

文章编号:1005-0523(2014)05-0006-06

# 掺加纤维对橡胶沥青混合料疲劳性能的影响

刘少鹏<sup>1</sup>,黄卫东<sup>1</sup>,纪淑贞<sup>2</sup>

(1.同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804;2.上海群康沥青科技有限公司,上海 200433)

**摘要:**通过气动伺服BFA试验机进行四点弯曲小梁疲劳试验,选用木质素纤维、聚酯纤维、腈纶纤维及自配橡胶沥青,采用 $N_{\text{NM}}$ 法、 $N_{50}$ 法对比分析添加纤维对其混合料疲劳性能的影响。此外还考虑了应变水平、沥青用量对混合料疲劳试验结果的影响。结果表明:各种类型的纤维对混合料的疲劳寿命均有不同程度的提高,在1 100  $\mu\text{E}$ ,1 300  $\mu\text{E}$ ,1 500  $\mu\text{E}$ 下 $N_{\text{NM}}$ 值提高幅度分别超过40%,90%,110%;混合料的疲劳寿命与沥青用量成正比,而与应变水平成反比。

**关键词:**道路工程;纤维;疲劳试验;应变水平;橡胶沥青;应力吸收层

**中图分类号:**U414

**文献标志码:**A

为了解决半刚性基层反射裂缝问题,其中最重要的手段之一就是设置应力吸收层<sup>[1-4]</sup>。应力吸收层一般设置在沥青面层与基层之间<sup>[5]</sup>,来自基层的应力经过应力吸收层分散后可以延缓和阻止沥青面层反射裂缝的产生。

橡胶沥青混合料成型后较为密实、粘结力强,同时还具有优良的自愈能力<sup>[6]</sup>,能够与基层较好的粘结在一起,随着基层的变形而变形。

纤维作为一种理想的加筋材料<sup>[7-8]</sup>,可有效地提高沥青混合料的抗裂性以及高温稳定性。纤维的加入,可均匀地分散在混合料中形成网络结构<sup>[9]</sup>,有效地阻碍了沥青的流动,增加了沥青混合料中骨料的结合性能<sup>[10]</sup>。同时,纤维可以显著改善沥青混合料路面的柔韧性<sup>[11]</sup>,减弱沥青混凝土在产生塑性收缩或膨胀时的胀力,大大提高沥青路面的抗冲击、抗疲劳能力<sup>[12-13]</sup>。

本研究中基于疲劳性能、以应力吸收层设计为出发点,采用橡胶改性沥青作为胶结料,探讨在应力吸收层中添加纤维对混合料的疲劳性能的影响。

## 1 试验材料及其性能

### 1.1 沥青

基质沥青选用ESSO 70#重交石油沥青,其性能指标见表1。胶粉选用山东产40目废旧轮胎胶粉。参考工程实践,橡胶沥青中胶粉的掺量采用外掺21%。橡胶沥青的生产采用小型对流式搅拌机,在180℃条件下匀速搅拌1.5h至胶粉均匀的融于基质沥青中。橡胶沥青的基本性能指标如表2。

### 1.2 纤维

纤维选用木质素纤维、聚酯纤维、腈纶纤维进行试验研究。纤维的质量符合规范技术要求,在250℃的干拌温度不变质、不发脆。纤维掺量为沥青混合料总质量的0.3%。

收稿日期:2014-06-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50308021);河北省交通运输厅科技计划项目(Y-070201)

作者简介:刘少鹏(1989—),男,硕士研究生,主要从事沥青及沥青混合料方面的研究;黄卫东(1970—),男,研究员,博导,研究方向为道路工程、沥青及沥青混合料。

### 1.3 集料

本研究所用粗集料( $\geq 4.75$  mm)为江苏茅迪玄武岩,细集料(2.36 mm以下各档)为石灰岩,填料采用普通硅酸盐水泥。集料密度见表3所示。

表1 埃索70#基质沥青常规指标检测结果

Tab.1 Conventional test results for ESSO 70#

试验项目	实测值	规范要求	试验方法
针入度(25℃,100g,5s),0.1mm	65.8	60-80	T0604
软化点(环球法),℃	49.6	$\geq 46$	T0606
粘度(135℃),Pa·s	0.52	/	T0625
溶解度,%	99.8	$\geq 99.5$	T0607
闪点(COC),℃	276	$\geq 260$	T0611
密度, $g \cdot cm^{-3}$	1.025	实测	T0603
延度(5cm/min,15℃),cm	>150	$\geq 100$	T0605
薄膜加热试验 (163℃,5h)	质量变化,%	$\leq 0.8$	T0609
	残余针入度比,%	$\geq 61$	T0604
	延度(15℃),cm	$\geq 15$	T0605

表2 橡胶沥青指标

Tab.2 Conventional test results for asphalt rubber

项目	针入度/0.1mm	软化点/℃	5℃延度/cm	177℃粘度/Pa·s
检测结果	53.3	72.3	12.7	3.63
规范要求	$\geq 25$	$\geq 54.0$	/	1.5~4.0
试验方法	T0604-2000	T0606-2000	/	T0625-2000

表3 集料密度

Tab.3 Density of aggregate

集料种类	粒径/mm	表观密度/ $(g \cdot cm^{-3})$	毛体积密度/ $(g \cdot cm^{-3})$
玄武岩	13.2	2.924	2.864
	9.5	2.925	2.854
	4.75	2.932	2.851
石灰岩	2.36	2.708	/
	1.18	2.698	/
	0.6	2.696	/
	0.3	2.700	/
	0.15	2.699	/
	0.075	2.645	/

## 2 试验方法及配合比设计

### 2.1 疲劳试验

在本研究中,采用四点弯曲梁疲劳试验<sup>[14]</sup>,加载方式为应变控制。试验仪器采用澳大利亚IPC公司产气动伺服四点弯曲试验机BFA,相比MTS用的疲劳小梁,BFA小梁尺寸较大,控制更为精确。BFA自带恒温环境箱,密闭性能良好,在中控器上有温度传感器接口,可以实时记录试验温度,环境箱也可用于实现不

同温度下的疲劳试件,温度可控制在 $-20\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,精度达 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。试验参数如表4所示。

表4 试验控制参数

Tab. 4 Test control parameters

加载方式	加载波形	应变水平	温度	频率	是否间歇
应变控制	半正弦	1 100~1 500 $\mu\epsilon$ ,以200 $\mu\epsilon$ 递增	15 $^{\circ}\text{C}$	10 Hz	否

### 2.1.1 劲度模量衰减50%评价法

常用的疲劳寿命的定义为,以初始劲度模量衰减50%所需加载次数作为最终的疲劳寿命<sup>[15]</sup>。50%劲度模量衰减方法,首先是 Pronk 和 Hopman 以及 Tayebali 等人提出的,并被 AASHTO 的临时规范 TP8-94 所采纳,作为对疲劳破坏的定义。50%劲度模量衰减法在疲劳寿命的评价上,具有试验快速、数据分析简便的优点,同时也是经过大量实验研究证明了的一种疲劳分析方法。

### 2.1.2 归一化劲度次数积评价法

根据 Rowe 和 Bouldin 的研究成果,ASTM D7460 制定了新的疲劳寿命获取方法<sup>[15]</sup>。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。归一化劲度次数积(normalized modulus $\times$ cycles, NM),如式(1)。

$$NM = \frac{S_i \times N_i}{S_0 \times N_0} \quad (1)$$

式中:NM—归一化劲度次数积;

$N_i$ —加载次数;

$S_i$ —第*i*次加载时时间的劲度模量;

$S_0$ —初始劲度模量,取第50次加载时的劲度模量;

$N_0$ —初始次数,取50次。

归一化劲度次数积评价法,可以较为确切的反应小梁的实际破坏机理,与50%劲度模量衰减方法相比较更为合理且稳定。

## 2.2 配合比设计

为验证纤维对橡胶沥青混合料疲劳性能的影响,结合应力吸收层特点,级配选用适用于橡胶沥青的 ARAC-10 型级配,各筛孔通过率如表5,沥青用量为8.0%,9.0%两组,8.0%沥青用量下目标空隙率为2%。

表5 级配表

Tab. 5 The mixture gradation

筛孔尺寸/mm	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
ARAC-10/%	100	55	45	35	20.5	9.5	4	2

## 3 疲劳试验结果分析

笔者主要采用归一化劲度次数积法对小梁的疲劳寿命进行分析,并以50%劲度模量衰减法作为对照,结合这两种方法所得出的结果对小梁疲劳寿命进行评价。

### 3.1 纤维类型的影响

当沥青用量为8%时,在1 100  $\mu\epsilon$ ,1 300  $\mu\epsilon$ ,1 500  $\mu\epsilon$  3种应变条件下所测得的小梁的疲劳寿命如表6。

由图1、图2、图3可知,在3种应变水平下,纤维的使用均对混合料的疲劳寿命有了不同程度地提高;其中聚酯纤维、木质素纤维对混合料的疲劳寿命提高较为明显,在1 100  $\mu\epsilon$ 下小梁的 $N_{NM}$ 值提高都超过40%,1 300  $\mu\epsilon$ 下小梁的 $N_{NM}$ 值提高幅度可达90%,而在1 500  $\mu\epsilon$ 下小梁的 $N_{NM}$ 值提高幅度最大均超过110%。并且聚酯纤维在大应变水平下更具有优势。归一化劲度次数积法所得的疲劳寿命与50%劲度模量衰减方法所得的疲劳寿命较大的区别,但存在较好的对应关系。

表6 不同纤维在各应变水平下的疲劳寿命对比  
Tab.6 The fatigue life of different fibers under different strain levels

应变水平/ $\mu\epsilon$	纤维种类	劲度模量/MPa	$N_{150}$	$N_{NM}$
1 100	木质素纤维	3 769	24 020	123 490
	聚酯纤维	3 578	22 440	127 470
	腈纶纤维	3 235	19 540	121 130
	参照组	3 472	14 820	86 185
1 300	木质素纤维	3 567	14 710	72 620
	聚酯纤维	3 252	13 010	74 310
	腈纶纤维	3 111	10 920	56 520
	参照组	3 538	7 890	29 660
1 500	木质素纤维	3 350	6 810	24 480
	聚酯纤维	2 910	8 010	37 050
	腈纶纤维	3 029	6 700	25 960
	参照组	3 086	4 670	9 430

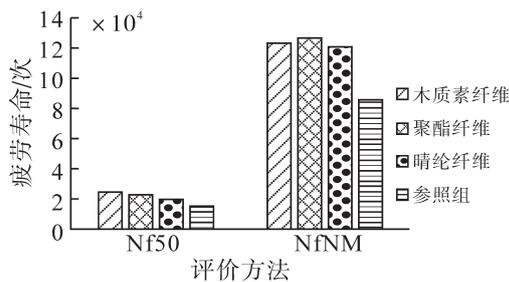


图1 在1 100  $\mu\epsilon$ 水平下掺加纤维对混合料疲劳寿命影响对比

Fig.1 The comparison of mixture fatigue life under the 1 100  $\mu\epsilon$

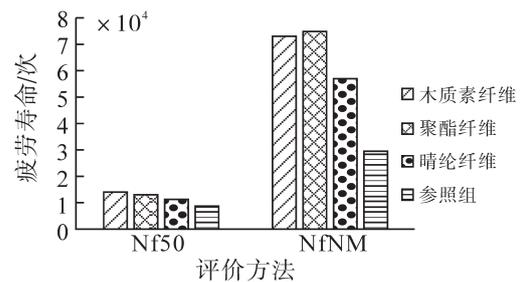


图2 在1 300  $\mu\epsilon$ 水平下掺加纤维对混合料疲劳寿命影响对比

Fig.2 The comparison of mixture fatigue life under the 1 300  $\mu\epsilon$

纤维均匀分散到混合料中,起到一定的加筋作用,同时其吸附一些自由沥青形成结合沥青提高了胶结料的粘结性,这就对小梁在弯拉作用下裂缝的产生及拓展起到了很好的减缓作用。而纤维在混合料中的分散程度以及纤维的长纤比、密度、强度及韧性等物理力学特性,又决定了不同纤维对混合料的疲劳寿命改善程度不尽相同。聚酯纤维以及腈纶纤维与木质素纤维相比具有更高的长纤比、强度及韧性,对混合料的加筋效果更为明显,但是其吸收沥青的能力远不及木质素纤维。故木质素纤维与聚酯纤维、腈纶纤维对混合料疲劳性能改善效果相差不大或受此影响。

### 3.2 沥青用量的影响

从经济性上进行考虑,木质素纤维价格较低,并结合对疲劳性能的改善程度,采用木质素纤维进行后

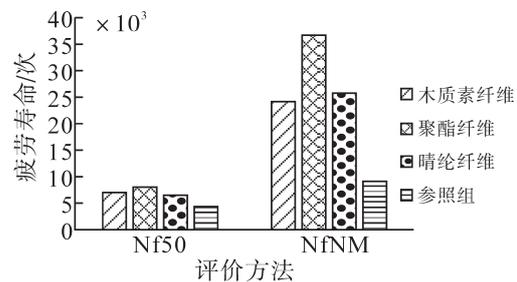


图3 在1 500  $\mu\epsilon$ 水平下掺加纤维对混合料疲劳寿命影响对比

Fig.3 The comparison of mixture fatigue life under the 1 500  $\mu\epsilon$

续研究。以9%的沥青用量成型混合料,结合前文,继续对混合料的疲劳性能进行研究。

不同应变水平、不同沥青用量下小梁的疲劳寿命见表7。

表7 不同沥青用量下疲劳寿命

Tab.7 The fatigue life under different asphalt content

应变水平/ $\mu\epsilon$	沥青用量/%	劲度模量/MPa	$N_{150}$	$N_{1\text{NM}}$
1 100	8	3 769	24 020	123 490
	9	3 417	29 810	160 320
1 300	8	3 567	14 710	72 620
	9	3 406	20 830	107 560
1 500	8	3 350	6 810	24 480
	9	3 384	6 640	85 250

由表7、图4可知,同种混合料的疲劳寿命与应变水平有良好的相关性,随着应变水平的提高,沥青混合料的疲劳寿命呈现明显的下降趋势。

相同应变水平同种类型的混合料,其小梁疲劳寿命在9%沥青用量下明显高于8%沥青用量。同时,疲劳寿命跟沥青用量具有较明显的正相关关系。分析其原因主要是由于,沥青用量的增加可以使混合料的劲度模量出现下降,即混合料的柔韧性提高;在外荷载反复作用下,柔韧性越高裂缝的产生扩展必然会越慢,从而使得混合料的疲劳寿命得到提高。对于抗疲劳性能与高温性能的平衡设计是个值得研究的方向。

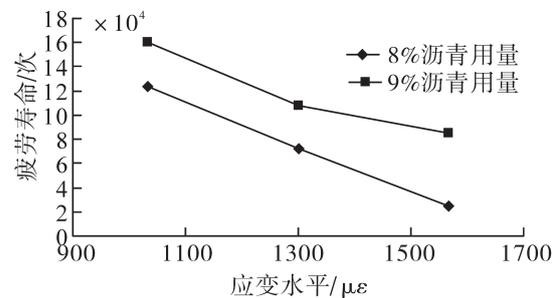


图4 两种沥青用量下疲劳寿命随应变水平变化趋势

Fig.4 The change trend of fatigue life with strain levels under two kinds of asphalt content

## 5 结语

通过小梁弯曲疲劳试验,对纤维用于橡胶沥青应力吸收层的可行性进行了论证,得出的主要结论如下:

- 1) 纤维对混合料的疲劳寿命均有不同程度的提高,在1 100  $\mu\epsilon$ , 1 300  $\mu\epsilon$ , 1 500  $\mu\epsilon$ 下  $N_{1\text{NM}}$  值提高幅度分别超过40%, 90%, 110%;
- 2) 混合料的疲劳寿命与沥青用量成正比,而与应变水平成反比;
- 3) 综合考虑改善效果及经济性,木质素纤维较适合用于橡胶沥青应力吸收层。

## 参考文献:

- [1] 刘仕贵,于新. 结构层参数对SAMI-R防反射裂缝影响有限元分析[J]. 华东交通大学学报,2013,30(2):33-36.
- [2] 耿立涛,任瑞波,郭玉清,等. 应力吸收层沥青混合料的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2012,15(4):570-574.
- [3] 李祖仲,陈栓发,廖卫东,等. 改性沥青应力吸收层混合料低温抗裂性能评价[J]. 中国公路学报, 2012,25(4):29-35.
- [4] 刘洪,颜赫,景宏伟,等. SAMI应力吸收层材料合理组成研究[J]. 公路, 2013(2):183-188.
- [5] 廖卫东,陈栓发,刘云全. STRATA应力吸收层抗疲劳特性研究[J]. 武汉理工大学学报, 2003,25(12):1-4.
- [6] 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.
- [7] QIANG XUE, LEI LIU, YIJUN CHEN. Study on the action effect of pavement straw composite fiber material in asphalt mixture

- [J]. *Construction and Building Materials*, 2013(43):293–299.
- [8] SAYYED M A, MOHAMMAD S, SAYYED M H. Fiber-reinforced asphalt-concrete: A review[J]. *Construction and Building Materials*, 2010,24(6):871–877.
- [9] HUAXIN CHEN, QINWU XU. Experimental study of fibers in stabilizing and reinforcing asphalt binder[J]. 17th International Symposium on Alcohol Fuels, 2010,89(7):1616–1622.
- [10] 陈华鑫. 纤维沥青混凝土路面研究[D]. 西安:长安大学,2002.
- [11] 杨红辉,袁宏伟,郝培文,等. 木质素纤维沥青混合料路用性能研究[J]. *公路交通科技*, 2003,20(4):10–11,15.
- [12] LIHUA ZHAO, JINYUN CHEN, SHENGWU WANG. Using mineral fibers to improve asphalt and asphalt mixture behavior[J]. *Traffic and Transportation studies*, 2010:1352–1361.
- [13] NIGHT M. Investigation of usability of basalt fibers in hot mix asphalt concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2013(47):175–180.
- [14] 李本亮. 应力吸收层防治反射裂缝效果实验研究[D]. 上海:同济大学,2011.
- [15] GEORGE B W, KAMIL K, JORGE S, et al. Performance characteristics of arizona asphalt-rubber and conventional mixes using beam fatigue and simple shear tests[J]. *Proceedings Asphalt Rubber 2012, Munich, Germany*,2012:23–26.

## Effect of Fibers on Fatigue Performance of Asphalt Rubber Mixture

Liu Shaopeng<sup>1</sup>, Huang Weidong<sup>1</sup>, Ji Shuzhen<sup>2</sup>

(1.Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education,Tongji University, Shanghai 201804, China; 2.Shanghai Qunkang Asphalt Technology Institute,Shanghai 200433, China)

**Abstract:** The four-point flexural bending test is conducted on compacted beam specimens through BFA with a pneumatic servo system. Effect of lignin fibers, polyester fibers, acrylic fibers on fatigue properties of mixtures is analyzed by using  $N_{NM}$  and  $N_{50}$ . Besides, the effect of strain level and asphalt content on fatigue properties is investigated. The results indicate that fatigue life is improved to some extent with all types of fibers. In the  $1100\mu\epsilon$ ,  $1300\mu\epsilon$ ,  $1500\mu\epsilon$ ,  $N_{NM}$  values have been increased more than 40%, 90% and 40% respectively. Positive correlation between fatigue life and asphalt content is found while negative correlation between fatigue life and strain level is identified.

**Key words:** road engineering; fiber; fatigue test; strain level; asphalt rubber