

# 玻璃纤维改性沥青用于张力带的 路面寿命和成本研究

白伟<sup>1</sup>,孔维康<sup>2</sup>,孟勇军<sup>2,3,4</sup> 编译

(1.广西南天高速公路有限公司,广西南宁 530022;2.广西大学 土木建筑工程学院,广西南宁 530004;

3.广西大学 工程防灾与结构安全教育部重点实验室,广西南宁 530004;4.广西壮族自治区科学

技术厅 广西特殊地质公路安全工程技术研究中心,广西南宁 530022)

**摘要:**在沥青混合料中添加纤维可以提升性能。作为木质纤维的替代品,玻璃纤维可以用于沥青玛蹄脂碎石等沥青混合料的添加剂。该文研究添加松散玻璃纤维对不同沥青混合料性能的影响。试验选择质量占比恒定为0.5%的玻璃纤维含量,通过循环间接拉伸试验研究玻璃纤维对沥青混合料疲劳和刚度性能的影响,进一步研究这些沥青混合料作为张力带的应用,并对其路面使用寿命和经济效益进行计算。结果表明:添加质量比为0.5%的玻璃纤维可使不同沥青混合料具有更好的疲劳和刚度性能,并且可以减小路面结构中沥青层的厚度。研究证明玻璃纤维改性沥青的性能较好,用玻璃纤维改性的沥青混合料铺设张力带可以显著降低路面成本。

**关键词:**玻璃纤维;增强剂;材料特性;路面使用寿命;张力带

**中图分类号:**U416.2

**文献标志码:**A

## 0 引言

在德国,纤维(通常为木质纤维)常添加在沥青玛蹄脂碎石(SMA)和多孔沥青中,这是因为纤维能避免在沥青含量相对较高时运输过程中的流失,也能减少沥青在摊铺过程中的分解。因而几十年来,研究人员一直尝试使用纤维改性沥青,以提高混合料的性能。Mahrez等<sup>[1]</sup>、顾晓燕等<sup>[2]</sup>、樊兴华等<sup>[3]</sup>研究了使用玻璃纤维和聚合物纤维改善疲劳性能的情况和纤维对沥青结合料高低温性能的影响;Qian等<sup>[4]</sup>利用多纤维拉拔试验和直接拉伸试验,确定了考虑必要嵌入的最佳纤维长度;Giustozzi等<sup>[5]</sup>对用聚合物和纤维改性的温拌沥青以及大量再生沥青路面的研究表明,纤维改性沥青路面的力学特性和长期性能可以得到改善;Mahrez等<sup>[1]</sup>对玻璃纤维增强沥青混合料的疲劳和变形特性进行了研究,并特别研究了纤维含量为0~0.5%时的玻璃纤维对沥青玛蹄脂碎石的增强效果。在中国,高颖等<sup>[6]</sup>研究了玻璃纤维对排

水沥青混合料路用性能的改善效果;王超等<sup>[7]</sup>、王伟等<sup>[8]</sup>研究了钢渣玻璃纤维复合改性沥青,发现掺入钢渣后沥青混凝土低温抗裂性能有所下降,掺入适量的玻璃纤维可以弥补该性能的下降;郭寅川等<sup>[9]</sup>、钱健等<sup>[10]</sup>研究了玻璃纤维对于AC-25砾石沥青混合料的路用性能改善作用的最佳掺量。然而这些研究没有考虑到在使用纤维的同时增加必要的沥青含量所产生的经济影响。上述研究表明:沥青基层混合料特性的改善,能够延长路面使用寿命或减少基层所需层厚。另外在研究过程中,必须确保用于提升SMA材料性能的玻璃纤维也符合经常使用的木质纤维的要求。本文基于上述这些研究开展工作。

## 1 张力带的工作原理

在单轴荷载作用下的沥青路面,假设所有沥青层之间完全黏结,具有最大拉伸应变的区域位于沥青基层的底部。因此,在薄层中使用高性能沥青可以承受这些高拉伸应变,这是提高路面整体使用寿命

命的一种有效方法。如图1所示,将有张力带的沥青路面层结构与普通沥青路面层结构进行比较。张力带的最小厚度一方面取决于所用高性能沥青混合料的最大粒径;另一方面取决于预期的使用寿命。此外,必须确保张力带和沥青基层之间黏结紧密。考虑到最大粒径和层厚的不同,本文研究玻璃纤维改性沥青混合料是否也可用作张力带。

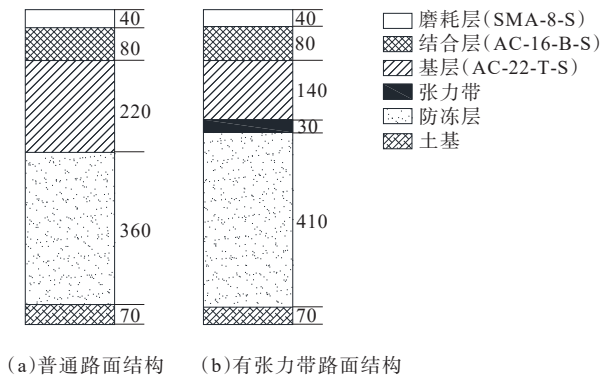


图1 张力带位置示意图(单位:mm)

2 材料和方法

2.1 玻璃纤维

研究中使用切割长度为4.4 mm的玻璃纤维。玻璃纤维由无碱玻璃制成,表1为玻璃纤维的特性。玻璃纤维和木质纤维在外表上的根本区别是:木质纤维表面更有纹理,而玻璃纤维表面相对光滑(图2、3)。Marsh等<sup>[11]</sup>的研究表明:没有充足证据证明暴露的玻璃棉会增加呼吸系统癌症风险。因此,可以认为在沥青混合料中使用玻璃纤维在混合或铺装过程中不存在健康风险。

表1 研究使用的玻璃纤维性质

性质	单位	数值
切割长度	mm	4.4
密度	g/cm <sup>3</sup>	2.6
纱线支数	dtex	4.0
纤维直径	μm	13
抗拉强度	cN/tex	130.8
	MPa	3 400
伸长率	%	3.5
弹性模量	cN/tex	2 807
	GPa	73
短期温度稳定性	℃	>400

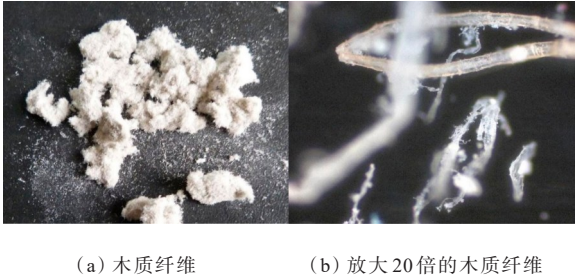


图2 木质纤维

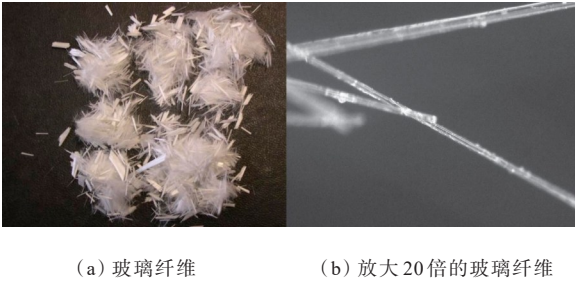


图3 玻璃纤维

2.2 沥青混合料和样品制备

本研究使用了3种不同类型的沥青:① 聚合物改性沥青 25/55-55A 的沥青玛蹄脂碎石 SMA-8-S; ② 聚合物改性沥青 25/55-55A 的一种沥青结合层混合料 AC-16-B-S; ③ 50/70 沥青的沥青基层混合料 AC-22-T-S。

SMA-8-S 和 AC-16-B-S 采用麻粒岩和石灰石填料,AC-22-T-S 沥青基层混合料采用麻粒岩填料和天然砂。此外,AC-22-T-S 是用两种不同数量的再生沥青生产的。对 RAP 的研究表明:添加到沥青基层混合物中的 RA 最初也是一种 AC-22 沥青基层材料,其黏结剂质量含量为 4.2%。对于 3 种类型的沥青,研究不含玻璃纤维(标为 0)或木质纤维(仅用于 SMA)的常见变种和含玻璃纤维(标为 4)的变种。表 2 为沥青混合料性能指标。

为了确保玻璃纤维在沥青混合料中均匀分布,沥青混合料都是在沥青厂生产的。使用塑料袋包装松散的玻璃纤维来确定添加沥青之前手动添加到混合器中玻璃纤维的数量。

根据 EN 12697-18 沥青混合料试验方法第 18 部分,当使用玻璃纤维代替木质纤维时,沥青排水量增加,但没有超过经验确定的质量 0.3% 的阈值。与木质纤维相比,玻璃纤维满足沥青排水的技术要求。

沥青板是在试验室用分段碾压机制造的,然后从板中钻出圆柱形样品,样品经过清洗和干燥。此

外,确定了每个样品的空隙率和尺寸,因为空隙率会极大地影响 CITT 的结果。根据德国标准 AL Sp-沥青 09,所用样品的体积密度差必须在  $0.03 \text{ g/cm}^3$  的范围内。

表 2 不同沥青混合料性能指标

混合料 类型	沥青含 量/%	纤维类型	纤维含 量/%	样本空隙 率/%	RA 总量/ %
S0	7.2	木质纤维	0.3	0.7~0.5	—
S4	7.2	玻璃纤维	0.5	1.8~1.4	—
B0-1	4.3	—	—	3.7~4.3	—
B0-2	4.7	—	—	1.7~2.5	—
B4-1	4.3	玻璃纤维	0.5	3.7~4.9	—
B4-2	4.7	玻璃纤维	0.5	3.5~4.7	—
T0-25	4.2	—	—	3.7~4.7	25
T4-25	4.2	玻璃纤维	0.5	4.2~5.2	25
T4-40	4.2	玻璃纤维	0.5	5.9~6.9	40

### 2.3 循环间接拉伸试验(CITT)

CITT 由德国标准 AL Sp-沥青 09 和欧洲标准 EN 12697 第 24 部分规定。为了测定沥青混合料的疲劳性能,使用频率为 10 Hz 的正弦加载。下部应力水平为 0.035 MPa(接触应力),上部应力水平变化 3 次,使初始弹性应变为  $0.05\% \sim 0.25\%$ 。试验温度为  $20^\circ\text{C}$ ,选择裂纹形成时的载荷循环数<sup>[12]</sup>作为疲劳判据。刚度性能描述为主曲线(不同温度/频率下的刚度)。选择了 0.1~10 Hz 的 5 个加载频率。测试温度为  $-10^\circ\text{C}$ 、 $5^\circ\text{C}$  和  $20^\circ\text{C}$ 。

## 3 测试结果

### 3.1 疲劳性能

所研究的沥青混合料的疲劳性能如图 4~6 所示。

(1) 由图 4 可知:用质量比为 0.5% 的玻璃纤维(S4)代替质量比为 0.3% 的木质纤维(S0),SMA-8-S 的疲劳性能得到一部分改善。

(2) 由图 5 可知:当沥青含量增加 0.4% 时,添加和不添加玻璃纤维的两种材料的疲劳性能都有所下降。这是由于最佳的沥青含量为 4.3%。沥青含量超过最佳沥青含量会导致疲劳性能的劣化;添加玻璃纤维对 B0-1/B4-1 和 B0-2/B4-2 都有显著影响,均提高了两组沥青混合料抵抗疲劳破坏的能力。

(3) 由图 6 可知:在加载循环数较低时,添加玻璃纤维的 T4-25 的疲劳性能要优于未添加纤维的 T0-25,但在循环数增加后区别不大。而增加 RA 含量后,在加载循环数较低时,T4-40 和 T4-25 相差不大,而循环数增加后 T4-40 的疲劳性能要优于 RA 含量较少的 T4-25。

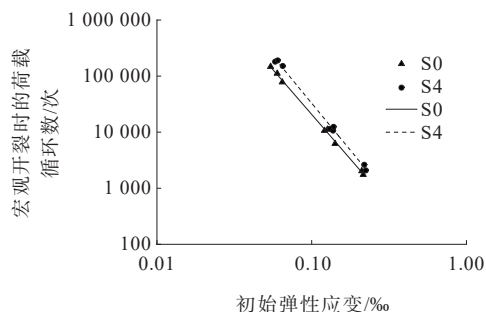


图 4 2 种 SMA-8-S 在  $20^\circ\text{C}$  和 10 Hz 下的疲劳性能

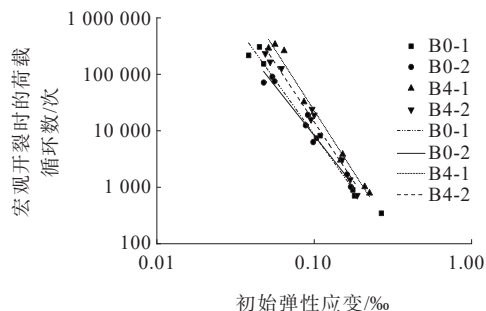


图 5 4 种 AC-16-B-S 在  $20^\circ\text{C}$  和 10 Hz 下的疲劳性能

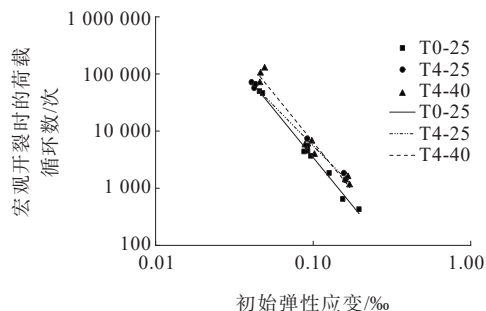


图 6 3 种 AC-22-T-S 在  $20^\circ\text{C}$  和 10 Hz 下的疲劳性能

### 3.2 刚度性能

含木质纤维(S0)和玻璃纤维(S4)的 SMA-8-S 的刚度性能如图 7 所示。由图 7 可知:玻璃纤维对这种沥青混合料的刚度性能影响不大。试验结果表明:由于空隙率略有不同,添加玻璃纤维(S4)的 SMA 的刚度性能应该更好。

图 8 为结合层沥青混合料的刚度性能。温度低于  $10^\circ\text{C}$  时的最大刚度值由沥青含量增加,但未添加

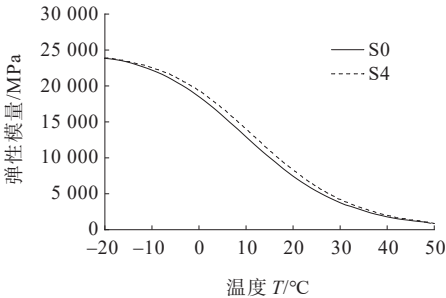


图7 2种SMA-8-S在10 Hz下的刚度性能

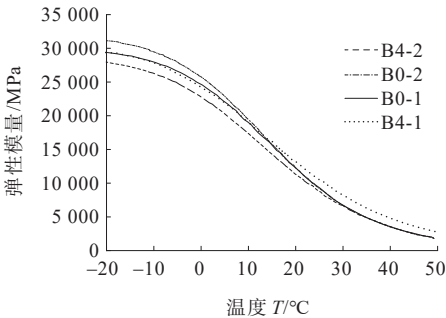


图8 4种AC-16-B-S在10 Hz下的刚度性能

纤维的B0-2型确定。在相同的温度范围内,添加玻璃纤维的B4-2的刚度值最低。在高温下,使用玻璃纤维的B4-1可以检测到最佳刚度值,最佳沥青含量为4.7%。

沥青基层混合料的刚度性能特征如图9所示。T0-25和T4-25的弹性模量值相差不大。当添加质量比为0.5%的玻璃纤维和增加质量40%的RA时,T4-40的弹性模量下降。在T4-40中,弹性模量的降低可能是由于新鲜沥青的减少和骨料表面的双层沥青膜导致。

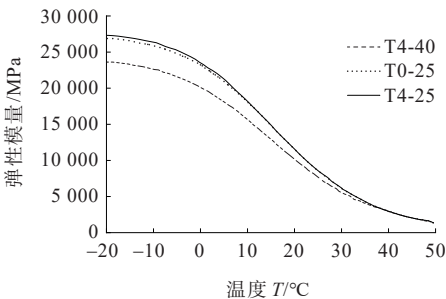


图9 3种AC-22-T-S在10 Hz下的刚度性能

4 讨论

添加质量比为0.5%的玻璃纤维可使不同沥青

混合料具有更好的疲劳和刚度性能。Moreno-Navarro等<sup>[13]</sup>也研究了添加0.3%的丙烯酸纤维改善材料性能。与含有聚合物改性沥青的沥青混合料相比,含有常规沥青和添加丙烯酸纤维的混合料在经济成本上更具吸引力。

考虑到必要材料成本的经济效益,进行了寿命计算,得出了改性材料性能对用作张力带的不同沥青混合料所需层厚的影响。选择了一种适用于繁忙交通的普通德国路面结构用于计算<sup>[14]</sup>。图1(a)给出了层厚,防冻路面结构的总厚度不能因沥青层的变化而减少。因此,沥青层的减少必须通过增加防冻层的层厚来补偿。层结构的优化通过两个方面进行:① 验证张力带底侧和未改性基层上层的底侧的抗疲劳性;② 根据ZTV沥青-StB通过分析最大粒径来决定最小铺装厚度。对路面结构经济效益的研究包括不同沥青层和防冻层的合理厚度。

疲劳状态是通过ADtoPave(德累斯顿理工大学城市和路面工程研究所的一个项目)确定的,给定使用寿命为30年。如果疲劳状态达到100%,则假定在研究层的底部出现疲劳诱发裂纹。

表3给出了沥青基层和张力带的确定层厚以及材料成本。没有张力带的普通路面结构的成本为63.90欧元/m<sup>2</sup>(与其他版本的成本为基准比较)。使用玻璃纤维改性黏结剂沥青(B4-1)作为张力带有可能减少黏结层厚度70 mm。此外,材料成本降低了5.50欧元/m<sup>2</sup>。

表3 有张力带沥青路面的层厚和材料成本

混合料 类型	厚度/mm			疲劳状态/%		成本/ (欧元·m <sup>-2</sup> )
	未改性沥青基层	张力带	防冻层	未改性沥青基层	张力带	
T0-25	200	—	380	95.52	—	63.90
T4-25	120	80	380	8.14	93.90	65.40
T4-40	100	80	400	14.29	93.44	62.80
B4-1	80	50	450	39.29	47.46	58.40
S0	130	40	410	86.09	51.09	63.60
S4	140	30	410	94.79	26.52	63.00

5 结论

试验结果表明:用玻璃纤维代替木质纤维制成



的 SMA 显著改善了所研究材料的特性(疲劳和刚度性能)。相比于不掺加纤维的沥青混合料,掺加玻璃纤维作为改性剂后,抵抗疲劳的性能增加,而弹性模量的大小和温度相关。而且,RA 的含量增加后,混合料的疲劳性能得到提升,弹性模量会下降。在这种情况下,必须保证沥青混凝土混合料的设计有足够的沥青或必须调整沥青含量以确保玻璃纤维能充分地融入沥青混合料中。因此,添加玻璃纤维可以延长路面使用寿命或者减少沥青基层的厚度,两者都能节约成本。在整个沥青层的底部放置一条玻璃纤维改性的高性能沥青张力带,是一种节约成本的施工方法。经济效益研究结果表明:在不考虑道路使用者成本的情况下,这种方法可以节省材料成本。在实验室试验和评价的基础上进行张力带路面施工时,尤其是进行高质量施工时,应注意通过现场试验进行检查。

#### 参考文献:

- [1] MAHREZ A, KARIM M R. Fatigue characteristics of stone mastic asphalt mix reinforced with fiber glass[J]. International Journal of Physical Sciences, 2010, 5(12): 1840-1847.
- [2] 顾晓燕,高剑飞,李惠翔. 聚酯纤维用于环氧树脂沥青混合料增柔及增韧技术研究[J]. 中外公路, 2022, 42(3): 247-250.
- [3] 樊兴华,薛振华. 大温差地区掺玄武岩纤维低标号沥青混合料路用性能研究[J]. 中外公路, 2020, 40(5): 286-291.
- [4] QIAN S Z, MA H, FENG J L, et al. Fiber reinforcing effect on asphalt binder under low temperature[J]. Construction and Building Materials, 2014, 61: 120-124.
- [5] GIUSTOZZI F, CRISPINO M, TORALDO E, et al. Mix design of polymer-modified and fiber-reinforced warm-mix asphalts with high amount of reclaimed asphalt pavement[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2015, 2523(1): 3-10.
- [6] 高颖,朱玉凤,和燕超,等. 玻璃纤维改性排水沥青混合料路用性能分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(4): 690-696.
- [7] 王超,张彩利,王伟. 钢渣玻璃纤维沥青混凝土性能研究[J]. 河北工业大学学报, 2019, 48(2): 81-85.
- [8] 王伟,戴梦丹,俞文杰. 短龄期玻璃纤维水泥土的三轴力学特性研究[J]. 中外公路, 2023, 43(3): 218-225.
- [9] 郭寅川,陈乔森,申爱琴,等. 玻璃纤维改善砾石沥青混合料路用性能[J]. 公路交通科技, 2018, 35(8): 28-33.
- [10] 钱健,周琳,杨建冬,等. 不同纤维改性石灰土的力学特性研究[J]. 中外公路, 2022, 42(5): 203-208.
- [11] MARSH G M, BUCHANICH J M, YOUK A O. Fiber glass exposure and human respiratory system cancer risk: Lack of evidence persists since 2001 IARC re-evaluation[J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2011, 60(1): 84-92.
- [12] ROWE G. Performance of asphalt mixtures in the trapezoidal fatigue test[J]. Asphalt Paving Technol, 1993, 62: 344-384.
- [13] MORENO-NAVARRO F, SOL-SÁNCHEZ M, RUBIO-GÁMEZ M C, et al. The use of additives for the improvement of the mechanical behavior of high modulus asphalt mixes[J]. Construction and Building Materials, 2014, 70: 65-70.
- [14] WEISE C, SOMMER V. Glass fibre modified asphalts and the use as a tension belt-pavement service lifetime calculations and economic efficiency[J]. Road Materials and Pavement Design, 2021, 22(12): 2896-2905.