

两种沥青胶浆的疲劳及自愈合性能试验

崔亚楠^{*1,2}, 赵琳², 孙广宁²

(1. 道路结构与材料交通行业重点实验室, 北京 100088; 2. 内蒙古工业大学 土木工程学院, 呼和浩特 010051)

摘要: 为了研究沥青胶浆的疲劳及自愈合特性, 利用动态剪切流变仪(DSR)进行时间扫描及疲劳-愈合-再疲劳测试, 并通过原子力显微镜(AFM)对微观结构进行观测。比较分析了不同粉胶比下基质沥青胶浆和苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)改性沥青胶浆的疲劳性能, 以及在常温(25℃)下 3 个不同间歇期的自愈合性能。试验发现: SBS 沥青胶浆具有更好的疲劳和自愈合性能, 两种沥青胶浆疲劳寿命均随粉胶比的增大而增加, 同一粉胶比条件下, 更长的间歇期有利于其自愈合, 过大或者过小的粉胶比都会降低沥青胶浆的自愈合性能; AFM 观测结果表明: 基质沥青胶浆出现明显的“蜂状结构”, 粉胶比增加, 矿粉吸附更多的沥青质, “蜂状结构”变多, 与沥青界面内聚力作用增强, 提高了抗疲劳性能, SBS 改性剂与沥青相容性良好, 改性沥青胶浆没有出现“蜂状结构”, 改性剂的加入增强了分子间内聚力, 有助于提高抗疲劳性能, 因此建议路面材料选用改性沥青胶浆。

关键词: 时间扫描; 自愈合; 沥青胶浆; 微观结构; 疲劳性能

中图分类号: TU535 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3854(2018)03-0699-07

Experimental study on fatigue and self-healing performance of two kinds of asphalt mortar

CUI Ya'nan^{*1,2}, ZHAO Lin², SUN Guangning²

(1. Key Laboratory of Road Structure and Materials Transportation, Beijing 100088, China;

2. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010051, China)

Abstract: In order to study on the fatigue and self-healing characteristics of asphalt mortar, the dynamic shear rheometer (DSR) was utilized to test time sweep and fatigue-healing-fatigue, and the microstructure was observed by Atomic Force Microscopy (AFM), and the fatigue performance of asphalt mortar and styrene butadiene styrene block copolymer(SBS) modified asphalt mortar under different powder binder ratios and self-healing properties of 3 different intermittent periods at normal atmospheric temperature (25℃) were analyzed and compared. It's found that SBS asphalt mortar has better fatigue and self healing properties, the fatigue life of two kinds asphalt mortar increases with powder binder ratio, and longer intermittent period is beneficial to self-healing under the same powder binder ratio. AFM observations show that matrix asphalt mortar appears “bee like structure” obviously, and asphaltene is absorbed and “bee like structure” becomes more, so the cohesion between filler and asphalt is enhanced, and fatigue properties is also improved with the increase of powder binder ratio. SBS modifier has good compatibility with asphalt, not a “bee like structure”, and the addition of the modifier greatly enhances the cohesion between the molecules, also it is conducive to improve the fatigue properties, so it is recommended that modified asphalt mortar is used as pavement material.

Keywords: time sweep; self-healing; asphalt mortar; microstructure; fatigue property

我国高速公路已经得到了快速有效的发展, 选择更具耐久性的路面材料是世界共同的研究方

向。裂缝是沥青路面的典型病害之一, 尽管长期以来, 国内外从沥青材料的选择及混合料配比设

收稿日期: 2017-03-07; 录用日期: 2017-05-12; 网络出版时间: 2017-06-01 18:34

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170601.009>

基金项目: 国家自然科学基金(51568054); 道路结构与材料交通行业重点实验室(北京)开放基金课题

通讯作者: 崔亚楠, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为道路工程材料 E-mail: yanancui@aliyun.com

引用格式: 崔亚楠, 赵琳, 孙广宁. 两种沥青胶浆的疲劳及自愈合性能试验[J]. 复合材料学报, 2018, 35(3): 699-705.

CUI Ya'nan, ZHAO Lin, Sun Guangning. Experimental study on fatigue and self-healing performance of two kinds of asphalt mortar[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(3): 699-705 (in Chinese).

计方面提出一些措施,但沥青路面的开裂问题仍然无法解决。有研究表明沥青以及沥青混凝土具有一定自愈合能力,传统的疲劳研究没有考虑到沥青的自愈合性能,从而低估了沥青材料的抗疲劳性能^[1-3]。因此理解和量化沥青及沥青混合料的自愈合性能对合理估计沥青路面的寿命有重要意义。

单丽岩等^[4]提出了4种评价沥青疲劳性能的指标,研究了沥青的自愈能力,表明沥青的自愈性对沥青的疲劳特性有重要影响。荷载停止作用初期,沥青模量的恢复程度较大。当时间足够长时,沥青的模量可以恢复到初始模量,但黏弹比例发生了变化。聂现会等^[5]通过CT扫描和流动试验对沥青胶浆结合料自愈行为进行深入研究,提出了沥青愈合率的指标。姜皖^[6]利用动态剪切流变仪(DSR)对三种沥青胶浆进行疲劳-自愈-再疲劳试验,用能量法解释和预估了沥青自愈合行为,指出老化沥青胶浆较基质沥青胶浆差很多。Qiu^[7-8]采用DSR对单层沥青试样和双层沥青试样进行愈合试验,分析了几何特性对复数剪切模量的影响,双层试样中发现沥青愈合分为两个阶段:初始愈合阶段和时间依赖愈合阶段。文献[9]对沥青砂浆进行小梁弯曲试验,计算其愈合活化能,认为毛细流动是愈合主要原因,用Arrhenius方程预测不同温度下沥青砂浆的愈合时间。沥青胶浆在沥青混合料中起粘结和填充作用,对沥青混合料的自愈性能有显著影响,国内外对沥青胶浆疲劳性能及自愈合研究较少,基于此,本文利用DSR对基质沥青胶浆和苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)沥青胶浆进行疲劳测试及疲劳-自愈-再疲劳试验,考虑自愈合补偿的疲劳性能,并进行微观结构观测。

1 实验材料与方法

1.1 原材料

本试验采用70号基质沥青、掺量为4.5%的苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)改性沥青,沥青材料基本指标列于表1中;矿粉采用石灰石矿粉,表观密度为2.641 g·cm⁻³,亲水系数为0.8,粒径≤0.075 mm,外观无结团现象。利用高剪切乳化机制成粉胶比(矿粉与沥青质量比)为0.5、1、1.5的基质沥青胶浆和SBS改性沥青胶浆。

参考姜皖^[6]的制样方法,具体操作步骤为:(1)确定所需的沥青胶浆的总量,本试验每种沥青

胶浆需要1 000 g;(2)根据不同的粉胶比,称量出每种沥青和矿粉的质量;(3)把准备好的沥青倒入金属容器中,待温度升高至160℃左右时,将矿粉缓缓加入盛有沥青的金属容器里,用垫有石棉网的电炉防止沥青受热不均匀而使局部温度过高,造成沥青老化,边加热边用专用工具玻璃棒搅拌。此时,高剪切乳化机所配备的剪切转子的速度控制在1 500 r/min左右,与此同时,沥青温度保持在160~170℃范围内;(4)直到矿粉全部加入,搅拌时间控制在5 min左右,不宜太长(防止沥青的老化)也不宜太短(以免搅拌不均匀);(5)继续搅拌3 min左右,确认沥青与矿粉充分混合均匀,至此沥青胶浆试样制备完成。

表 1 沥青材料基本指标
Table 1 Basic indicators of asphalt

Technical index	Matrix asphalt	SBS modified asphalt
Penetration value (25℃, 5 s, 100 g)/0.1 mm	76.3	65
PI	-0.4535	-0.2
Soften point/℃	48.9	62
Ductility at 10℃ (5 cm·min ⁻¹)/cm	45.1	—
Ductility at 5℃ (5 cm·min ⁻¹)/cm	—	33
Flash point(COC)/℃	346	269

1.2 试验方法

1.2.1 疲劳测试

相关研究成果显示^[6],处于中温阶段(10~30℃)沥青的抗疲劳性能开始展现出来,采用DSR在试验温度为25℃及10 Hz(相当于时速60 km/h)的频率下,对三种不同粉胶比的基质沥青胶浆和SBS改性沥青胶浆施加0.2 MPa应力的交变正弦荷载,使用8 mm平行板,间隙为2 mm进行时间扫描试验。

1.2.2 原子力显微镜(AFM)微观结构观测

AFM是利用原子、分子间的相互作用力来观测物体表面微观形貌的一种技术^[10]。本试验采用本原公司CSPM4000扫描探针显微镜,成像模式为轻敲式。制样过程如下:将沥青胶浆加热至液态;将少量沥青胶浆滴在干净的载玻片上并置于烘箱内约10 min,使沥青胶浆散成直径1 cm左右的圆膜;取出样品,冷却后对沥青胶浆样品进行AFM观测。

1.2.3 疲劳-愈合-再疲劳测试

疲劳-愈合-再疲劳过程可以用来研究沥青胶浆的自愈合^[11]。试验条件与疲劳测试一致, 采用 DSR, 在应力控制(0.2 MPa)模式下使用 8 mm 平行板, 间隙为 2 mm 进行测试。当试样破坏到一定程度, 即复数剪切模量 G^* 达到初始模量 G_0^* 的 60%, 也就是损伤了 40% 时剪切停止, 进入恢复阶段, 愈合温度为 25℃, 间歇期设为 0.5 h、1 h 和 2 h, 然后剪切继续, 直至试样破坏, 整个试验分为: 疲劳-愈合-再疲劳 3 个阶段, 如图 1 所示。

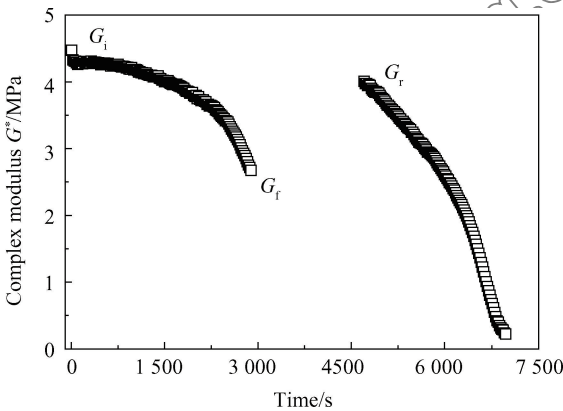


图 1 沥青胶浆疲劳-愈合-再疲劳过程中复数模量 G^* 变化情况
Fig. 1 Change of complex modulus G^* of asphalt mortar during fatigue-healing-fatigue

2 结果讨论

2.1 沥青胶浆疲劳性能

孙艳娜等^[12]建议采用模量衰减到初始值的 50% 时来评价沥青结合料的疲劳性能, 此时疲劳点出现, 作用时间即为疲劳寿命。基质沥青胶浆和 SBS 改性沥青胶浆疲劳测试结果如图 2 所示, 图中 G^* 只取到初始模量的 50%。

可以看出, 无论是基质沥青胶浆还是 SBS 改性沥青胶浆, 在时间扫描(重复剪切疲劳试验)中, 复数剪切模量 G^* 逐渐降低, 初始阶段, G^* 下降幅度较大, 这被认为是沥青触变性引起^[13], 也可能是由于荷载作用下分子发生变形及热效应引起^[14]。随着粉胶比的增大, G^* 逐渐增大, 由于粉胶比增大, 矿粉与沥青界面之间黏附性增强, 在矿料表面形成具有高黏力和稳定的结构沥青, 增加了沥青胶浆的抗变形能力, 同时, 矿料颗粒可以起到阻断裂纹发展的作用^[15-17]。将两种沥青胶浆的疲劳寿命值汇总后列于表 2。可见, SBS 改性沥青胶浆的疲劳寿命远大于基质沥青胶浆, 表明 SBS 沥青胶浆的疲劳

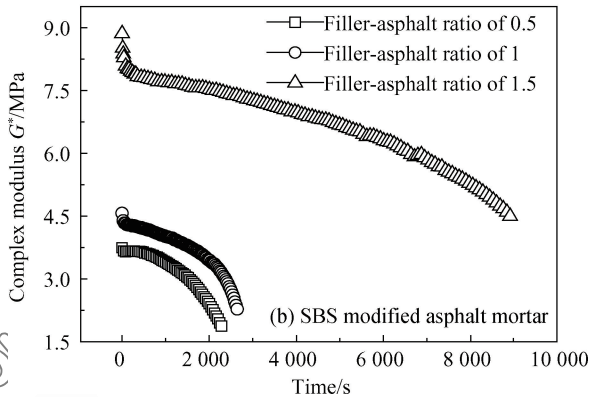
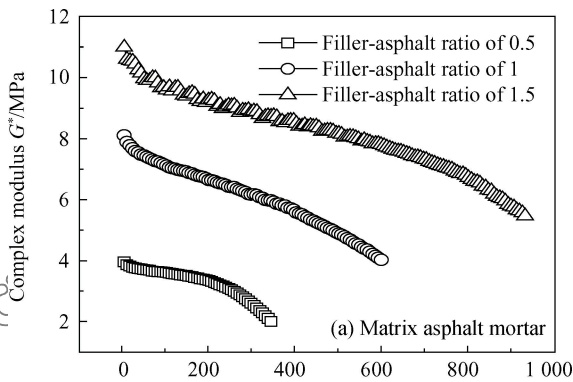


图 2 沥青胶浆复数剪切模量与时间的关系
Fig. 2 Relationship between complex shear modulus and time of asphalt mortar

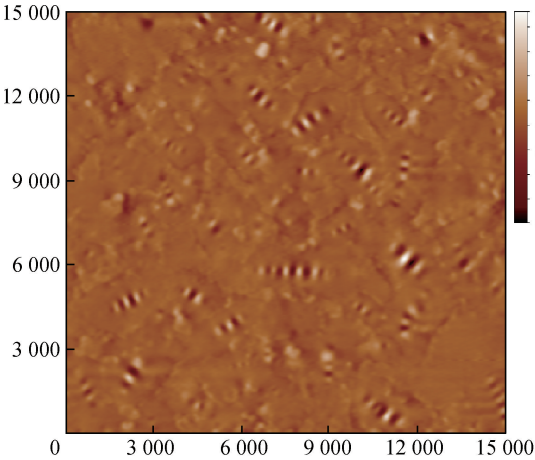
表 2 沥青胶浆疲劳寿命
Table 2 Fatigue life of asphalt mortar

Type of asphalt mortar	Filler-asphalt ratio	Fatigue life/s
Matrix asphalt mortar	0.5	345.92
	1.0	600.01
	1.5	933.67
SBS modified asphalt mortar	0.5	2286.27
	1.0	2660.10
	1.5	8949.23

性能好于基质沥青胶浆, 这是由于 SBS 改性剂作为苯乙烯与丁二烯的嵌段共聚物, 在高强的硬段和高弹的软段共同作用下, 改变了沥青的变形和恢复特性, 改性剂的加入使沥青胶浆抵抗各种损伤的能力增强, 包括抗疲劳能力。从决定高分子聚合物疲劳性能的因素来看, 高分子材料会在承受相同方向的外力作用时出现分子取向现象, 就是高分子链段平行地向同一方向排列的现象, 这种取向使高分子在各个方向呈现出各向异性性质, 力学性能得到加强, 有助于提高材料抵抗疲劳的能力^[18]。

2.2 沥青胶浆结构形貌

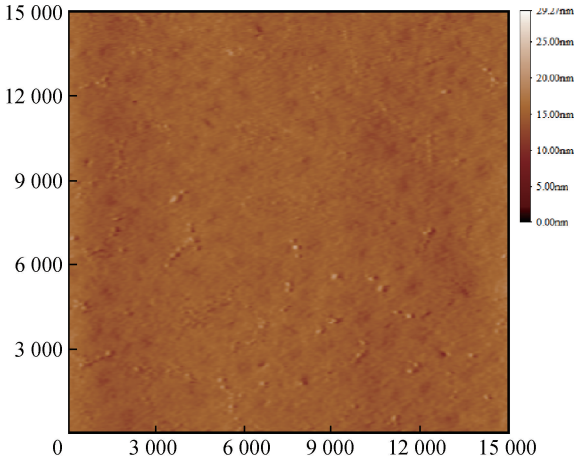
不同粉胶比的两种沥青胶浆 AFM 观测结果如



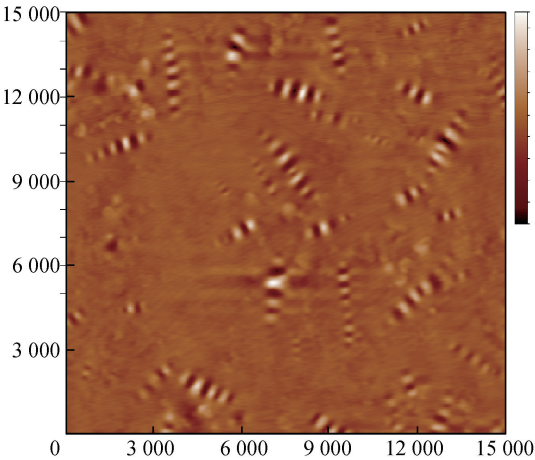
(a) Matrix asphalt mortar with filler-asphalt ratio of 0.5

图 3 所示。

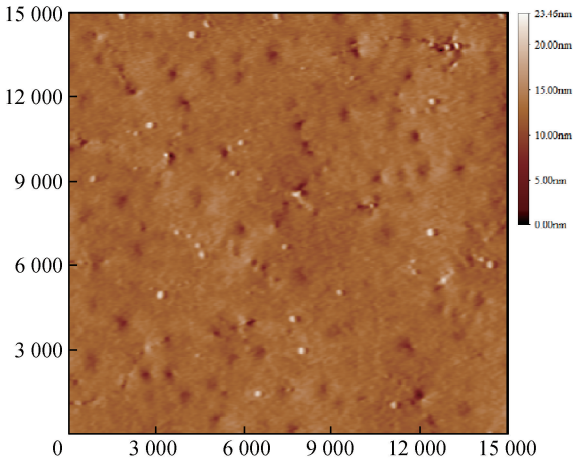
由于矿粉包覆在沥青层间，没有暴露在样品表



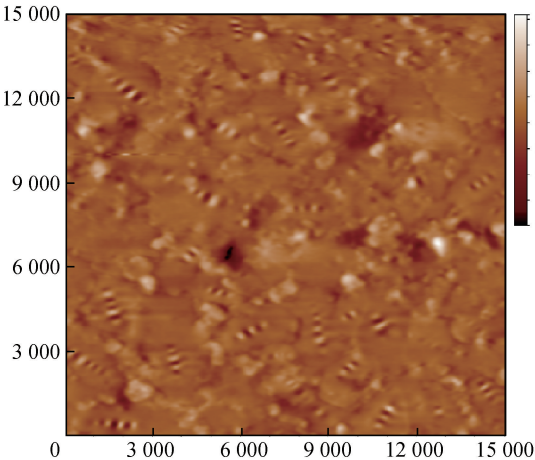
(b) SBS modified asphalt mortar with filler-asphalt ratio of 0.5



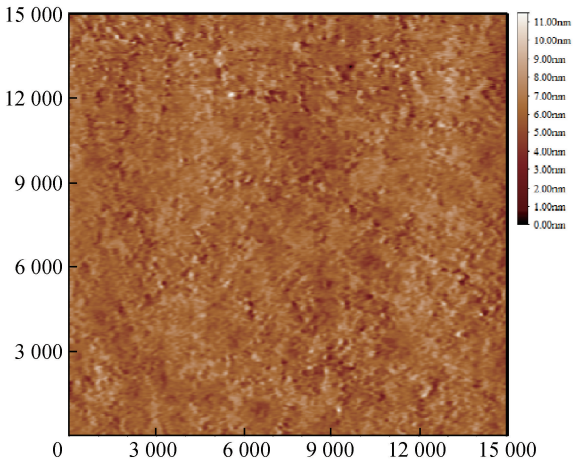
(c) Matrix asphalt mortar with filler-asphalt ratio of 1



(d) SBS modified asphalt mortar with filler-asphalt ratio of 1



(e) Matrix asphalt mortar with filler-asphalt ratio of 1.5



(f) SBS modified asphalt mortar with filler-asphalt ratio of 1.5

图 3 沥青胶浆 AFM 二维图

Fig. 3 Two-dimensional images of AFM of asphalt mortar

面, 显微镜探针探测不到, 某些情况下, 表面附近的填料粒子会检测为亮斑现象。从图 3 可以看出, 基质沥青胶浆出现明显的蜂状结构, 是由于沥青质聚成高度较高的白色区域, 长链烷烃的烷基侧链尾部一些极性大、空间阻位小的硫化物、稠环芳烃穿插在沥青质分子层间或大沥青质分子卷曲空白处, 形成峰状沉陷区, 阻止沥青质的堆积^[19]。这类长链分子的扩散可以为沥青胶浆的自愈提供物质传输通道, 随着极性组分缓慢的扩散完成后, 沥青裂缝将完全自愈^[20]。由图 3(a)、图 3(c)和图 3(e)发现, 随着粉胶比的增加, 基质沥青胶浆变得更加粗糙(粗糙度如表 3 所示), 且蜂形数量增加, 由于矿粉比例增加, 使颗粒表面积增大, 有利于吸附更多的沥青质, 矿粉和沥青界面内聚力作用增强, 这就提高了沥青胶浆的抗疲劳性能。由图 3(b)、图 3(d)和图 3(f)可以发现, SBS 改性沥青胶浆没有出现蜂形结构, 随着粉胶比的增加, 表面同样变的粗糙, 因为矿粉之间由于表面吸附作用聚集成团, 加之沥青胶浆稠度变大, 矿粉不易分散到沥青中^[16], SBS 改性剂与沥青相容性好, 选择性地吸收沥青中的油分, 外层吸附胶质, 沥青质存在于网孔中心, 只是少量聚集, 所以没有出现蜂状结构^[21], 这种结构的形成大大增强分子间的内聚力, 因而也提高了沥青的弹性和抗疲劳性能。

表 3 沥青胶浆粗糙度
Table 3 Roughness of asphalt mortar

Type of asphalt mortar	Filler-asphalt ratio	Average roughness/nm
Matrix asphalt mortar	0.5	2.67
	1.0	3.27
	1.5	3.85
SBS modified asphalt mortar	0.5	0.627
	1.0	0.772
	1.5	1.200

2.3 沥青胶浆疲劳-愈合-再疲劳性能

2.3.1 不同间歇期下沥青胶浆的自愈合

为了直观评价愈合时间和沥青胶浆种类对自愈合效果的影响, 本研究采用愈合指数 $I_H = \frac{G_r - G_i}{G_i - G_f}$ 作为评价指标, 其中, G_i 表示初始模量, G_f 和 G_r 分别为愈合之前和愈合之后的复数模量。粉胶比为 0.5 时, 两种沥青胶浆复数模量随加载时间和间歇期变化情况如图 4 所示。

根据上述计算方法, 将不同愈合时间下的基质和 SBS 改性沥青胶浆的愈合指数列于表 4。可以看

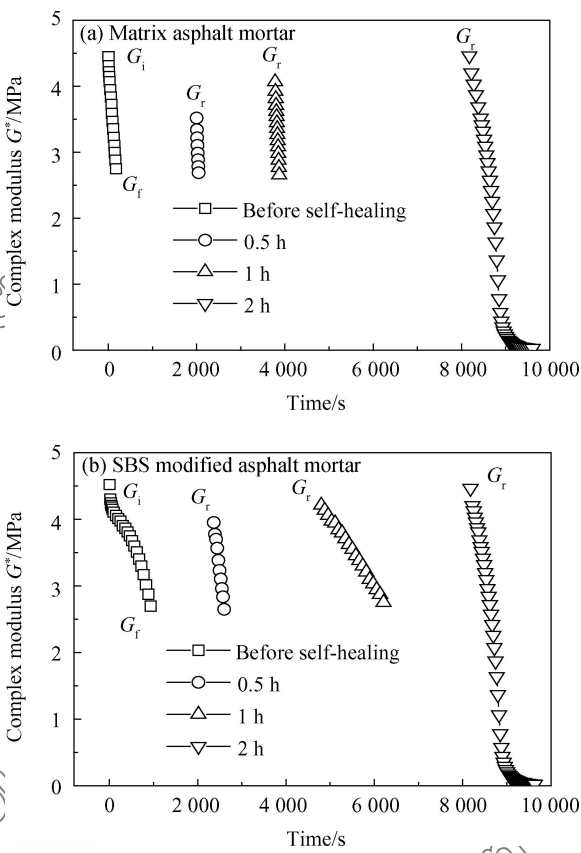


图 4 不同间歇期下沥青胶浆自愈合复数模量随时间的变化
Fig. 4 Complex modulus self-healing of asphalt mortar with time under different intermittent periods

表 4 沥青胶浆愈合指数
Table 4 Healing index of asphalt mortar

Type of asphalt mortar	Healing time/h	Healing index
Matrix asphalt mortar	0.5	0.496
	1.0	0.702
	2.0	0.857
SBS modified asphalt mortar	0.5	0.699
	1.0	0.830
	2.0	0.968

出, 两种沥青胶浆的愈合能力均随时间的增加而提高, 基质沥青胶浆自愈能力小于 SBS 改性沥青胶浆。沥青胶浆疲劳过程中产生了大量的微裂纹, 当裂纹扩散到一定程度, 愈合需要较长时间, 因此较长的间歇期对沥青胶浆的自愈合起促进作用^[22], 间歇期从 0.5 h 增加到 1 h, 基质沥青胶浆愈合指数增加了 41.5%, SBS 改性沥青胶浆增加了 18.7%, 由 1 h 增加到 2 h, 基质和 SBS 改性沥青胶浆愈合指数分别增加 22.0% 和 16.6%, 两种沥青胶浆的愈合均是间歇前期作用显著, 间歇后期沥

青胶浆自愈合效果与前期相比趋于平缓,这是由于沥青胶浆表现黏弹性,当剪切停止后,沥青的储存模量初始恢复速度很快,随时间增加,恢复速度逐渐降低,同时受到沥青触变性的影响,沥青胶浆黏度及模量在荷载作用下逐渐降低,荷载停止后,又完全恢复^[13]。在同一间歇期下,SBS 改性沥青胶浆愈合指数高于基质沥青胶浆,愈合指数增长的速度小于基质沥青胶浆,这说明 SBS 改性沥青胶浆自愈合能力强,而愈合效率低,由于 SBS 聚合物吸收基质沥青轻质油,并发生溶胀,形成空间三维网络结构,提高沥青黏弹特性,间歇一段时间后,复数模量可以恢复到很大,具有很好的愈合能力^[22]。同时,对于不同种类的沥青材料,黏度大的沥青材料流动性相对较差,SBS 聚合物的加入使沥青中的一部分轻质组分被吸收,从而沥青质相对含量升高,表现为表面能极性组分大大升高,抑制了沥青分子的运动,会对沥青的自愈产生不利影响,因此在相同的时间内,SBS 改性沥青胶浆完成的愈合效率要低。

2.3.2 不同粉胶比下沥青胶浆的自愈合

以基质沥青胶浆为例,三种不同粉胶比对沥青胶浆自愈合效果的影响如图 5 所示,愈合指数计算结果见表 5。

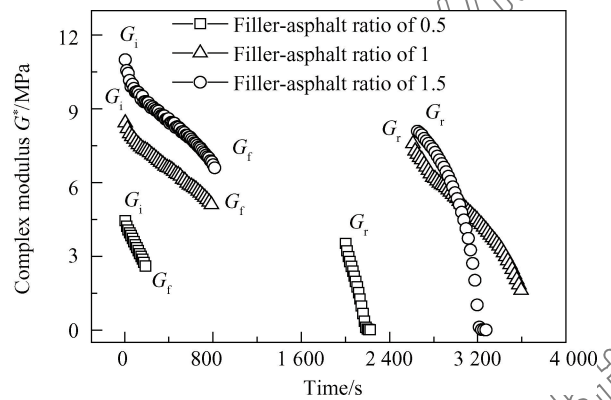


图 5 不同粉胶比下基质沥青胶浆自愈合复数模量随时间的变化
Fig. 5 Complex modulus of self-healing of matrix asphalt mortar with time under different filler-asphalt ratios

表 5 不同粉胶比下基质沥青胶浆愈合指数
Table 5 Healing index of matrix asphalt mortar under different filler-asphalt ratios

G_i /MPa	G_f /MPa	G_r /MPa	Healing index I_H
4.45	2.61	3.52	0.496
8.43	5.05	7.58	0.627
11.00	6.60	8.09	0.339

Notes: G_i —Initial modulus; G_f —Complex modulus before healing; G_r —Complex modulus after healing.

由表 5 可见,粉胶比为 1 时,愈合指数最大,过大或过小的粉胶比都会降低沥青胶浆的自愈合性能。由于过大的粉胶比会造成相位角过小,黏性成分比例减少,从而导致沥青流动性和黏附性不足,相对来说,填料-沥青界面的自愈合是比较困难的,而过小的粉胶比形成的结构沥青黏度小,自由沥青过多,这应该是有利于自愈合的,但是矿粉含量太少,与沥青接触比表面积较小,没有形成完全的胶浆体系,导致沥青胶浆刚度不足,本身抗疲劳性能差,自愈合后,复数模量仍然很小,所以愈合指数降低。

3 结 论

(1) 动态剪切流变仪(DSR)时间扫描测试结果表明,SBS 改性沥青胶浆较基质沥青胶浆具有更好的疲劳性能,且两者疲劳性能均随粉胶比的增加而提高。

(2) 原子力显微镜(AFM)观测表明,仅基质沥青胶浆出现蜂状结构,数量随粉胶比成正比,两种沥青胶浆表面粗糙度均随粉胶比增加而变大,从微观角度再次印证增大粉胶比有助于提高沥青胶浆的疲劳性能。

(3) 疲劳-愈合-再疲劳测试结果表明,SBS 改性沥青胶浆自愈合能力更好,但愈合效率低,两种沥青胶浆的间歇期越长,自愈合效果越好,过大或者过小的粉胶比都会降低沥青胶浆的自愈合性能。因此建议路面材料使用合理粉胶比下的改性沥青胶浆,并在适当时候控制交通量,使路面使用有一定的间歇期。

参考文献:

[1] 孙大权,张立文,梁果. 沥青混凝土疲劳损伤自愈合行为研究进展(1):自愈合行为机理与表征方法[J]. 石油沥青, 2011, 25(5): 7-11.
SUN D Q, ZHANG L W, LIANG G. Review on self-healing behavior of asphalt concrete (1): Mechanism and characterization methods of self-healing behavior[J]. Etroleum Asphalt, 2011, 25(5): 7-11 (in Chinese).
[2] SUN D, LIN T, ZHU X, 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.
[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 C. Study on the features and influencing factors of self-

- healing characteristic of asphalt [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013 (in Chinese).
- [4] 单丽岩, 谭忆秋. 考虑触变性的沥青疲劳过程分析[J]. 中国公路学报, 2012, 25(4): 10-15.
- SHAN L Y, TAN Y Q. Analysis of fatigue process of asphalt considering thixotropy[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(4): 10-15 (in Chinese).
- [5] 聂现会, 钱国平, 杨博, 等. 基于CT和流动试验的沥青胶浆裂缝自愈性能研究[J]. 中外公路, 2013, 33(2): 247-250.
- NIE X H, QIAN G P, YANG B, et al. Self-healing of open cracks in asphalt mastic, the science and technology of fuel and energy [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2013, 33(2): 247-250 (in Chinese).
- [6] 姜皖. 沥青胶浆自愈合能力研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- JIANG W. Research on the self-healing capacity of bitumen mastics[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011 (in Chinese).
- [7] QIU J, VEN M F C V D, WU S P, et al. Investigating self healing behaviour of pure bitumen using Dynamic Shear Rheometer[J]. Fuel, 2011, 90(8): 2710-2720.
- [8] QIU J, VEN M V D, MOLENAAR A. Crack-healing investigation in bituminous materials[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(7): 864-870.
- [9] GARCÍA Á. Self-healing of open cracks in asphalt mastic [J]. Fuel, 2012, 93: 264-272.
- [10] GASKIN J. On bitumen microstructure and the effects of crack healing[D]. Nottingham: University of Nottingham, 2013.
- [11] SUN D, LIN T, ZHU X, 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.
- [12] 孙艳娜, 李立寒, 汪于凯. 沥青疲劳性能评价指标[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(6): 1102-1107.
- SUN Y N, LI L H, WANG Y K. Evaluation parameter research of asphalt binder fatigue[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(6): 1102-1107 (in Chinese).
- [13] 单丽岩. 基于粘弹特性的沥青疲劳流变机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- SHAN L Y. Fatigue and rheology mechanism of asphalt binder based on viscoelastic characteristic[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010 (in Chinese).
- [14] 刘全涛. 沥青胶浆的疲劳性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- LIU Q T. Evaluation of the fatigue properties bituminous binders[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008 (in Chinese).
- [15] 王树杰, 郝冠军. 粉胶比对沥青胶浆流变性能的影响[J]. 公路, 2015(6): 15-18.
- WANG S J, HAO G J. Effect of powder binder ratio on the rheological properties of asphalt mortar[J]. Highway, 2015 (6): 15-18 (in Chinese).
- [16] 邵显智, 谭忆秋, 邵敏华. 沥青胶浆微观界面的研究[J]. 公路, 2003(12): 106-108.
- SHAO X Z, TAN Y Q, SHAO M H. Research on micro-structure of asphalt mortar[J]. Highway, 2003(12): 106-108 (in Chinese).
- [17] 孙大权, 刘富良, 林添坂, 等. 沥青胶浆疲劳寿命分析方法与预估方程[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(1): 100-104.
- SUN D Q, LIU F L, LIN T B, et al. Fatigue life evaluation method and prediction equation for asphalt mortar[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(1): 100-104 (in Chinese).
- [18] 曹贵, 刘永红, 马晓燕. SBS改性沥青疲劳特性影响因素分析[J]. 公路交通科技, 2014(1): 76-78.
- CAO G, LIU Y H, MA X Y. Analysis of influencing factors on fatigue characteristics of SBS modified asphalt[J]. Highway Traffic Science and Technology, 2014(1): 76-78 (in Chinese).
- [19] 王鹏, 董泽蛟, 谭忆秋. 基于分子模拟的沥青蜂状结构成因探究[J]. 中国公路学报, 2016, 29(3): 9-16.
- WANG P, DONG Z J, TAN Y Q. Research on the formation mechanism of bee-like structures in asphalt binders based on molecular simulations [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(3): 9-16 (in Chinese).
- [20] 龚明辉. 基于原子力显微镜的沥青微观自愈机理研究和定量分析[D]. 南京: 东南大学, 2014.
- GONG M H. Research on the micro-healing mechanism of asphalt with atomic force microscopy and quantitative analysis [D]. Nanjing: Southeast University, 2014 (in Chinese).
- [21] 王腾. 复合型胶粉改性沥青胶浆及混合料性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- WANG T. Research on performance of compound rubber modified asphalt mortar and mixture[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014 (in Chinese).
- [22] 周燕, 李佩林. 基于分子模拟技术的沥青自愈合性能研究[J]. 山西建筑, 2013, 39(6): 83-85.
- ZHOU Y, LI P L. Research on asphalt self-healing property based on molecular modeling technique[J]. Shanxi Architecture, 2013, 39(6): 83-85 (in Chinese).