

基于正交试验基质沥青自愈合性能影响因素研究

邓 华, 黄 峰

(重庆市智翔铺道技术工程有限公司, 重庆市 401336)

摘 要: 沥青材料作为一种黏弹性物质, 具有自愈合性能。为研究影响 70# 基质沥青的显著性因素, 设计正交试验选取了间歇温度、间歇时间、损伤度三个因素并采用动态剪切流变仪进行“疲劳-愈合-疲劳”试验, 根据极差、方差得到各因素对自愈合性能指标的影响。结果表明: 影响自愈合性能指标 HI_1 的主要因素是间歇时间, 间歇温度和损伤度几乎无影响, 认为采用指标 HI_1 评价基质沥青的自愈合性能欠妥; 对影响自愈合性能指标 HI_2 的因素显著性排序为间歇温度 > 间歇时间 > 损伤度, 且随间歇温度的升高、间歇时间的延长将大幅提高沥青材料的自愈合程度; 自愈合指标 HI_3 考虑了加载次数与模量的联系, 从而对自愈合指标 HI_3 修正得到, 各因素对指标的显著性 HI_3 排序为损伤度 > 间歇温度 > 间歇时间, 且随着损伤度的增大, 自愈合程度逐渐降低, 体现自愈合性能良好的最优组合为间歇温度 30℃、间歇时间 4 h, 损伤度 10%。

关键词: 道路工程; 基质沥青; 动态模量; 自愈合性能

中图分类号: U444

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)09-0189-04

0 引 言

对于路面工程而言, 沥青混凝土长期服役过程中受外界耦合因素的作用导致微裂缝或局部破坏, 人们期望路面材料在损伤时也能复刻壁虎断尾自愈合的功能。最早提出沥青混合料能够自愈合的是 Bazin^[1], 其中沥青是使混合料产生自愈合能力的主要驱动力。此后, 国内外研究学者将研究广泛集中于沥青材料的自愈合机理、试验方法、评价指标、影响因素等方面。

Phillips 等^[2]从物理-化学特性的角度提出沥青材料自愈合的三个阶段。Lytton^[3]通过表面能理论阐述了极性键和非极性键对自愈合效果的影响, 并且提出相应的指标。随着计算机在材料微观领域的发展, 朱建勇^[4]从分子模拟技术入手, 采用溶解度参数为评价指标验证国外学者^[5-6]提出的沥青分子模型, 同时利用分子动力学模拟方法对 1 nm 裂纹沥青在不同温度下能量变化规律。结果表明, 温度越高, 其分子扩散速度越快, 从而沥青自愈合程度越高。

Pang 等^[7]通过剪切流变试验将不同间歇时间条件下测得的沥青愈合前、后损伤程度的比值作为评价指标分析了基质沥青和 SBS 改性沥青的自愈合能力。汤文等^[8]根据能量耗散原理建立了沥青疲劳寿命

N_f 与耗散能坪值 P_v 的关系, 同时分别以沥青损伤前后的 N_f 和 P_v 的变化率作为沥青材料自愈合指标。罗蓉等^[9]结合聚合物裂缝愈合理论和实验数据对通用的自愈合性能指标进行验证和修正, 并阐述了影响自愈合性能的因素为损伤度、间歇时间。程耀飞等^[10]从扩散理论出发, 提出沥青胶浆疲劳自愈合方程, 并设置不同温度、粉胶比、填料类型等多个因素验证了愈合度与时间 $t^{0.25}$ 的相关性。

上述研究沥青自愈合性能影响因素多是独立进行的, 因此本研究在前人研究基础上采取正交试验设计, 引入间歇时间、损伤度、间歇温度三个因素对沥青自愈合性能指标进行分析, 为预测沥青路面寿命和路面养护时机作出一定的指导意义。

1 原材料与试验方法

试验采用 SK70# 基质沥青, 置于 135℃ 烘箱中, 待其成流动状态时浇注于专用硅胶磨具中, 冷却后利用动态剪切流变仪进行试验。夹具为 8 mm 平行板, 间距 2 mm, 加载频率 10 Hz, 恒应变 6%, 设计三因素五水平正交试验, 见表 1。

2 结果与分析

用于评价沥青材料自愈合性能的指标尚未统一, 目前的主流是以沥青材料随加载次数变化测试自愈合前后复数模量。本试验采用 HI_1 , HI_2 , HI_3 为自愈合性能评价指标进行显著性因素分析。

收稿日期: 2021-01-22

作者简介: 邓华(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为道路材料。

表1 正交试验方案

水平	间歇温度 /℃	间歇时间 /h	损伤度 /%
1	20	0.5	10
2	25	1	30
3	30	2	50
4	35	4	70
5	40	8	90

2.1 自愈合评价指标 HI_1

HI_1 通常认为是沥青经过间歇时间自愈合后的初始动态剪切模量 G_{after}^* 与自愈合前初始模量 $G_{initial}^*$ 的比值^[11],表达式为:

$$HI_1 = \frac{G_{after}^*}{G_{initial}^*} \quad (1)$$

采用动态剪切流变仪测试三因素五水平下的复数模量,利用式(1)计算得到 HI_1 结果,见表2。

表2 HI_1 正交试验结果

间歇温度 /℃	间歇时间 /h	损伤度 /%	HI_1
20	0.5	10	0.97
20	1	30	0.93
20	2	50	0.93
20	4	70	0.97
20	8	90	0.79
25	0.5	30	0.93
25	1	50	0.83
25	2	70	0.83
25	4	90	0.81
25	8	10	1.07
30	0.5	50	0.79
30	1	70	0.91
30	2	90	0.96
30	4	10	1.19
30	8	30	0.83
35	0.5	70	0.88
35	1	90	0.92
35	2	10	0.62
35	4	30	1
35	8	50	0.98
40	0.5	90	0.92
40	1	10	0.95
40	2	30	0.92
40	4	50	0.97
40	8	70	0.84

通过上述试验结果及极差(见表3)分析,可以看出对于自愈合指标 HI_1 而言,影响因素较为显著的是间歇时间。结合 HI_1 的物理意义,不难解释间歇时间对其的影响。在试验过程中,经过加载的沥青会出现微裂纹,在分子扩散重组的过程导致微裂纹实现愈合,并且随着间歇时间一定的延长使 $G_{after}^*/G_{initial}^*$ 增

大,即愈合指数增大。当以 $\alpha=0.05$ 时, $F(4,12)=3.26$ 。从方差的分析结果来看,能够显著影响 HI_1 的只有间歇时间,忽略了剩余两个因素对指标 HI_1 的影响。结合聚合物自愈合机理可知,温度升高的过程会加速分子扩散、重组速度,从而使愈合几率增大,同时损伤度越小,愈合程度会有所增加。因此,指标 HI_1 用于评价沥青的自愈合性能存在一定的不足之处。

表3 极差与方差计算

水平	间歇温度 /℃	间歇时间 /h	损伤度 /%
1	0.92	0.90	0.96
2	0.89	0.91	0.92
3	0.94	0.85	0.90
4	0.88	0.99	0.89
5	0.92	0.90	0.88
极差	0.06	0.14	0.08
F 值	0.80	3.84	1.68

2.2 自愈合评价指标 HI_2

自愈合评价指标 HI_2 反映了当荷载停止时沥青材料在间歇前后模量损伤率的接近程度,其比值可用作自愈合性能的评价指标^[12],表达式为:

$$HI_2 = \frac{G_{after}^* - G_{before}^*}{G_{initial}^* - G_{before}^*} \quad (2)$$

式中: G_{after}^* 为愈合后初始动态模量,MPa; $G_{initial}^*$ 为愈合前初始动态模量,MPa; G_{before}^* 为愈合前终止动态模量,MPa。

采用 HI_2 作为评价指标的试验结果及方差、极差计算结果见表4、表5。将表中数据按照极差分析可以看出,对自愈合评价指标 HI_2 影响程度的因素排序为间歇温度>间歇时间>损伤度,但间歇温度和间歇时间的极差结果较为接近。利用方差进一步分析可知,在 $\alpha=0.05$, $F(4,12)=3.26$ 时,各因素 F 值均大于临界值 $F(4,12)$,且根据 F 值排序可认为对自愈合指标 HI_2 的影响程度为间歇温度>间歇时间>损伤度。

从表中数据得知,温度为 40℃ 时自愈合指标 HI_2 较 20℃ 时增加 66.7%,较 25℃ 时增加 49.2%。可认为随着间歇温度的升高,自愈合指标 HI_2 会逐渐增大,验证了沥青分子内部扩散重组速度会随温度的升高而加速,当温度超过 30℃ 时,增长速率趋于平缓。同时,间歇 8 h 的自愈合指标 HI_2 是间歇 0.5 h 的 1.47 倍,并且间歇时间超过 2 h 后,自愈合指标 HI_2 的变化幅度趋于平稳。这说明间歇时间的延长有助于沥青微裂缝的愈合。不同的损伤度所呈现的结果

表 4 HI_2 正交试验结果

间歇温度 /℃	间歇时间 /h	损伤度 /%	HI_2
20	0.5	10	0.47
20	1	30	0.39
20	2	50	0.53
20	4	70	0.71
20	8	90	0.75
25	0.5	30	0.40
25	1	50	0.52
25	2	70	0.64
25	4	90	0.50
25	8	10	0.98
30	0.5	50	0.70
30	1	70	0.66
30	2	90	0.91
30	4	10	1.00
30	8	30	0.97
35	0.5	70	0.71
35	1	90	0.82
35	2	10	1.00
35	4	30	1.00
35	8	50	0.94
40	0.5	90	0.76
40	1	10	1.00
40	2	30	1.00
40	4	50	0.91
40	8	70	0.86

表 5 极差与方差计算

水平	间歇温度 /℃	间歇时间 /h	损伤度 /%
1	0.57	0.61	0.89
2	0.61	0.68	0.75
3	0.85	0.82	0.72
4	0.89	0.82	0.72
5	0.91	0.90	0.75
极差	0.34	0.29	0.17
F 值	54.39	28.98	10.51

出现上下波动的情况，可能是由于在计算指标 HI_2 时，未考虑加载次数对结果的影响，但损伤度越小，沥青材料的自愈合程度越高。

2.3 自愈合评价指标 HI_3

通常将沥青自愈合前与自愈合后分别达到疲劳寿命时加载次数的比值作为自愈合指标 HI_3 ，表达式为：

$$HI_3 = \frac{N_{after}-N_{before}}{N_{before}} \tag{3}$$

式中： N_{after} 为沥青自愈合后至疲劳寿命所需荷载次数； N_{before} 为沥青自愈合前至疲劳寿命所需荷载次数。

但由于该指标在计算过程中忽略了模量的变化^[13-14]，对此采用修正指标 HI_3'' 来表征沥青材料自愈

合性能，表达式为：

$$HI_3'' = \left(\frac{G_{before}^*}{G_{initial}^*} \right) \frac{N_{after}-N_{before}}{N_{before}} \tag{4}$$

式中： $G_{initial}^*$ 为愈合前初始动态模量； $G_{terminal}^*$ 为愈合后的终止动态模量； N_{after} 为沥青自愈合后至疲劳寿命所需荷载次数； N_{before} 为沥青自愈合前至疲劳寿命所需荷载次数。

由表 6、表 7 可知，按照极差和方差的计算结果表明，损伤度显著影响自愈合指标 HI_3'' 的变化。当沥青材料损伤度由 10% 增加到 30%、90% 时，指标 HI_3'' 分别降低了 29.6%、58.3%。这说明随着沥青材料损伤度的提高，其自愈合性能逐渐降低。间歇温度对指标 HI_3'' 的影响与 HI_2 的趋势一致。而间歇时间的 5 个水平结果出现波峰现象，原因可能是疲劳加载次数导致沥青分子损伤程度出现差异。同时从表中数据可知，沥青材料自愈合指标 HI_3'' 的最优组合为间歇温度 40℃、间歇时间 4 h、损伤度 10%。

表 6 HI_3'' 正交试验结果

间歇温度 /℃	间歇时间 /h	损伤度 /%	HI_3''
20	0.5	10	0.61
20	1	30	0.41
20	2	50	0.33
20	4	70	0.52
20	8	90	0.34
25	0.5	30	0.60
25	1	50	0.28
25	2	70	0.40
25	4	90	0.52
25	8	10	0.92
30	0.5	50	0.35
30	1	70	0.51
30	2	90	0.42
30	4	10	1.60
30	8	30	0.61
35	0.5	70	0.32
35	1	90	0.23
35	2	10	1.08
35	4	30	0.97
35	8	50	1.03
40	0.5	90	0.74
40	1	10	1.17
40	2	30	1.21
40	4	50	0.96
40	8	70	0.94

另外，从理论上分析自愈合指标的值应小于等于 1，接近 1 表示自愈合性能良好，但因引入沥青材料达到疲劳寿命的加载次数导致其自愈合前的复数模量大幅降低，造成计算结果出现大于 1 的情况。

表 7 极差与方差计算

水平	间歇温度 /℃	间歇时间 /h	损伤度 /%
1	0.44	0.52	1.08
2	0.54	0.52	0.76
3	0.70	0.69	0.59
4	0.73	0.91	0.54
5	1.00	0.77	0.45
极差	0.56	0.39	0.63
方差 <i>F</i> 值	6.87	4.23	9.19

3 结 论

(1)通过设计正交试验对 SK70# 基质沥青自愈合性能进行疲劳 - 自愈试验的结果分析可知,能够显著影响自愈合指标 HI_1 的因素为间歇时间,但方差分析的结果表示间歇温度和损伤度对指标 HI_1 几乎无影响,从理论上认为采用指标 HI_1 评价沥青材料自愈合能力欠妥。

(2)自愈合指标 HI_2 通过计算沥青材料间歇前后模量的变化率进行表征,根据极差和方差的分析可知三个因素显著性影响的排序为间歇温度>间歇时间>损伤度,且间歇温度达到 30℃、间歇时间为 4 h 时能够显著改善自愈合性能。

(3)将间歇前后沥青材料模量作为修正系数引入自愈合指标 HI_3 得到指标 HI_3 进行正交试验。结果表明,所列三个因素都对沥青材料自愈合性能产生影响,其显著性排序为损伤度>间歇温度>间歇时间,且随着损伤度的增大,自愈合程度逐渐降低,体现自愈合性能良好的最优组合为歇温度 30℃、间歇时间 4 h,损伤度 10%。

参考文献:

[1] Bazin P,Saunier J B. Deformability,fatigue and healing properties

of asphalt mixes [C]//Proceedings of Asphalt Pavement,Ann Arbor,Michigan,USA,1967:438

[2] Phillips M C.Multi-step models for fatigue and healing,and binder properties involved inhealing [C]//Proceedings of Euro Bitumen Workshop on Performance Related Properties for Bituminous Binders,Luxembourg,1998.

[3] Lytton R.Characterizing asphalt pavement for performance[J].Transportation. Research Record Journal of the Transportation Research Board,2000,1723(1):5.

[4] 朱建勇.沥青胶结料自愈合行为的分子动力学模拟[J].建筑材料学报,2018,21(3):433-439.

[5] Bommavaram R R.Evaluation of healing in asphalt binders using dynamic shear rheometer and molecular modeling techniques [D].Texas: Texas A&M University,2008

[6] Bommavaram R R,Bhasin A,Little D N. Use of dynamic shear rheometer to determine the intrinsic healing properties of asphalt binders [C]//Transportation Research Board 88th Annual Meeting,2009.

[7] Pang L,Jiang H,Wu S,et al.Self healing capacity of asphalt binders [J].Journal of Wu han University of Technology-materials Science Edition,2012,27(4):794

[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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 向浩,张文武,刘鹏,等.基于 DSR 的再生沥青最佳愈合温度与愈合时间研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2019,38(10):56-60.

[12] 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.

[13] 陈柳晓,向浩,何兆益,等.基于 DSR 的沥青胶结料自愈合评价指标分析[J].建筑材料学报,2019,22(3):493-498.

[14] 单丽岩.基于粘弹特性的沥青疲劳一流变机理研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.

(上接第 188 页)

[3] 王丙涛,王丙涛,等.基于倾斜摄影技术的三维建模生产与质量分析[J].城市勘测,2015(5):80-82.

[4] 周小杰,胡振彪,乔新.无人机倾斜摄影技术在大比例尺地形图测绘中的应用[J].城市勘测,2019(1):63-66.

[5] 段宗恩,夏正清.西南弱纹理林区提高空中三角测量精度方法[J].测绘与空间地理信息,2018,41(2):216-218+223.

[6] 李永利,卢小平,侯岳.倾斜影像三维建模方法与应用[J].河南科技,2017(19):30-32.