

文章编号:1007-9629(2021)06-1271-09

热老化下沥青胶浆微观结构及自愈合性能评价

崔亚楠^{1,2}, 周 军^{1,2}, 赵 琳³

(1. 内蒙古工业大学 土木工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古工业大学 内蒙古自治区土木
工程结构与力学重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010051; 3. 内蒙古建筑职业技术学院 交通与市政
工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要:为研究热老化作用下沥青胶浆的自愈合特性, 针对3种沥青胶浆, 利用原子力显微镜(AFM)、动态剪切流变仪(DSR)、弯曲梁流变仪(BBR)进行微观结构、疲劳—愈合—再疲劳、蠕变—愈合—再蠕变测试, 通过2个愈合指数(HI^1 和 HI^2)研究了愈合温度、沥青种类、粉胶比、老化程度、破坏程度及愈合时间对沥青胶浆自愈合性能的影响. 结果表明: 老化后基质沥青胶浆中“蜂形结构”变化显著, 而老化后SBS改性沥青胶浆和胶粉改性沥青胶浆的微观结构较为稳定, 微观结构的改变潜在影响沥青胶浆的自愈合性能; 基于累计耗散能建立的愈合指数 HI^1 和基于时间轴与劲度模量主曲线在双对数坐标下所围面积 S_A 而建立的愈合指数 HI^2 能很好地反映沥青胶浆的自愈合性能; 低粉胶比沥青胶浆的自愈合能力更好, 老化程度的加深导致沥青胶浆的自愈合能力降低, 经历低温后改性沥青胶浆的自愈合能力较好.

关键词:热老化; 自愈合; 沥青胶浆; 微观结构; 流变性能; 愈合机理

中图分类号:U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.06.020

Evaluation of Microstructure and Self-healing Properties of Asphalt Mortar under Heat Aging

CUI Yanan^{1,2}, ZHOU Jun^{1,2}, ZHAO Lin³

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 2. The Key Laboratory of Civil Engineering Structure and Mechanics of Inner Mongolia Autonomous Region, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 3. School of Transportation and Municipal Engineering, Inner Mongolia Technical College of Construction, Hohhot 010051, China)

Abstract: In order to study the self-healing properties of asphalt mortar under heat aging, three kinds of asphalt mortar were prepared to test microstructure, fatigue—healing—re-fatigue and creep—self-healing—re-creep processes, by atomic force microscope (AFM), dynamic shear rheometer (DSR), bending beam rheometer (BBR) to establish two healing indexes (HI^1 and HI^2) for the effects of healing temperature, asphalt type, filler-asphalt ratio, aging degree, destruction degree, healing time on the self-healing properties of asphalt mortar. The results show that after aging, the bee-shape structure in the matrix asphalt mortar changes significantly, while the microstructure of SBS modified asphalt mortar and rubber powder modified asphalt mortar is more stable, and the change of microstructure potentially affects the self-healing performance. The healing index HI^1 based on the cumulative dissipation energy and the healing index HI^2 based on the area S_A enclosed by the time axis and the main curve of the stiffness modulus in double logarithmic coordinates can better reflect the asphalt

收稿日期:2020-06-23; 修订日期:2020-07-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51568054);内蒙古自治区高等学校“青年科技英才计划”项目(NJYT-19-A19);内蒙古自然科学基金资助项目(2018MS05053)

第一作者:崔亚楠(1974—),女,内蒙古乌兰察布人,内蒙古工业大学教授,博士生导师,博士.E-mail:791773793@qq.com

mortar self-healing properties; The self-healing ability of asphalt mortar with low filler-asphalt ratio is better, the deepening of aging reduces the healing ability, and the healing ability of modified asphalt mortar is stronger at low temperature.

Key words: heat aging; self-healing; asphalt mortar; microstructure; rheological property; healing mechanism

沥青路面受自然环境和行车荷载的影响会发生老化,导致路用性能降低,从而产生裂缝^[1-2]。研究发现,沥青路面在停止使用一段时间后,随着温度的升高,裂缝缩小,甚至消失,这就是沥青材料的自愈合性能^[3-4]。道路工作者从材料学、热力学和力学等角度对沥青自愈合进行大量研究,其中采用动态剪切流变仪(DSR)对沥青进行疲劳愈合测试是常用方法。Bommavaram等^[5]对5种SHRP沥青(AAM、AAD、AAB、AAF和ABD)的自愈能力进行研究,发现沥青的短期自愈率取决于材料的表面能,而沥青材料的分子扩散特性决定其长期自愈率。Kim等^[6]对比了AAM-1和AAD-1这2种典型沥青的疲劳自愈性能,以动态模量、刚度及耗散能的变化为评价指标,发现AAM-1具有更好的自愈能力。Shen等^[7]定义每单位荷载间歇时间耗散能的变化率为愈合率,以此评价沥青胶浆的自愈合潜能。姜皖^[8]对热老化基质沥青胶浆及SBS改性沥青胶浆进行了疲劳—愈合—再疲劳试验,并采用愈合前后复数剪切模量的变化作为自愈合评价的指标,发现SBS改性沥青胶浆的自愈合

能力优于基质沥青胶浆,而老化后沥青胶浆的愈合效果相差很多。以上研究丰富了沥青胶浆自愈合评价指标及愈合机理,但对老化、低温下沥青胶浆的自愈合能力研究偏少。

本文针对老化前后的基质沥青胶浆、SBS改性沥青胶浆、胶粉改性沥青胶浆进行微观结构测试、疲劳—愈合—再疲劳试验及蠕变—愈合—再蠕变试验,通过原子力显微镜(AFM)、DSR、弯曲梁流变仪(BBR)等,分析老化前后沥青胶浆的微观结构和自愈合性能,研究沥青胶浆的自愈合机理,并评价其在高低温下的自愈合能力,以优化沥青混凝土的使用。

1 试验

1.1 原材料

沥青采用70#基质沥青(BA)、SBS改性沥青(SA)和胶粉改性沥青(RA),各沥青的基本指标列于表1;矿粉采用石灰石矿粉,其基本指标列于表2。3种沥青胶浆的粉胶比(质量比)分别为0.5、1.0和1.5。3种沥青胶浆均采用高剪切乳化机制备。

表1 沥青的基本指标
Table 1 Basic indicators of asphalts

Asphalt type	Penetration (25 °C, 5 s, 100 g)/(0.1 mm)	PI	Softening point/°C	Ductility/cm	
				15 °C	5 °C
BA	87.0	-1.78	50.0	>100	
SA	58.4	0.47	72.6		47.2
RA	53.8	0.47	81.9		32.2

表2 矿粉的基本指标
Table 2 Basic indicator of mineral powder

Apparent density/ (g·cm ⁻³)	Hydrophilic coefficient	Particle size/mm
2.641	0.8	≤0.075

1.2 试验方法

1.2.1 沥青胶浆老化试验

采用薄膜烘箱试验(TFOT),在(163±1)℃下老化5 h,模拟沥青胶浆从运输到摊铺过程中发生的短期老化。将经过短期老化后的沥青胶浆样品放入压力老化箱(PAV),在(2.1±0.1) MPa下热氧老化20 h,同时将老化温度提升至90℃,即可得到沥青胶浆的长期老化试样。

1.2.2 疲劳—愈合—再疲劳试验

采用DSR,在25℃、10 Hz、0.3 MPa应力控制模式下使用8 mm平行板,先进行第1阶段疲劳试验,当沥青胶浆复数剪切模量达到初始模量的60%、40%、20%(即损伤程度达到40%、60%、80%)时停止剪切;接着沥青胶浆进入恢复阶段,愈合温度分别为25、35、45℃,间歇期分别为0.5、1.0、2.0 h;然后继续剪切,进入第2阶段疲劳试验,直至试样破坏。

1.2.3 蠕变—愈合—再蠕变试验

采用BBR,使用设置预切口的硅胶模具浇筑沥青胶浆小梁试件。先将沥青胶浆小梁恒温保持(60±5) min,在-10、-20、-30℃下进行蠕变测试;接着置于硅胶模具中,连同硅胶模具一起放入高低温箱

中对其进行热诱导自愈合,愈合温度为 25、35、45 ℃,间歇期分别为 0.5、1.0、2.0 h;然后在试验温度下冷却,再次进行沥青胶浆小梁弯曲蠕变试验.

1.2.4 AFM 微观结构观测

采用热铸法制备沥青胶浆微观试样,步骤如下:先将沥青胶浆加热至熔融状态;然后在干净的载玻片中央滴入少量沥青胶浆,烘箱温度设置为 110 ℃,将其置于烘箱烘烤 10 min;最后取出,冷却至室温,即可进行 AFM 观测.

2 结果讨论

2.1 沥青胶浆疲劳—愈合—再疲劳试验愈合指数

采用 Miner 线性疲劳损伤准则研究沥青疲劳损伤累积.该准则假定沥青材料在疲劳试验过程中的损伤累积为线性累积,当损伤累积达到损伤阈值(损伤破坏临界值)时试件破坏^[9].将愈合前后沥青胶浆的累积耗散能(W)之比定义为愈合指数 HI^1 ,以此来评价其自愈合能力.愈合指数 HI^1 的计算式见式(1)~(3).

$$\omega_i = \pi \frac{\sigma^2}{G_i} \sin \delta_i$$

(1)

$$W = \sum_{i=1}^n \omega_i$$

(2)

$$HI^1 = \frac{W_{after}}{W_{before}}$$

(3)

式中: σ 为加载应力,MPa; G_i 为沥青胶浆第*i*次加载时的复数剪切模量,MPa; ω_i 为第*i*次荷载作用中的耗散量,MJ/m³; δ_i 为相位角,(°); W_{before} 、 W_{after} 分别为沥青胶浆愈合前后的累积耗散能,MJ/m³.

2.2 沥青胶浆蠕变—自愈合—再蠕变试验愈合指数

谭忆秋等^[10]采用 CAM(christensen anderson marasteanu)模型,将劲度模量主曲线与时间轴在双对数坐标下所围面积 S_A 定义为低温评价指标. S_A 可以综合考虑材料的模量及松弛能力,该值越小,说明沥青胶浆的低温性能越好.将 S_A 的变化率定义为愈合指数 HI^2 ,来表征沥青胶浆的愈合能力,其表达式为:

$$HI^2 = \frac{S_{AH} - S_{AI}}{S_{AI}}$$

(4)

式中: S_{AI} 、 S_{AH} 分别为沥青胶浆愈合前后的 S_A ,MPa·s.

2.3 试验结果

根据试验结果,计算得到沥青胶浆的愈合指数 HI^1 和 HI^2 ,见表 3、4.

表 3 沥青胶浆愈合指数 HI^1 计算结果
Table 3 Healing index HI^1 calculation results of asphalt mortars

Asphalt type	Filler-asphalt ratio (by mass)	Aging degree	Healing temperature/℃	Healing time/h	Destruction level/%	HI^1
BA	0.5	Original	25	0.5	40	0.790
BA	1.0	TFOT	35	0.5	80	0.431
BA	1.5	TFOT	45	2.0	40	0.699
SA	1.0	TFOT	25	1.0	60	0.272
SA	1.5	PAV	35	1.0	40	0.801
SA	0.5	PAV	45	0.5	60	0.978
RA	1.5	PAV	25	2.0	80	0.218
RA	0.5	Original	35	2.0	60	0.693
RA	1.0	Original	45	1.0	80	0.851
BA	0.5	PAV	25	1.0	80	0.110
BA	1.0	PAV	35	2.0	60	0.947
BA	1.5	Original	45	1.0	60	0.695
SA	1.0	Original	25	2.0	40	0.407
SA	1.5	Original	35	0.5	80	0.181
SA	0.5	TFOT	45	2.0	80	0.904
RA	1.5	TFOT	25	0.5	60	0.358
RA	0.5	TFOT	35	1.0	40	0.842
RA	1.0	PAV	45	0.5	40	0.533

表4 沥青胶浆愈合指数 HI^2 的计算结果
Table 4 Healing index HI^2 calculation results of asphalt mortars

Asphalt type	Filler-asphalt ratio	Aging degree	Healing temperature/ $^{\circ}C$	Healing time/h	HI^2
BA	0.5	Original	25	0.5	0.289
SA	1.0	TFOT	25	1.0	1.763
RA	1.5	PAV	25	2.0	0.080
BA	1.0	TFOT	35	0.5	0.616
SA	1.5	PAV	35	1.0	0.224
RA	0.5	Original	35	2.0	1.132
SA	0.5	PAV	45	0.5	1.261
RA	1.0	Original	45	1.0	0.067
BA	1.5	TFOT	45	2.0	0.031
RA	1.5	TFOT	25	0.5	0.210
BA	0.5	PAV	25	1.0	0.659
SA	1.0	Original	25	2.0	0.344
SA	1.5	Original	35	0.5	0.075
RA	0.5	TFOT	35	1.0	0.187
BA	1.0	PAV	35	2.0	0.538
RA	1.0	PAV	45	0.5	0.239
BA	1.5	Original	45	1.0	0.038
SA	0.5	TFOT	45	2.0	0.007

2.4 沥青胶浆自愈性能的评价

2.4.1 基于愈合指数 HI^1 评价沥青胶浆自愈性能

针对表3中愈合指数 HI^1 的计算结果,运用极差方法来分析各因素对沥青胶浆疲劳自愈性能的影响,见图1.

由图1(a)、(b)、(d)可知:愈合温度越高、损伤程度越低、愈合时间越长,沥青胶浆的自愈合效果越好.这是因为沥青材料随着温度的升高而变软,胶体中固态部分的结合性能明显低于液态部分^[11],进而增强了湿润与分子扩散作用;当沥青胶浆的损伤越严重时,间

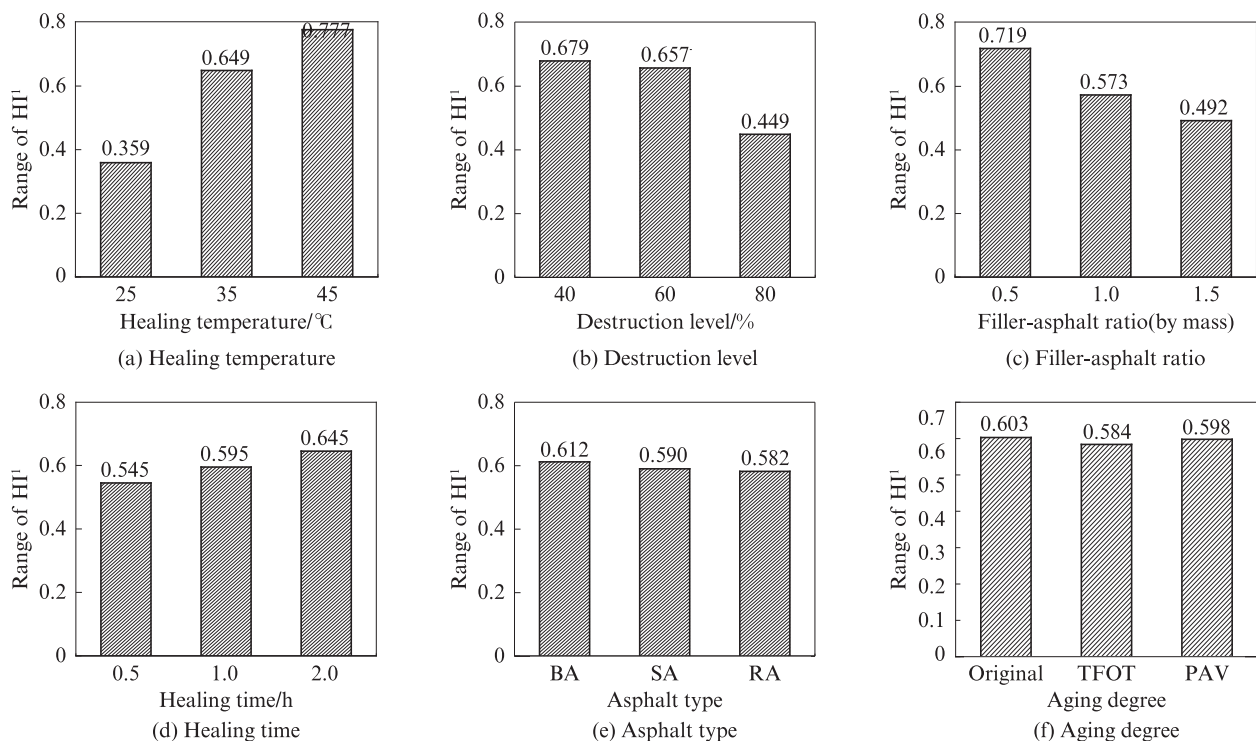


图1 各影响因素下沥青胶浆愈合指数 HI^1 的极差分析结果

Fig. 1 Range analysis results of asphalt mortar healing index HI^1 under various influencing factors

歇期之后的累积耗散能越小^[12],所表现出的自愈合效果也就越差.由此可以推断,当沥青胶浆损伤很小时,在长期自愈合作用下会完全恢复其抗疲劳性能.

由图1(c)可知:随着粉胶比的增大,沥青胶浆的愈合指数有所减小.这是由于粉胶比增大使得沥青胶浆由“稀释结构”向“集中式”结构转变^[13].在粉胶比较低的沥青胶浆中自由沥青的比例较高,因而其自愈合效果较好,但沥青胶浆的抗疲劳特性较差.

由图1(e)可知:3种沥青胶浆中胶粉改性沥青胶浆的自愈合性能最差,基质沥青胶浆的自愈合性能最优.这是由于改性剂抑制了沥青胶浆的自愈合,沥青中的一些相容成分如饱和分及芳香分被聚合物吸

收,使得剩余沥青中沥青质的含量较高,由于难以流动和自愈,沥青的扩散系数与相对分子质量成反比^[14-15],所以表现出来的自愈合性能较差.但是,在SBS改性沥青胶浆中,沥青与改性剂可以很好地相容,高弹的软段与高强的硬段在常温下共同作用,与此同时沥青的变形及恢复特性也会改变,当高分子材料在承受相同方向的外力作用时会出现分子取向现象,进而提高了抗疲劳性能及对各种损伤的抵抗能力^[15].

2.4.2 基于愈合指数 HI^2 评价沥青胶浆自愈合性能

运用极差方法分析各因素对沥青胶浆愈合指数 HI^2 的影响,见图2.

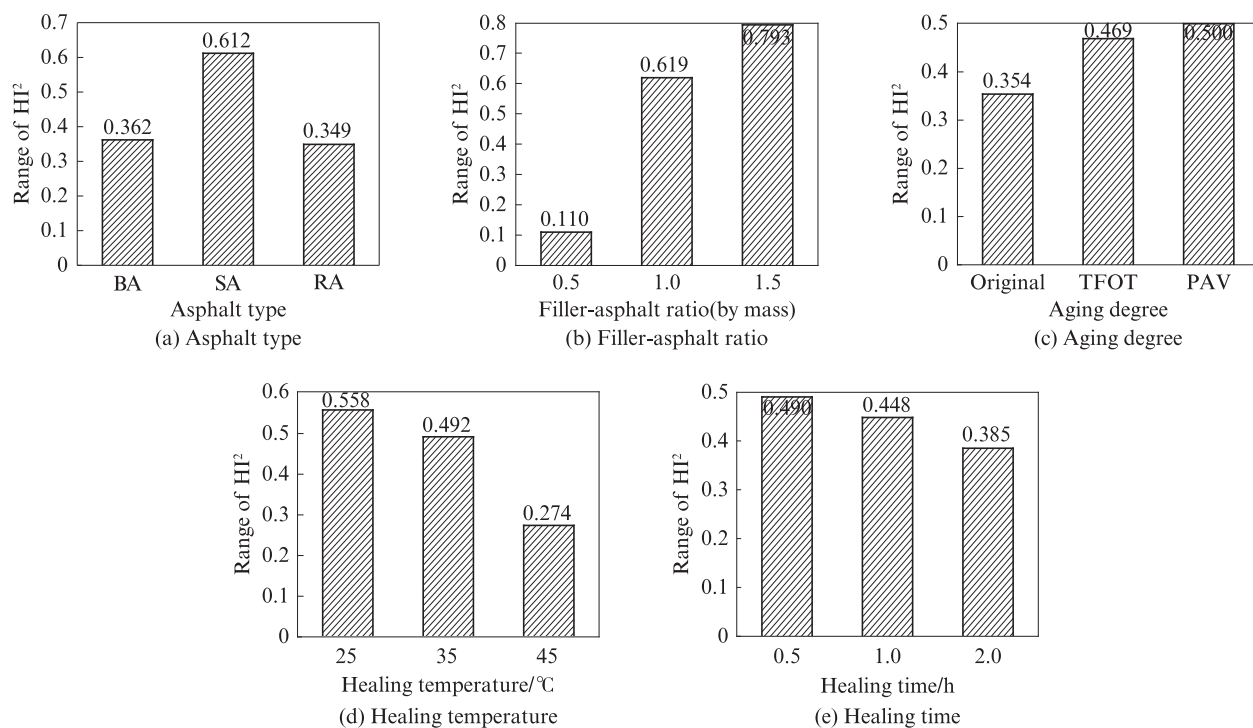


图2 各影响因素下沥青胶浆愈合率 HI^2 的变化

Fig. 2 Change of asphalt mortar healing index HI^2 under various influencing factors

由于愈合指数 HI^2 反映的是 S_A 的变化率,其极差值越小,表示沥青胶浆低温性能恢复得越好,愈合效果越好.

由图2(a)可知,SBS改性沥青胶浆的愈合效果劣于基质沥青胶浆,胶粉改性沥青胶浆具有较好的弹性,所以其在低温下体现出的自愈性能较好.由图2(b)可知,沥青胶浆的自愈合能力受粉胶比的影响最大,愈合效果随着粉胶比的增大而变差,这是因为粉胶比大的沥青胶浆在低温下会更脆硬,使得其低温抗裂性能变差^[16];粉胶比较小的沥青胶浆含有较多的自由沥青,其流动性可促进裂缝愈合.图2(c)显示,随着老化程度的加剧,沥青胶浆自愈合效果减弱.

这是由于老化后沥青胶浆的轻组分减少、沥青质增加,沥青开始变得又硬又脆,分子间极性增强,阻碍了沥青分子的流动,导致流动性变差^[17].由图2(d)、(e)可见:沥青胶浆的愈合效果随着温度的升高和愈合时间的增长而变好,当温度由35℃上升到45℃时,沥青胶浆的愈合指数 HI^2 大幅降低,降幅为44.3%.这是由于沥青在低温时的凝胶状态会随着温度的升高向溶胶状态转变^[13],致使沥青黏度降低,增加了沥青分子的流动性.随着愈合时间的增加,裂缝周围的沥青分子缓慢流动使其闭合,从而表现出很好的愈合效果^[18].

3 老化后沥青胶浆的微观结构

3.1 沥青胶浆的微观结构

粉胶比为1.0的3种沥青胶浆的原子力显微照片如图3所示.由图3可以看出:(1)基质沥青胶浆出现明显的“蜂形结构”,该结构是由于沥青质的聚集形成了一定高度的白色区域,而硫化物、稠环芳烃阻止沥青质聚集,形成了蜂状沉陷区所构成的;未老化的基质沥青胶浆“蜂形结构”比较集中,随着老化程度的增加,“蜂形结构”逐渐变窄变长,表明沥青质不断增加,分散状况变差.(2)SBS改性沥青胶浆没有出现明显的“蜂形结构”,老化后,SBS改性沥青三维网状结构

的破坏减弱了沥青质的分散作用,出现了“絮凝”状结构^[19].(3)胶粉改性沥青胶浆也没有出现“蜂形结构”,这是由于胶粉颗粒不溶于沥青,而是吸收沥青中的轻组分,溶胀后以颗粒的形式均匀地分散在沥青基体中,沥青质分散状况良好;经过短期老化后胶粉改性沥青胶浆表面变得均匀,而长期老化过程中溶胀作用减弱,胶粉改性沥青胶浆组分氧化,表面变得粗糙.

3.2 沥青胶浆微观参数分析

为进一步分析老化对沥青胶浆微观结构的影响规律及自愈合的潜在影响,对3种沥青胶浆的微观形貌参数进行分析.各沥青胶浆的微观形貌参数见表5~7.

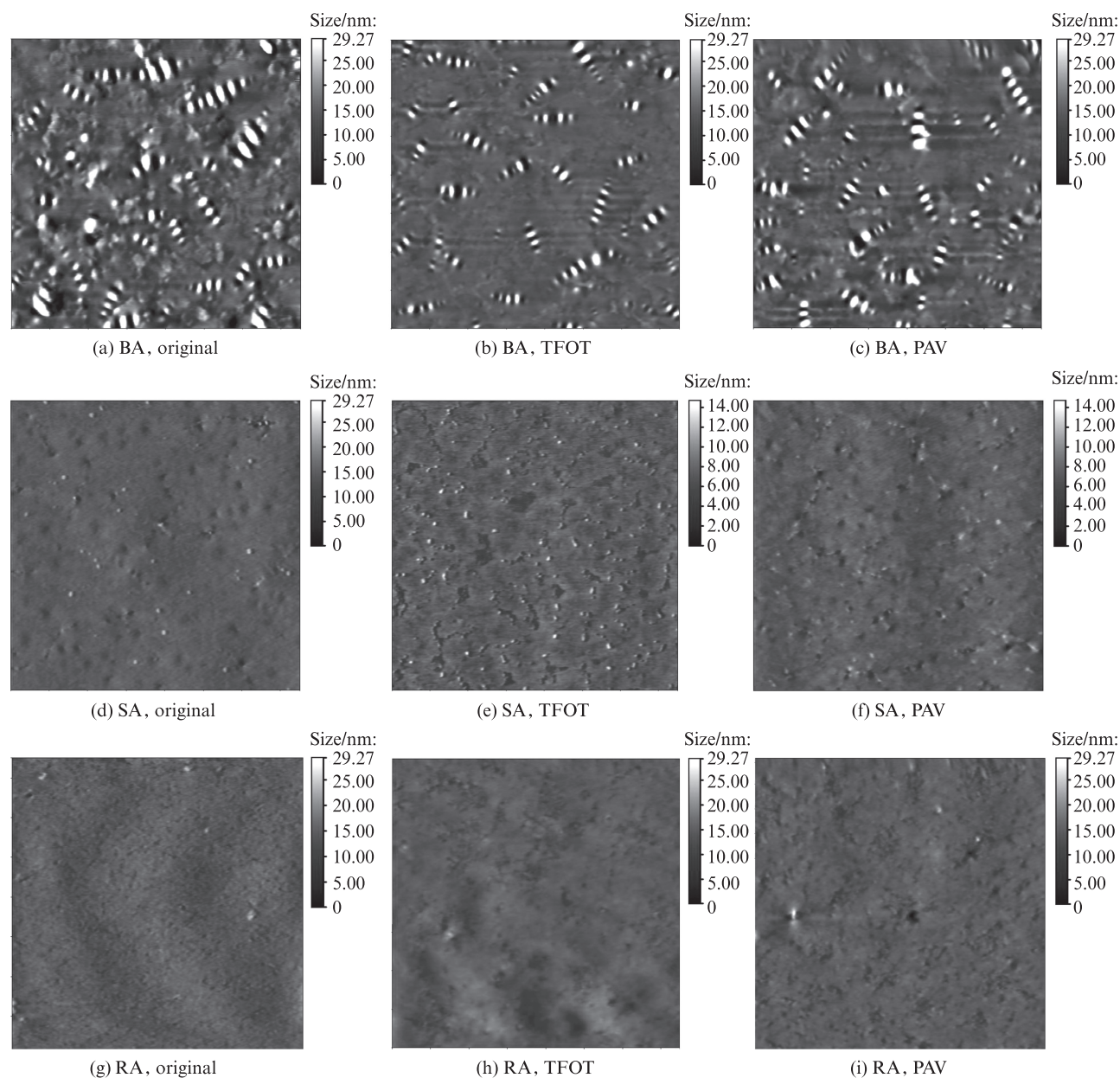


图3 老化前后的沥青胶浆原子力显微照片

Fig. 3 AFM photos of asphalt mortars before and after aging (filler-asphalt ratio (by mass)=1.0)

表5 基质沥青胶浆的“蜂形结构”特征参数
Table 5 Characteristic parameters of matrix asphalt mortar of “bee-shape structure”

Status of asphalt	Filler-asphalt ratio (by mass)	Maximum “bee-shape structure” area/ μm^2	Number of “bee-shape structure”
Original	0.5	0.706	19
	1.0	1.239	23
	1.5	0.920	25
TFOT	0.5	0.583	3
	1.0	1.378	27
	1.5	1.342	28
PAV	0.5	1.182	23
	1.0	1.449	31
	1.5	1.373	31

表6 SBS改性沥青胶浆的粗糙度及颗粒分析
Table 6 Roughness and particle analysis of SBS modified asphalt mortar

Status of asphalt	Filler-asphalt ratio (by mass)	Average roughness	Average particle size/nm	Total number of particle
Original	0.5	0.627	113	2 591
	1.0	0.772	127	2 034
	1.5	1.200	132	2 732
TFOT	0.5	0.449	121	1 951
	1.0	0.518	129	2 097
	1.5	0.627	136	1 801
PAV	0.5	0.523	127	2 172
	1.0	0.542	141	1 803
	1.5	0.578	156	1 424

表7 胶粉改性沥青胶浆的粗糙度及颗粒分析
Table 7 Roughness and particle analysis of rubber powder modified asphalt mortar

Status of asphalt	Filler-asphalt ratio (by mass)	Average roughness	Average particle size/nm	Total number of particle
Original	0.5	0.725	121	2 328
	1.0	1.010	125	2 323
	1.5	1.030	135	2 074
TFOT	0.5	1.030	147	1 637
	1.0	0.894	149	1 601
	1.5	0.837	181	1 095
PAV	0.5	0.939	145	1 670
	1.0	0.924	164	1 430
	1.5	0.899	183	1 044

由表5可见,当粉胶比由0.5增加到1.0时,原样基质沥青胶浆的“蜂形结构”数量增加了21.1%,而经历长短期老化的基质沥青胶浆分别增加了34.8%和8倍,且最大“蜂形结构”面积也达到最大(1.449 μm^2).这表明粉胶比一定时,老化会加速沥青质的聚集,进而会降低其自愈合能力;随着粉胶比的增加,原样基质沥青胶浆中“蜂形结构”数量稍稍增加,老化后的沥青胶浆中几乎不变,说明粉胶比增大后沥青胶浆的老化有所抑制,这是因为轻组分质量分数在老化后已经较低,且过多的矿粉已无法吸收轻组分,此

外,矿粉还会对氧分子的扩散有阻碍作用,降低基质沥青的老化速度,以至于大分子聚集现象没有更多出现.

由表6可见:随着粉胶比的增大,老化前后的SBS改性沥青胶浆粗糙度及平均粒径均增大,这是由于随着矿粉含量的增加,沥青胶浆的稠度增加,且矿粉易聚集成团,难以充分分散在沥青中,因而会增加表面的粗糙度,同时也会降低其自愈合的能力;短期老化后,SBS改性剂受到一定破坏,最终在经历凝聚、离析后,出现了“絮凝”状结构,颗粒数和颗粒尺

寸变化不大,粗糙度反而下降,蜡类及轻组分等分散介质减少,沥青质含量增加,进而降低了沥青胶浆的自愈合能力;长期老化后,SBS沥青胶浆的表面粗糙度参数与短期老化相比变化不大.由此可见,SBS的加入会起到抑制沥青胶浆老化进程的作用.

由表7可见:对于原样胶粉改性沥青,随着粉胶比的增大,其粗糙度增加,这是由于不断增加的矿粉含量难以分散均匀;而经历短期和长期老化后的胶粉改性沥青胶浆,随着粉胶比的增大,其粗糙度先增大后减小,这主要是其内部的沥青、矿粉、胶粉颗粒一起发生老化,致使橡胶分子部分降解,矿粉被更加均匀地裹覆,加之数量不断增加的结构沥青,增强了黏附作用,使得体系越来越稳定^[20].胶粉改性沥青胶浆的改性过程仅仅是部分溶胀或混溶,并未发生任何化学作用,沥青质含量很高的凝胶膜通过附着在胶粉颗粒上,使得沥青分子的流动与扩散变得困难,导致自愈合性能较差.

4 结论

(1)疲劳—愈合—再疲劳测试结果表明:SBS改性沥青胶浆和基质沥青胶浆的自愈合性能优于胶粉改性沥青胶浆;当损伤程度较小时,间歇期越长、愈合温度越高,沥青胶浆的自愈合效果就越好;沥青胶浆随粉胶比增加,自愈合效果变差;老化后沥青胶浆的自愈合效果降低.

(2)蠕变—愈合—再蠕变测试结果表明:愈合温度越高、愈合时间越长、粉胶比越小的沥青胶浆经历低温后的自愈合效果越好;原样胶粉改性沥青本身具有优异的低温性能,在低温条件下自愈合性能具有优势.

(3)微观结构观测显示,不同种类的沥青及矿粉含量均会对老化沥青胶浆的微观结构产生影响,进而影响到其自愈合的能力,但老化后改性沥青微观结构变化较小,说明其抗老化能力较强,对环境的适应性更好.

参考文献:

- [1] 王志军.考虑老化作用的沥青胶浆动态粘弹性能试验分析[J].公路工程,2016,41(6):48-52.
WANG Zhijun. Viscoelastic properties test of asphalt mortar with different aging degree[J]. Highway Engineering, 2016, 41(6):48-52. (in Chinese)
- [2] 许苑.沥青疲劳性能、自愈合性能的影响因素及相关性研究[D].武汉:武汉理工大学,2018.
XU Yuan. Influencing factors of and relationship between fatigue and healing properties of asphalt binders[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [3] 徐辰.沥青自愈合特性及影响因素研究[D].重庆:重庆交通大学,2013.
XU Chen. Study on the features and influencing factors of self-healing characteristic of asphalt[D]. Chongqing. Chongqing Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [4] HOU Y, WANG L, PAULI T, et al. An investigation of asphalt self-healing mechanism using phase-field model[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(3): 04014118.1-04014118.13.
- [5] BOMMAVARAM R R, BHASIN A, LITTLE D N. Determining intrinsic healing properties of asphalt binders: Role of dynamic shear rheometer[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2009(1): 47-54.
- [6] KIM Y R, LITTLE D N, LYTTON R L. Evaluation of micro-damage, healing, and heat dissipation of asphalt mixtures, using a dynamic mechanical analyzer [J]. Transportation Research Record, 2001, 176:60-66.
- [7] SHEN S H, CHIU H M, HUANG H. Characterization of fatigue and healing in asphalt binders[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(9):846-852.
- [8] 姜皖.沥青胶浆自愈合能力研究[D].武汉:武汉理工大学,2011.
JIANG Huan. Research on the self-healing capacity of bitumen mastics[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [9] CARPENTER S H, SHEN S H. Dissipate denery approach to study hot-mix asphalt healing fatigue [J]. Journal of the Transportation Research Board, 2006, 1970(1):178-185.
- [10] 谭忆秋,符永康,纪伦,等.橡胶沥青低温评价指标[J].哈尔滨工业大学学报,2016,48(3):66-70.
TAN Yiqiu, FU Yongkang, JI Lun, et al. Low-temperature evaluation index of rubber asphalt[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(3):66-70. (in Chinese)
- [11] 黄明,汪翔,黄卫东.橡胶沥青混合料疲劳性能的自愈合影响因素分析[J].中国公路学报,2013,26(4):16-22,35.
HUANG Ming, WANG Xiang, HUANG Weidong. Analysis of influencing factors for self-healing of fatigue performance of asphalt rubber mixture [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(4):16-22, 35. (in Chinese)
- [12] 汤文,资建民,吕悦晶.沥青自愈合行为的影响因素及评价方法[J].建筑材料学报,2017,20(5):814-819.
TANG Wen, ZI Jianmin, LÜ Yuejing. Influential factors and evaluation methods of healing behavior of asphalt binders [J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(5):814-819. (in Chinese)
- [13] 袁燕,张肖宁,陈育书.改性沥青胶浆的疲劳评价研究现状[J].中外公路,2005,25(4):163-166.
YUAN Yan, ZHANG Xiaoning, CHEN Yushu. Research status of fatigue assessment of modified asphalt mortar[J]. China & Foreign Highway, 2005, 25(4):163-166. (in Chinese)

- [14] FAHEEM A F, BAHIA H U. Modelling of asphalt mastic in terms of filler-bitumen interaction [J]. Road Materials and Pavement Design, 2010, 11(sup1):281-303.
- [15] 周帅, 姚鸿儒, 王仕峰, 等. 胶粉沥青相互作用的微观结构与组成变化[J]. 石油沥青, 2015, 29(2):44-47.
ZHOU Shuai, YAO Hongru, WANG Shifeng, et al. Microscopic structure and composition changes in interaction process between rubber powder and asphalt [J]. Petroleum Asphalt, 2015, 29(2):44-47. (in Chinese)
- [16] 吴萌萌, 李睿, 张玉贞, 等. 纤维沥青胶浆高低温性能研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(1):169-175.
WU Mengmeng, LI Rui, ZHANG Yuzhen, et al. Study of high and low temperature performance of fiber-asphalt mortar [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(1):169-175. (in Chinese)
- [17] 韩吉伟. 盐冻循环条件下沥青微观结构及流变学性能研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2016.
HAN Jiwei. Research on the microstructure and rheology performance of asphalt under the salt freezing cycles[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [18] 陈华鑫, 陈拴发, 王秉纲. 基质沥青老化行为与老化机理[J]. 山东大学学报(工学版), 2009, 39(2):125-130.
CHEN Huaxin, CHEN Shuanfa, WANG Binggang. The aging behavior and mechanism of base asphalts [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2009, 39(2):125-130. (in Chinese)
- [19] VEYTSKIN Y, BOBKO C, CASTORENA C. Nanoindentation and atomic force microscopy investigations of asphalt binder and mastic [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(6):04016019.
- [20] 钟志锋, 郭兴文, 周浩. 粉胶比对橡胶沥青胶浆高温性能的影响研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2016, 33(1):20-23.
ZHONG Zhifeng, GUO Xingwen, ZHOU Hao. Study of the influence about the high temperature performance of crumb rubber modified asphalt mortars by powder / asphalt ratio [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2016, 33(1):20-23. (in Chinese)