

文章编号:1671-6833(2020)04-0012-05

不同损伤度和愈合温度条件下沥青胶浆自愈合行为研究

乐金朝, 张世兴, 乐明静, 李瑞霞

(郑州大学 水利科学与工程学院,河南 郑州 450001)

摘 要:为探讨不同损伤度和愈合温度条件下沥青胶浆自愈合行为变化规律,以基质沥青胶浆和岩沥青胶浆作为研究对象,利用动态剪切流变仪对不同疲劳试样施以 0.001% 小应变进行愈合监测,观测并分析间歇期内两种沥青胶浆在不同损伤度、不同愈合温度下自愈合行为的演变过程。结果表明:在中温阶段内,两种沥青胶浆在不同损伤度条件下的自愈合曲线均呈总体升高趋势,具体表现为“两段”型,即自愈合稳定前的增长发展型曲线和自愈合稳定后的稳定型曲线。在中温范围内提高愈合温度对沥青胶浆愈合速率的影响逐渐减弱。沥青胶浆的损伤度存在一定的阈值,当其疲劳损伤度小于阈值损伤度时,沥青胶浆可恢复至初始状态。其中在愈合温度为 25 ℃ 时,基质沥青胶浆和岩沥青胶浆的阈值损伤度分别为 50%、55%。岩沥青的掺入,增大了分子作用力,显著提升了沥青胶浆的黏聚性愈合强度与速率,但同时其分子流动性有所降低,从而减弱了初始阶段的黏附性愈合性能。

关键词:沥青胶浆;岩沥青;疲劳损伤;自愈合;愈合机理

中图分类号: TU535 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2019.04.007

0 引言

自愈合材料指其本身具有修复损伤能力的材料。沥青混合料的自愈合行为是指在荷载间歇期,沥青混合料中的微裂缝由于沥青分子的浸润、扩散等运动而自动愈合,性能逐渐恢复^[1]。而岩沥青是一种天然沥青,可以将它作为改性剂掺入到沥青混合料中,从而使其表现出优良的路用性能^[2]。现如今,疲劳开裂问题已是沥青路面在使用期间的主要损伤之一。因此,可以在道路工程中利用沥青材料的自愈合性能对沥青路面进行及时养护,从而有效延长路面的疲劳寿命。

关于沥青自愈合方面的研究首先是针对沥青胶结材料,由于沥青胶浆在沥青混合料中主要起黏结填充作用^[3],因此其对沥青混合料的性能具有重要影响。近些年来,部分学者已经开始对沥青胶浆的自愈性展开了研究。张宏等^[4]通过室内试验对沥青胶浆流变性能进行了研究,发现温度等因素对沥青胶浆流变性能具有较大影响;马晓燕等^[5]通过 LAS 试验对沥青胶浆的疲劳寿命进行了研究,发现随着填料体积分数的增加,沥青胶浆的疲劳寿命减

小;姜皖^[6]利用动态剪切流变仪对沥青胶浆进行疲劳-愈合-再疲劳试验,且采用能量法评价沥青胶浆的自愈合性能,发现老化后的沥青胶浆的自愈合性能较基质沥青胶浆相差很大;Shen 等^[7]借助 DSR 研究自愈合性能的影响因素,表明加载应力水平、沥青类型、愈合时间及愈合温度对自愈合能力影响明显;崔亚楠等^[8]通过疲劳-愈合-再疲劳试验指出 SBS 改性沥青胶浆较基质沥青胶浆自愈合性能更好,过大或过小的粉胶比对沥青胶浆的自愈合性能均会造成不良影响。上述的研究成果有效地推动了沥青胶浆自愈合行为的研究进展,但是这些研究大多集中于自愈合性能评价指标和影响因素,而没有深入分析沥青胶浆在间歇期自愈合行为的演变过程。考虑到沥青胶浆的自愈合行为是一个较为缓慢的过程,在间歇期的不同阶段内,由于受到沥青类型、愈合温度、损伤度等影响,自愈合性能呈现出不同的规律性^[9]。基于上述分析,笔者以两种沥青胶浆作为研究对象,在多种损伤度下开展疲劳-自愈合试验,并且在不同愈合温度条件下,观测其性能变化过程,从而期望更深入地了解沥青胶浆自愈合行为的演化规律。

收稿日期:2020-02-21;修订日期:2020-05-09
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51708513);河南省博士后科研项目启动经费(001802008)
通信作者:李瑞霞(1985—),女,河南开封人,郑州大学副教授,博士,主要从事道路工程材料研究,E-mail:
Lirui Xia031@163.com。

1 试验材料及方法

1.1 原材料

本试验采用 70 号基质沥青和掺量质量分数为 10% 的伊朗岩沥青改性沥青^[10],两者的基本技术指标如下:25 ℃ 的针入度分别为 65.3 (0.1 mm)、32.0 (0.1 mm);针入度指数分别为 -1.09、-0.64;5 ℃ 下延度分别为 42.5 cm、11.3 cm;软化点分别为 48.4 ℃、57.5 ℃。矿粉选用石灰岩矿粉。参考相关文献[11],利用高速剪切乳化机制备粉胶比为 1 的基质沥青胶浆和岩沥青胶浆。

1.2 试验方法

1.2.1 疲劳试验

采用动态剪切流变仪(DSR)开展沥青胶浆的疲劳试验。根据相关研究成果^[12],采用直径为 8 mm、间隙为 2 mm 的平行板,试验温度为 25 ℃,试验频率为 10 Hz,应变为 3%。根据式(1)计算沥青胶浆的损伤度 D ,

$$D = 1 - G_b / G_i, \quad (1)$$

式中: D 为损伤度,%; G_i 为初始复数模量,Pa; G_b 表示愈合前的复数模量,Pa。

1.2.2 愈合监测试验

当沥青胶浆达到设定损伤度后对其停止加载,通过调整试验温度,使沥青胶浆在不同温度下自动愈合^[9]。每 5~20 min 监测一次沥青胶浆的性能。为了减小对沥青试件性能的影响,监测时采用小应变(0.001%)^[13]。当试件的愈合指数等于 1,或愈合指数增长的速率小于 0.001/min 时终止试验。基质沥青胶浆与岩沥青胶浆均在 10 Hz、25 ℃ 下进行疲劳试验,愈合温度分别选取 15、20、25、30 ℃,在 4 种温度下均开展损伤度为 20% 的疲劳-自愈合试验。此外,在 25 ℃ 下还开展损伤度分别为 40%、50%、55%、60%、80% 的疲劳-自愈合试验。

2 试验结果与分析

2.1 愈合时间的影响

为了分析沥青胶浆的自愈合行为,笔者将采用式(2)作为愈合评价指标^[10]。

$$HI = \frac{G_a - G_b}{G_i - G_b}, \quad (2)$$

式中: HI 为愈合指数; G_i 为试验开始时的复数剪切模量,Pa; G_b 为自愈合行为发生前的复数剪切模量,Pa; G_a 为自愈合发生后的复数模量,Pa。

选取愈合温度 25 ℃,损伤度 20% 下基质沥

青胶浆和岩沥青胶浆的愈合监测曲线作为典型,以此来深入探寻在愈合时间增长条件下,荷载间歇期内沥青胶浆自愈合性能的变化规律,如图 1 所示。由图 1 可以看出,基质沥青胶浆和岩沥青胶浆的愈合指数均随着愈合时间的增加而增大,且愈合曲线形态均呈现“两段”型:自愈合稳定前的增长发展型曲线和自愈合稳定后的稳定型曲线。其中,增长发展型曲线为“半抛物线”形,随着间歇期的增加,曲线的斜率逐渐降低,并且可以发现自愈合行为早期速率远远大于愈合后期速率。产生这种现象的原因主要是随着沥青胶浆性能的恢复,损伤试件的性能已接近原始状态,从而导致愈合速率降低,沥青胶浆的自愈合行为减弱;另一方面,在沥青胶浆愈合的初期阶段,会受到触变性的影响^[16],此时复数剪切模量的恢复由自愈性和触变性两种作用共同叠加,因此愈合速率初期大于后期。自愈合稳定后的稳定型曲线几乎呈水平状,此时沥青胶浆达到了最大的愈合能力,其性能的恢复已经趋于稳定。此外,有个别沥青试件的愈合指数 HI 略大于 1,初步认为可能是由于沥青材料空间硬化造成的^[15]。

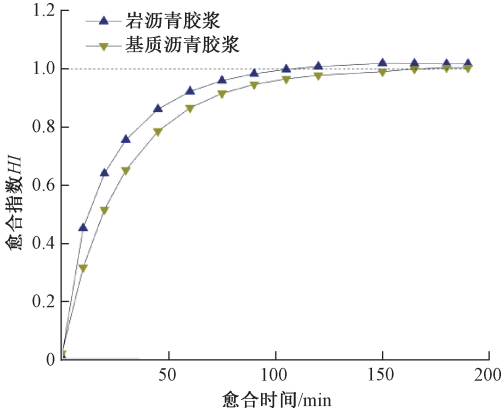


图 1 沥青胶浆典型愈合曲线

Figure 1 Typical self-healing curves of asphalt mortar

2.2 愈合温度的影响

绘制不同温度条件下损伤度为 20% 的两种不同沥青胶浆的自愈合变化曲线,如图 2 所示。

不同温度下两种沥青胶浆自愈合可以从图 2 曲线中直观看出。中温阶段基质沥青胶浆和岩沥青胶浆两种材料的愈合曲线均上升,表示中温阶段的温度对沥青胶浆的自愈合行为具有一定作用,但作用程度不同。处于中温范围内升高温度,能增大沥青胶浆的愈合速率,使沥青胶浆尽快达到愈合峰值,变为稳定。因此,在实际工程中,为充分利用沥青材料的自愈性,可以采用热诱导^[16]的方式来提高自愈合的速率。

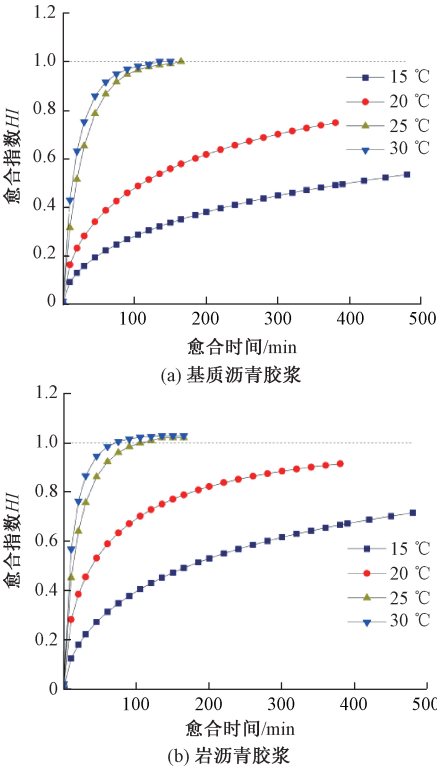


图 2 不同愈合温度下沥青胶浆愈合曲线
Figure 2 Self-healing curves of asphalt mortar under different temperature

通过进一步深入分析可以发现,在中温范围内,温度的逐渐升高对沥青胶浆自愈合性能的促进并不能够无限增长,而是越来越弱。两种沥青胶浆的愈合温度从 25 °C 增长到 30 °C,愈合曲线已经变得较为接近,达到愈合稳定的时间仅相差约 40 min。通过研究认为在中温范围内,温度对自愈速率具有重要影响,但对愈合指数最终稳定值的影响则微弱。在温度为 15 °C、20 °C 条件下,当试验结束时,基质沥青胶浆和岩沥青胶浆的自愈合曲线的斜率均大于 0,HI 分别为 0.534、0.748、0.715、0.914,若给予足够的间歇时间,愈合指数可能增长到 1。

2.3 损伤度的影响

图 3 给出了在愈合温度 25 °C 下不同损伤度两种沥青胶浆自愈合发展曲线。在不同损伤度下,两种沥青胶浆均表现出了自愈性,即便在高损伤度条件下,沥青胶浆依旧发生了自愈合行为^[17]。由于损伤度的增大,沥青胶浆中的微裂纹变长、变宽,沥青胶浆分子的毛细作用速率逐渐减小,分子扩散距离也随之变长,因此损伤度的增大降低了愈合速率。通过研究认为,损伤度的增加不仅会影响沥青胶浆的自愈合速率,而且会改变自愈合稳定状态。在图 3 中能够明显地看到愈合

温度为 25 °C 的基质沥青胶浆分别在不同损伤度 (20%、40%、50%) 条件下,仍能恢复到初始完整状态,而从 $D=55\%$ 开始,愈合指数明显低于 1 且已达到愈合稳定状态,表明其无法恢复到初始状态。同样试验现象在岩沥青胶浆试验结果中也可获得,但岩沥青胶浆则从 $D=60\%$ 开始,愈合指数上升不到 1。由以上分析可以看出,初始损伤程度增大,沥青胶浆的自愈合性能降低,其损伤度存在一定的阈值。当沥青胶浆的损伤度小于该阈值损伤度时,其仍然具有恢复至原始状态的愈合能力,经历一段间歇期,沥青胶浆可以完全恢复;但当沥青胶浆的损伤度大于该阈值损伤度时,沥青胶浆则无法恢复到原始状态,也即无论愈合时间的长短,愈合稳定后其愈合指数 HI 均小于 1。当温度为 25 °C 时,基质沥青胶浆的阈值损伤度为 50%,而岩沥青胶浆的阈值损伤度则略高于基质沥青胶浆,为 55%。

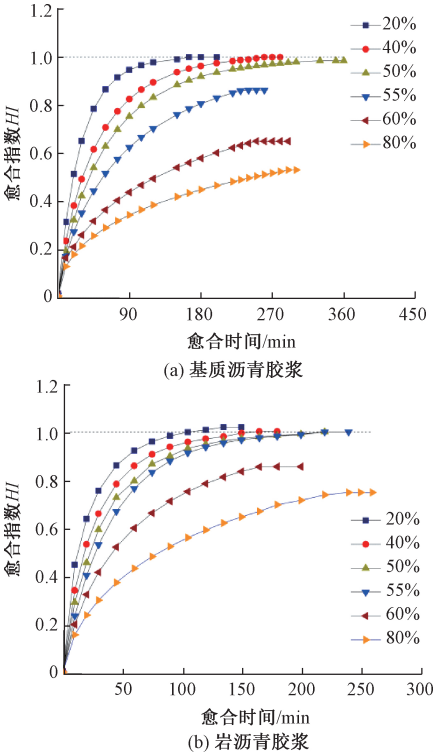


图 3 不同损伤度下沥青胶浆愈合曲线
Figure 3 Self-healing curves of asphalt mortar under different damage degrees

2.4 沥青类型的影响

岩沥青很大程度上改变了沥青的性能,为了深入探究沥青类型对沥青胶浆自愈合行为的影响,在 25 °C 下使沥青胶浆愈合,选取低于和高于阈值损伤度的典型愈合曲线进行研究,如图 4 所示。当小于阈值损伤度时,岩沥青的掺入,增大了愈合效率及速率,使沥青胶浆加速恢复到初始状

态;而大于阈值损伤度时,不仅提升了愈合速率和效率,而且提高了沥青胶浆的愈合能力,使胶浆能够恢复到接近疲劳前的状态。

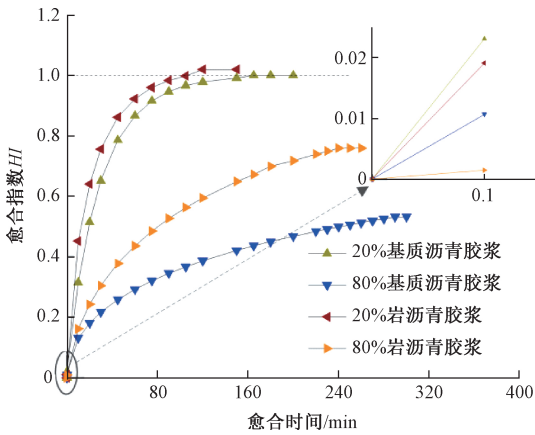


图 4 不同沥青胶浆愈合曲线

Figure 4 Self-healing curves of different asphalt mortar

为了探究沥青胶浆疲劳自愈合行为在岩沥青影响下的作用机理,使两种沥青胶浆在不同条件下愈合 0.1 min,所得结果见表 1。由表 1 和图 4 可得,愈合初始阶段岩沥青胶浆愈合指数较低,但其愈合曲线斜率较大,愈合指数增长速度较快,短时间后岩沥青胶浆的愈合指数将大于基质沥青胶浆的愈合指数。

表 1 不同条件下沥青胶浆愈合指数

Table 1 Healing index of asphalt mortar under different conditions

沥青胶浆类型	愈合温度/℃	损伤度	0.1 min 愈合指数/ 10^{-3}
基质沥青胶浆	15	0.20	9.4
	20	0.20	19.0
	25	0.20	23.1
	25	0.40	15.6
	25	0.50	14.1
	25	0.55	13.4
	25	0.60	12.2
	25	0.80	10.7
岩沥青胶浆	30	0.20	27.5
	15	0.20	6.8
	20	0.20	16.4
	25	0.20	19.1
	25	0.40	8.2
	25	0.50	4.5
	25	0.55	3.7
	25	0.60	2.0
	25	0.80	1.5
	30	0.20	22.8

沥青胶浆的自愈行为包含两部分:由毛细作

用引起的分子润湿黏附性愈合和由分子扩散引起的黏聚性愈合^[18],停止荷载后,在很短时间内润湿黏附性愈合便可完成,间歇期内主要进行分子黏聚性愈合。由表 1 和图 4 对比可得,岩沥青降低了沥青胶浆的分子润湿黏附性愈合能力,但同时增强了分子黏聚性愈合能力。由此可以推知,加入岩沥青会吸收沥青中的轻质组分,使其形成连续结构,此时胶浆分子流动性降低,分子间作用力增大,表现为沥青胶浆变硬^[19]。同时其毛细作用减弱体现在愈合过程中岩沥青胶浆润湿黏附性愈合能力降低。虽然岩沥青胶浆的分子流动性降低,导致扩散速率减慢,但是微裂缝宽度与分子间作用力有关,这也是黏聚性愈合强度的影响因素之一^[20],因此岩沥青掺入后,分子作用力提升,黏聚性愈合强度得到增强,愈合效率得到显著提升。综上所述,岩沥青的掺入,会显著增强沥青胶浆的愈合能力。

3 结论

(1)当愈合温度和损伤度相同时,随着愈合时间的延长,沥青胶浆的愈合形成“两段”型的曲线,即增长型曲线(呈“半抛物线”状)和稳定型曲线(呈“水平”状),且曲线总体呈增长趋势。

(2)随着愈合温度的提高,沥青胶浆在中温范围内的愈合速率随之增强,但温度对该愈合速率的促进作用则逐渐减小。

(3)沥青胶浆存在阈值损伤度。在疲劳损伤达到阈值损伤度之前,沥青胶浆能够通过自愈合恢复到原始状态;而一旦超过阈值损伤度,则难以恢复到原始状态。其中,在 25 ℃ 条件下,基质沥青胶浆的阈值损伤度为 50%,岩沥青胶浆的阈值损伤度为 55%。

(4)岩沥青降低了沥青胶浆的初期润湿黏附性愈合能力,但同时提高了分子黏聚性愈合能力,因此,整体上讲,岩沥青的掺入有利于增强沥青胶浆的愈合性能。

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.

[2] 孙大权,林添坂. 改性剂对沥青自愈合能力的影响[J]. 公路, 2015, 60(4): 224-228.

[3] TABATABAEE H A, VELASQUEZ R, BAHIA H U. Predicting low temperature physical hardening in asphalt binders [J]. Construction and building materials, 2012, 34: 162-169.

- [4] 张宏,刘新,乔志. 沥青胶浆粘度及流变特性的影响因素研究[J]. 材料导报,2019,33(14):2381-2385.
- [5] 马晓燕,陈华鑫,杨平文,等.基于改进 S-VECD 模型的沥青胶浆疲劳寿命预估[J].长安大学学报(自然科学版),2019,39(4):35-43.
- [6] 姜皖. 沥青胶浆自愈合能力研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2011.
- [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] 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.
- [9] 张世兴. 基于流变学的沥青胶浆自愈合行为研究[D]. 郑州:郑州大学,2019.
- [10] LI R, KARKI P, HAO P, et al. Rheological and low temperature properties of asphalt composites containing rock asphalts[J]. Construction and building materials, 2015,96: 47-54.
- [11] 李锐铎. 基于分数阶导数理论的沥青胶砂及混合料力学特性研究[D]. 郑州:郑州大学,2016.
- [12] 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.
- [13] MAZZONI G, STMILLI A, CARDONE F, et al. Fatigue, self-healing and thixotropy of bituminous mastics including aged modified bitumens and different filler contents [J]. Construction and building materials, 2017,131(30): 496-502.
- [14] MAZZONI G, STMILLI A, CARDONE F. Self-healing capability and thixotropy of bituminous mastics[J]. International journal of fatigue, 2016,92:8-17.
- [15] SANTAGATA E, BAGLIERI O, TSANILIS L, et al. Evaluation of self healing properties of bituminous binders taking into account steric hardening effects[J]. Construction and building materials, 2013,41: 60-67.
- [16] 何凡,唐进,刘全涛. 沥青砂浆的热诱导自愈合性能研究[J]. 武汉理工大学学报,2016,40(4): 701-704.
- [17] SHEN S H, LU X. Fracture healing properties of asphaltic material under controlled damage[J]. Journal of materials in civil engineering, 2014,26(2): 275-282.
- [18] WOOL R P, O'CONNOR K M. A theory crack healing in polymers[J]. Journal of applied physics, 1981,52(10):5953-5963.
- [19] 黄刚,何兆益,胡诚,等. 基于微观和流变分析的岩沥青改性沥青性能评价[J]. 东南大学学报,2010,40(2): 367-372.
- [20] SUN D Q, LIN T B, ZHU X Y, et al. Indices for self-healing performance assessments based on molecular dynamics simulation of asphalt binders[J]. Computational materials science, 2016,114: 86-93.

Study on Self-healing Behavior of Asphalt Mastic under Different Damage Degree and Healing Temperature

YUE Jinchao, ZHANG Shixing, YUE Mingjing, LI Ruixia

(School of Water Conservancy Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: This study aimed explore the evolution process of the self-healing behavior of asphalt mastics in different damage degrees and healing temperatures. The virgin asphalt mastic and rock asphalt mastic were used as the research objects. The Dynamic Shear Rheometer was used to examine the application of 0.001% small strain to different fatigue samples. The self-healing behavior of two asphalt mastics under different damage degrees and healing temperatures were observed during the healing period. The results showed that in the middle temperature stage, the self-healing curves of the two asphalt mastics under different damage degrees showed an overall growth trend, and the specific performance was a “two-stage” type, that was, a growth and development type before self-healing and a stable curve after self-healing. In the middle temperature stage, the effect of increasing the healing temperature on the healing rate of asphalt mastics become weaker and weaker. There was a certain threshold for the damage degree of asphalt mastic. When the fatigue damage degree was lower than the threshold damage degree, the asphalt mastic could be restored to the initial state. When the healing temperature was 25 ℃, the threshold damage degrees of virgin asphalt mastic and rock asphalt mastic were 50% and 55% respectively. The incorporation of rock asphalt increased the molecular force, and significantly improved the cohesive healing strength and rate of asphalt mastic, but at the same time its molecular fluidity was reduced, thereby weakening the initial stage of adhesive healing properties.

Key words: asphalt mastic; rock asphalt; fatigue damage; self-healing; self-healing mechanism