

溶解性胶粉改性沥青混合料疲劳性能

黄卫东¹, 郑茂^{1,2}, 黄明³

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 四川省交通运输厅交通勘察设计研究院, 四川 成都 610000; 3. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: 应用四点弯曲疲劳试验机 BFA (beam fatigue apparatus) 对溶解性胶粉改性沥青混合料的疲劳性能进行研究, 并在相同空隙率下对溶解性胶粉改性沥青密级配沥青混合料(AC13)和苯乙烯-丁二烯-苯乙烯改性沥青密级配沥青混合料(SBS-AC13)完成了考虑自愈影响的疲劳性能比较, 进一步完成溶解性胶粉改性沥青与 SBS 复合改性沥青混合料 AC13 的疲劳性能和高温性能研究. 结果显示: 归一化劲度次数积疲劳寿命比 50% 初始模量降低疲劳寿命更适合用于评价溶解性胶粉改性沥青混合料的疲劳寿命; 总结溶解性胶粉改性沥青混合料的疲劳性能与应变、沥青用量和空隙率等三个因子的相关性, 提出溶解性胶粉改性沥青混合料的疲劳方程; 在 4% 的设计空隙率下, 无论是否考虑自愈的影响, SBS-AC13 的疲劳寿命均高于溶解性胶粉改性沥青 AC13, 但溶解性胶粉改性沥青 AC13 的自愈能力高于 SBS-AC13; 在 4% 的设计空隙率下, 无论是否考虑自愈的影响, 溶解性胶粉复合 SBS 改性沥青 AC13 的疲劳寿命均达到 SBS-AC13 疲劳寿命的 2 倍, 其自愈能力高于 SBS-AC13, 且高温性能亦远优于 SBS-AC13.

关键词: 溶解性胶粉改性沥青; 复合改性沥青; 疲劳性能; 四点弯曲小梁疲劳试验

中图分类号: U414

文献标志码: A

Fatigue Performance of Terminal Blend Rubberized Asphalt Mixture

HUANG Weidong¹, ZHENG Mao^{1,2}, HUANG Ming³

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Sichuan Communication Surveying & Design Institute, Chengdu 610000, China; 3. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: The fatigue performance of terminal blend rubberized asphalt mixture was researched by BFA which was selected to do four-point bending beam fatigue tests. The fatigue performance considering self-healing between Terminal Blend-AC13 and SBS-AC13 was compared which had

the same air voids. Further research was done on fatigue performance and high temperature performance of the compound modified asphalt mixture through mixing SBS into terminal blend rubberized asphalt. The results show that N_{NM} is more suitable than N_{f50} to be the fatigue damage standard for terminal blend asphalt mixtures. The correlation of terminal blend asphalt mixture's fatigue performance and three factors which are strain, asphalt content and air void ratio is researched. Terminal blend asphalt mixture AC13's fatigue equations is regressed. Regardless of whether the self-healing is considered, when the air voids of mixture is 4%, SBS-AC13 has longer fatigue life than TB-AC13, but TB-AC13 gets better self-healing capability. Regardless of whether the self-healing is considered, when the air voids of mixture is 4%, the fatigue life of TB+SBS-AC13 is twice as much as the fatigue life of SBS-AC13, and also TB+SBS-AC13 gets better self-healing capability than SBS-AC13. The high temperature performance of TB+SBS-AC13 can far exceed the SBS-AC13.

Key words: terminal blend rubberized asphalt mixture; compound modified asphalt; fatigue performance; four-point bending beam fatigue test

Terminal Blend(TB)胶粉改性沥青是近年在美国发展起来的一种新型改性沥青,其主要是由 30 目(0.6 mm)或者更细的胶粉颗粒改性,让胶粉在沥青中发生脱硫反应并可以较快地分解、融合,这些脱硫并存储稳定的橡胶粉改性沥青在美国被统称为 Terminal Blend 胶粉改性沥青. 这种胶粉改性沥青在国内还没有统一的名称,鉴于该类胶粉沥青在三氯乙烯中的溶解度可以达到 99% 以上,因此本文统一将其译为“溶解性胶粉改性沥青”,其胶粉掺量通常在外掺 5%~25% 之间^[1-2]. 由于对废旧橡胶的使用,其与传统橡胶沥青一样具有良好的社会和环保效应,更为重要的是其具有比传统橡胶沥青更为良好的储存稳定性,工程应用成本也比苯乙烯-丁二烯-苯乙烯(SBS)嵌段共聚

物改性沥青和传统橡胶沥青低。

美国加州大学伯克利分校的 University of California Pavement Research Center (UCPRC) 用 Heavy Vehicle Simulator (HVS) 所做的加速加载试验表明, 溶解性胶粉改性沥青有很好的抗反射裂缝能力^[3]。美国联邦公路管理局 (FHWA) 用

Accelerated Loading Facility (ALF) 加速加载试验对溶解性胶粉改性沥青的抗反射裂缝能力进行了评价, 其结果见图 1, 第 5 道的 Crumb Rubber-Terminal Blend (CR-TB) 表现要优于 SBS 等诸多种沥青混合料。

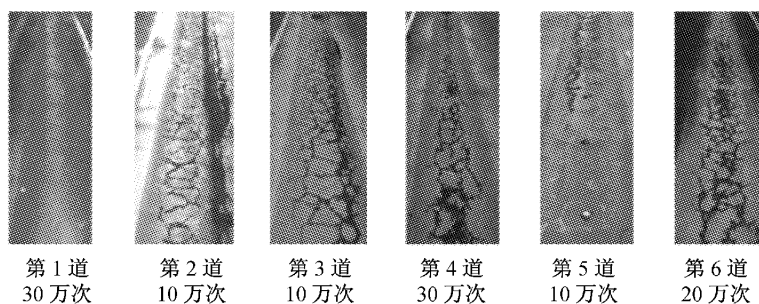


图 1 ALF 对溶解性胶粉改性沥青混合料 (CR-TB) 的评价结果^[4]

Fig. 1 Evaluation results of terminal blend rubberized asphalt concrete (CR-TB) by ALF

溶解性胶粉改性沥青在美国已获得了较为广泛的应用, 但除了上述两次影响较大的加速加载试验, 在美国针对该沥青及其混合料的室内试验研究还很少, 有关疲劳性能方面的室内试验研究更少。美国加州大学伯克利分校的 Tsai Bor-Wen 等人在进行溶解性胶粉改性沥青混合料的疲劳试验^[5]时, 采用 7.1% 的单一沥青用量; 内华达大学的 Elie Y. Hajj 等人在进行溶解性胶粉改性沥青混合料的疲劳试验^[6]时, 以控制空隙率的方式成型试件, 空隙率标准选定为 7%。可见, 在美国有限的针对溶解性胶粉改性沥青混合料疲劳性能的室内试验时, 沥青用量、空隙率等关键指标的选择均有局限性, 并不能全面反映溶解性胶粉改性沥青混合料的疲劳性能, 且混合料控制指标标准的选择合理性也有待商榷。另一方面, 在国内, 目前几乎没有针对溶解性胶粉改性沥青混合料疲劳性能的研究。

本文将对溶解性胶粉改性沥青混合料的疲劳性能进行全面研究, 并在 4% 的空隙率条件下与 SBS 沥青混合料的疲劳性能进行对比。同时, 从成本上看溶解性胶粉改性沥青较 SBS 改性沥青更低, 具有一定的复合改性空间。本文采用 SBS 改性剂与溶解性胶粉改性沥青进行复合改性后进一步探究其混合料性能, 希望能为拓展有关溶解性胶粉改性沥青的室内性能研究提供参考和依据。

1 试验材料和试验方法

1.1 沥青和改性剂

本次研究中采用埃索 70 号基质沥青进行改性剂改性, 研究中所用改性沥青种类及其改性方案见表 1。其中, 溶解性胶粉改性沥青的制备过程中, 一般是通过高温、氧化、活化或剪切等化学或物理手段, 使胶粉充分脱硫降解。本文所用溶解性胶粉改性沥青是经过高温高压制备的, 考虑到在试验室实现比较困难, 故统一采用厂拌成品沥青, 其产地为安徽。SBS 改性沥青的室内加工过程如下: 加入内掺 4.5% 质量分数的 SBS 改性剂以及 0.15% 质量分数的稳定剂, 在 180 °C 下用高速剪切机以 6 000~7 000 r·min⁻¹ 的转速剪切、研磨、挤压 30 min 后, 再搅拌 90 min, 最后在 160 °C 左右的恒温烘箱孕育 30 min。TB 加 SBS 复合改性沥青室内制备过程为: 向 TB 中加入内掺 3% 质量分数的 SBS 改性剂以及 0.15% 质量分数的稳定剂, 在 150 °C 下强力搅拌 1.5 h。各改性沥青的基本指标见表 2^[7]。

表 1 改性沥青的改性方案

Tab. 1 Modified ways of modified asphalts	
种类	改性方案
SBS 改性沥青	SBS 掺量 4.5%
TB	30 目 (0.6 mm) 胶粉掺量 20%
TB 加 SBS 复合改性沥青	30 目 (0.6 mm) 胶粉掺量 19.4%、SBS 掺量 3%

1.2 集料和级配

1.2.1 集料

本文整个混合料设计研究过程采用江苏溧阳产玄武岩, 浙江安吉产石灰岩, 填料为浙江安吉产石灰石矿粉。集料各项指标均能满足规范要求。

1.2.2 级配

试验所采用级配类型为密级配沥青混凝土混合料 AC13,各尺寸筛孔通过率均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)^[8]所提供级配范围,见表 3。

表 2 改性沥青的指标测试结果
Tab.2 Test results for modified asphalts

种类	针入度/ 0.1 mm	延度/cm			软化 点/℃	软化点 差/℃	135 ℃ 黏度/ (Pa·s)	163 ℃薄膜加热(5 h)					PG 分级
		15 ℃	10 ℃	5 ℃				质量 损失/ %	残留针 入度 比/%	15 ℃残 留延度/ cm	10 ℃残 留延度/ cm	5 ℃残 留延度/ cm	
SBS 改性沥青	55.0	—	—	41	87.7	1.6	2.33	0.14	72	—	—	17.0	70~22
TB	119.5	>150	96	30	50.5	0.2	0.83	0.14	65	62	22	0	58~28
TB 加 SBS 复 合改性沥青	82.8	—	—	59	72.6	1.1	2.27	0.12	83	—	—	38.4	70~28

表 3 试验所用级配

Tab.3 The gradation used in tests

筛孔尺寸/mm	通过率/%	规范要求/%
16.000	100	100
13.200	100	90~100
9.500	77	68~85
4.750	47	38~68
2.360	32	24~50
1.180	20	5~38
0.600	16	110~28
0.300	11	7~20
0.150	9	5~15
0.075	5	4~8

1.3 混合料初步设计

以 4%作为设计空隙率,在表 3 提供的级配下,试验确定三种沥青混合料的最佳沥青用量. 试验选用 0.5%作为间隔,在 3.5%,4.0%,4.5%,5.0%和 5.5%五个沥青用量下进行马歇尔击实试验. 混合料密度及空隙率测试结果见表 4, 其中毛体积相对密度采用马歇尔试件表干法测得,最大理论相对密度通过计算法测得^[7].

表 4 混合料空隙率结果

Tab.4 Voidage results of mixtures

沥青种类	沥青用量/%	毛体积 相对 密度	最大理 论相对 密度	空隙率/ %	选定的最 佳沥青用 量/%
SBS 改 性沥青	3.5	2.418	2.549	5.1	4.6
	4.0	2.432	2.544	4.4	
	4.5	2.435	2.539	4.1	
	5.0	2.442	2.535	3.7	
	5.5	2.441	2.530	3.5	
TB	3.5	2.412	2.549	5.4	4.7
	4.0	2.428	2.544	4.6	
	4.5	2.431	2.539	4.3	
	5.0	2.438	2.535	3.8	
	5.5	2.443	2.530	3.4	
TB 加 SBS 复合改性沥青	3.5	2.416	2.549	5.2	
	4.0	2.422	2.544	4.8	
	4.5	2.429	2.539	4.3	
	5.0	2.438	2.535	3.8	
	5.5	2.444	2.530	3.4	

1.4 试验方法和试验指标

1.4.1 试验方法

本文所有试验均采用 Beam Fatigue Apparatus (BFA)试验机,该机是澳大利亚 Industrial Process Control(IPC) Global 公司生产的四点弯曲疲劳试验机,使用 Universal Testing Machines(UTM)软件系统操作。

1.4.2 试验评价指标

50%初始劲度模量降低疲劳寿命(N_{50})为 Strategic Highway Research Program (SHRP)-A303 中推荐的疲劳试验的判断方法. 许多试验证实了疲劳破坏发生在 40%的初始模量降低处,据此,SHRP-A303 中推荐 50%的初始劲度模量减少作为疲劳试验的判断标准即疲劳寿命 N_{50} 法,形成了 American Association of State Highway and Transportation Officials(AASHTO) TP-8 标准。

归一化劲度次数积疲劳寿命(N_{NM})是美国 American Society for Testing Material (ASTM) D7460 中的方法,最先由 Rowe 和 Bouldin^[7]的研究提出. ASTM D7460 中,疲劳破坏点定义为归一化劲度次数积在荷载次数图中的峰值,初始劲度模量取第 50 次的劲度模量. 对归一化劲度次数积的获取如下:

归一化劲度次数积 (normalized modulus cycles, J_{NM})为

$$J_{NM} = \frac{S_i N_i}{S_0 N_0}$$

式中: J_{NM} 为归一化劲度次数积; N_i 为加载次数; S_i 为第 i 次加载时的劲度模量; S_0 为初始劲度模量,取第 50 次加载时的劲度模量; N_0 为初始次数,取 50 次。

当 J_{NM} 达到最大值时的 N 即为材料的疲劳破坏次数. 虽然公式中提出了初始劲度模量选取第 50 次的劲度模量,但针对每一次试验这是一个定值, J_{NM}

的最大值出现与 S_0 无关,故此时的 N 与 S_0 的取值无关。

2 TB-AC13 混合料疲劳性能研究

2.1 TB-AC13 疲劳试验数据

为全面性地进行 TB 沥青混合料的疲劳性能研究,本文选取沥青用量、空隙率和应变变量作为疲劳试验的变量指标,在该三种变量的变化条件下测定疲劳寿命^[9]。沥青用量选用 4.0%,5.5%和 7.0%,应变变量选用 $1\ 000 \times 10^{-6}$, $1\ 250 \times 10^{-6}$ 和 $1\ 500 \times 10^{-6}$,空隙率的变化通过调整轮碾次数实现。

疲劳试验的结束条件设定为达到初始模量的 10%时截止,同时记录 N_{f50} 和 N_{fNM} 疲劳次数。

同一条件下安排多次平行试验,去除误差大于 20%和意外破坏试件,保证最终获取误差最小的两个数据进行分析比较,根据既定全面试验,记录整个试验过程的混合料疲劳破坏次数,试验数据见表 5。将 N_{f50} 与 N_{fNM} 汇总于同坐标系中,计算其各自的变异系数。结果如图 2 所示。

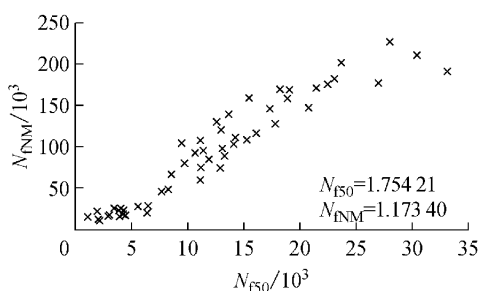


图 2 溶解性胶粉改性沥青混合料的 N_{f50} 与 N_{fNM} 变异系数比较

Fig.2 Comparison between coefficient variation (CV) of N_{f50} and N_{fNM} of terminal blend rubberized asphalt mixture

对比 N_{f50} 与 N_{fNM} 可以发现:

(1)对比 N_{fNM} 与 N_{f50} 之间的差距,平均为 7.308 倍。 N_{f50} 法是以 50%的初始劲度模量减少作为疲劳试验的判断标准,而 N_{fNM} 法是以 10%的初始劲度模量减少作为疲劳试验的结束条件,一般的沥青混合料在此条件下均能达到 J_{NM} 峰值。因此,对比 N_{fNM} 与 N_{f50} 之间的差距,平均为 7.308 倍;

(2)由于改性剂的存在,改性沥青有着比基质沥青更好的韧性与弹性,在发生 50%的初始劲度模量减少时,混合料通常远未发生疲劳破坏。同时,改性沥青混合料初始劲度模量较大,基于 BFA 测试仪本身对初始模量的检测具有不稳定性,越大的劲度模

量越难以准确测定,因此第 50 次的劲度模量值变化较大,这是导致改性沥青混合料 N_{f50} 数据离散性较大的原因。另一方面,由图 2 可见,与初始劲度模量无关的 N_{fNM} 变异系数较小,相对稳定,可信度更高。

综上所述, N_{fNM} 法测得的疲劳次数更能客观反映 TB 改性沥青混合料的疲劳性能。

2.2 回归分析

将试验结果经过 1stOpt 编程拟合得到各个参数,结果如下:

$$N_f = 2.632 \times 10^{6.561} e^{0.357W_{AC}-0.214V_a} \epsilon^{-0.334}, \quad R^2 = 0.936 \quad (1)$$

式中: N_f 为疲劳寿命,次; ϵ 为应变, $\times 10^{-6}$; W_{AC} 为沥青含量,%; V_a 为空隙率,%。

回归公式的相关系数 R^2 达到 0.936,可见 TB-AC13 混合料疲劳寿命与应变变量、沥青用量以及空隙率有不错的相关性。从拟合方程角度分析,应变变量越小,沥青用量越大,空隙率越小则疲劳寿命越长。

3 相同设计空隙率下 TB-AC13 与 SBS-AC13 混合料疲劳性能对比

SBS 改性沥青在我国应用最为成熟和广泛,TB 胶粉改性沥青具有良好的应用前景,本文选用 SBS 改性沥青混合料与其混合料进行疲劳性能的对比。

在混合料的疲劳性能试验对比中需要特别说明:其一,空隙率是沥青混合料设计中的关键点,在疲劳性能的测试中应予以着重考虑。本文特以 4%作为 AC13 的设计空隙率,并在此条件下进行混合料的疲劳性能对比。控制混合料 4%空隙率的方法是混合料在最佳油石比下进行试碾压以确定碾压次数,试碾压是一个重复且难以控制的过程,每种沥青混合料的碾压次数并不完全相同。疲劳试验小梁均按试碾压确定的碾压次数成型后切割制作,空隙率控制在目标空隙率左右,误差在 $\pm 5\%$ 以内,满足此条件的小梁试件参与试验。其二,沥青是一种黏弹性材料,它会随着往复应力的加载而发生形变,自愈合无时无刻不在发生^[10],本文在进行混合料的疲劳性能对比时将考虑自愈合的影响。根据先期关于自愈合的研究^[11],本文设定的自愈合条件为,将已进行过一次疲劳测试并达到了 N_{fNM} 的改性沥青混合料小梁在 50℃环境下保温 4 h,然后静置于 15℃室温下 24 h,再进行应变量为 $1\ 000 \times 10^{-6}$ 的四点弯曲疲劳试验。

表 5 TB-AC13 小梁疲劳试验数据
Tab.5 Data of the beam fatigue tests of TB-AC13

平行 试验	沥青用 量/%	应变 水平/ 10^{-6}	空隙率/ %	初始 模量/MPa	疲劳次数			
					N_{150}	N_{1NM}		
1			4.33	3 139	5 620	28 330		
2			4.33	3 319	6 500	29 010		
3	4.0	1 000	5.07	3 069	3 440	26 710		
4			5.07	3 127	4 150	26 090		
5			5.81	3 186	3 910	24 070		
6			5.81	3 142	2 020	22 950		
7					4.33	3 298	4 270	23 360
8					4.33	3 316	6 400	20 730
9	4.0	1 250	5.07	3 741	4 470	17 540		
10			5.07	3 626	4 020	16 680		
11			5.81	3 535	1 140	15 750		
12			5.81	3 469	2 910	16 750		
13					4.33	3 359	4 240	17 790
14					4.33	3 236	4 160	19 940
15	4.0	1 500	5.07	3 331	3 090	17 440		
16			5.07	3 157	2 980	16 130		
17			5.81	3 033	2 070	12 500		
18			5.81	3 139	2 150	11 400		
19					3.65	2 894	16 080	116 860
20					3.65	2 840	12 610	130 530
21	5.5	1 000	4.28	2903	14 240	111 635		
22			4.28	2 767	13 090	98 297		
23			5.05	3 025	9 490	104 583		
24			5.05	2 849	10 640	92 805		
25					3.65	3 165	14120	103 500
26					3.65	3 214	15 260	108 670
27	5.5	1 250	4.28	2 984	13 300	89 305		
28			4.28	2 876	11 390	95 317		
29			5.05	2 783	9 750	80 230		
30			5.05	2 847	11 210	75 140		
31					3.65	2 884	11 920	85 470
32					3.65	2 918	12 900	74 730
33	5.5	1 500	4.28	2 718	8 580	66 850		
34			4.28	2 783	11 120	59 420		
35			5.05	2 667	8 290	48 930		
36			5.05	3 049	7 710	45 880		
37					2.44	2614	30 390	210 800
38					2.44	2 705	28 040	227 280
39	7.0	1 000	2.81	2 494	33 120	191 000		
40			2.81	2 576	26 990	177 580		
41			3.35	2 348	22 490	176 240		
42			3.35	2 020	19 080	169 430		
43					2.44	2 189	23 080	182 360
44					2.44	1 985	23 700	201 760
45	7.0	1 250	2.81	1 965	20 760	147 810		
46			2.81	2 036	18 260	169 930		
47			3.35	1 948	13 650	139 810		
48			3.35	2 025	17 310	146 560		
49					2.44	2 156	18 870	158 540
50					2.44	2 022	21 460	171 420
51	7.0	1 500	2.81	2 308	15 450	159 210		
52			2.81	2 189	17 800	128 430		
53			3.35	2 113	13 010	120 550		
54			3.35	2 045	11 150	108 520		

3.1 TB-AC13 与 SBS-AC13 疲劳数据分析

试验均在 $1\ 000 \times 10^{-6}$ 的应变率下进行,同一条条件下安排多次平行试验,记录 N_{NM} , 去除误差大于 20% 和意外破坏试件, 保证最终获取误差最小的两个数据进行分析比较. 记未考虑自愈合的疲劳寿命为 N_{f1} , 记完成自愈合条件处理的小梁疲劳寿命为

N_{f2} , 两者相加记为 N_f , 试验数据汇总结果见表 6.

由表 6 可见, 在 4% 的空隙率下, 无论是否考虑自愈合的影响, TB-AC13 的疲劳寿命均较 SBS-AC13 要低. 未考虑自愈合时, SBS-AC13 的疲劳寿命是 TB-AC13 的 1.7 倍, 考虑自愈合后, SBS-AC13 的疲劳寿命是 TB-AC13 的 1.5 倍.

表 6 TB-AC13 与 SBS-AC13 疲劳性能结果

Tab. 6 Results of fatigue performance between TB-AC13 and SBS-AC13

小梁名称	空隙率/ %	最佳沥青 含量/%	初始劲度 模量/MPa	恢复后劲度 模量/MPa	N_{f1} /次	N_{f2} /次	N_f /次
SBS-AC13	4	4.6	4 759	2 320	151 640	64 300	215 940
			5 089	2 738	156 510	76 580	233 090
TB-AC13	4	4.7	3 890	468	91720	57 580	149 300
			3 576	855	87 600	69 200	156 800

3.2 TB-AC13 与 SBS-AC13 自愈合能力比较

将表 6 中的 N_{f2} 与 N_{f1} 相除作百分率处理后作为各沥青混合料的自愈合能力评价指标, TB-AC13 的自愈合评价指标为 71%, SBS-AC13 的自愈合评价指标为 46%. 在相同设计空隙率下, TB-AC13 的自愈合能力优于 SBS-AC13. 由于胶粉的存在, 使得 TB-AC13 的自愈合能力优于 SBS-AC13. 沥青混合料的自愈合能力强, 可在其长期使用过程中增强其疲劳寿命.

能研究可知, TB-AC13 的疲劳性能表现不如 SBS-AC13, 但其具有优异的自愈合能力, 同时从成本上看 TB 胶粉改性沥青较 SBS 改性沥青更低, 具有一定的复合改性空间. 本文采用 SBS 改性剂与 TB 胶粉改性沥青进行复合改性后进一步探究其混合料性能.

4 TB 加 SBS 复合改性沥青的研究

4.1 TB 加 SBS-AC13 与 SBS-AC13 疲劳性能比较

采用 4.0% 作为 AC-13 的设计空隙率, 在此条件下进行 TB 加 SBS 沥青混合料的疲劳性能检测, 试验均在 $1\ 000 \times 10^{-6}$ 的应变率下进行, 同一条条件下安排多次平行试验, 去除误差大于 20% 和意外破坏试件, 保证最终获取误差最小的两个数据进行分析比较, 并与 SBS-AC13 疲劳数据相比较, 结果见表 7.

由此前关于 TB-AC13 与 SBS-AC13 的疲劳性

表 7 TB 加 SBS-AC13 与 SBS-AC13 疲劳性能试验结果

Tab. 7 Test results of fatigue performance between TB + SBS-AC13 and SBS-AC13

小梁名称	空隙率/%	最佳沥青 含量/%	初始劲度 模量/MPa	恢复后劲度 模量/MPa	N_{f1} /次	N_{f2} /次	N_f /次
SBS-AC13	4	4.6	4 759	2 320	151 640	64 300	215 940
			5 089	2 738	156 510	76 580	233 090
TB 加 SBS- AC13	4	4.7	3 777	1 729	338 210	164 330	502 540
			3 821	2 012	303 650	150 300	453 950

由表 7 可见, 在 4% 的空隙率下, 无论是否考虑自愈合的影响, TB 加 SBS-AC13 的疲劳寿命均较 SBS-AC13 要高. 未考虑自愈合时, TB 加 SBS-AC13 的疲劳寿命是 SBS-AC13 的 2 倍, 考虑自愈合后, TB 加 SBS-AC13 的疲劳寿命是 SBS-AC13 的 2.1 倍.

混合料的性能, 以 4.0% 作为设计空隙率, 对 TB 加 SBS-AC13 与 SBS-AC13 成型车辙试件, 完成 60 °C 下的车辙试验, 试验结果如表 8 所示. TB 加 SBS-AC13 的高温性能明显优于 SBS-AC13.

将表 7 中的 N_{f2} 与 N_{f1} 相除做百分率处理后作为两种沥青混合料的自愈合能力评价指标, SBS-AC13 的自愈合评价指标为 46%, TB 加 SBS-AC13 的自愈合评价指标为 49%, TB 加 SBS 复合改性沥青-AC13 的自愈合能力略高于 SBS-AC13.

表 8 TB 加 SBS-AC13 与 SBS-AC13 的动稳定度试验结果
Tab. 8 Test results of dynamic stability of TB + SBS-AC13 and SBS-AC13

名称	最佳沥 青含量/ %	60 min 变形量/ mm	动稳定 度/(次· mm ⁻¹)	动稳定度 均值/(次· mm ⁻¹)
SBS-AC13	4.6	2.233	5 206	5 390
		2.421	5 574	
TB 加 SBS- AC13	4.7	1.734	8 750	8 392
		1.817	8 033	

4.2 TB 加 SBS-AC13 与 SBS-AC13 高温性能验证

为更全面地探究和检验 TB 加 SBS-AC13 沥青

5 结论

涉及溶解性胶粉改性沥青的室内研究目前在国内外还较少,本文通过对 TB-AC13 的疲劳性能研究,并与 SBS-AC13 疲劳性能对比,进一步对 TB 加 SBS 复合改性沥青混合料性能进行探究,期望能在兼顾经济性的情况下,对拓展有关 TB 改性沥青混合料性能的室内研究提供参考和依据,相关结论如下:

(1) N_{NM} 比 N_{B0} 更适合用于评价溶解性胶粉改性沥青混合料的疲劳寿命。

(2) 溶解性胶粉改性沥青 AC13 混合料疲劳寿命与应变量、沥青用量以及空隙率有较好的相关性,从拟合方程角度分析,应变量越小,沥青用量越大,空隙率越小则疲劳寿命越长;经过回归计算,给出了溶解性胶粉改性沥青面层混合料的疲劳行为方程。

(3) 在 4% 的设计空隙率下,未考虑自愈合时, SBS-AC13 的疲劳寿命是 TB-AC13 的 1.7 倍,考虑自愈合后, SBS-AC13 的疲劳寿命是 TB-AC13 的 1.5 倍。但 TB-AC13 的自愈合能力远高于 SBS-AC13。

(4) 在考虑经济性的前提下,采用 3% 的 SBS 对 TB 胶粉改性沥青进行复合改性后,在 4% 的设计空隙率下,无论是否考虑自愈合对疲劳性能的补偿, TB 加 SBS-AC13 的疲劳寿命均达到 SBS-AC13 疲劳寿命的 2 倍,且高温性能亦远优于 SBS 改性沥青混合料。

参考文献:

- [1] Santucci L. Rubber roads; waste tires find a home [J]. Pavement Technology Update, 2009, 1(2):1.
- [2] 黄卫东,李彦伟,杜群乐,等. 橡胶沥青及其混合料的研究与应用[M]. 北京:人民交通出版社,2013.
- [3] HUANG Weidong, LI Yanwei, DU Qunle, *et al.* Research and application on asphalt rubber and asphalt rubber mixture[M]. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [4] Jones D, Harvey J, Monismith C *et al.* Reflective cracking study: summary report[R]. Richmond: University of California Pavement Research Center, 2007.
- [5] Qi X C, Aroon S, Terry A, *et al.* Laboratory characterization and full-scale accelerated performance testing of crumb rubber asphalts and other modified asphalt systems[C]//Proceeding of the Asphalt-Rubber 2006 Conference. Palm Springs: Rubber Pavement Association, 2006:39-68.
- [6] Tsai B, Jones D, Harvey J, *et al.* Reflective cracking study: first-level report on laboratory shear testing[R]. Richmond: University of California Pavement Research Center, 2007.
- [7] Hajj Y E, Sebaaly E P, Hitti E, *et al.* Performance evaluation of terminal blend tire rubber HMA and WMA mixtures—case studies[R]. Reno: Western Regional Superpave Center, 2007.
- [8] 中华人民共和国交通运输部. JTG E20—2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 北京:人民交通出版社,2011. Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG E20—2011 Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering [S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [9] 中华人民共和国交通运输部. JTG F40—2004 公路沥青路面施工技术规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004. Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG F40—2004 Technical specification for construction of highway asphalt pavements[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [10] 黄卫东,高川,李昆. 橡胶沥青混合料疲劳性能影响因素研究[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2009, 37(12):1608. HUANG Weidong, GAO Chuan, LI Kun. Research on influence factors of AR mixture fatigue performance [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(12): 1608.
- [11] Rowe G M, Bouldin M G. Improved Techniques to Evaluate the Fatigue Resistance of Asphaltic Mixtures[C]//Proceedings of 2nd Euro Asphalt and Euro Bitumen Congress. Barcelona: Foundation Eurasphalt, 2000: 754-763.
- [12] 黄明,汪翔,黄卫东. 橡胶沥青混合料疲劳性能自愈合影响因素分析[J]. 中国公路学报, 2013, 26(4):16. 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.