文章编号:1673-5005(2015)01-0169-07 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2015.01.025

纤维沥青胶浆高低温性能研究

吴萌萌, 李 睿, 张玉贞, 魏建明, 樊 亮

(中国石油大学重质油国家重点实验室,山东青岛 266580)

摘要:采用软化点、锥入度、动态剪切、弯曲梁流变等试验方法,研究粉胶比、温度、纤维含量和纤维种类等因素对沥青胶浆高低温性能的影响。结果表明:粉胶比、纤维含量以及纤维种类对沥青胶浆的高低温性能影响较大;纤维的掺入能较大幅度地提高沥青胶浆高温稳定性,并且木质素纤维对沥青胶浆的改善效果优于玄武岩纤维;粉胶比和纤维含量增加均可提高沥青胶浆高温性能,但低温抗裂性能有所降低;纤维沥青胶浆具有显著的温度敏感性,提高温度有利于沥青胶浆低温抗裂性能的改善;粉胶比降低 0.2 并掺入 1% 木质素纤维,与原沥青胶浆相比,其对沥青胶浆流变性能的影响近似相同。

关键词:纤维; 沥青胶浆; 温度; 流变性; 评价方法

中图分类号:TE 626.86 **文献标志码**:A

引用格式:吴萌萌,李睿,张玉贞,等. 纤维沥青胶浆高低温性能研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(1):169-175.

WU Mengmeng, LI Rui, ZHANG Yuzhen, et al. Study of high and low temperature performance of fiber-asphalt mortar[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2015,39(1):169-175.

Study of high and low temperature performance of fiber-asphalt mortar

WU Mengmeng, LI Rui, ZHANG Yuzhen, WEI Jianming, FAN Liang

(*State Key Laboratory of Heavy Oil Processing in China University of Petroleum*, *Qingdao* 266580, *China*)

Abstract: The softening point, cone sink experiment, dynamic shear rheometer (DSR) and bending beam rheometer (BBR) were conducted to evaluate the effects of the ratio of filler to asphalt (ROFTA), fiber content (FC) and fiber type on the high and low temperature properties of fiber-asphalt mortar. The results show that the fiber increases the high temperature stability of asphalt mortar greatly, in which the lignin fiber shows better improvement than the mineral fiber. The increase of ROFTA and FC improves the high temperature performance of asphalt mortar significantly. However, they have some negative effects on low temperature performance. Also, fiber-asphalt mortar presented significant temperature susceptibility, increasing temperature will induce the improvement of low temperature cracking. When the ROFTA decreases 0.2 and lignin content increases 1%, the rheological property of the fiber-asphalt mortar is approximately equal to that of pure asphalt mortar.

Keywords: fiber; asphalt mortar; temperature; rheology; evaluation method

沥青混合料是一种复合材料,主要由沥青胶浆和骨料两部分组成。其中沥青胶浆由沥青、矿粉(还可能包括纤维等添加剂)组成,在沥青混合料中所占比例不大,但对路面性能影响极大[1-2]。沥青混合料是一种多级空间网状结构的分散系,沥青与其中的各种填料组成的沥青胶浆为末级分散系,其中填料为分散相,沥青为分散介质[3]。纤维改性沥青混合料是一种通过掺入纤维材料,改善沥青胶浆及

收稿日期:2014-06-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51008307);中央高校基本科研业务费专项(09CX04039A);中国石油大学研究生创新基金项目(12CX06055A)

作者简介:吴萌萌(1984-),女,博士研究生,研究方向为重质油加工利用。E-mail: meng521baobei@126.com。

通讯作者:张玉贞(1959-),女,教授,博士生导师,研究方向为沥青技术。E-mail:zhangyuzhen1959@163.com。

其混合料综合性能,从而提高沥青路面使用品质的复合材料[4-5]。相比于其他改性方法(如聚合物改性)[6-7],采用纤维进行改性的突出特点是能阻止混合料结构中裂缝的扩展(包括温缩裂缝和反射裂缝),减少车辙变形和疲劳破坏,对于延长沥青路面使用寿命具有显著的作用[8-11]。纤维的掺加直接影响着沥青胶浆的高低温性能,进而决定了沥青混合料的高低温性能及抗疲劳性能,笔者研究粉胶比、纤维含量和纤维种类等因素对沥青胶浆高低温性能的影响,探讨纤维的作用机制。

1 试 验

1.1 试验材料

沥青采用高富 AH-50 基质沥青,其基本性质见表 1;矿粉采用济南长清矿粉,测量标准为 ASTM C128-04,结果表明,矿粉的表观密度为 2.7 g·cm^{-3},塑性指数为 3.10,吸水率为 0.30%,亲水系数为 0.75;纤维采用木质素纤维和玄武岩纤维,其性能参数见表 2。

表 1 高富 AH-50 基质沥青的基本性质

Table 1 Physical properties of Gaofu AH-50 base asphalt

项目	软化点 T/℃	25 ℃锥入度	10 ℃延度/cm	15 ℃延度/cm	薄膜烘箱试验(163 ℃, 5 h)	
					锥入度比/%	10 ℃延度/cm
测量结果	52.2	48	11.8	>150	71	5.6
采用标准	GB/T 4507	GB/T 4509	GB/T 4508	GB/T 4508	GB/T 4509	GB/T 4508

表 2 纤维性能参数

Table 2 Physical properties of different fibers

纤维类型	直径/μm	长度/mm	拉伸强度/MPa	熔点/℃
木质素纤维	12~15	0.5~2.0	100~300	<250
玄武岩纤维	13~16	6.0	2 500~3 500	1 600

1.2 试验方法

(1)纤维沥青胶浆制备。粉胶比取值 0.6~1.4,级差 0.2;纤维用量以沥青胶浆质量占比计算,木质素纤维用量取值 0%~2%,玄武岩纤维为 1%。制备试样温度为 170 ℃,试验按照预先设定比例配制不同纤维含量的沥青胶浆,采用小型搅拌器混合均匀。

(2)软化点试验。沥青的软化点是沥青的等黏温度,常用于评价沥青的高温性能,软化点高意味着沥青的等黏温度高,混合料的高温稳定性好[12]。软化点的测定方法有多种,例如 ASTM D36 环球法、ASTM D61-38 立方体法、Kramer Sarnow test DIN1995 U5 法等,本文中采用 ASTM D36 制定的沥青软化点测定法(GB/T 4507[13])。

(3)锥入度试验。沥青胶浆属于非均质混合物,采用锥入度仪测定其稠度,测试结果存在很大的离散性,为了尽量减少针尖受这种非均质性材料的影响,将锥入度仪中的长针换成一个圆锥体,同时为了减少容器壁的附壁效应产生的尺寸影响,相应加大了容器尺寸,因此采用锥入度试验进行测定。沥青胶浆的锥入度以锥针在一定的荷重、时间及温度条件下垂直穿入沥青胶浆试样的深度表示,单位为 0.1 mm。椎针、针连杆及附加砝码的合重为 200.1 g,温度为 25 ℃,时间为 5 s。盛样皿由不锈钢加工而成,直径 100 mm,深度 50 mm。

(4)动态剪切流变仪(DSR)试验。DSR 是 Superpave 体系中测定沥青结合料高温稳定性的仪器。DSR 以一定的速度旋转剪切,测定结合料的复数剪切模量 G^* 和相位角 δ,表征其黏弹性能。复数剪切模量 G^* 越大,材料抵抗应力的能力越强;相位角 δ 反映了沥青结合料弹性(可恢复部分)与黏性(不可恢复部分)成分的比例,δ 值越大,沥青中黏性成分所占比例越大,即变形不可恢复的部分越大,越容易产生永久变形[14]。试验采用美国 TA 公司生产的 AR2000 型动态剪切流变仪,采用应力控制模式,应力水平为 100 Pa,采用正弦波方式加载,频率为 10 rad/s,选择 64、70、76、82 ℃ 4 个试验温度,试样直径为 25 mm,厚度为 1 mm[15]。

(5)弯曲梁流变仪(BBR)试验。在 Superpave 沥青结合料性能规范中,以沥青结合料 BBR 试验指标弯曲蠕变劲度模量 S 和蠕变曲线斜率 m(劲度模量对荷载作用时间的曲线斜率)作为评价沥青结合料的低温抗裂性能评价指标。蠕变劲度模量 S 表征沥青胶浆的柔性,S 值越小,表示其低温抗开裂性能越好;蠕变曲线斜率 m 表征沥青胶浆的松弛性能,m 值越大,表明其应力释放速度越快,松弛能力越强,低温抗裂性能越好[16]。试验采用-6、-12、-18 ℃ 3 个试验温度,试样长为 127 mm,厚度为 6.35 mm,宽为 12.7 mm[17]。

2 结果分析

2.1 软化点与锥入度试验

粉胶比对沥青胶浆软化点的影响如图 1 所示。

从图 1 可以看出,沥青胶浆软化点相比于基质沥青软化点(52.2 ℃)有较大提高,随着粉胶比增大,沥青胶浆软化点增加,表明矿粉的掺入能明显提高沥青热稳定性,可以有效减少沥青高温永久变形。锥入度试验表征了沥青胶浆在一定温度下的抗剪切强度。从图 1 可以看出,沥青胶浆的锥入度随着粉胶比增大而减小,表明其抗剪切强度随着粉胶比增大明显提高,因此矿粉含量对沥青胶浆整体抗剪切性能起着重要作用。同时,纤维含量对沥青胶浆软化点及锥入度的影响也存在类似的规律,如图 2 所示。以木质素纤维为例,从图 2 中看出,纤维沥青胶浆与纯沥青胶浆相比软化点明显增加,锥入度降低,纤维的掺入使沥青胶浆的抗高温变形能力、抗剪切强度明显改善,表明纤维对沥青胶浆的高温稳定性及整体抗剪切性能有很大影响。

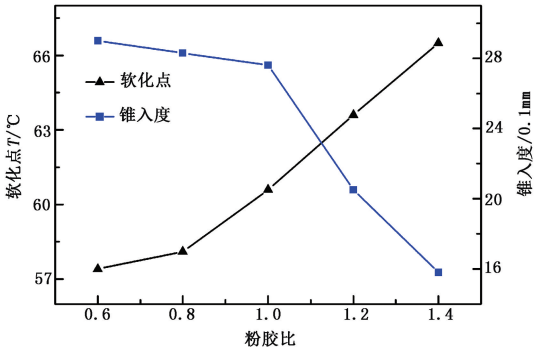

图 1　粉胶比对沥青胶浆软化点及锥入度的影响

Fig. 1　Effect of ROFTA on softening point and cone penetration of fiber-asphalt mortar

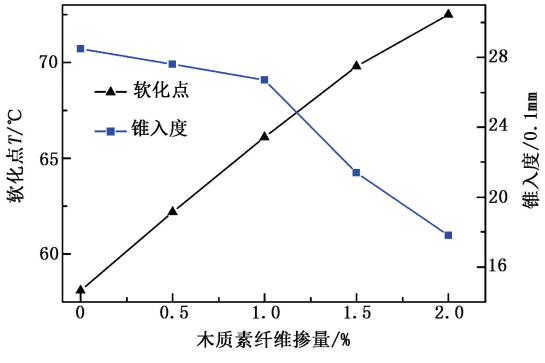

图 2　纤维含量对沥青胶浆软化点及锥入度的影响(粉胶比为 0.8)

Fig. 2　Effects of FC on softening point and cone penetration of fiber-asphalt mortar with ROFTA of 0.8

2.2　DSR 试验

试验测试了未添加纤维的沥青胶浆(纯沥青胶浆)和纤维沥青胶浆的复数剪切模量 G^* 和相位角 δ,并计算了车辙因子 $G^*/\sin\delta$,结果见图 3、4。

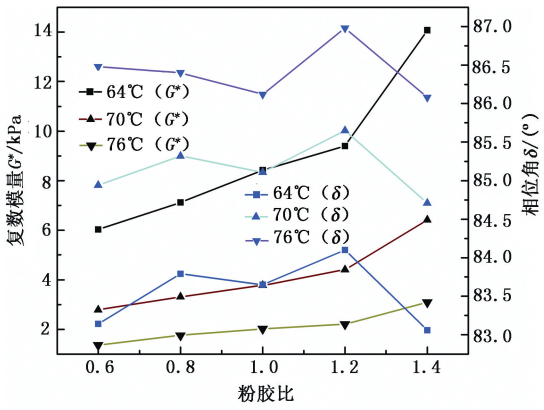

图 3　粉胶比对沥青胶浆复数剪切模量 G^* 及相位角 δ 的影响

Fig. 3　Effect of ROFTA on complex modulus and phase angle of asphalt mortar

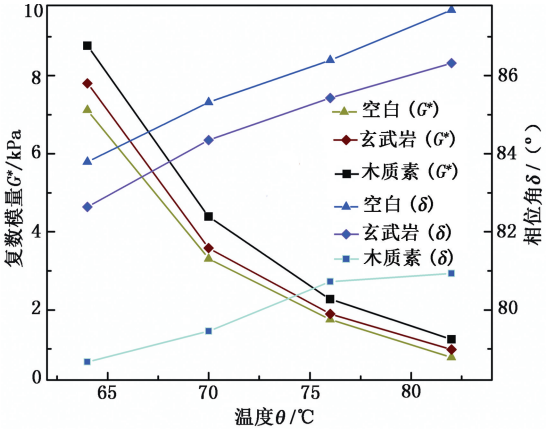

图 4　温度对沥青胶浆复数剪切模量 G^* 及相位角 δ 的影响(粉胶比为 0.8)

Fig. 4　Effect of temperature on complex modulus and phase angle asphalt mortar with ROFTA of 0.8

从图 3 粉胶比对沥青胶浆复数剪切模量 G^* 及相位角 δ 的影响关系可以看出,随着粉胶比增加复数剪切模量 G^* 增大,相位角 δ 先增大后减小,矿粉的掺入能较大幅度地提高沥青胶浆的复数剪切模量,这是因为矿粉具有较大的比表面积大,又由于矿粉具有体积增强作用和沥青与矿粉的物化作用(形成结构沥青),粉胶比增加使沥青的黏度提高,表现为沥青胶浆的高温稳定性增强。试验温度对沥青胶浆复数剪切模量 G^* 和相位角 δ 的影响如图 4 所示。从图 4 看出,不同类型沥青胶浆的复数剪切模量 G^* 随着试验温度升高呈指数函数减小,并且随着试验温度不断升高最终趋于相同,表明纤维沥青胶浆和纯沥青胶浆都具有温度敏感性;此外,纤维的掺入能较大幅度地提高沥青胶浆复数剪切模量 G^*,使材料抵抗应力的能力增强,即产生增强效果。纤维对沥

青胶浆增强效果的排序为木质素纤维沥青胶浆>玄武岩纤维沥青胶浆>纯沥青胶浆。从图 4 还发现,不同类型沥青胶浆的相位角 δ 随着试验温度升高逐渐增大,纯沥青胶浆的相位角大于纤维沥青胶浆。δ 值越大,表明沥青胶浆中黏性成分越大,越容易产生高温永久变形。因此,不同类型沥青胶浆随着试验温度升高逐渐由弹性状态向黏性状态转化,纯沥青胶浆的黏性状态最为明显,最容易产生高温永久变形,其次为玄武岩纤维沥青胶浆、木质素纤维沥青胶浆。由此可见,纤维的掺入能较大幅度提高沥青胶浆抗高温变形能力,并且木质素纤维对沥青胶浆的改善效果优于玄武岩纤维。

沥青路面的实际应用中,外部荷载作用下的沥青混合料会在一个很宽的温度范围内产生高温永久变形。以车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 作为评价沥青胶浆高温流变性的指标,$G^*/\sin\delta$ 越大,沥青胶浆高温时越不容易发生流动变形,表明其抗车辙能力越强,高温稳定性越好[18-19]。图 5 粉胶比对沥青胶浆车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 的影响,可以看出,相同温度下随着粉胶比增加,$G^*/\sin\delta$ 逐渐增大,表明矿粉含量增加可以提高沥青胶浆高温稳定性。由于矿粉具有较大的比表面积,有利于矿粉和沥青间物化作用[20]的发生形成的结构沥青[20],比界面层以外的自由沥青黏结性强[21]。随着矿粉含量的增加,结构沥青的含量随之增加,沥青的黏稠度增大,沥青胶浆的高温稳定性得到改善。此外,在较低温度时 $G^*/\sin\delta$ 增加趋势更为明显,例如在 64 和 76 ℃时,粉胶比由 1.2 提高到 1.4,$G^*/\sin\delta$ 分别增加了 4.72 和 0.9 kPa,这是由于高温下沥青中黏性成分的增多削弱了增加矿粉对其弹性成分的影响,导致 $G^*/\sin\delta$ 增幅降低[20]。粉胶比相同时,随着温度降低车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 迅速增大,表明沥青胶浆与沥青单体一样具有温度敏感性。图 6 为温度对沥青胶浆车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 的影响,可以看出,在整个温度范围内,木质素纤维沥青胶浆的车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 随着温度的升高迅速降低,表明木质素纤维沥青胶浆抗高温永久变形能力急剧减弱,并且具有显著的温度敏感性。此外,$G^*/\sin\delta$ 随着纤维含量增加而增大,且温度越低影响越显著。例如在 64 ℃时,纤维含量从 1.5% 增加到 2.0%,$G^*/\sin\delta$ 增加 3.1 kPa;而 82 ℃时,$G^*/\sin\delta$ 仅增加了 0.3 kPa。这一结果主要与纤维的含量以及纤维与沥青之间的作用机制有关。沥青中的酸性树脂组分属于一种表面活性物质,与纤维接触后能在其表面产生物理浸润作用和吸附作用,形成结合力牢固的结构沥青界面层,提高沥青的黏结性能[22]。其次,由于高温下沥青中黏性成分的增多削弱了增加纤维含量对其弹性成分的影响,导致 $G^*/\sin\delta$ 增幅降低。

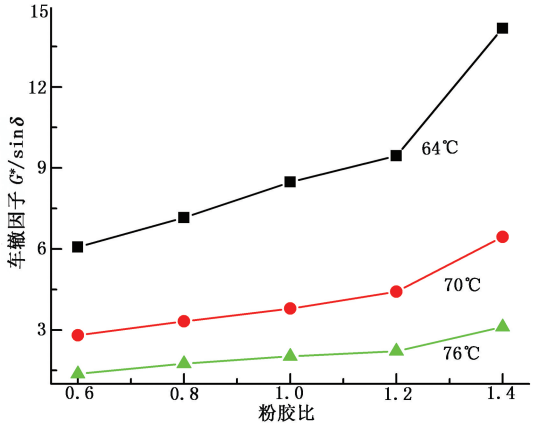

图 5　粉胶比对沥青胶浆车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 的影响

Fig. 5　Effect of ROFTA on rutting factor of asphalt mortar

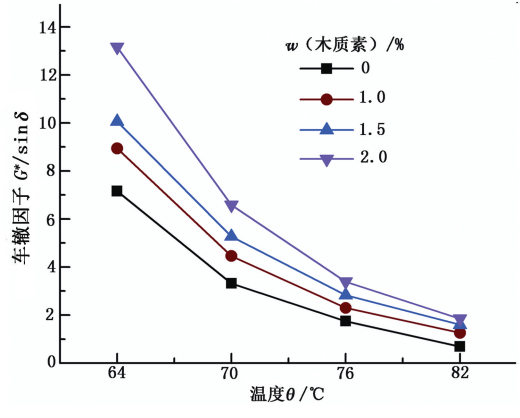

图 6　温度对纤维沥青胶浆车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 的影响(粉胶比为 0.8)

Fig. 6　Effect of temperature on rutting factor of fiber-asphalt mortar with ROFTA of 0.8

图 7 为粉胶比与纤维含量对沥青胶浆高温性能的影响。其中,F 代表粉胶比,$F1.0$ 代表粉胶比 1.0;X 代表纤维含量,$X0$ 代表 0% 的纤维含量,其他以此类推。从图 7 看出,在各试验温度下,粉胶比从 1.0 降到 0.8,并在胶浆中掺入适量木质素纤维,可使 $G^*/\sin\delta$ 超出原沥青胶浆的高温性能指标。沥青胶浆的车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 随着试验温度降低、纤维含量增加而增大,表明纤维沥青胶浆抗高温永久变形的能力逐渐增强,并且具有显著的温度敏感性。这是由于低温时沥青中弹性成分的迅速增长,增强了纤维对沥青胶浆的改性作用。从图 7 还发现,粉胶比降低 0.2 并掺入 1% 木质素纤维与原沥青胶浆

相比其对高温性能的影响近似相同,因此适当降低粉胶比并在胶浆中加入适量木质素纤维,同样可以起到改善沥青胶浆高温性能的作用。这是因为纤维可以吸附沥青或吸收沥青中的油分,并以细长形状分布在沥青胶浆中,具有多向加筋功能。这一作用可以降低沥青的流动性,增强沥青对集料颗粒的握裹力,从而提高沥青混合料防剥离、耐磨损能力,增强沥青胶浆高温抗剪切性能,保证沥青路面的整体性[23]。

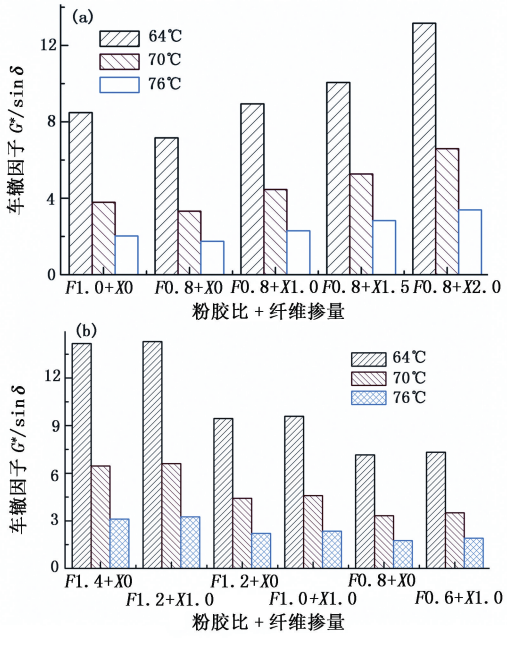

图 7　粉胶比与纤维含量对沥青胶浆车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 的影响

Fig. 7　Effect of ROFTA and FC on rutting factor of asphalt mortar

2.3　BBR 试验

BBR 试验的两个指标:弯曲蠕变劲度模量 S 和蠕变曲线斜率 m(劲度模量对荷载作用时间的曲线斜率)用以测评沥青结合料低温抗裂性能。蠕变劲度模量 S 表征沥青胶浆的柔性,S 值越小,沥青胶浆柔性越好,容许变形越大,其低温抗开裂性能越好[16]。从图 8 可以看出,沥青胶浆的蠕变劲度模量 S 随着粉胶比增加而增大。S 值增大,表明沥青胶浆低温抗裂性能变差,因此粉胶比的增加不利于沥青胶浆低温性能的改善。同时,试验结果也表明 S 值随着温度升高迅速降低,因此提高温度有利于沥青胶浆低温性能的改善。蠕变曲线斜率 m 表征沥青胶浆的松弛性能,m 值越大,表明其应力释放速度越快,松弛能力越强,低温抗裂性能越好[16]。图 9 为粉胶比对沥青胶浆蠕变曲线斜率 m 的影响,沥青胶浆蠕变曲线斜率 m 值随着粉胶比增加略有降低,但变化趋势不明显,表明粉胶比对沥青胶浆的应力积累能力影响较小,因此粉胶比增加对沥青胶浆低温性能存在不利的影响,但影响较弱。此外,m 值随着温度升高迅速增大,再次证明提高温度有利于沥青胶浆低温抗裂性能的改善。

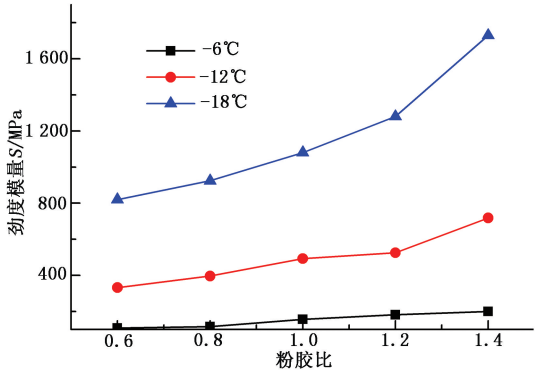

图 8　粉胶比对沥青胶浆蠕变劲度模量 S 的影响

Fig. 8　Effect of ROFTA on creep stiffness of asphalt mortar

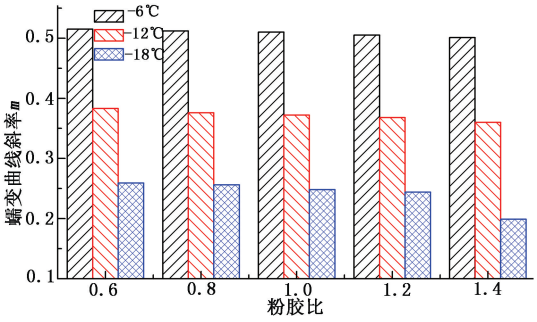

图 9　粉胶比对沥青胶浆蠕变曲线斜率 m 值的影响

Fig. 9　Effect of ROFTA on creep rate of asphalt mortar

纤维含量与沥青胶浆蠕变劲度模量 S、蠕变劲度变化率 m 值的关系如图 10 所示。可以看出,沥青胶浆的蠕变劲度模量 S 随着纤维含量增加而增大,但其增长幅度要小于粉胶比对蠕变劲度模量 S 的影响(图 8)。S 值越大,沥青胶浆的低温抗裂性能越差,因此,粉胶比和纤维含量的提高均不利于沥青胶浆低温性能的改善。蠕变劲度变化率 m 值随着纤维含量的增加略有降低,但变化趋势不明显,表明纤维含量对沥青胶浆的应力积累能力没有太大的影响,因此纤维含量增加对沥青胶浆低温抗裂性能也存在不利的影响。综上所述,粉胶比、纤维含量对沥青胶浆低温性能指标蠕变劲度模量 S 和蠕变曲线斜率 m 的影响规律具有一致性(图 8 ~ 10)。

图 11 为粉胶比与纤维含量对沥青胶浆低温性能的影响。

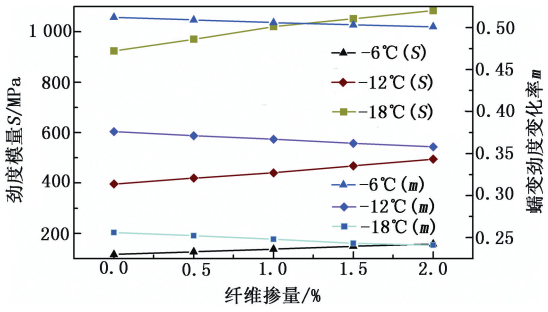

图 10　纤维含量对纤维沥青胶浆蠕变劲度模量 S、蠕变劲度变化率 m 值的影响(粉胶比为 0.8)

Fig. 10　Effect of FC on creep stiffness and creep rate of fiber-asphalt mortar with ROFTA of 0.8

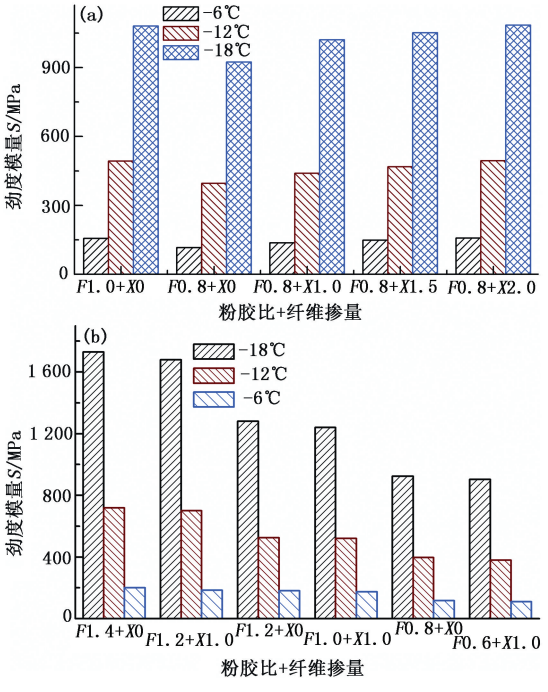

图 11　粉胶比与纤维含量对沥青胶浆蠕变劲度模量 S 的影响

Fig. 11　Effect of ROFTA and FC on creep stiffness of asphalt mortar

从图 11(a)看出,在各试验温度下,粉胶比从 1.0 降低到 0.8,在胶浆中掺入适量木质素纤维,可使沥青胶浆的低温性能指标蠕变劲度模量 S 降低。以纯沥青胶浆($F=1.0$,$X=0$)与纤维沥青胶浆($F=0.8$, $X=1.0$)为例,在 -12 ℃时纤维沥青胶浆($F=0.8$, $X=1.0$)的蠕变劲度模量 S 与纯沥青胶浆($F=1.0$, $X=0$)的 S 值相比降低 11%,表明沥青胶浆中粉胶比降低 0.2 并加入适量木质素纤维,其低温抗裂性能可以得到改善。从图 11 还发现,沥青胶浆的蠕变劲度模量 S 随着试验温度的升高迅速降低,表明提高温度有利于沥青胶浆低温性能的改善;粉胶比降低 0.2 并掺入 1% 木质素纤维与原沥青胶浆相比其对低温性能的影响近似相同。因而适当降低粉胶比,并在沥青胶浆中加入适量木质素纤维,同样可以起到改善沥青胶浆低温性能的作用。

3　结　论

(1)沥青胶浆的高温性能随着温度升高迅速衰减,随着粉胶比、纤维含量增加,复数剪切模量 G^*、车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 均增大,矿粉、纤维含量的增加对沥青胶浆高温稳定性有了明显改善,并且木质素纤维对沥青胶浆的改善效果优于玄武岩纤维。

(2)蠕变劲度模量 S 值随着温度升高而降低,蠕变速率 m 值增大,提高温度有利于沥青胶浆低温抗裂性能的改善;随着粉胶比、纤维含量增加,蠕变劲度模量 S 增大,蠕变速率 m 减小,沥青胶浆低温抗裂性能变差。

(3)纤维含量和粉胶比对纤维沥青胶浆流变性能的影响具有相关性,粉胶比降低 0.2 并掺入 1% 木质素纤维,与原沥青胶浆相比,其对沥青胶浆流变性能的影响近似相同。

参考文献:

[1]　邵显智,谭忆秋,邵敏华. 几种矿粉指标对沥青胶浆的影响分析[J]. 公路,2004,5:124-126.
SHAO Xianzhi, TAN Yiqiu, SHAO Minhua. Analysis of influence of several indexes of mineral filler on asphalt mortar[J]. Highway, 2004,5:124-126.

[2]　张争奇,王永财. 沥青胶浆对沥青混合料高低温性能的影响[J]. 长安大学学报:自然科学版,2006,26(2):1-5.
ZHANG Zhengqi, WANG Yongcai. Influence of asphalt mortar on hot mix asphalt performance at high and low temperature [J]. Journal of Chang'an University (Edition of Natural Science), 2006,26(2):1-5.

[3]　沈金安. 沥青及沥青混合料路用性能[M]. 北京:人民交通出版社, 2003.

[4]　WU Mengmeng, LI Rui, ZHANG Yuzhen, et al. Reinforcement effect of fiber and deoiled asphalt on high viscosity rubber/SBS modified asphalt mortar[J]. Petroleum Science, 2014,11:454-459.

[5]　CHEN H, XU Q, CHEN H, et al. Evaluation and design of fiber reinforced asphalt mixture [J]. Material Design, 2009,30:2595-2603.

[6]　李水平,范维玉,杨猛龙,等. SBS 改性沥青性能实验研究[J]. 石油大学学报:自然科学版,2002,26(4):87-89.
LI Shuiping, FAN Weiyu, YANG Menglong, et al. Ex-

perimental study on performance of asphalt modification with SBS [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2002,26(4):87-89.

[7] 张玉贞,王翠红,黄小胜, 等. 聚合物 SBS 和沥青的相容性研究[J]. 石油学报:石油加工, 2001,17(2):68-71.
ZHANG Yuzhen, WANG Cuihong, HUANG Xiaosheng, et al. The compatibility of asphalt and styrene-butadiene-styrene block copolymer [J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2001,17(2):68-71.

[8] TAPKIN S, ÇEVIK A, UŞAR Ü. Prediction of marshall test results for polypropylene modified dense bituminous mixtures using neural networks [J]. Expert Systems with Applications, 2010,37:4660-4670.

[9] TAPKIN S, ÇEVIK A, UŞAR Ü. Accumulated strain prediction of polypropylene modified marshall specimens in repeated creep test using artificial neural networks [J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36: 11186-11197.

[10] TAPKIN S, UŞAR Ü, TUNCAN A, et al. Repeated creep behavior of polypropylene fiber-reinforced bituminous mixtures [J]. Journal of Transportation Engineering, 2009,135 (4):240-249.

[11] DONG Biqin, HAN Ningxu, DING Zhu, et al. A preliminary study of synthesized-in situ fiber in cement materials [J]. Construction and Building Materials, 2013, 40:10-13.

[12] 张玉贞. 聚合物改性沥青相容性研究[D]. 北京:石油大学化学化工学院,2001.
ZHANG Yuzhen. Study on the compatibility of polymer modified asphalt [D]. Beijing: College of Chemistry and Chemical Enginerring in China University of Petroleum, 2001.

[13] 国家质量监督局检验检疫总局. GB/T 4507 沥青软化点测定法[S]. 北京:中国标准出版社,2010.

[14] TAN Y Q, LI X L, ZHOU X Y. Interactions of granite and asphalt based on the rheological characteristics [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010,22(8): 820-825.

[15] WEI Jianming, LIU Zhangyong, ZHANG Yuzhen. Rheological properties of amorphous poly alpha (APAO) modified asphalt binders[J]. Construction and Building Materials, 2013,48:533-539.

[16] BAHIA H U, ANDERSON D A, CHRISTENSEN D W. The bending beam rheometer: a simple device for measuring low-temperature rheology of asphalt binders[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1992,61:117-153.

[17] ANDERSON D A, KENNEDY T W. Development of SHRP binder specification[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1993, 62: 481-507.

[18] SHENOY A. Model-fitting the master curve of dynamic shear rheometer data to extract a rut-controlling term for asphalt pavement[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2002,30(2):95-102.

[19] TAN Y Q, LI Z H, ZHANG X Y, et al. Research on the high-temperature and low-temperature properties of asphalt-mineral filler mastic[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010,22(8):811-819.

[20] 张争奇,李平,王秉纲. 纤维和矿粉对沥青胶浆性能的影响[J]. 长安大学学报:自然科学版,2005,25(5):15-18.
ZHANG Zhengqi, LI Ping, WANG Binggang. Effect of fiber and mineral filler on asphalt mortar performance [J]. Journal of Chang'an University (Edition of Natural Science), 2005,25(5):15-18.

[21] 马冬云. 纤维种类对沥青胶浆流变性能的影响研究[J]. 公路交通科技, 2013(6):50-52.
MA Dongyun. Influence of fiber on the rheological properties of asphalt mortar[J]. Highway Science and Technology of Communications, 2013(6):50-52.

[22] 黎永皆,陈华鑫. 纤维沥青胶浆的高温性能研究[J]. 上海公路, 2006,1:41-44.
LI Yongjie, CHEN Huaxin. Study on the high temperature performance of fiber-asphalt mortar [J]. Shanghai Highway, 2006,1:41-44.

[23] 樊英华. 纤维沥青胶浆剪切性能的 DSR 试验研究[J]. 山西交通科技, 2011,6:6-9.
FAN Yinghua. The study on DSR test of shear properties for fiber asphalt mastic[J]. Shanxi Science and Technology of Communications, 2011,6:6-9.

(编辑　刘为清)