

【土木工程 / Architecture and Civil Engineering】

# 表面预处理PVA纤维改性沥青的高温流变特性

张伟<sup>1</sup>, 张钊<sup>2</sup>, 曹晖<sup>3</sup>, 颀俊杰<sup>1</sup>, 徐华鑫<sup>1</sup>, 牛冬瑜<sup>2</sup>

1) 甘肃路桥建设集团有限公司, 甘肃兰州 730030; 2) 长安大学材料科学与工程学院, 陕西西安 710061;  
3) 甘肃省公路交通建设集团有限公司, 甘肃兰州 730030

**摘要:** 为改善聚乙烯醇 (polyvinyl alcohol, PVA) 纤维与沥青的相容性, 采用KH-570硅烷偶联剂对PVA纤维进行了表面预处理, 并通过接触角、旋转黏度、温度扫描、多重应力蠕变 (multiple stress creep and recovery, MSCR) 和线性振幅扫描 (linear amplitude sweep, LAS) 等试验, 对比研究了不同掺量下原样PVA纤维(T)改性沥青和表面处理后的PVA纤维(ST)改性沥青的相容性及高温流变性能, 以此评价表面处理工艺对于PVA纤维改性沥青流变性能的影响. 结果表明, 表面处理工艺增大了沥青和PVA纤维的相容性; 相同掺量下, 相较于T, ST的增黏效果、抗车辙性能以及抗永久变形能力更优, 在较低应变水平下可提高沥青的疲劳寿命, 但在高应力水平重复荷载作用下, T和ST对于沥青的蠕变变形能力和疲劳寿命均没有明显改善. 所采用的表面预处理工艺可有效提高胶结料整体的储存稳定性、黏度和高温抗变形能力, 研究结果为PVA纤维改性沥青的制备及应用提供了参考.

**关键词:** 道路工程; 改性沥青; 聚乙烯醇; 纤维; 流变性能; 表面预处理

中图分类号: U414 文献标志码: A doi: 10.3724/SP.J.1249.2022.04409

## High temperature rheological properties of surface pretreated PVA fiber modified asphalt

ZHANG Wei<sup>1</sup>, ZHANG Zhao<sup>2</sup>, CAO Hui<sup>3</sup>, XIE Junjie<sup>1</sup>,  
XU Huaxin<sup>1</sup>, and NIU Dongyu<sup>2</sup>

1) Gansu road and Bridge Construction Group Co. Ltd., Lanzhou 730030, Gansu Province, P. R. China

2) School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi Province, P. R. China

3) Gansu Highway Traffic Construction Group Co. Ltd., Lanzhou 730030, Gansu Province, P. R. China

**Abstract:** In order to improve the compatibility of polyvinyl alcohol (PVA) fiber and asphalt in application of asphalt pavement, the surface of PVA fiber is pretreated with KH-570 silane coupling agent. The tests such as contact angle, rotational viscosity, temperature scanning, multiple stress creep and recovery (MSCR) and the linear amplitude sweep (LAS) are conducted to study the compatibility and high temperature rheological properties of original PVA fiber (T) and surface treated PVA fiber (ST) modified asphalts with different contents, so as to evaluate the effect of surface modification process on the rheological properties of PVA fiber modified asphalt. The results show that the surface treatment process improves the compatibility of asphalt and PVA fiber. Compared with T, ST has better viscosity increasing effect, rutting resistance, and permanent deformation resistance at the same content,

**Received:** 2021-06-08; **Revised:** 2022-03-22; **Accepted:** 2022-04-25; **Online (CNKI):** 2022-06-25

**Foundation:** National Key Research and Development Program of China (2016YFB0303103); Science and Technology Project of Transportation Department of Gansu Province (2020-05); Research and Development Center of Transport Industry of Technologies, Materials and Equipments of Highway Construction and Maintenance (GLKF201812); Shaanxi Housing and Urban-Rural Development Science and Technology Project (2020-K11)

**Corresponding author:** Associate professor NIU Dongyu. E-mail: dongyu.niu@chd.edu.cn

**Citation:** ZHANG Wei, ZHANG Zhao, CAO Hui, et al. High temperature rheological properties of surface pretreated PVA fiber modified asphalt [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2022, 39(4): 409-416. (in Chinese)



and can slightly improve the fatigue resistance of asphalt at the lower strain level. However, T and ST have no obvious improvement on creep deformation ability and fatigue life of asphalt at high stress level under repeated load. The surface pretreatment process can effectively improve the storage stability, viscosity and high temperature deformation resistance of the binder and the results provide reference for the preparation and application of PVA fiber modified asphalt.

**Key words:** road engineering; modified asphalt; polyvinyl alcohol; fiber; rheological properties; surface pretreatment

沥青材料因有较高的温度敏感性及较差的环境耐受性,严重影响着路面的服役寿命,将纤维作为改性剂和增强剂引入沥青结构体系中,可有效提升路面的抗裂性和稳定性.很多学者采用无机、有机及植物纤维类改性剂改善路面损坏现状<sup>[1-3]</sup>.CHEN等<sup>[4]</sup>利用玉米秸秆纤维对沥青进行改性,提高了沥青结合料的低温蠕变速率,降低了裂缝出现的可能性.SU等<sup>[5]</sup>采用多巴胺自聚合和胺化石墨烯共价接枝聚丙烯腈(polyacrylonitrile, PAN)纤维改性沥青,提高了沥青胶浆的力学性能和耐水性.RAHMAN等<sup>[6]</sup>发现掺加质量分数为0.2%~0.3%的炭黑纤维,使沥青黏度显著提升,且有效改善了沥青胶浆的流变性能.李立顶等<sup>[7]</sup>提出玄武岩纤维可较好地改善沥青的流变性能指标.

作为聚合物纤维之一的聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)纤维,具有高强度、高模量以及与无机非金属材料具有良好亲和力的特点,已被广泛应用于混凝土路面材料的研究中<sup>[8-11]</sup>.就沥青路面而言,采用PAV纤维作为改性材料可节约生产成本,减少沥青路面开裂,显著降低路面养护费用.然而鲜有研究人员将PVA纤维作为改性剂应用于沥青胶浆中,主要原因在于PVA纤维与沥青胶黏剂具有较差的相容性和黏附性,难以形成稳定的胶黏体系.因此,能否通过对PVA纤维表面进行处理提高其与沥青的相容性,使其广泛应用于沥青路面之中,值得深入研究.目前对于纤维的表面处理工艺已有大量研究.XING等<sup>[12]</sup>发现采用芳纶纤维改性沥青,可以增强与沥青的黏结效果,增大结合料黏度.XIANG等<sup>[13]</sup>提出氨基官能团硅烷可以使玄武岩纤维与沥青产生化学结合作用,进而使沥青力学性能整体提高.BRUGNAGO等<sup>[14]</sup>对蒸汽爆破和碱洗后的蔗渣纤维进行了表征,结果表明纤维的热稳定性和吸水率得到了改善.解英等<sup>[15]</sup>总结了碱液及表面胶结改性等工艺的现状及其问题.但仍缺乏针对PVA纤维应用于沥青的表面改性方法.鉴于此,本研究选取适用于增强PVA纤维和沥青相容性的表面处理工艺,并借助接触角测量仪、布氏旋转黏度

计和动态剪切流变(dynamic shear rheology, DSR)设备,对比研究不同掺量以及表面处理工艺对PVA改性沥青稳定性及流变性能的影响,并评价经表面处理的PVA纤维改性沥青的改性效果,确定纤维的合理掺量,为PVA纤维改性剂应用于沥青路面材料提供参考.

## 1 原材料及试验方法

### 1.1 原材料

基质沥青(base asphalt, BA)为SK70#道路石油沥青,技术参数见表1,薄膜烘箱测试(thin film oven test, TFOT)的技术参数见表2.纤维选用上海臣启化工科技有限公司生产的PVA纤维(长度为6 mm),性能指标如表3.表面处理剂选用去离子水、KH-570硅烷偶联剂以及无水乙醇(分析纯).

表1 基质沥青技术参数

Table 1 Technical parameters of base asphalt

试验指标	实测值	技术要求	参考标准
25 °C时针入度 × 10/mm	67	60 ~ 80	T 0604—2011
软化点/°C	52.5	≥ 46	T 0606—2011
15 °C时延度	> 100	≥ 100	T 0605—2011
15 °C时密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.037	实测记录	T 0603—2011
135 °C时运动黏度/(Pa·s)	2.608	≤ 3	T 0619—2011

表2 薄膜烘箱测试的技术参数

Table 2 Technical parameters of thin film oven test

试验指标	实测值	技术要求	试验标准
质量损失/%	-0.504	-0.8 ~ 0.8	T 0610—2011
针入度比/%	72	≥ 61	T 0604—2011
15 °C时残留延度/cm	20	≥ 15	T 0605—2011

### 1.2 PVA纤维的表面处理及改性沥青的制备

经前期试验探索,本研究选定的表面处理工艺为:①按照无水乙醇和去离子水的质量比3:7制得

表3 PVA纤维技术指标

Table 3 Technical index of PVA fiber

指标	数值
抗拉强度/MPa	1 400 ~ 1 500
干断裂深度/%	17 ± 3.0
弹性模量/GPa	35 ~ 39
水中软化点/℃	114
线密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	0.91
耐碱性/%	98 ~ 100

溶解液,然后掺加2%(乙醇质量分数)的偶联剂,搅拌混匀后静置30 min,使硅烷偶联剂完全水解;  
②将PVA纤维加入步骤①的溶液中,浸泡90 min;  
③浸泡后过滤出PVA纤维,在80℃恒温干燥箱中烘干3 h.

分别选取基质沥青质量分数为1.0%、1.5%和2.0%的原样PVA纤维(T)和经表面处理工艺改性后的PVA纤维(ST)制备6种改性沥青.改性工艺为:将基质沥青材料预热至160℃,掺加PVA纤维并在短时间内温度上升到165℃.最后在165℃的温度下以较低速率(2 000 r/min)剪切30 min,使PVA纤维完全分散.

### 1.3 试验方法及评价指标

采用外形图像分析方法分别测量处理前后PVA纤维和沥青的接触角,并以黏附功评价处理工艺对于纤维改性剂和沥青相容性的改善效果.通过布氏黏度计得到PVA纤维改性沥青110~160℃内的旋转黏度,以评价温度敏感性.基于动态剪切流变仪,采用温度扫描、多重应力蠕变回复(multiple stress creep and recovery, MSCR)和线性振幅扫描(linear amplitude sweep, LAS)试验,评价不同纤维含量下表面处理工艺对于PVA纤维改性沥青流变性能的影响.

## 2 结果与讨论

### 2.1 接触角测量

根据表面能理论<sup>[16]</sup>,任何物质都趋向于达到自身能量最低的状态.就沥青和集料体系而言,集料由于表面力场的存在会自发吸引沥青从而降低表面能,形成稳定的体系,应用此理论可采用黏附功评价两者的黏附性.对于PVA纤维和沥青体系,由于PVA纤维具有同样的黏附效应,因此可采用相同的黏附功计算方法近似处理.

依据Young方程和表面能理论,可根据式(1)和式(2)计算基质沥青(BA)和PVA纤维的黏附功:

$$\frac{1 + \cos \theta}{2} \frac{\gamma_1}{\sqrt{\gamma_1^d}} = \sqrt{\gamma_s^p} \sqrt{\frac{\gamma_1^p}{\gamma_1^d}} + \sqrt{\gamma_s^d} \quad (1)$$

$$W_{sl} = \gamma_1^* (\cos \theta^* + 1) \quad (2)$$

其中, $\gamma_1$ 为标准液的表面能; $\gamma_1^d$ 和 $\gamma_1^p$ 分别为标准液表面自由能的色散分量和极性分量; $\gamma_s^d$ 和 $\gamma_s^p$ 分别为沥青表面自由能的色散分量和极性分量; $\theta$ 为沥青和标准液的接触角; $W_{sl}$ 为沥青与纤维的黏附功; $\gamma_1^*$ 为沥青的表面能; $\theta^*$ 为沥青和纤维的接触角.

沥青和标准液的接触角测量结果如图1,通过式(1)可得沥青和标准液的表面能.其中,标准液中水的色散分量为21.8 mJ/m<sup>2</sup>,极性分量为51.0 mJ/m<sup>2</sup>,表面能为72.8 mJ/m<sup>2</sup>;标准液中丙三醇的色散分量为34.0 mJ/m<sup>2</sup>,极性分量为30.0 mJ/m<sup>2</sup>,表面能为64.0 mJ/m<sup>2</sup>;沥青的色散分量为22.9 mJ/m<sup>2</sup>,极性分量为1.2 mJ/m<sup>2</sup>,表面能为24.1 mJ/m<sup>2</sup>.

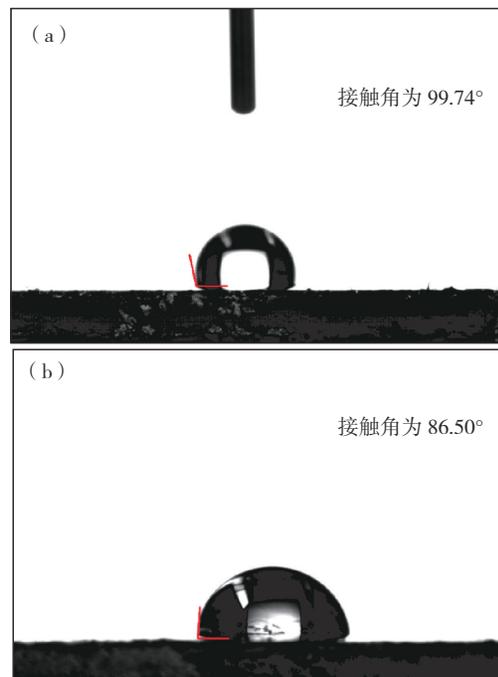


图1 沥青和标准液的接触角 (a) 沥青-水界面接触角;  
(b) 沥青-丙三醇界面接触角

Fig. 1 Contact angles (CA) of (a) asphalt-water and  
(b) asphalt-glycerol.

根据沥青与原样纤维和经表面处理纤维的接触角测试结果(图2),表面改性前后PVA纤维与沥青液滴的接触角均大于90°,表明沥青对PVA纤维不润湿,但对比两者的接触角,经表面处理的PVA纤维与沥青的接触角较原样纤维降低了10°左右.

根据式(2)计算了表面处理前后纤维与沥青的黏附功,分别为  $15.3 \text{ mJ/m}^2$  和  $19.7 \text{ mJ/m}^2$ , 即表面处理工艺明显提高了沥青和纤维两者的相容性. 这是因为硅烷偶联剂 KH-570 的 Y 基团与聚乙烯醇中活性氢发生了酰化反应, 改善了 PVA 表面与沥青的黏结性. 由此可知, PVA 表面改性可有效提高沥青的黏附性.

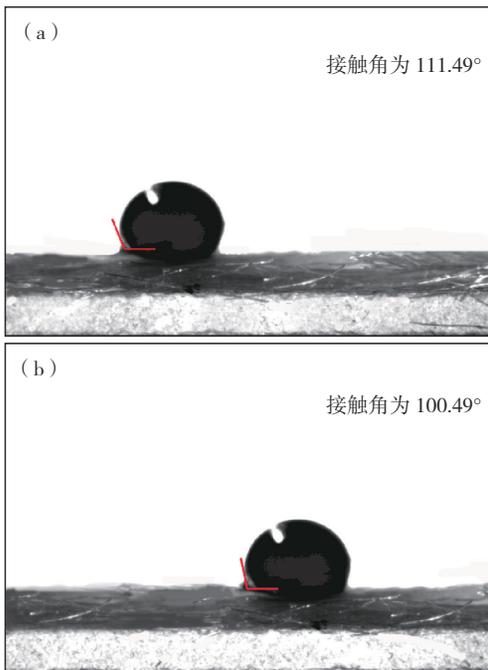


图2 沥青和表面处理前后 PVA 纤维的接触角 (a) 沥青-原样 PVA; (b) 沥青-表面处理 PVA

Fig. 2 Contact angles (CA) between asphalt and PVA fibers (a) with or (b) without surface treating.

## 2.2 旋转黏度测量

为了对比研究表面处理前后 PVA 纤维对基质沥青抵抗剪切变形流动能力的影响, 通过布氏旋转黏度计测量了转子转速为  $20 \text{ r/min}$ 、温度分别为  $110$ 、 $120$ 、 $135$ 、 $150$  和  $160 \text{ }^\circ\text{C}$  时基质沥青和不同质量分数 PVA 纤维改性沥青的旋转黏度 ( $\eta$ ), 并得到对应的黏温曲线, 如图 3. 由图 3 可见, 各类型胶结料的黏度在  $110\sim 160 \text{ }^\circ\text{C}$  内均表现为非线性衰减趋势, 同一温度下, 各质量分数纤维改性沥青和基质沥青的布氏黏度展现出较大的差异性. 在所选温度区间内, 相较于 BA, T 和 ST 均具有更高的黏度, 这表明 PVA 纤维的加入起到了明显的增黏效果. 此外, 对比两种不同的 PVA 纤维改性沥青黏度结果可以看出, 相同质量分数下 ST 的黏度高于 T 的黏度, 且两者黏度的差异性随掺量的增加而变大, 即 PVA 纤维经表面处理增黏效果更为显著, 这是由

于 PVA 纤维表面经改性后提高了与沥青的混溶程度, 使得两者的接触面积增大, 因此在外界剪切力的作用下对于沥青流动变形的阻碍效应变大, 而质量分数越高时这种阻碍作用越为明显, 导致黏结剂表现出较大的黏度. 另一方面, 沥青的黏度与其对应的混合料拌合温度相关, 因此根据黏温曲线可以得出相同质量分数下 ST 黏结剂的施工拌合温度高于 T 黏结剂, 通过降低 PVA 纤维含量可以有效降低沥青的允许拌合温度.

为更好在描述 T 和 ST 黏度 ( $\eta$ ) 与摄氏温度 ( $t$ ) 的数量关系, 采用半对数坐标系对图 3 中各曲线进行回归拟合, 结果如表 3. 在回归拟合模型中, 截距代表对应的黏度的大小, 而斜率的绝对值决定该沥青黏度对温度变化的耐受性大小. 根据表 3 的回归关系可以得出 ST-2.0% 的温度敏感性最小, 但总体而言各沥青的回归斜率值表现出较小的差异性, 即 T、ST 和 BA 的黏温敏感性大致相同.

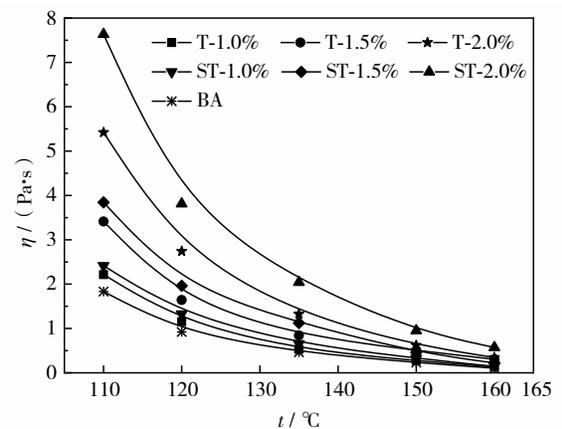


图3 不同沥青胶结料的黏温曲线

Fig. 3 Viscosity temperature curves of different asphalt binders.

表3 黏温曲线回归结果

沥青类型	回归关系	相关系数 $R^2$
T-1.0%	$\lg \eta = 2.917 - 0.024t$	0.992 5
T-1.5%	$\lg \eta = 2.663 - 0.024t$	0.980 3
T-2.0%	$\lg \eta = 3.264 - 0.023t$	0.986 6
ST-1.0%	$\lg \eta = 2.950 - 0.023t$	0.988 5
ST-1.5%	$\lg \eta = 3.187 - 0.024t$	0.986 7
ST-2.0%	$\lg \eta = 3.253 - 0.022t$	0.994 0
BA	$\lg \eta = 2.842 - 0.024t$	0.987 5

## 2.3 温度扫描

根据各 PVA 纤维改性沥青的线性黏弹区范围,

选定5%应变条件, 加载频率为10 Hz, 在40、46、52、58和64 °C对各试样进行温度扫描, 试验结果如图4至图6. 所有试样的复数剪切模量随温度的升高均表现出非线性下降的趋势, 同一温度下各质量分数的T和ST样品复数剪切模量均高于BA. 对于相同质量分数的T和ST, ST具有更高的复数剪切模量, 说明PVA纤维的添加可以显著增强沥青高温条件下的抗变形能力, 而经过表面改性后其与沥青间的胶结力增大, 使得沥青结合料整体的温度敏感性降低, 这与前述黏度试验结果一致.

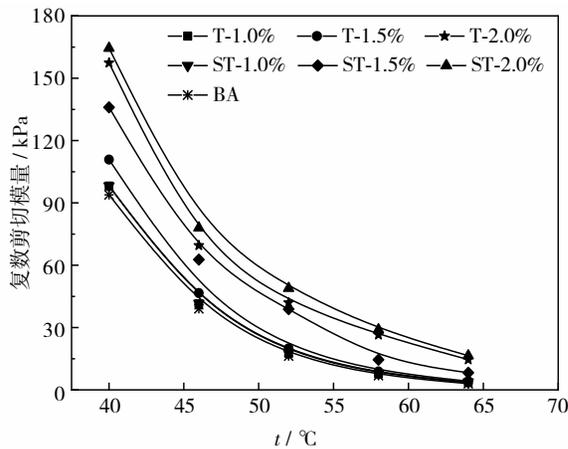


图4 复数剪切模量结果

Fig. 4 Complex shear modulus versus temperatures.

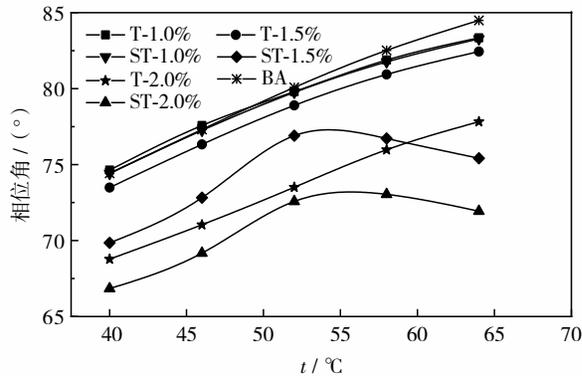


图5 相位角结果

Fig. 5 Phase angle versus temperatures.

由图5结果可知, 同样的剪切参数条件下, 各沥青样品的相位角变化趋势呈现出明显的差异, 对于BA和T, 相位角与温度表现出较好的正相关, 这与通常的黏结剂相位角结果一致, 即温度升高, 沥青逐渐转变为近似的牛顿流体, 从而展示出更为明显的流动特征, 因此剪切变形的滞后效应更大, 相位角增大. 而对于ST, 当表面处理PVA纤维质量分数为1%左右时, 相位角变化规律与BA和T一

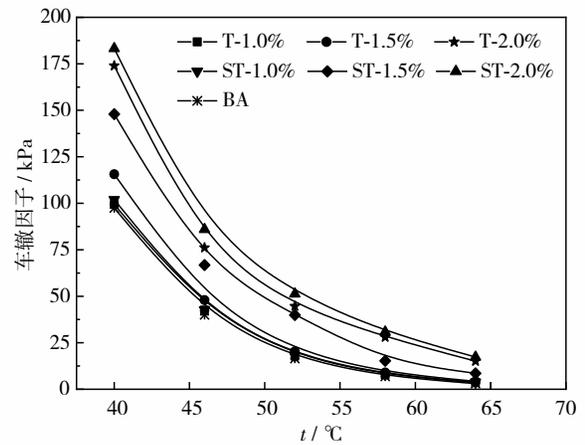


图6 车辙因子结果

Fig. 6 Rutting factor versus temperatures.

致, 但当质量分数为1.5%和2%时, 相位角表现为先上升后逐渐衰减的特点, 当温度在52~60 °C时相位角达到峰值. 这是由于表面处理PVA纤维与沥青的结合更为紧密, 当高温收到剪切力时, 纤维起到主要作用, 通过桥连效应增加了沥青分子间的摩擦力从而抑制了沥青的流动变形<sup>[17]</sup>.

图6采用车辙因子综合评价各试样的黏弹性特性及抗车辙性能. 由图6可见, 车辙因子在所选试验参数条件下的变化趋势与复数剪切模量相似, 即表现为非线性变化的负相关. 当T和TS中纤维的质量分数都在1%时, PVA对胶结料的高温流变性能提升不大, 但当纤维质量分数超过1.5%时, 胶结料整体具有较好的高温稳定性, 且ST对沥青结合料整体的抗车辙性能提升更为明显. 这是由于ST在沥青中的分布更为均匀, 容易形成致密的结构沥青层, 极大增强了抗剪切变形能力. 而当温度逐渐升高时, 沥青逐渐变为游离态, 纤维被弱化, 因此抗变形能力极具衰减, 车辙因子趋向于0.

### 2.4 MSCR 试验

根据AASHTO MP 19, 采用MSCR试验, 分别对旋转薄膜烘箱测试(rolling thin film oven test, RTFOT)后不同质量分数下两种PVA纤维改性沥青和基质沥青在64 °C下的不可回复蠕变柔量( $J_{nr}$ )、蠕变回复率( $R$ )及应力敏感性( $R_{diff}$ 和 $J_{nr-diff}$ )进行了分析, 结果如图7.

$R_{0.1}$ 和 $R_{3.2}$ 分别代表试样在0.1 kPa和3.2 kPa应力水平下加载1 s和卸载10 s过程中可回复应变与峰值应变的比值, 表征了样品的蠕变回复能力.  $J_{nr}$ 则表征了在此加载卸载过程中试样所产生的永久变形的大小. 从图8(a)和(b)可见, 在0.1 kPa和3.2

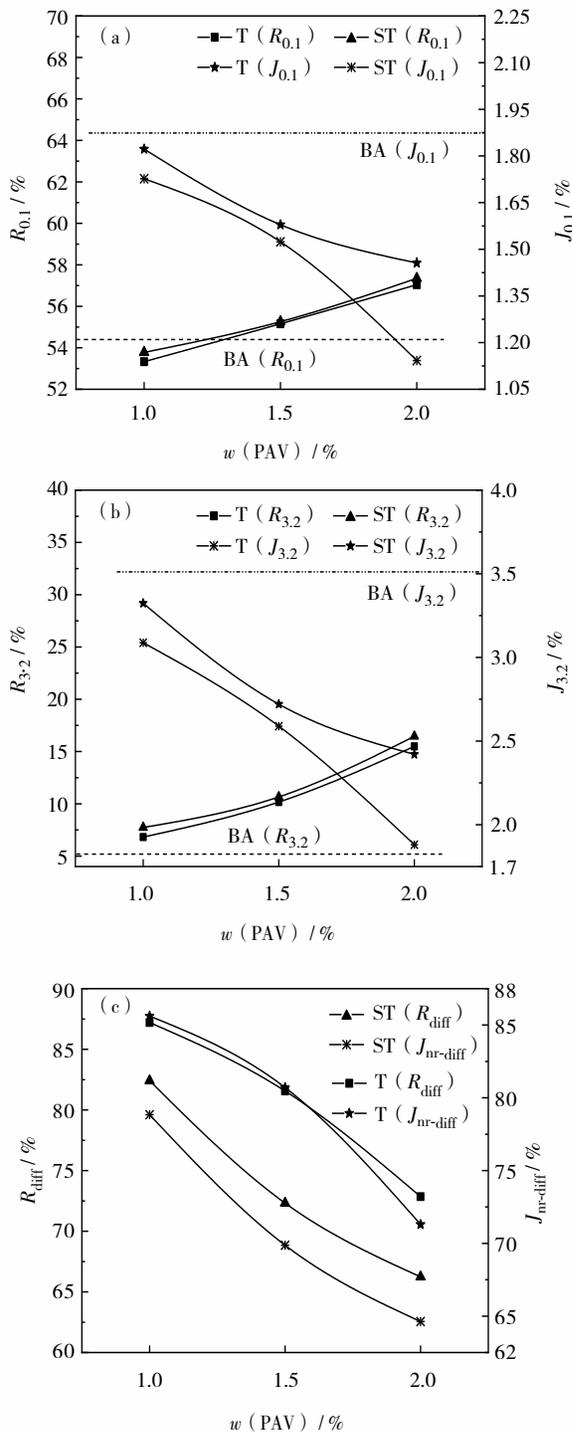


图7 MSCR 试验结果 (a) 0.1 kPa 荷载水平下  $R$  和  $J$  与 PAV 纤维质量分数的关系; (b) 3.2 kPa 荷载水平下  $R$  和  $J$  与 PAV 纤维质量分数的关系; (c) 应力敏感性随纤维质量分数的变化

Fig. 7 MSCR results. (a) Relationship between  $R$ ,  $J$  and PAV fiber mass fraction at 0.1 kPa load level, (b) relationship between  $R$ ,  $J$  and PAV fiber mass fraction at 3.2 kPa load level, and (c) variation of stress sensitivity with PAV fiber mass fraction.

kPa 应力水平下, 各 T 和 ST 试样的  $J_{nr}$  值随 PVA 质量分数的增加而逐渐衰减, 均小于 BA. 相较于 T, ST 试样具有更低的  $J_{nr}$  值. 这表明在 64 °C 的重复荷载条件下, PVA 纤维的存在能够抑制沥青不可回复形变的产生, 而 ST 由于与沥青更大的结合力使得沥青表面更容易形成致密的结构层, 因而表现出优异的抗车辙性能. 对于蠕变回复率来说, 尽管  $R_{0.1}$  和  $R_{3.2}$  与掺量均表现出较好的正相关, 但不同质量分数的 T 和 ST 试样在 0.1 kPa 和 3.2 kPa 表现出较大的差异性. 在 0.1 kPa 荷载条件下, PVA 质量分数为 1.0% 的 T 和 ST 的蠕变回复均小于 BA, 当 PVA 质量分数超过 1.5% 时, T 和 ST 逐渐表现出优于 BA 的蠕变能力, 而在 3.2 kPa 荷载条件时, 各掺量 T 和 ST 的可回复变形比例均高于 BA. 综合来看, 两种应力水平下  $R$  的浮动范围随掺量的提高都在 10% 以内, 即 PVA 纤维的加入对于沥青在高应力水平重复荷载作用下的蠕变变形能力没有明显改善.

图 8(c) 显示了各试样的应力敏感性指标  $R_{diff}$  和  $J_{nr-diff}$  与 PVA 掺量的关系曲线. 总体而言, PVA 纤维质量分数提高,  $R$  和  $J_{nr}$  的敏感性均有所降低. 经表面处理后 PVA 纤维改性沥青试样在应力变化的过程中有着更好的变形及回复稳定性. 此外, T 的  $J_{nr-diff}$  降低幅度更大, 而 ST 的  $R_{diff}$  和  $J_{nr-diff}$  随 PAV 质量分数的变化降低幅度相当. 根据 AASHTO MP 19 要求, SBS 改性沥青的应力敏感指标应不超过 75%. 相较而言, 原样纤维质量分数达到 2.0% 左右时可达 SBS 标准, 而经表面处理后 1.5% 的质量分数即可满足该要求, 表明经表面改性后与沥青结合的有效纤维含量增加, 提升了胶结料整体对循环应力载荷的抗性.

### 2.5 LAS 试验

为研究 T 和 ST 的耐疲劳性能, 对经压力老化箱 (pressurized aging vessel, PAV) 处理后的试样进行振幅扫描, 以识别沥青样品的损伤特征. 其中, 振荡剪切应变的振幅在 5 min 内从 0 线性增加到 10 Hz 下的 30%, 以此得到不同 T 和 ST 样品在线性增加的应变条件下所产生的应力大小变化. 结合 VECD 模型计算沥青疲劳方程 (3) 中的参数, 进而预测疲劳寿命为

$$N_f = A(\gamma_{max})^B \quad (3)$$

其中,  $N_f$  为疲劳寿命;  $\gamma_{max}$  为施加的振幅剪切应变;  $A$  和  $B$  为模型拟合系数. 在 2.5% 和 5.0% 应变条件下, 对 PVC 纤维改性沥青的疲劳寿命进行预测, 如

图8. 在2.5%应变条件下,相较于BA,各PVA含量的T改性沥青的疲劳寿命略有提高,但随PVA添加量的增多变化不大,而ST对于疲劳寿命的提升较大,PVA质量分数为1.5%和2.0%的ST改性沥青相较于BA,分别增加了约2 500和5 000. 在5%应变条件下,各胶结料试样的疲劳寿命均有大幅度下降,且PVA含量的提高对 $N_f$ 的增长表现不明显. 这表明对PVA纤维表面改性有利于提高沥青在线性振幅扫描中的抗疲劳性能,但这种提升作用在低应变水平下表现突出,在较高应变水平下T和ST改性沥青无显著差异.

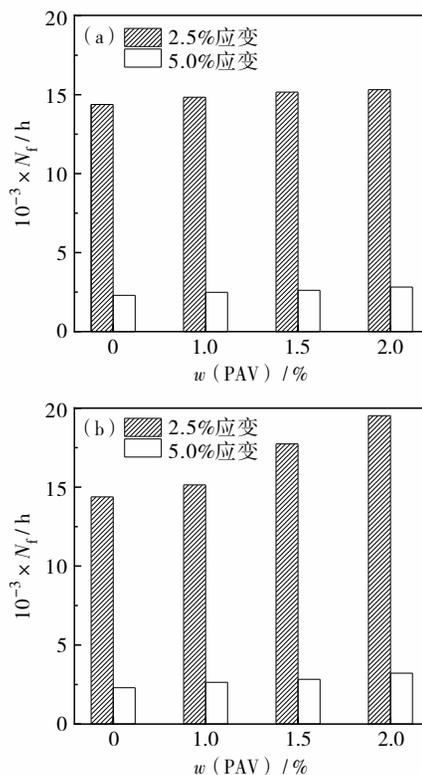


图8 疲劳寿命预测结果 (a)T; (b)ST

Fig. 8 Fatigue life prediction results of (a) T and (b) ST.

### 3 结论

综上所述可知:

1) 经表面处理的PVA纤维与沥青的接触角较原样纤维降低了 $10^\circ$ 左右,黏附功增大了 $4.4 \text{ mJ}/\text{m}^2$ ,即表面处理工艺提高了沥青和PVA纤维的相容性.

2) 掺杂PVA的浓度相同时,ST的黏度高于T,且两者黏度的差异性与PVA浓度的上升呈现正相关趋势,表明PVA纤维经表面处理后增黏效应更

加突出.

3) 随温度的递增,沥青试样的复数剪切模量与车辙因子均表现出非线性下降趋势. 相同温度下ST改性沥青具有更高的抗车辙性能,这是由于纤维的桥连效应增加了胶结料间的摩擦力,从而抑制流动了变形.

4) PVA纤维的存在有效降低了沥青的不可回复变形,降低了胶结料整体的不可回复蠕变柔量,提升了反复加载卸载过程中的抗永久变形能力,且ST的改善效果更为明显,而T和ST对于沥青在高应力水平重复荷载作用下的蠕变变形能力没有明显改善.

5) 在较低应变水平下,PVA纤维可略微提高沥青在线性振幅扫描中的抗疲劳性能,经表面改性后更为突出,但对于较高应变水平,T和ST改性胶结料与BA的疲劳寿命无显著差异.

**基金项目:** 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0303103); 甘肃省交通运输厅科技资助项目(2020-05); 公路建设与养护技术、材料及装备交通运输行业研发中心(甘肃路桥建设集团有限公司)开放基金资助项目(GLKF201812); 陕西省住房城乡建设科技科研开发计划资助项目(2020-K11)

**作者简介:** 张伟(1972—),甘肃路桥建设集团有限公司高级工程师. 研究方向: 沥青的稳定性. E-mail: zcglzx@163.com

**引文:** 张伟,张钊,曹晖,等. 表面预处理PVA纤维改性沥青的高温流变特性[J]. 深圳大学学报理工版, 2022, 39(4): 409-416.

### 参考文献 / References:

- [1] 刘开平, 李佳容, 李祖仲, 等. 棉秸秆纤维改性沥青胶浆试验研究[J]. 应用化工, 2017, 46(1): 132-135, 140.  
LIU Kaiping, LI Jiarong, LI Zuzhong, et al. Experimental study on cotton straw fiber modified asphalt mortar [J]. Applied Chemical Industry, 2017, 46(1): 132-135, 140. (in Chinese)
- [2] 吕泽华, 程永春, 马桂荣, 等. 硅藻土-玄武岩纤维复合改性沥青的低温流变性能试验研究[J]. 公路工程, 2019, 44(1): 44-50.  
LV Zehua, CHENG Yongchun, MA Guirong, et al. Laboratory study on rheological performance at low temperature of diatomite and basalt fiber compound modified asphalt mastic [J]. Highway Engineering, 2019, 44(1): 44-50. (in Chinese)
- [3] 熊锐, 杨晓凯, 杨发, 等. 煤矸石粉/水镁石纤维复合改性沥青胶浆性能试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2016, 38(2): 11-16.

- XIONG Rui, YANG Xiaokai, YANG Fa, et al. Laboratory investigation of performance of coal gangue powder/brucite fiber modified asphalt mortar [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2016, 38(2): 11-16. (in Chinese)
- [ 4 ] CHEN Zining, YI Junyan, CHEN Zhiguo, et al. Properties of asphalt binder modified by corn stalk fiber [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 212: 225-235.
- [ 5 ] SU Zhibin, MUHAMMAD Y, SAHIBZADA M, et al. Preparation and properties of aminated graphene fiber incorporated modified asphalt [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 229: 116836.
- [ 6 ] RAHMAN M T, MOHAJERANI A, GIUSTOZZI F. Possible use of cigarette butt fiber modified bitumen in stone mastic asphalt [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 263: 120134.
- [ 7 ] 李立顶, 马桂荣, 程永春, 等. 基于 DSR 试验的硅藻土/玄武岩纤维复合改性沥青性能研究[J]. *材料导报*, 2018, 32(增刊2): 484-488.  
LI Liding, MA Guirong, CHENG Yongchun, et al. Study on performance of diatomite and basalt fiber compound modified asphalt based on DSR test [J]. *Materials Reports*, 2018, 32(Suppl. 2): 484-488. (in Chinese)
- [ 8 ] 黄加圣, 杨鼎宜, 朱振东, 等. 聚乙烯醇纤维混凝土耐久性能试验研究[J]. *混凝土*, 2019(6): 61-65.  
HUANG Jiasheng, YANG Dingyi, ZHU Zhendong, et al. Experimental study on durability of polyvinyl alcohol fiber concrete [J]. *Concrete*, 2019(6): 61-65. (in Chinese)
- [ 9 ] 黄加圣, 杨鼎宜, 朱振东, 等. 聚乙烯醇纤维混凝土的长期力学性能研究[J]. *混凝土*, 2019(4): 76-80.  
HUANG Jiasheng, YANG Dingyi, ZHU Zhendong, et al. Research of the long-term mechanical properties of polyvinyl alcohol fiber concrete [J]. *Concrete*, 2019(4): 76-80. (in Chinese)
- [ 10 ] 潘钻峰, 汪卫, 孟少平, 等. 混杂聚乙烯醇纤维增强水泥基复合材料力学性能[J]. *同济大学学报自然科学版*, 2015, 43(1): 33-40.  
PAN Zuanfeng, WANG Wei, MENG Shaoping, et al. Study on mechanical properties of hybrid PVA fibers reinforced cementitious composites [J]. *Journal of Tongji University Natural Science*, 2015, 43(1): 33-40. (in Chinese)
- [ 11 ] 银英姿, 仇贝. 聚乙烯醇纤维混凝土力学性能及早期开裂试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(2): 454-458.  
YIN Yingzi, QIU Bei. Experimental study on mechanical properties and early cracking of polyvinyl alcohol fiber concrete [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(2): 454-458. (in Chinese)
- [ 12 ] XING Xiangyang, LIU Tao, PEI Jianzhong, et al. Effect of fiber length and surface treatment on the performance of fiber-modified binder [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 248: 118702.
- [ 13 ] XIANG Yu, XIE Youjun, LONG Guangcheng. Effect of basalt fiber surface silane coupling agent coating on fiber-reinforced asphalt: from macro-mechanical performance to micro-interfacial mechanism [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 179: 107-116.
- [ 14 ] BRUGNAGO R J, SATYANARAYANA K G, WYPYCH F, et al. The effect of steam explosion on the production of sugarcane bagasse/polyester composites [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2011, 42(4): 364-370.
- [ 15 ] 解英, 吴宏武. 表面处理对植物纤维增强高分子基复合材料性能的影响评述[J]. *化工进展*, 2010, 29(7): 1256-1262.  
XIE Ying, WU Hongwu. Influence of surface treatment on properties of vegetable fibre reinforced polymer composite [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2010, 29(7): 1256-1262. (in Chinese)
- [ 16 ] MORAES R, VELASQUEZ R, BAHIA H. Using bond strength and surface energy to estimate moisture resistance of asphalt-aggregate systems [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 130: 156-170.
- [ 17 ] 于华洋, 马涛, 王大为, 等. 中国路面工程学术研究综述[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(10): 5-70.  
YU Huayang, MA Tao, WANG Dawei, et al. Review on China's pavement engineering research [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(10): 5-70. (in Chinese)

【中文责编：坪梓；英文责编：之聿】