

DOI: 10.7672/sgjs2026040140

# 玄武岩纤维与木质素纤维沥青胶浆流变性能研究\*

张翔<sup>1</sup>, 赵礼澳<sup>2</sup>, 李智辉<sup>2,3</sup>, 王昱鑫<sup>2</sup>, 张博文<sup>2</sup>

(1. 华设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014;

2. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064;

3. 中交第二公路工程局有限公司工程设计研究院, 陕西 西安 710065)

[摘要] 木质素纤维作为最早应用于沥青混合料的纤维材料, 存在高温易变形失效和长期耐久性不足的问题。基于此, 对比研究木质素纤维与玄武岩纤维在不同温度、不同掺量下对沥青胶浆的影响, 通过锥入度、动态剪切流变(DSR)、弯曲梁流变等试验评价沥青胶浆流变性能。研究表明: 2种纤维均能在沥青胶浆中形成三维网状结构, 有效提高沥青胶浆的抗永久变形和低温抗裂性; 纤维通过嵌合作用提高了沥青胶浆的稠度, 其抗剪强度对应增强, 且相较于木质素纤维, 玄武岩纤维的复数模量更高, 相位角更小, 储存能更大, 损耗能减小, 车辙因子更高, 从而表现出更优异的流变性能; 玄武岩纤维的劲度变化率较高, 表现出更好的阻滞作用和传力作用, 低温抗裂性表现更优, 但纤维掺量超过3.9%后, 2种纤维的低温抗裂性反而降低; 另外相较于玄武岩纤维, 木质素纤维表现出明显的温度敏感性, 在不同温度下有不同的变化趋势, 玄武岩纤维对沥青胶浆流变性能的改性效果更好。

[关键词] 公路; 沥青; 木质素纤维; 玄武岩纤维; 流变性能; 试验

[中图分类号] U41

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)04-0140-06

## Research on Rheological Properties of Basalt Fibre and Lignin Fibre Asphalt Mastic Slurries

ZHANG Xiang<sup>1</sup>, ZHAO Li'ao<sup>2</sup>, LI Zhihui<sup>2,3</sup>, WANG Yuxin<sup>2</sup>, ZHANG Bowen<sup>2</sup>

(1. China Design Group Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210014, China; 2. College of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China; 3. Engineering Design and Research Institute of China Communications Second Highway Engineering Bureau Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710065, China)

**Abstract:** Lignin is the earliest fibre used in asphalt mastic, but it is prone to deformation and failure at high temperature and has poor long-term performance. Based on this, a comparative study of lignin fibre and basalt fibre at different temperatures, different dosage of asphalt mastic, through the cone penetration experiment, DSR experiments, bending beam rheological test to characterize the rheological properties of asphalt mastic, the results show that the two types of fibers can be distributed in asphalt mastic to form a three-dimensional network structure, After the addition of the fibres, the consistency of the asphalt mastic is increased due to the embedding effect of the fibres, and the shear strength is also increased accordingly. The complex modulus of basalt fibres is higher than that of lignin fibres, the phase angle is reduced, the strain hysteresis is reduced, the elasticity component is increased, the storage energy is greater, the loss energy is reduced, the permanent deformation is reduced and the rutting factor is higher, which shows better rheological performance. And the basalt fibre has a higher rate of change of strength, which shows a better blocking effect and force transmission, and a better low-temperature cracking resistance, but the low-temperature cracking resistance of the two types of fibres tends to be reduced after the fibre doping exceeds 3.9%. And the lignin fibre is more sensitive to temperature than the basalt fibre, with different trends at different temperatures. In summary, the basalt fibre showed better

\* 国家自然科学基金(51308064)

[作者简介] 张翔, 工程师, E-mail: 1277938108@qq.com

[收稿日期] 2025-08-12

rheological properties for asphalt mortar.

**Keywords:** highway; asphalt; lignin fibres; basalt fibres; rheological properties; tests

## 0 引言

沥青路面是我国高等级公路的主要结构形式,然而,随着交通量的持续增长和重载车辆比例增加,沥青路面易出现车辙、开裂等早期病害。在沥青混合料中掺入纤维可有效提高其高、低温性能,且施工工艺简单、无需特殊设备,故纤维在沥青路面中应用广泛。木质素纤维最早应用于沥青路面中,尤其是大量用于沥青玛蹄脂碎石(SMA)中。许庆祥等<sup>[1]</sup>采用木质素纤维和玄武岩纤维对SMA进行复合改性,研究发现当两者比例为1:1时的路用性能最佳。郭利杨等<sup>[2]</sup>研究了预加工的新型木质素纤维和木质素纤维+抗车辙剂对SMA的影响,发现木质素纤维+抗车辙剂可以提高其高、低温性能和水稳定性。吴金荣等<sup>[3]</sup>在探究盐对纤维增强混合料性能的影响时发现,不同类型的纤维改善效果存在显著差异。其中,掺加木质素纤维混合料的冻融劈裂强度不增反降,改善效果不理想,而掺加玄武岩纤维的混合料则表现出良好的抗冻融劈裂性能。王可等<sup>[4]</sup>从吸油率、分散效果等方面研究木质素纤维和玄武岩纤维在沥青混合料中的适应性,发现纤维在不同温度下的化学成分和形貌没有发生改变,可以很好地分散在混合料中。程从密等<sup>[5]</sup>研究发现木质素纤维对沥青胶浆的早期收缩较好,但长期收缩抑制能力较差。Yang等<sup>[6]</sup>通过间接拉伸试验研究粒状、絮状木质素纤维的性能,结果表明,颗粒状木质素纤维的沥青混合料弹性模量和抗拉强度均好于絮状。Lou等<sup>[7]</sup>发现纤维长度组合与沥青胶浆的性能密切相关,且复合纤维比单一纤维性能提升更好。任宪富等<sup>[8]</sup>通过动态剪切试验和弯曲梁试验研究木质素纤维、玄武岩纤维和聚酯纤维在不同比例下的流变性能,推荐出最优配合比。综上所述,木质素纤维对沥青混合料的短期力学性能有一定提升,但其长期耐久性改善作用有限,且在高温条件下易发生变形或降解,导致性能衰减。目前相关研究主要集中在纤维对混合料宏观性能的影响方面,而关于其在沥青胶浆尺度中的流变行为与作用机理尚待深入研究。为此,本文聚焦于沥青胶浆层面,系统对比研究木质素纤维与玄武岩纤维在不同掺量、不同温度条件下的流变性能,分析其高温稳定性、变形恢复能力及温度敏感性等关键指标,并进一步探讨2种纤维在沥青体系中的作用机理与性能表现差异。

## 1 原材料

沥青采用SBS改性沥青,矿粉采用石灰岩矿粉,玄武岩纤维和木质素纤维的各项技术指标如表1所示。

表1 2种纤维的技术指标

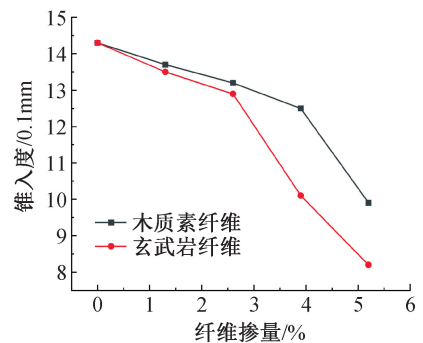
纤维名称	检验项目	技术要求	测试结果
玄武岩纤维	纤维直径/ $\mu\text{m}$	—	15
	纤维长度/mm	—	6
	断裂强度/MPa	$\geq 1\ 200$	1 290
	弹性模量/MPa	$\geq 7\ 500$	65 200
	断裂伸长率/%	$\leq 3.1$	2.58
木质素纤维	纤维长度/mm	$\leq 6$	2.6
	灰分含量/%	13~23	21.3
	pH值	6.5~8.5	7.2
	吸油率/%	5~9	8.4

## 2 纤维沥青胶浆测试

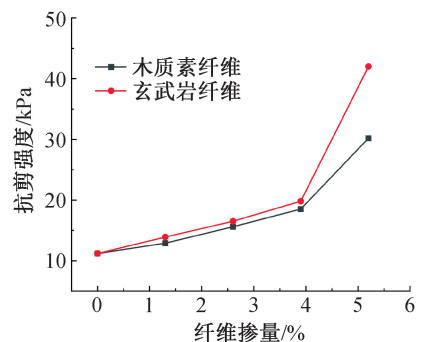
本研究依据以往研究成果,粉胶比取1.6,纤维掺量分别设为0, 1.3%, 2.6%, 3.9%, 5.2%,以制备相应的纤维沥青胶浆。

### 2.1 锥入度试验

不同纤维沥青胶浆锥入度和抗剪强度与纤维掺量的关系如图1所示。



a 锥入度与纤维掺量的关系曲线



b 抗剪强度与纤维掺量的关系曲线

图1 纤维沥青胶浆锥入度和抗剪强度与纤维掺量的关系  
Fig. 1 Relationship between fibre asphalt mastic cone penetration and shear strength and fibre dosage

由图1可知,2种纤维沥青胶浆的锥入度均随掺量的增大而降低,但其抗剪强度提高,这是因为纤维可以在沥青胶浆中形成三维网状结构,且纤维通常可以与沥青中的轻质组分相互融合<sup>[9]</sup>,沥青胶浆稠度降低。但在相同掺量下,玄武岩纤维的锥入度比木质素纤维更小,木质素空隙较多,可以较好地吸附沥青,但其模量很低,而玄武岩纤维模量较大,表面有较多凸起,对沥青胶浆的加筋效果更显著<sup>[10]</sup>。

沥青胶浆的抗剪强度随着纤维掺量增加而提高,且玄武岩纤维沥青胶浆的抗剪强度高于木质素纤维沥青胶浆。这主要与纤维本身力学性能有关,玄武岩纤维的断裂强度和弹性模量远高于木质素纤维,而在掺量超过3.9%后,抗剪强度显著提高,分析原因为玄武岩纤维为光滑的圆柱状,而木质素纤维为分支较多的纤维,在掺量较小的情况下,两者对沥青胶浆的嵌合作用差距较小,从而使得抗剪强度差距也较小,而掺量超过3.9%后,玄武岩纤维在沥青胶浆随机充填,弹性模量更大,在沥青胶浆中可以构成完整三维结构,从而使得力学强度得到很好的释放<sup>[11]</sup>。

## 2.2 动态剪切流变试验

沥青在高温下通常表现出更多的黏性特征,选取58,64,70,76和82℃研究沥青胶浆的高温流变性能。试样直径25mm、厚1mm,测试频率为10rad/s。

### 1) 复数模量 $G^*$

在纤维掺量为2.6%时的复数模量随温度的变化趋势如图2所示,同一温度下复数模量随掺量的变化如图3所示。

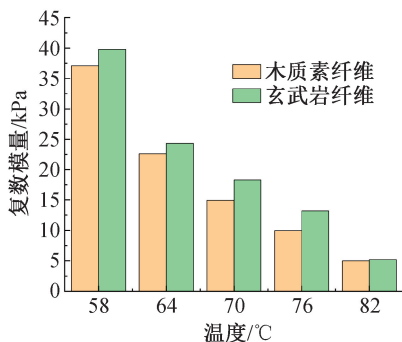


图2 温度对纤维沥青胶浆复数模量的影响

Fig.2 Effect of temperature on the complex modulus of fibrous asphalt mortars

由图2可知,随着温度升高,2种纤维沥青胶浆的复数模量均表现出下降趋势,这主要是因为沥青是典型的黏弹性材料,具有很强的温度敏感性,在

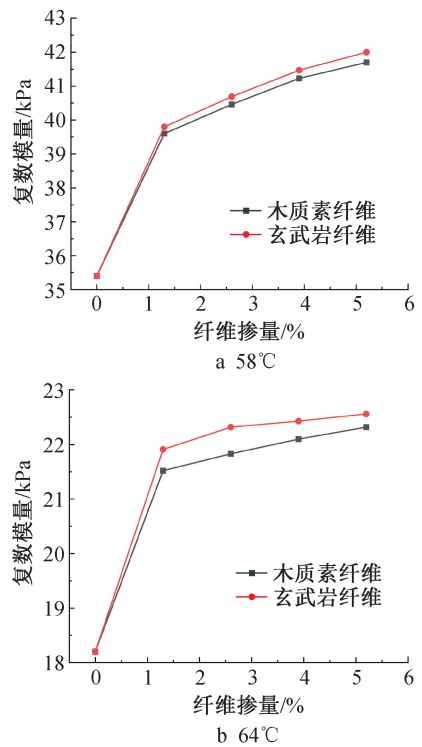


图3 纤维掺量对纤维沥青胶浆复数模量的影响

Fig.3 Effect of fibre dosage on the complex modulus of fibrous asphalt mortars

低温时弹性组分占比高,以弹性为主,在高温时黏性组分占比高,以黏性为主。玄武岩纤维沥青胶浆的复数模量比木质素纤维沥青胶浆高,且随着温度升高,这种提升速率有降低的趋势,这是因为在高温条件下,沥青变软,流动性增大,自由沥青增多,沥青性能对胶浆的影响最大,这时纤维对沥青胶浆性能的影响较小。

由图3可知,在相同温度下,随着纤维掺量逐渐增多,沥青胶浆的复数模量逐渐提高,表明玄武岩纤维和木质素纤维对沥青都有较好的相容性,对沥青有较好的嵌合作用,且玄武岩纤维在掺2.6%后,复数模量增量有所减缓,这是因为当纤维掺量较多时可能会出现结团现象,反而对沥青胶浆的加筋效果起相反的作用。

### 2) 相位角 $\delta$ (纤维掺量2.6%下)

在纤维掺量为2.6%时,相位角随温度变化趋势如图4所示。相同温度下,相位角随纤维掺量的变化如图5所示。

由图4可知,2种纤维沥青胶浆的相位角随着温度的升高而升高,这是因为随着温度升高,沥青的黏度上升,使应变滞后,这种应变滞后性将导致蠕变增大,更易产生永久变形,这也是车辙越容易在高温下产生的原因。

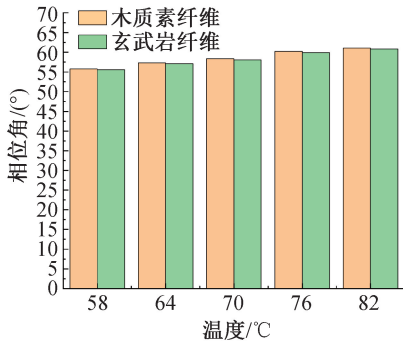


图4 温度对纤维沥青胶浆相位角的影响

Fig. 4 Effect of temperature on the phase angle of fibre asphalt mastics

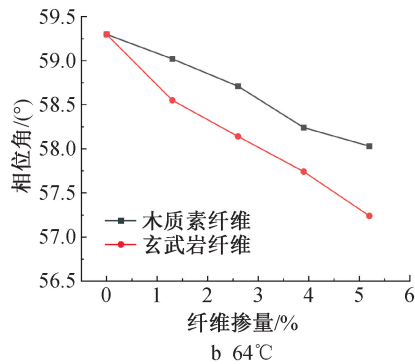
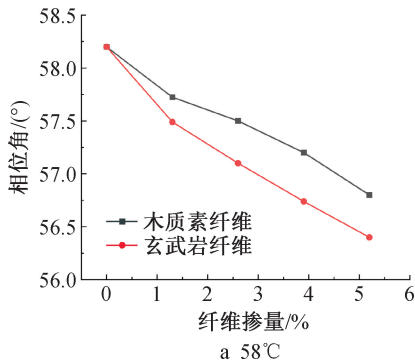


图5 纤维掺量对纤维沥青胶浆相位角的影响

Fig. 5 Effect of fibre dosage on phase angle of fibrous asphalt mortar

由图5可知,温度一定下,沥青胶浆的相位角随着纤维掺量的增大而减小,使得沥青的耗散能减小,存储能更大,这将提高高温稳定性能,且玄武岩纤维的相位角小于木质素纤维,表明玄武岩纤维沥青胶浆的弹性更多,恢复变形的能力更优,永久变形也相对减小,与玄武岩纤维的弹性模量表现更大、沥青胶浆的相容性有等很大关联。

### 3) 车辙因子 $G^*/\sin\delta$

车辙因子与沥青的高温稳定性有关,车辙因子越大,高温稳定性能表现越好。车辙因子随温度变化如图6所示,车辙因子随纤维掺量的变化趋势如图7所示。

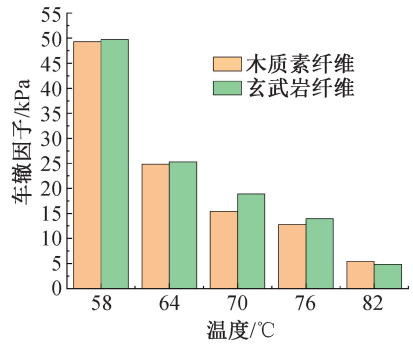


图6 温度对纤维沥青胶浆车辙因子的影响

Fig. 6 Effect of temperature on the rutting factor of fibrous asphalt mortar

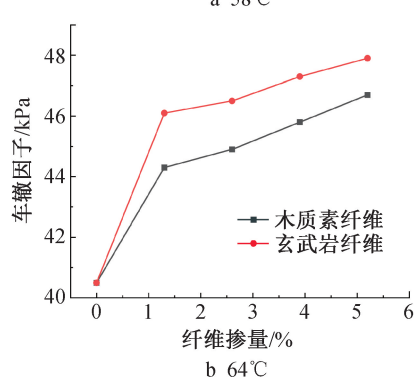
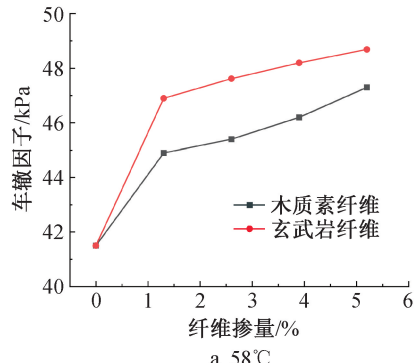


图7 纤维掺量对纤维沥青胶浆车辙因子的影响

Fig. 7 Effect of fibre dosing on the rutting factor of fibrous asphalt mortar

由图6可知,2种纤维掺量均在2.6%情况下,随着温度升高,纤维沥青胶浆的车辙因子均降低,高温稳定性降低,与相位角所分析的相同。

由图7可知,相同温度下,随着纤维掺量增多,车辙因子表现出升高的趋势,这主要是因为纤维对沥青有良好的加筋效果,使得沥青胶浆的力学性能得到更好的发挥,变形恢复能力增强,且玄武岩纤维的车辙因子高于木质素纤维,从而表现出更好的高温稳定性,永久变形减小。

### 2.3 弯曲梁流变试验

为了研究沥青胶浆的低温性能,通过美国SHARP计划研发的弯曲梁流变试验,通过劲度模量

和蠕变速率表征沥青胶浆的低温性能。选取 0, -6, -12℃ 进行试验。劲度模量(纤维掺量 2.6% 下)随温度和纤维掺量的变化如图 8, 9 所示。

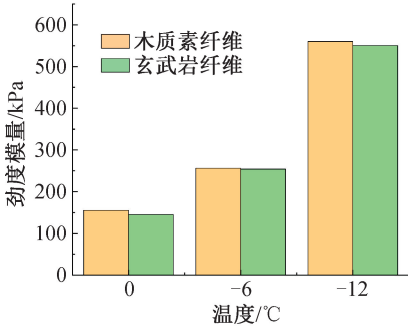


图 8 温度对纤维沥青胶浆劲度模量的影响  
Fig. 8 Effect of temperature on the modulus of strength of fibrous asphalt mortars

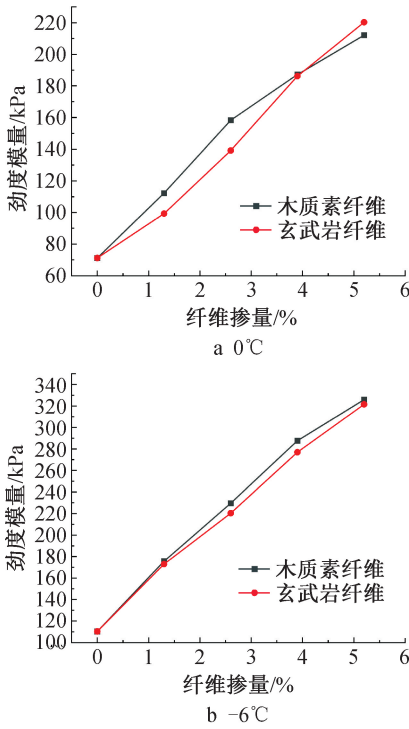


图 9 纤维掺量对纤维沥青胶浆劲度模量的影响  
Fig. 9 Effect of fibre dosage on the modulus of strength of fibrous asphalt mastics

由图 8 可知,当纤维掺量相同时,劲度模量随温度降低而提高,表明沥青胶浆越脆,低温抗裂性越差,由此得知沥青是对温度特别敏感的材料。玄武岩纤维沥青胶浆的劲度模量小于木质素纤维沥青胶浆,这是因为玄武岩纤维的最大弯拉强度要高于木质素纤维,且玄武岩纤维对沥青的吸附作用稍好于木质素纤维,从而引起断裂强度要优于木质素纤维沥青胶浆。但当超过 -12℃ 后,2 种纤维的劲度模量都超过 SHRP 计划中的要求(劲度模量 <

300MPa)。由图 9 可知,当温度相同时,劲度模量随纤维加入量不断增大,但最大弯曲应力增大,从而导致沥青胶浆的低温抗裂性提高,因此在评价沥青胶浆的低温性能时,需要从多方面进行评价,单一评价因素可能出现矛盾的现象,且当纤维掺量超过 3.9% 时,劲度模量超过 300MPa,不满足沥青胶浆低温稳定性能的要求,因此,推荐纤维掺量保持在 3.9% 以下。

温度和纤维掺量对纤维沥青胶浆劲度变化率的影响如图 10, 11 所示。

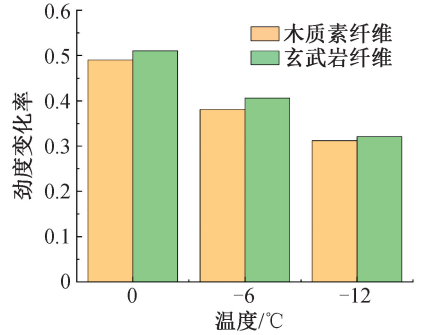


图 10 温度对纤维沥青胶浆劲度变化率的影响  
Fig. 10 Effect of temperature on the rate of change of strength of fibrous asphalt mortar

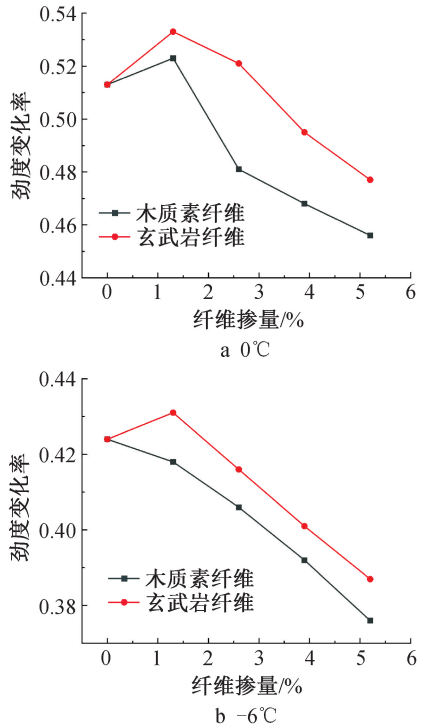


图 11 纤维掺量对纤维沥青胶浆劲度变化率的影响  
Fig. 11 Effect of fibre dosage on the rate of change of strength of fibrous asphalt mastics

由图 10 可知,2 种纤维掺量均在 2.6% 时,随着温度降低,纤维沥青胶浆的劲度变化率均表现出降

低的趋势,但在 $-10^{\circ}\text{C}$ 时超过规定值( $>0.3$ ),玄武岩纤维沥青胶浆的劲度变化率高于木质素纤维沥青胶浆,这主要是因为木质素通过自身空隙吸附沥青,而在低温这种吸附能力降低,玄武岩纤维为通过增黏作用来提高嵌合作用从而使得沥青胶浆内部应力消散加快,从而使得低温抗裂性更优。

由图 11 可知,随着纤维掺量的逐渐增多,沥青胶浆的劲度变化率表现为先增大后减小的趋势,这是因为掺入纤维后,纤维对沥青胶浆有良好的阻滞裂缝发展和传力应力的作用,它通常会引起低温性能提高,而随着纤维掺量增多,纤维更容易结团,相容性变差,从而使得低温抗裂性能降低,在 $0^{\circ}\text{C}$ 和 $-6^{\circ}\text{C}$ 下,沥青胶浆的劲度变化率表现出不同的变化趋势,在 $0^{\circ}\text{C}$ 下表现为先增大后减小的趋势,而在 $-6^{\circ}\text{C}$ 下,随着纤维掺量增大而降低,说明木质素纤维沥青胶浆对温度更敏感。

### 3 结语

1) 木质素纤维与玄武岩纤维均能在沥青胶浆中形成三维网状结构,提高沥青胶浆的稠度和抗剪强度。

2) 玄武岩纤维沥青胶浆的复数模量高于木质素纤维沥青胶浆,相位角却相反,玄武岩纤维沥青胶浆的弹性高于木质素纤维,应变滞后减小,表现出更好的高温流变性能。

3) 掺入 2 种纤维后,车辙因子均提高,沥青胶浆的储存能提高,损耗能降低,弹性恢复增多,抗永久变形能力显著提高。

4) 掺入 2 种纤维后,由于纤维对裂缝的阻滞作用和应力传递作用,使得低温开裂性能得到提升,但当纤维掺量超过 3.9%时将不再满足劲度模量的要求。

5) 木质素纤维在沥青胶浆中对温度更敏感,在不同温度下劲度变化率随着纤维掺量的增大表现出不同的变化趋势。

### 参考文献:

[ 1 ] 许庆祥,刘朝晖,柳力,等.玄武岩纤维与木质素纤维复合 SMA 路用性能试验研究[J].公路与汽运,2017(2):88-92.  
XU Q X, LIU Z H, LIU L, et al. Experimental study on road performance of basalt fiber and lignin fiber composite SMA[J]. Highways & automotive applications, 2017(2):88-92.

[ 2 ] 郭利杨,徐世法,柴林林,等.新型木质素纤维及抗车辙剂对 SMA 沥青混合料的性能影响评价[J].公路,2017,62(3):224-228.  
GUO L Y, XU S F, CHAI L L, et al. Evaluation on the performance of SMA with new fiber and rutting resistant agent [J]. Highway, 2017, 62(3):224-228.

[ 3 ] 吴金荣,宋风宁,纪方利.盐分对纤维沥青混合料水稳定性的影响[J].硅酸盐通报,2019,38(5):1609-1613.  
WU J R, SONG F N, JI F L. Effect of salts on water stability of fiber-reinforced asphalt mixture [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2019, 38(5):1609-1613.

[ 4 ] 王可,姚立阳,马勤,等.纤维在沥青混合料中应用的适应性研究[J].公路,2017,62(5):44-46.  
WANG K, YAO L Y, MA Q, et al. Research on adaptability of fibers to asphalt mixture [J]. Highway, 2017, 62(5):44-46.

[ 5 ] 程从密,何健辉,何娟,等.纤维类型对砂浆收缩性能的影响[J].玻璃钢/复合材料,2019(12):77-82.  
CHENG C M, HE J H, HE J, et al. The effect of fiber type on the shrinkage of mortar [J]. Fiber reinforced plastics/composites, 2019(12):77-82.

[ 6 ] YANG S Y, ZHOU Z G, LI K, et al. Influence of fiber type and dosage on tensile property of asphalt mixture using direct tensile test[J]. Materials, 2023, 16(2):822.

[ 7 ] LOU K K, XIAO P, KANG A H, et al. Performance evaluation and adaptability optimization of hot mix asphalt reinforced by mixed lengths basalt fibers [J]. Construction and building materials, 2021, 292:123373.

[ 8 ] 任宪富,曹卫东,姜术荣,等.复合纤维沥青胶浆优化设计与性能[J].公路工程,2024,49(5):140-145.  
REN X F, CAO W D, LOU S R, et al. Optimal design and performance of composite fiber asphalt mortar [J]. Highway engineering, 2024, 49(5):140-145.

[ 9 ] 陶勇.基于表面改性的玉米秸秆纤维沥青胶浆性能研究[D].合肥:合肥大学,2023.  
TAO Y. Study on the performance of corn straw fibre asphalt mastic based on surface modification [D]. Hefei: Hefei University, 2023.

[ 10 ] 吕鹏磊,王子照,王志文,等.木质素与玄武岩纤维沥青胶浆路用性能试验[J].路基工程,2022(4):39-44.  
LÜ P L, WANG Z Z, WANG Z W, et al. Experimental study on road performance of wood and basalt fiber asphalt mortar [J]. Subgrade engineering, 2022(4):39-44.

[ 11 ] 吴林松,王旭洋,许泽宁,等.玄武岩纤维沥青胶浆抗剪性能研究[J].公路交通科技,2023,40(6):17-24.  
WU L S, WANG X Y, XU Z N, et al. Study on shear properties of asphalt mortar with basalt fiber [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2023, 40(6):17-24.