

文章编号:1007-9629(2022)10-1070-07

沥青老化及再生对自愈合性能的影响

徐 浩¹, 张文武², 何兆益^{1,*}, 孔 林¹, 黄佳兴¹

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074; 2. 山东高速集团有限公司, 山东 济南 250101)

摘要:通过动态剪切流变仪(DSR)进行“疲劳-愈合-疲劳”试验,分析原样沥青、老化沥青及再生沥青在不同间歇时间下的自愈合性能,并结合红外光谱分析沥青老化、再生过程中官能团与自愈合性能的相关性.结果表明:老化过程中沥青发生了氧化反应,羰基和亚砷基官能团指数增大,极性氧化物含量增加,最终导致自愈合性能降低;添加5%Y型再生剂后沥青自愈合性能明显恢复,经旋转薄膜烘箱老化85、170、340 min的70#基质沥青再生后平均愈合指数恢复至70#基质沥青的100.9%、96.4%、63.2%,愈合速率分别恢复至基质沥青的89.7%、94.7%、40.7%,3种再生剂中Y型再生剂效果最好;沥青自愈合参数与亚砷基、羰基官能团指数线性相关性良好.

关键词:道路工程;再生沥青;自愈合;动态剪切流变仪;红外光谱

中图分类号:U414.1

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.10.011

Influence of Asphalt Aging and Regeneration on Self-healing Performance

XU Hao¹, ZHANG Wenwu², HE Zhaoyi^{1,*}, KONG Lin¹, HUANG Jiaxing¹

(1. Civil Engineering College, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Shandong Expressway Group Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: The self-healing properties of as-received asphalt, aged asphalt and recycled asphalt at different intermittent times were analyzed by dynamic shear rheometer (DSR) for “fatigue-healing-fatigue” test. The correlation between functional groups and self-healing properties during the aging and regeneration of asphalt was analyzed by infrared spectroscopy. The result shows during the aging process, the asphalt undergoes an oxidation reaction, the carbonyl and sulfoxide functional group indices increase, and the polar oxide content increases, which eventually leads to a decrease in self-healing performance. The self-healing performance of asphalt recovered obviously after adding 5% Y regenerant. The average healing index of 70# base asphalt aged 85, 170, 340 min in a rotary film oven was restored to 100.9%, 96.4%, 63.2% of that of 70# base asphalt. The self-healing rate recovered to 89.7%, 94.7%, 40.7% of the base asphalt, respectively. Among the three regenerants, the Y regenerant has the best effect; the self-healing parameters of asphalt have a good linear correlation with the indices of sulfoxide and carbonyl functional groups.

Key words: road engineering; recycled asphalt; self-healing; dynamic shear rheometer(DSR); infrared spectroscopy

疲劳开裂是沥青路面的主要破坏形式,对路面性能具有显著的负面影响.沥青作为一种典型的黏弹性材料,具有自愈合性能,即自动修复疲劳裂纹的能力,从而延长路面疲劳寿命^[1-3].1965年Deacon^[4]发现沥青混凝土的使用寿命随间歇时间增加而延长.

从此,学者们对沥青自愈合机理、自愈合表征方法及影响因素等展开了大量研究.Wool等^[5-6]将沥青自愈合过程归结为裂缝界面的润湿及分子的扩散.程耀飞等^[7]研究表明自愈合指标与愈合时间 $t^{0.25}$ 具有较高的线性拟合度.罗蓉等^[8]在现有自愈合指标基础上作

收稿日期:2021-08-24; 修订日期:2021-10-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51978116);齐鲁交通发展集团养护科技项目(2018YHKY-01)

第一作者:徐 浩(1995—),男,山东德州人,重庆交通大学博士生.E-mail:258017283@qq.com

通讯作者:何兆益(1983—),男,云南昭通人,重庆交通大学教授,博士生导师,博士.E-mail:hzyzwb@cqjtu.edu.cn

了进一步修正,得到了考虑愈合前后动态剪切模量和加载时间变化的新指标.崔亚楠等^[9]通过正交试验分析表明老化是影响 SBS 改性沥青自愈合性能的最大因素.

沥青在长期服役过程中会逐渐老化,自愈合性能也会降低,添加再生剂能恢复老化沥青自愈合性能.中国大部分路面超过设计使用年限而逐渐进入大中修期,废旧沥青混合料的再生技术是环保经济的道路修复方法,国内外对再生沥青混合料的使用量也逐年增加,因此研究再生沥青自愈合性能十分必要.本文通过动态剪切流变(DSR)试验和红外光谱(IR)试验,研究老化及再生对沥青自愈合性能的影响,并分析沥青自愈合性能与其化学组成的相关性.

1 试验

1.1 原材料及试样制备

采用 70# 基质沥青,通过旋转薄膜烘箱老化(RTFOT)试验模拟沥青不同程度的老化,将 70# 基质沥青经 RTFOT 老化 85、170、340 min 后的试样分别表示为 70#R85、70#R170 和 70#R340.基质沥青和老化沥青的技术指标如表 1 所示.再生剂选用课题组自主研发的 R、S、Y 型 3 种再生剂,R 型为矿物油再生剂,S 和 Y 型为生物油再生剂,其性能指标如表 2 所示.

再生沥青制备过程如下:将不同程度老化沥青在烘箱中预热至 160 ℃,按试验所需质量倒入杯中;按设计掺量(质量分数)称取再生剂并加入到老化沥青中;将老化沥青与再生剂混合试样杯放置在 160 ℃ 恒温油浴锅中,采用搅拌机以 1 000 r/min 的速率持续搅拌 30 min,使再生剂与老化沥青混合均匀,得到再生沥青.

再生沥青编号以“老化沥青编号+再生剂掺量和类型”来表示,如 70#R85+5%Y 表示向老化沥青 70#R85 中添加 5%Y 型再生剂后制备的再生沥青.针对不同的问题,采用控制变量法进行分组,当研究不同老化程度再生沥青的自愈合性能时,以老化时间为变量,固定再生剂类型和掺量;当研究不同再生剂掺量对老化沥青自愈合性能的影响时,以向 70#R340 中掺加 Y 型再生剂的再生沥青为研究对象,变量为 Y 型再生剂掺量(5%,7%,9%);当研究不同再生剂类型对老化沥青自愈合性能的影响时,以向 70#R340 中掺加 9% 再生剂的再生沥青为研究对象,变量为再生剂类型(Y、S、R).

1.2 试验方法

1.2.1 自愈合试验方法及评价指标

“疲劳-愈合-疲劳”循环加载试验是研究沥青自愈合性能的常用方法.试验采用 DSR 时间扫描模式,

表 1 基质沥青和老化沥青的技术指标
Table 1 Technical indicators of matrix asphalt and aging bitumen

Sample	Penetration at 25 ℃/ (0.1 mm)	Softening point/℃	Ductility at 15 ℃/cm	Viscosity at 135 ℃/(Pa·s)
70#	68.6	52.8	150.0	0.378
70#R85	51.2	57.5	36.7	0.866
70#R170	35.1	62.7	18.6	1.296
70#R340	24.2	67.2	4.4	1.649

表 2 再生剂的性能指标
Table 2 Properties of the regenerant

Property	R	S	Y	Skills requirement
Viscosity at 60 ℃/(Pa·s)	0.324	0.272	0.178	
Flashing point/℃	240	237	260	≥220
Saturation content(by mass)/%	23			≤30
Aromatic content(by mass)/%	56			Actual measurement
Mass ratio before and after RTFOT/%	1.65	1.94	2.28	≤4
Viscosity ratio before and after RTFOT/%	1.50	1.44	0.94	≤3
Density/(g·cm ⁻³)	1.060	1.050	0.933	Actual measurement

选取平行板直径和间距分别为 8、2 mm,控制应变为 5%,加载频率为 10 Hz,试验温度为 30 ℃,间歇时间 t 分别设置为 10、20、40、60、80 min.试验流程如图 1 所示,图中各参数定义同式(1).

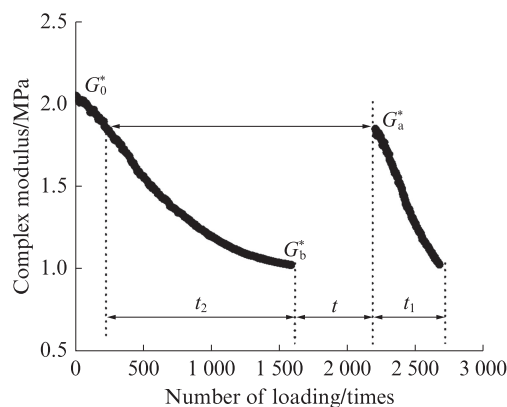


图 1 沥青“疲劳-愈合-疲劳”循环加载试验流程
Fig. 1 Test procedure for ‘fatigue-healing-fatigue’ cycle loading of asphalt

本文采用罗蓉等^[8]提出的愈合指数 HI 对沥青自愈合性能进行表征,如式(1)所示:

$$HI = \frac{G_a^* - G_b^*}{G_0^* - G_b^*} \cdot \frac{t_1}{t_2} \quad (1)$$

式中: G_a^* 为沥青自愈合后的初始动态剪切模量, MPa; G_b^* 为沥青自愈合前的终止动态剪切模量, MPa; G_0^* 为沥青自愈合前的初始动态剪切模量, MPa; t_1 、 t_2 表示加载时间, s.

此外, 根据毛细扩散理论可知, 沥青自愈合由毛细力引起的瞬时自愈合和分子扩散形成的扩散愈合组成, 愈合指数 HI 可以通过愈合温度和愈合时间的函数来表征^[10], 如式(2)所示:

$$HI(\theta, t) = HI_0(\theta) + K(\theta)t^{0.25} \quad (2)$$

式中: $HI(\theta, t)$ 为温度 θ 下间歇时间为 t 时的愈合指数; HI_0 为瞬时自愈合强度; K 为愈合速率; $t^{0.25}$ 为愈合时间.

1.2.2 红外光谱试验

采用 NEXUS EU-RO 红外光谱仪, 以薄膜法测定沥青的化学官能团, 扫描次数为 32 次/s, 分辨率为

4 cm^{-1} . 采用特征官能团吸收峰面积比来定量分析官能团组成与含量对沥青自愈合性能的影响^[11], 如式(3)所示.

$$I_i = \frac{A_i}{\sum A} \quad (3)$$

式中: I_i 为官能团 i 的指数; A_i 为官能团 i 的吸收峰面积; $\sum A$ 为 600~2 000 cm^{-1} 波段范围内所有吸收峰面积之和.

2 结果与分析

2.1 自愈合行为方程拟合

对不同类型沥青进行“疲劳-愈合-疲劳”循环加载试验, 采用式(2)对各沥青愈合指数 HI 进行拟合, 得到各沥青在 30 $^{\circ}\text{C}$ 下愈合指数与愈合时间的关系, 如图 2 所示.

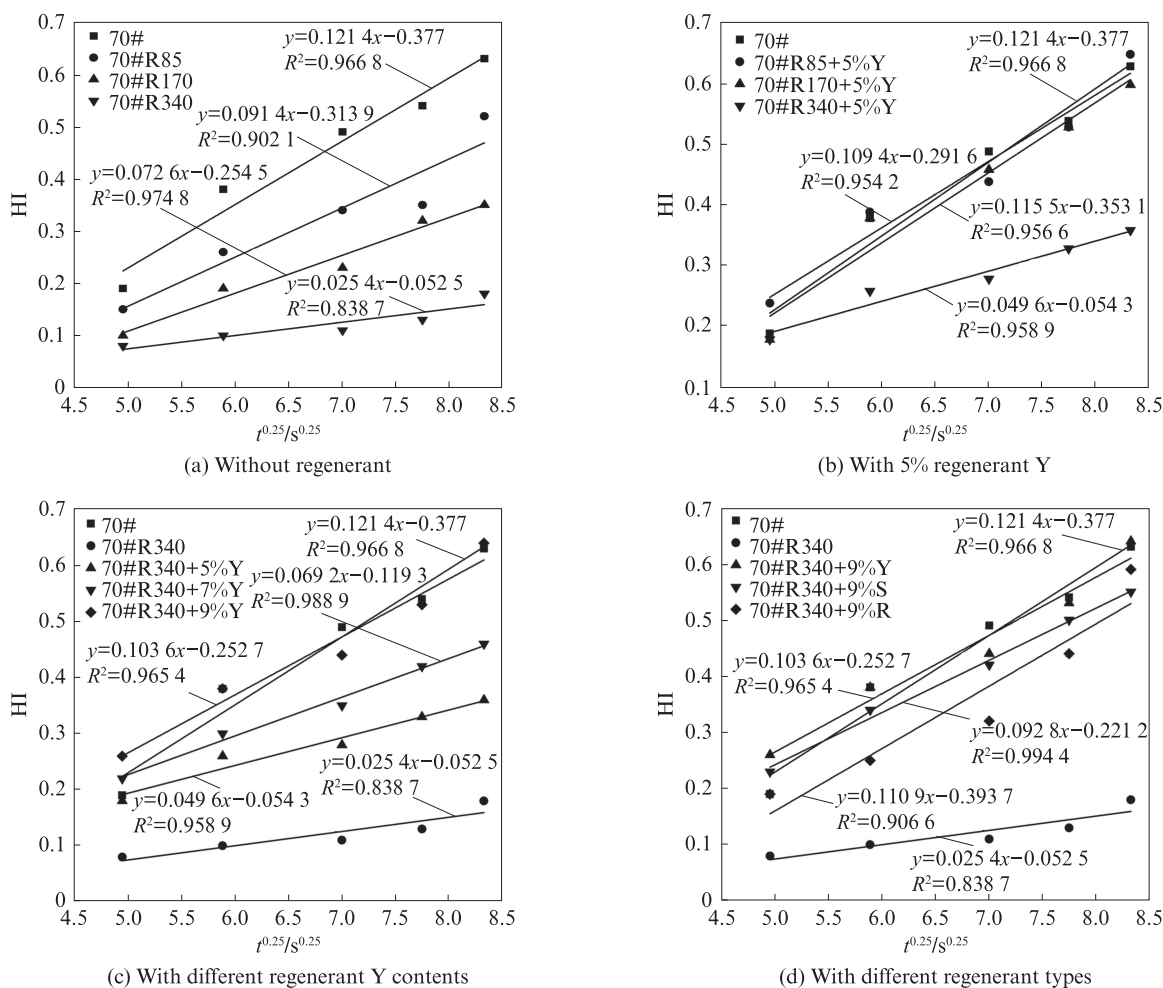


图2 各沥青在 30 $^{\circ}\text{C}$ 下愈合指数与愈合时间的关系

Fig. 2 Relationship between self-healing index and healing time of each asphalts at 30 $^{\circ}\text{C}$

由图 2 可知: 各沥青愈合指数 HI 均随着愈合时间的延长而增大, 充分的间歇时间有利于沥青自愈合修复; 除重度老化沥青 (RTFOT 老化 340 min 的沥

青) 以外, 沥青愈合指数 HI 与愈合时间 $t^{0.25}$ 拟合相关度较高 ($R^2 > 0.9$), 说明基于毛细扩散理论的自愈合模型 (式(2)) 能够较好地描述沥青愈合指数随愈合

时间的发展变化,重度老化沥青拟合相关性较差的原因可能是30℃时重度老化沥青的流动性较差,自愈合现象不明显;拟合曲线斜率为沥青愈合速率 K ,反映了沥青愈合过程中的恢复速率,拟合曲线的截距为沥青的瞬时自愈合强度 HI_0 ,图2中所有沥青拟合曲线的截距均为负数,说明沥青瞬时自愈合并不能恢复其承受荷载作用的能力^[11];图2(b)~(d)中,不同状态再生沥青自愈合拟合曲线之间存在交叉点,因为沥青愈合指数随时间变化,以某一个时间点的愈合指数进行沥青自愈合性能的对比会比较片面.因此,本文以平均愈合指数 HI_a 对原样沥青、老化沥青和再生沥青的自愈合能力进行评价,结合愈合速率 K 分析沥青老化及再生过程中自愈合性能的变化规律.

2.1.1 老化程度对沥青自愈合性能的影响

图3为不同老化程度沥青再生前后的自愈合参数.由图3可见:随沥青老化程度加重(老化时间延长),平均愈合指数 HI_a 减小,愈合速率 K 降低;70#R85、70#R170、70#R340的平均愈合指数 HI_a 分别为基质沥青的72.6%、53.4%、26.9%,愈合速率 K 分别降低至基质沥青的77.1%、59.5%、20.8%,表明老化对于沥青自愈合性能具有显著的负面影响.原因在于老化后沥青中轻质组分减少,沥青质增加,分子间作用力增大,分子扩散运动能力减弱.

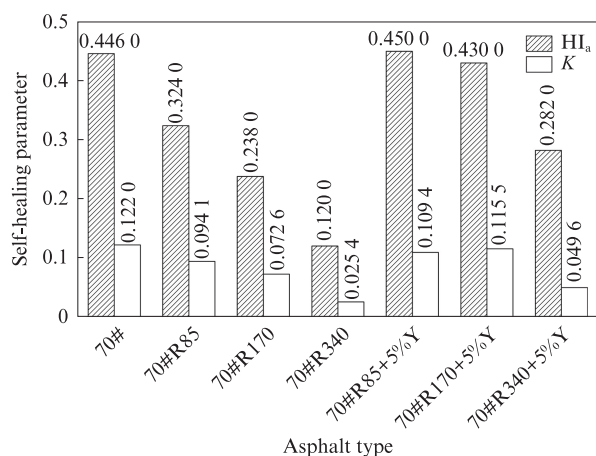


图3 不同老化程度沥青再生前后的自愈合参数
Fig. 3 Self-healing parameters of asphalt with different aging degrees before and after regeneration

由图3还可见:老化沥青添加再生剂后自愈合性能明显恢复,平均愈合指数 HI_a 提高,愈合速率 K 增大;再生后70#R85+5%Y、70#R170+5%Y、70#R340+5%Y的平均愈合指数 HI_a 分别恢复至基质沥青的100.9%、96.4%、63.2%,愈合速率 K 分别恢复至基质沥青的89.7%、94.7%、40.7%.原因是再生剂补充

了沥青在老化过程中缺失的轻质组分,溶解并分散了老化过程中生成的强极性物质,改善了老化沥青的胶体结构,促进了沥青自愈合.

2.1.2 再生剂掺量对老化沥青自愈合性能的影响

图4为不同再生剂掺量下再生沥青的自愈合参数.由图4可见:随着再生剂掺量的增加,再生沥青自愈合性能明显提高;70#R340老化沥青添加5%、7%、9%的Y型再生剂后,平均愈合指数 HI_a 分别恢复到基质沥青的63.2%、78.5%、100.9%,愈合速率 K 分别恢复至基质沥青的40.7%、56.7%、84.9%,再生剂对愈合速率 K 的恢复作用弱于平均愈合指数 HI_a ;70#R340添加9%Y型再生剂后的自愈合性能与基质沥青较为接近,说明70#R340重度老化沥青需要更大掺量的再生剂才能补充其老化过程中损失的轻质组分,恢复胶体结构.

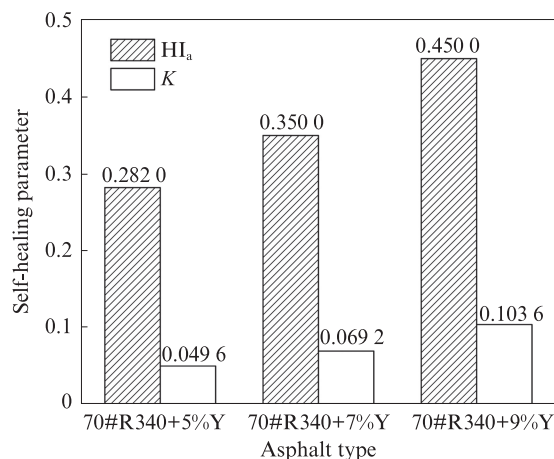


图4 不同再生剂掺量下再生沥青的自愈合参数
Fig. 4 Self-healing parameters of recycled asphalt with different regenerative agent content

2.1.3 再生剂类型对老化沥青自愈合性能的影响

图5为不同再生剂类型下再生沥青的自愈合参数.由图5可见:3种再生剂均能恢复老化沥青自愈合性能,向70#R340老化沥青中添加9%的Y型、S型、R型再生剂后平均愈合指数 HI_a 分别恢复到基质沥青的100.9%、91.5%、80.3%,愈合速率 K 分别恢复至基质沥青的84.9%、76.1%、90.9%;3种再生剂对老化沥青平均愈合指数 HI_a 的恢复效果排序为Y>S>R,对老化沥青愈合速率 K 的恢复效果排序为R>Y>S.3种再生剂均能提高老化沥青的自愈合性能,因再生剂组分不同,对老化沥青的化学组成影响存在差异,改善效果不同.

2.2 红外光谱分析

图6为再生剂、原样沥青、老化沥青及再生沥青的红外光谱.

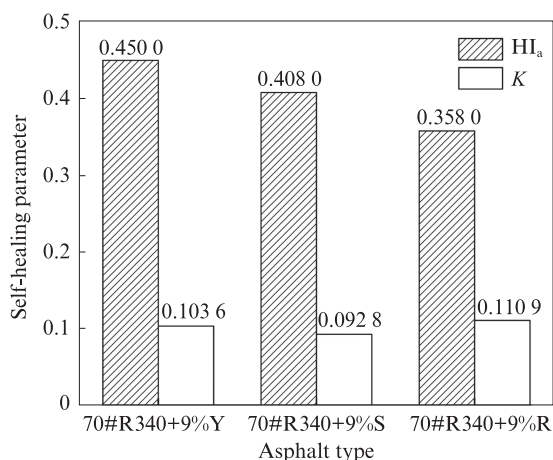


图5 不同再生剂类型下再生沥青的自愈合参数
Fig. 5 Self-healing parameters of recycled asphalt under different regenerant types

由图6(a)可知:在 $2\,830\sim 2\,982\text{ cm}^{-1}$ 波段内3种再生剂均出现高强度的 CH_3 和 CH_2 反对称与对称伸缩振动峰,表明再生剂中均存在含有非极性甲基和亚甲基官能团的烷烃;3种再生剂均包含多种极性官

能团, $1\,740$ 、 $1\,169\text{ cm}^{-1}$ 处分别出现酯羰基 $\text{C}=\text{O}$ 和链酸酐 $\text{C}-\text{O}$ 极性基团吸收峰, $1\,030\text{ cm}^{-1}$ 处出现微弱的亚砷基 $\text{S}=\text{O}$ 吸收峰,表明3种再生剂均含有一端由亲水基(极性部分)、一端由憎水基(非极性部分)组成的表面活性剂成分^[12].

由图6(b)可知:70#基质沥青经过老化后在 $1\,700\text{ cm}^{-1}$ 附近出现了羰基特征峰,并随着老化程度的加重而增强;另外, $1\,030\text{ cm}^{-1}$ 附近的亚砷基 $\text{S}=\text{O}$ 伸缩振动峰和 $3\,420\text{ cm}^{-1}$ 附近的 $\text{O}-\text{H}$ 吸收峰均在原有基础上有所增强.

对比图6(b)、(c)可知,老化沥青再生前后的官能团吸收峰位置基本相同,但不同状态再生沥青均在 $1\,740\text{ cm}^{-1}$ 附近出现了酯羰基 $\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动峰.原因在于,再生剂的引入导致了再生沥青中新吸收峰的出现,老化沥青再生过程中并无新物质产生.

2.3 沥青愈合指数与微观化学指标的相关性

现有研究^[13-14]表明沥青老化及再生过程中主要关注 $1\,700\text{ cm}^{-1}$ 附近的羰基 $\text{C}=\text{O}$ 及 $1\,030\text{ cm}^{-1}$ 附近

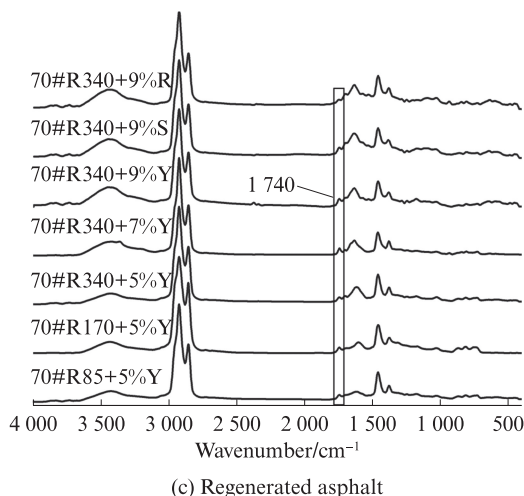
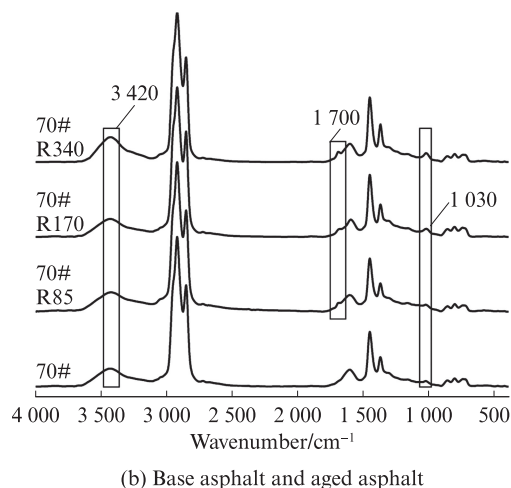
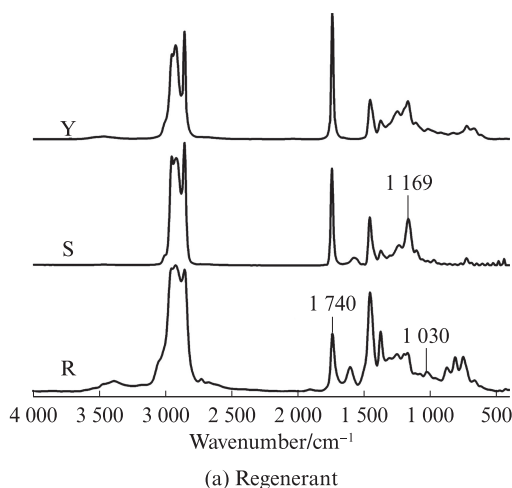


图6 再生剂、原样沥青、老化沥青及再生沥青的红外光谱
Fig. 6 IR spectra of regenerant, base asphalt, aged asphalt and regenerated asphalt

的亚砷基 $S=O$ 等含氧官能团的变化.采用OMNIC软件中的基线法来计算红外光谱中碳基和亚砷基特征峰的面积,进而通过式(3)得到碳基 $C=O$ 和亚砷基 $S=O$ 的官能团指数 $I_{C=O}$ 、 $I_{S=O}$,结果见表3.通过羰基和亚砷基官能团指数来反映沥青的老化及再生状态.

由表3可知:随着沥青老化程度的加重, $I_{C=O}$ 和 $I_{S=O}$ 逐渐增大,说明沥青中羰基和亚砷基含量变大,沥青发生氧化反应生成羰基和亚砷基等极性基团;老化沥青添加3种再生剂后均表现出 $I_{C=O}$ 和 $I_{S=O}$ 减小,表明沥青再生后极性官能团含量减少,再生剂能够补充老化沥青缺失的轻质组分,稀释溶解沥青老化过程中产生的极性物质.

图7给出了沥青自愈合参数与官能团指数的关系.由图7可知, $I_{S=O}$ 与沥青平均愈合指数 HI_a 具有一定程度的相关性($R^2>0.68$), $I_{S=O}$ 越大,沥青中极性官能团含量越高,分子间作用力越大,沥青自愈合性能

越低.考虑到再生剂种类不同会影响再生沥青官能团指数,排除添加R型和S型再生剂的试验样品后,将沥青自愈合参数与官能团指数的关系列于图8.

表3 再生沥青官能团指数

Table 3 Functional group index of recycled asphalt

Sample	$I_{C=O}$	$I_{S=O}$
70#	0	0.020 5
70#R85	0.012 9	0.025 3
70#R170	0.015 5	0.049 6
70#R340	0.023 7	0.053 8
70#R85+5%Y	0.004 8	0.020 2
70#R170+5%Y	0.005 3	0.023 9
70#R340+5%Y	0.012 5	0.034 2
70#R340+7%Y	0.010 4	0.025 0
70#R340+9%Y	0.013 0	0.023 9
70#R340+9%S	0.016 0	0.027 8
70#R340+9%R	0.023 1	0.047 3

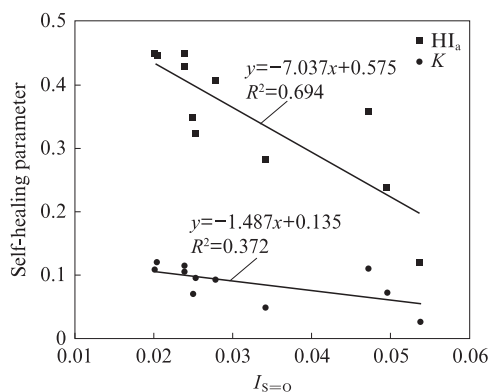
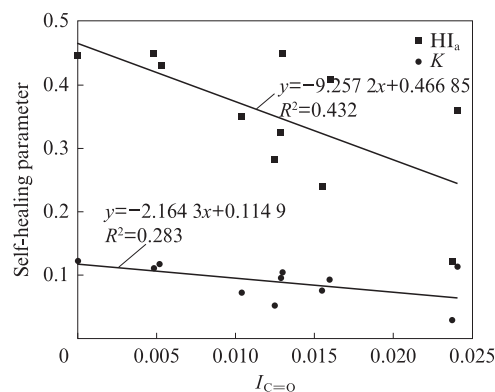
(a) $I_{S=O}$ (b) $I_{C=O}$

图7 沥青自愈合参数与官能团指数的关系

Fig. 7 Relationship between asphalt self-healing parameter and functional group index

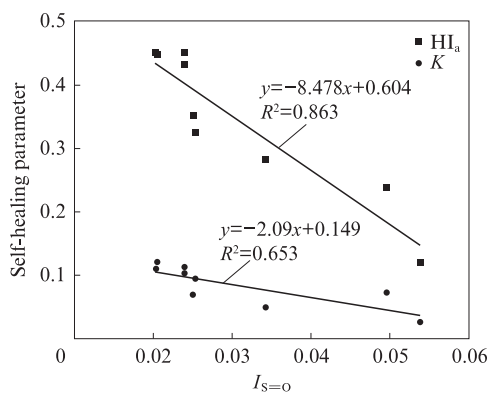
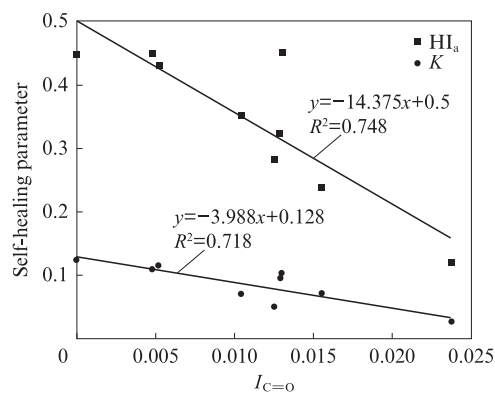
(a) $I_{S=O}$ (b) $I_{C=O}$

图8 排除添加R型和S型再生剂的试验样品后,剩余沥青自愈合参数与官能团指数的关系

Fig. 8 Relationship between self-healing parameters and functional group index of the remaining asphalts after excluding R and S types of recycled asphalt

由图8可见:排除添加R型和S型再生剂的试验样品后,自愈合参数与官能团指数 $I_{C=O}$ 、 $I_{S=O}$ 的相关性

明显提高,沥青平均愈合指数与 $I_{C=O}$ 的相关性超过0.7,表明再生剂种类影响了沥青自愈合参数与官能团

指数的相关性;对于添加Y型再生剂的沥青,自愈合参数与 $I_{C=O}$ 、 $I_{S=O}$ 之间表现出较好的线性相关性。

3 结论

(1)通过不同间歇时间下的沥青疲劳自愈合试验得出,除重度老化沥青外,其余沥青的平均愈合指数 HI_a 与愈合时间 $t^{0.25}$ 的线性相关性较高。老化导致沥青 K 和 HI_a 降低,添加再生剂能够恢复老化沥青的愈合性能,且再生剂掺量较高时效果更好;Y型再生剂对恢复老化沥青自愈合性能的效果最好。

(2)沥青在老化过程中发生了氧化反应,随着老化程度的加重,羰基指数 $I_{C=O}$ 和亚砷基指数 $I_{S=O}$ 增大,沥青中极性氧化物含量提高,导致分子间作用力增大,自愈合能力降低;老化沥青再生后 $I_{C=O}$ 、 $I_{S=O}$ 减小,极性氧化物含量降低,分子间作用力减小,自愈合能力得到恢复。

(3)再生剂组分差异会影响再生沥青自愈合参数与官能团指数的相关性,添加Y型再生剂的再生沥青自愈合参数与 $I_{C=O}$ 、 $I_{S=O}$ 均表现出较好的线性相关性。

参考文献:

- [1] 周璐,黄卫东,吕泉.干湿条件下沥青自愈合性能评价与机理分析[J].建筑材料学报,2021,24(1):137-145.
ZHOU Lu, HUANG Weidong, LÜ Quan. Evaluation and mechanism analysis of asphalt self-healing performance under dry and wet conditions[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(1): 137-145. (in Chinese)
- [2] 向浩,何兆益,陈柳晓,等.再生沥青自愈合影响因素及疲劳性能分析[J].建筑材料学报,2019,22(2):292-298.
XIANG Hao, HE Zhaoyi, CHEN Liuxiao, et al. Analysis of influencing factors and fatigue performance of recycled asphalt self-healing[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(2): 292-298. (in Chinese)
- [3] 陈瑞璞,崔亚楠,冯蕾.老化作用下沥青混合料的疲劳及自愈合性能[J].建筑材料学报,2019,22(3):487-492.
CHEN Ruipu, CUI Yanan, FENG Lei. Fatigue and self-healing performance of asphalt mixture under aging[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(3): 487-492. (in Chinese)
- [4] DEACON J A. Fatigue of asphalt concrete [D]. Berkeley: University of California Berkeley, 1965:67-68.
- [5] WOOL R P, OCONNOR K M. A theory crack healing in polymers [J]. Journal of Applied Physics, 1981, 52 (10): 5953-5963.
- [6] SHEN S H, SUTHARSAN T. Quantification of cohesive healing of asphalt binder and its impact factors based on dissipated energy analysis[J]. Road Materials and Pavement Design, 2011, 12 (3): 525-546.
- [7] 程耀飞,蒋勇,孙大权,等.不同类型沥青胶浆自愈合行为方程[J].公路交通科技,2019,36(3):42-48.
CHENG Yaofei, JIANG Yong, SUN Daquan, et al. Self-healing behavior equation of different types of asphalt mortar[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(3): 42-48. (in Chinese)
- [8] 罗蓉,许苑,刘涵奇,等.沥青自愈合指标修正及影响因素分析[J].建筑材料学报,2018,21(2):340-344.
LUO Rong, XU Yuan, LIU Hanqi, et al. Modification of asphalt self-healing index and analysis of influencing factors[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(2): 340-344. (in Chinese)
- [9] 崔亚楠,陈超,赵琳.热老化后SBS改性沥青的微观结构及自愈合性能[J].高分子材料科学与工程,2018,34(5):65-70.
CUI Yanan, CHEN Chao, ZHAO Lin. Microstructure and self-healing performance of SBS modified asphalt after heat aging [J]. Polymeric Materials Science and Engineering, 2018, 34(5): 65-70. (in Chinese)
- [10] SUN D Q, LIN T B, ZHU X Y, et al. Calculation and evaluation of activation energy as a self-healing indication of asphalt mastic [J]. Construction and Building Materials, 2015, 95:431-436.
- [11] 姚志杰.再生剂与老化沥青微观作用机理研究[D].兰州:兰州交通大学,2018.
YAO Zhijie. Research on the microcosmic mechanism of regeneration agent and aging asphalt [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [12] TANG J, LIU Q T, WU S P, et al. Investigation of the optimal self-healing temperatures and healing time of asphalt binders [J]. Construction and Building Materials, 2016, 113:1029-1033.
- [13] 何兆益,冉龙飞,曹青霞.基于光谱分析的SBS改性沥青再生机理研究[J].建筑材料学报,2015,18(5):900-904.
HE Zhaoyi, RAN Longfei, CAO Qingxia. Study on regeneration mechanism of SBS modified asphalt based on spectral analysis [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(5): 900-904. (in Chinese)
- [14] 曹雪娟,胡森,曹芯芯,等.植物油再生老化沥青胶结料性能研究[J].应用化工,2019,48(3):571-574.
CAO Xuejuan, HU Sen, CAO Xinxin, et al. Study on properties of bio-oil recycled aging asphalt binder [J]. Applied Chemical Industry, 2019, 48(3): 571-574. (in Chinese)