分亚砷基生成了硫化氢导致其亚砷基指数下降,而基质沥青中的硫元素主要以单质或者其他化合态形式存在,在老化过程中被氧化成亚砷基导致其亚砷基指数增大;但新旧沥青在老化过程中既有回收沥青中亚砷基的减少又有基质沥青中亚砷基的增加,故在 RTFOT 老化过程中其亚砷基指数相对恒定,经历 PAV 老化之后最终仍然呈现上升趋势。

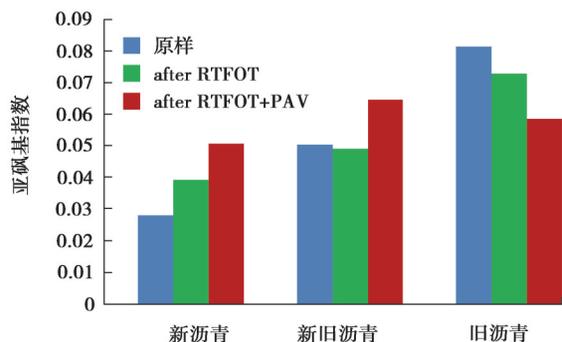


图6 3种沥青老化前后的亚砷基指数

Fig. 6 Sulfoxide index of the three asphalts before and after aging

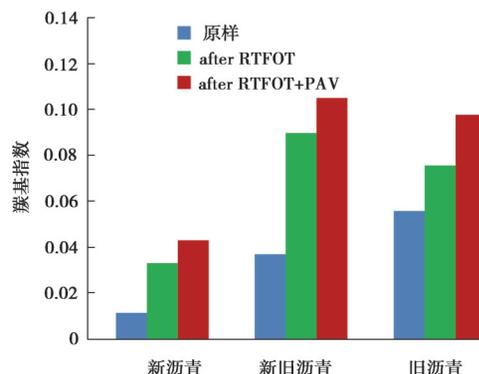


图7 3种沥青老化前后的羰基指数

Fig. 7 Carbonyl index of the three asphalts before and after aging

对比分析3种沥青依次经历RTFOT老化和PAV老化之后其羰基指数的变化情况。3种原样沥青中羰基指数大小关系为:回收沥青>新旧沥青>基质沥青;RTFOT老化后,3种沥青的羰基指数均显著升高,其增幅分别为0.029 7、0.042 8和0.031 9,显然新旧沥青的羰基指数增长幅度最大,且与回收沥青的羰基指数之差大幅减小,与基质沥青的羰基指数之差增大;继续经历PAV老化,这3种沥青的羰基指数进一步增加,其增幅分别为0.012 2、0.015 6和0.009 8,仍然是新旧沥青羰基指数增幅最大,基质沥青与新旧沥青的羰基指数之差被进一步拉大,而新旧沥青的羰基指数已接近于回收沥青。因此,相对于基质沥青而言,新旧沥青在短期老化过程中的抗老化能力迅速下降,由此推断,新旧沥青的老化进程是非常复杂的,绝不仅仅是基质沥青和回收沥青各自老化进程的简单叠加,必定存在一种对基质沥青老化进程有显著促进作用诱导老化,导致新旧沥青中的基质沥青老化显著加速。

2.5 差示扫描量热分析(DSC)

采用差示量热扫描法测试新沥青、新旧沥青及回收沥青分别经历FTROT和PAV老化前后的玻璃态转变温度 T_g 及其在 T_g 附近的温度转变范围变化来评价其老化程度,论证新旧沥青混合物在经历老化过程中旧沥青对新沥青的诱导老化作用,测试结果见表6。

表6 3种沥青老化前后的玻璃化转变范围和玻璃化转变温度

老化方式	玻璃化转变范围 T_g					
	基质沥青		新旧沥青		回收沥青	
原样	8.01~44.11	8.69	8.85~45.21	9.68	11.82~45.88	16.90
短期老化	9.68~46.15	10.13	10.91~45.49	14.75	12.66~46.82	17.22
长期老化	11.23~46.86	13.18	12.48~46.92	17.61	14.85~47.24	19.33

表6结果表明,随着老化程度的深入,3种沥青的玻璃化转变范围均向高温方向发生了较明显的偏移,其玻璃化转变温度也发生了不同程度的升高,原因为:RTFOT老化和PAV老化使沥青的分子结构产生了部分交联,从而使主链分子链段活动受到约束,相邻交联点之间的链长减小;二是因为沥青的分子主链上引入了侧链羰基,增大了沥青主链分子的刚性。比较3种沥青的玻璃化转变温度的上升幅度还发现,新旧沥青的玻璃化转变温度上升幅度明显高于基质沥青,且经历长期老化之后,其玻璃化转变温度(17.61 °C)也远高于基质沥青经历长期老化之后的玻璃化转变温度(13.18 °C),与回收沥青经历短期老化之后的玻璃化转变温度较接近,表明新旧沥青的老化速率明显高于基质沥青。

3 结论

新旧沥青依次经历RTFOT老化和PAV老化后其动力粘度和低温性能变化幅度明显高于基质沥青,高粘度的回收沥青经历RTFOT老化和PAV老化后其粘度呈指数增长,表明回收沥青不宜直接作为热再生混合料的胶结料;红外光谱的官能团固定性分析和定量计算结果表明,新旧沥青在RTFOT老化和PAV老化过程中,羰基指数和亚砷基指数会显著上升,其上升幅度远大于基质沥青,除基质沥青和回收沥青自身各自独立的老化

外,还存在一种加速新沥青老化的“诱导老化”。这种诱导老化显著加速了新沥青的老化进程,改变了其老化机理;新旧沥青的玻璃化转变温度在老化进程中的上升幅度明显高于基质沥青,与回收沥青经历短期老化之后的玻璃化转变温度较接近,也证明了新旧沥青的老化速率明显高于新沥青。新旧沥青混合物的老化机理十分复杂,下一步工作将通过研究其老化动力学规律探究其老化进程和老化机理。

参考文献

- [1] 李丹,鲍胜,周露,等.再生沥青混合料研究现状[J].公路交通科技,2020,16(10):1-4.
Li D, Bao S, Zhou L, et al. Research status of recycled asphalt mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development. 2020, 16(10):1-4.(in Chinese)
- [2] Zaumanis M, Mallick R B. Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: state of the art[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2015, 16(1): 39-55.
- [3] Yu B, Gu X, Wu M, et al. Application of a high percentage of reclaimed asphalt pavement in an asphalt mixture: blending process and performance investigation[J]. Road Materials and Pavement Design, 2017, 18(3): 753-765.
- [4] 陈辉强,李成林,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.
Chen H Q, Li C L, et al. Effect of interactive aging based on UV and PAV on rheological properties of SBR modified asphalt and analysis of aging mechanism[J]. Journal of Chongqing University, 2019, 42(7): 54-62.(in Chinese)
- [5] Peng Y, Harvey J, Sun L J. Three-dimensional discrete-element modeling of aggregate homogeneity influence on indirect tensile strength of asphalt mixture [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(11):04017211.
- [6] Elkashef M, Podolsky J, Williams R C, et al. Introducing a soybean oil-derived material as a potential rejuvenator of asphalt through rheology, mix characterisation and Fourier Transform Infrared analysis[J]. Road Materials and Pavement Design, 2018, 19(8): 1750-1770.
- [7] 祝谭雍.基于再生沥青混合料性能特点的再生路面设计研究[D].南京:东南大学,2017.
Zhu T Y. Structure analysis and design for recycled asphalt pavement based on the performance characteristics of Hot-recycled Asphalt Mixture[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.(in Chinese)
- [8] 查旭东,闵斌,宋微.RAP掺量对热再生沥青混合料性能影响分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2013,10(4):1-8.
Zha X D, Min B, Song W. Influence analysis of RAP contents on performance of hot recycled asphalt mixture[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2013,10(4): 1-8.(in Chinese)
- [9] 陈静云,王峻,刘佳音.高比例RAP热再生沥青混合料低温抗裂性能[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2013,29(5):782-787.
Chen J Y, Wang J, Liu J Y. Study on low temperature anti-cracking performance of hot recycled asphalt mixture at high proportion of RAP [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2013, 29(5): 782-787.(in Chinese)
- [10] 王杰,秦永春,黄颂昌,等.沥青混合料回收料变异性[J].北京工业大学学报,2018,44(2):244-250.
Wang J, Qin Y C, Huang S C, et al. Variability of reclaimed asphalt pavement[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2018,44(2): 244-250.(in Chinese)
- [11] Zhu J Q, Ma T, Fang Z Y. Characterization of agglomeration of reclaimed asphalt pavement for cold recycling [J]. Construction Materials Science and Engineering, 20, 40(3): 374-379.
- [12] Bowers B F, Huang B, Shu X, et al. Investigation of reclaimed asphalt pavement blending efficiency through GPC and FTIR [J]. Construction & Building Materials, 2014, 50(50):517-523.
- [13] 李敬敬,张辉辉,李国芳,等.紫外辐照高温硫化硅橡胶的红外光谱分析和老化机理[J].光谱学与光谱分析,2020,40(4):1063-1070.
Li J J, Zhang H H, Li G F, et al. Infrared spectrum analysis and aging mechanism of high temperature vulcanized silicone rubber irradiated by ultraviolet[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(4): 1063-1070.(in Chinese)
- [14] 王永宁,李波,任小遇,等.不同老化时间的SBS改性沥青再生红外光谱分析[J].材料科学与工程学报,2020,38(4):643-647.
Wang Y N, Li B, Ren X Y, et al. Analysis of SBS modified asphalt with different aging time by regenerated infrared spectroscopy[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2020, 38(4): 643-647.(in Chinese)
- [15] Dehouche N, Kaci M, Mokhtar K A. Influence of thermo-oxidative aging on chemical composition and physical properties of polymer modified bitumens [J]. Construction & Building Materials, 2012, 26(1):350-356.
- [16] 中国国家标准化管理委员会.建筑防水涂料试验方法:GB/T 16777-2008 [S].北京:中国标准出版社,2008.
Standardization Administration of the P. R. C. Test methods for building waterproofing coatings: GB/T16777-2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008. (in Chinese)
- [17] 翁诗甫.傅里叶变化红外光谱分析[M].北京:化学工业出版社,2010.
Weng S F. Fourier transform infrared spectroscopy analysis[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010. (in Chinese)