DOI:10.11918/201905082

超硬质沥青改性结合料流变性能分析

周纯秀[1],王 璐[1],张中丽[1],臧志远[1],吴腾飞[2]

(1. 大连海事大学 交通运输工程学院,辽宁 大连 116026;2.吉林省高速公路管理局 松原分局,吉林 松原 138001)

摘 要: 为研究超硬质沥青(super hard asphalt,SHA)对超硬质沥青结合料的高、低温流变的影响效果,采用 SHA 作为改性剂对 AH-90 道路石油沥青进行改性,制备了不同质量分数(5%、6%、7%和 8%)的 SHA 改性结合料,并进行动态剪切流变试验、多应力蠕变恢复试验及小梁弯曲蠕变试验. 试验结果表明:其适用于时温等效原理;SHA 的掺入会有效提高沥青结合料的车辙因子 $G^*/\sin\delta$,沥青混合料的高温性能得到明显改善;随着 SHA 掺量的增加,沥青结合料的平均应变恢复率 R 逐渐升高,不可恢复蠕变柔量 J_{nr} 逐渐降低,掺加 SHA 有利于提高沥青结合料高温抗变形能力与变形恢复能力;随着 SHA 的掺入,沥青结合料的蠕变劲度 S 与蠕变劲度变化率 m 变化幅度不大,对沥青结合料的低温抗裂性能影响不大. SHA 改性沥青结合料高温抗车辙性能优异,低温性能相对于基质沥青 PG 分级保持不变.

关键词: 超硬质沥青;流变性能;Black 曲线;动态剪切流变试验;弯曲蠕变

中图分类号: U414 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2020)09-0144-08

Analysis of rheological properties of super hard asphalt modified binders

ZHOU Chunxiu[1], WANG Lu[1], ZHANG Zhongli[1], ZANG Zhiyuan[1], WU Tengfei[2]

(1. College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China;
2. Songyuan Sub-bureau, Jilin Provincial Expressway Administration, Songyuan 138001, Jilin, China)

Abstract: To study the effect of super hard asphalt (SHA) on high and low temperature rheological properties of SHA modified binders, SHA was adopted as modifier to modify AH-90 pavement petroleum asphalt. Different proportions (5%, 6%, 7%, and 8%) of SHA binders were prepared, and dynamic shear rheology test, multiple stress creep-recovery test, and bending beam rheometer test were carried out. Results show that SHA modified binder conformed to time-temperature equivalence principle. The addition of SHA significantly improved the rutting factor of asphalt binder, indicating that the high temperature performance of asphalt binder was obviously improved. With the increase of SHA content, the average strain recovery rate of asphalt binder increased gradually, and the unrecoverable creep compliance decreased gradually, which means SHA is conducive to improving the high-temperature deformation resistance ability and elastic resilience ability of asphalt binder. With the incorporation of SHA, the variations of creep stiffness and creep stiffness change rate of asphalt binder were small, and the low-temperature anti-cracking performance of asphalt binder was little affected. Modified asphalt binder with SHA had excellent rutting resistance at high temperature, and its low-temperature performance remained unchanged with respect to PG classification of matrix asphalt.

Keywords: super hard asphalt; rheological properties; Black curve; dynamic shear rheology test; bending beam rheometer

中国富煤、贫油、少气的能源资源现状决定了中国的煤炭消耗量十分巨大[1-6]. 超硬质沥青(super hard asphalt,SHA)是煤清洁化转化过程中产生的残渣 DCLR(direct coal liquefaction residue)进一步精加工得到的产品,其组成与天然湖沥青相当,非沥青含量(质量分数)约占 50%,但其软化点更高,灰分更低,其挥发量小于石油沥青和湖沥青. 研究超硬质沥青的意义:从路用性能角度上,掺入超硬质沥青可以提高沥青结合料的高温稳定性,进而减少路面车辙病害;从环保角度上,超硬质沥青是煤液化残渣,而且它与传统的煤焦油沥青不同,挥发物多为无毒的半饱和烃,不会对环境造成影响,运用到沥青路面上,既可以节约资源又可以保护环境.

2007 年文献[7]首先将 DCLR 作为改性剂加入沥青,并与特立尼达湖沥青(TLA)改性沥青进行性能对比分析,发现在改性效果一定的条件下,其掺量明显小于 TLA. 文献[8]利用多种试验手段,对 DCLR 和 TLA 改性沥青的宏观性能和微观结构等进行了对比研究,发现两者都能改善沥青的高温性能,但对低温性能有损伤,相同掺量下,TLA 的性能影响更小. 文献[9]基于 DCLR 热分析性质、道路沥青的改性性能以及脱灰性能 3 个方面进行研究,得出

收稿日期: 2019-05-13
基金项目: 国家自然科学基金(51308084);
中央高校基本科研业务费专项资金(3132014326)
作者简介: 周纯秀(1977—),女,副教授,硕士生导师
通信作者: 周纯秀,zcxhit@163.com

DCLR 的掺入量的质量百分比应控制在 10 以下的结论. 文献[10]通过研究不同的配混工艺,选择熔融的煤液化残渣与加热的基质沥青混合制备改性沥青,分析了各参数对 DCLR 改性沥青性能的影响.

本文拟采用 DCLR 精加工后的产品超硬质沥青 SHA 作为改性剂,对不同掺量的 SHA 改性沥青结合料,采用动态剪切流变等试验,从流变角度对其改性后的宏观性能进行研究,分析掺入 SHA 后对沥青的高低温变化的影响规律,以期揭示 SHA 对沥青的改性效果,为超硬质沥青 SHA 的工程应用提供理论依据.

1　原材料与试验方法

1.1　原材料

基质沥青采用壳牌 AH-90 道路石油沥青,技术性能指标见表 1,满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)[11]要求.

煤液化技术包含直接液化和间接液化,直接液化是指煤在氢气和催化剂作用下,通过加氢裂化转变为液体燃料的过程[12]. 试验用超硬质沥青 SHA 为煤直接液化残渣的精加工产品,其性能见表 2.

表 1　基质沥青的技术指标

Tab.1　Technical properties of matrix asphalt

对比项	25 ℃针入度/0.1 mm	5 ℃软化点/℃	15 ℃延度/cm	C_2HCl_3溶解度 RTFOT 残留物/%	质量损失/%	25 ℃针入度比/%	15 ℃残留延度/cm
检测值	88.3	46.0	>100	99.83	0.08	73.1	≥57
规范值	80~100	≥44	≥100	≥99.5	[-0.8, 0.8]	75.6	≥20

表 2　SHA 成分参数(质量分数)

Tab.2　Composition parameters of SHA (mass fraction)　　%

沥青四组分				沥青	甲苯不溶物	
饱和分(S)	芳香分(Ar)	胶质(R)	沥青质(As)		有机不溶物	无机不溶物
0.51	7.91	49.39	42.19	47.03	37.71	15.26

1.2　改性沥青制备

结合已有研究成果,综合考虑路用性能需求和经济性等,选择超硬质沥青 SHA 掺量(质量分数)分别为 0%、5%、6%、7%和 8%,共制备 5 种试样,将其分别编号为 SHA0、SHA5、SHA6、SHA7 和 SHA8. 采用 BME 100L 型号的实验室剪切乳化机制备不同 SHA 掺量的沥青结合料. 首先,将基质沥青在130 ℃的烘箱中加热 1 h,将预设比例的基质沥青与 SHA 颗粒进行混合,在 140 ℃下保温 20 min,电机设定温度为 180 ℃,转速为 5 000 r/min,剪切时间为 45 min,电机停止后,用玻璃棒匀速缓慢地搅拌改性沥青,去除其中的气泡,倒入准备好的容器内,盖上盖子以免灰尘落入. 超硬质沥青结合料的制备工艺如图 1 所示.

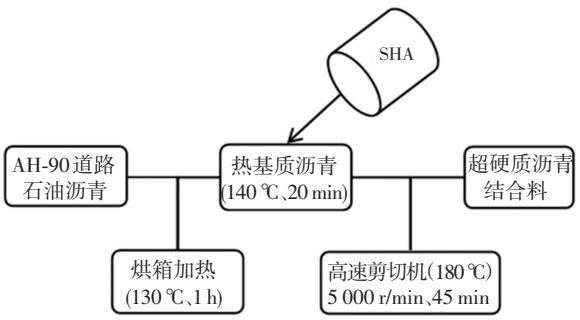


图 1　超硬质沥青结合料的制备工艺流程

Fig.1　Preparation process of SHA binder

1.3　试验方法

1.3.1　频率扫描(frequency sweep)

采用动态流变剪切仪,针对基质沥青与掺入了超硬质沥青 SHA 的改性沥青进行不同温度下,不同频率的频率扫描试验,得到不同复数模量 G^* 和相位角 δ, 并画出 Black 图对试验结果进行分析,具体试验参数选取如下:试验温度选择 46 ℃作为起始温度,逐渐升温至 76 ℃,其中试验温度间隔为 6 ℃;选择直径为 25 mm,厚度为 1 mm 的转子;频率从 0.1 Hz升至 10 Hz;应变大小设置为 1%.

1.3.2　温度扫描(temperature sweep)

采用动态流变剪切仪,针对基质沥青与掺入了超硬质沥青 SHA 的改性沥青进行单一频率下,不同温度下的温度扫描试验,得到车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 与温度的变化曲线,具体试验参数选取如下:试验温度选择 46 ℃作为起始温度,逐渐升温至 76 ℃,其中试验温度间隔为 6 ℃;选择直径为 25 mm,厚度为 1 mm的转子;角频率设置为 10 rad/s;应变大小设置为 1%.

1.3.3　多应力蠕变恢复试验(multiple stress creep-recovery test, MSCR)

采用旋转薄膜烘箱试验(RTFOT)老化处理后的 4 组改性沥青进行 MSCR 试验,测得在温度在 64 ℃,应力水平分别在 0.1、3.2 kPa 下加入不同掺量的改性沥青的平均应变恢复率 R 和不可恢复蠕变柔量 J_{nr}. 具体试验参数选取如下:试验温度选择 64 ℃;选择直径为 25 mm,厚度为 1 mm 的转子;应力水平选择 0.1、3.2 kPa 两种水平;蠕变时间设定为 1 s,恢复时间设定为 9 s.

1.3.4 弯曲梁流变试验(bending beam rheometer test,BBR)

采用低温弯曲梁流变仪测试超硬质沥青结合料的低温断裂特性. 根据线黏弹性模型,在恒定温度下,小梁承受一个恒定应力,其应力分布与线弹性梁相同. 具体试验参数选取如下:在-10~-22 ℃之间选取 5 个试验温度进行试验,温度间隔为 3 ℃;制得试件体积为 127 mm×6.35 mm×12.7 mm;加载时间取 60 s.

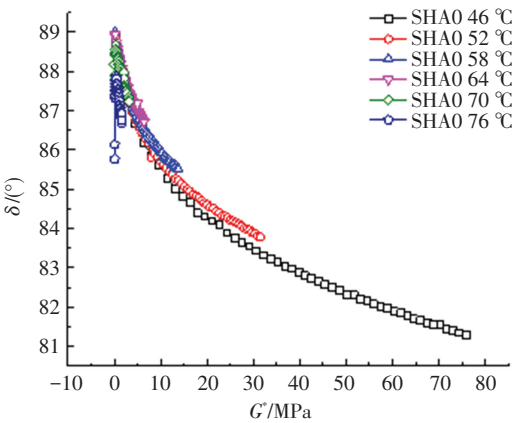
2 试验结果与分析

2.1 频率扫描

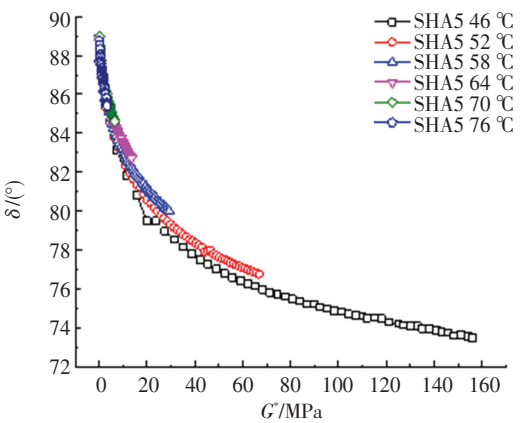
沥青材料是一种典型的具有流变特征的材料,因此,可以采用流变学的方法来描述其工程性质. 利用沥青动态剪切流变仪,对基质沥青和不同掺量的超硬质沥青,进行了不同加载频率下的试验研究.

2.1.1 超硬质沥青 SHA 掺量的相位角随复数模量的变化

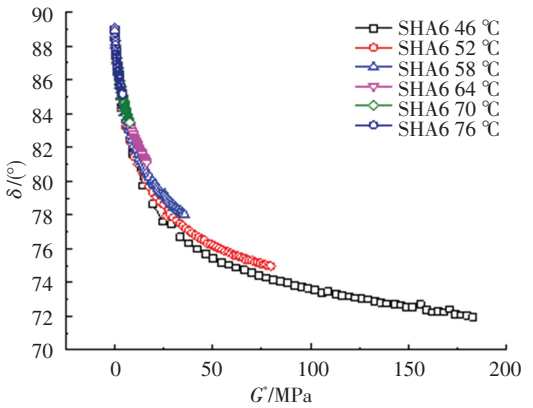
对于具有黏弹性能的沥青材料,其模量等性能指标是加载时间(频率)和温度的函数. 流变试验结果如图 2 所示.



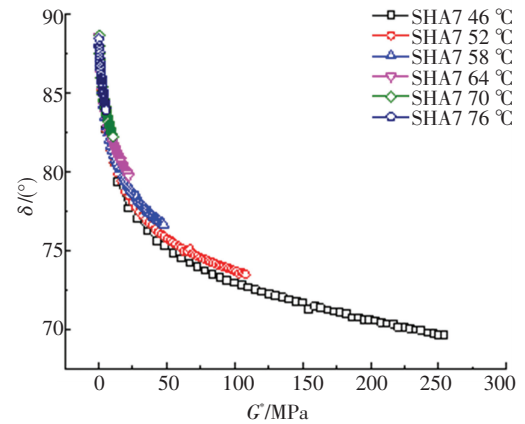
(a)SHA0



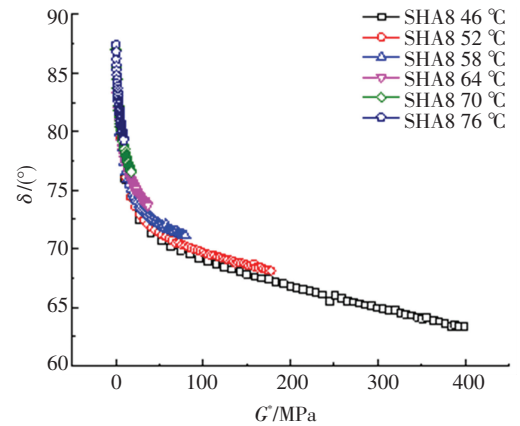
(b)SHA5



(c)SHA6



(d)SHA7



(e)SHA8

图 2 不同掺量 SHA 结合料的 Black 曲线

Fig.2 Black curves for different proportions of SHA binder

沥青材料是一种非牛顿流体,与弹性材料不同,它的力学响应不仅与施加的应力相关,还与时间相关. 经过长期且大量的试验发现沥青在不同温度不同频率下的黏弹参数特征曲线具有相同的走势,通过一定的平移可使其重合,即时间与温度具有等效作用,这种特征被称为时温等效[13-15]. 由图 2 可知:基质沥青和掺入了超硬质沥青 SHA 的 Black 曲线为平滑的连续曲线,没有出现“波浪”,说明该种材料适用于时温等效原理. 相位角 δ 代表着应力应变的滞后行为,反映材料的黏弹比例. 完全弹性的材

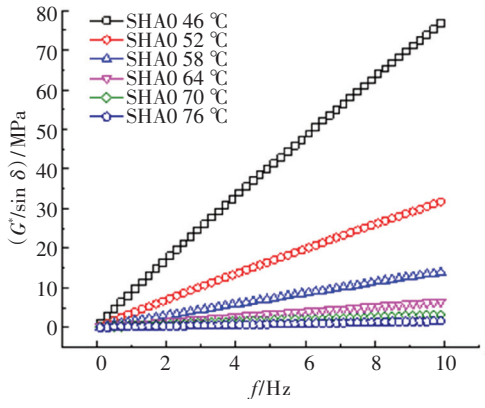
料应力应变不存在滞后行为，即 $\delta = 0°$；完全黏性的材料应力应变相位滞后恒定，即 $\delta = 90°$；而黏弹性的材料应力应变响应的相位滞后在 0° ~ 90° 之间[16-17]. 随着温度的升高，沥青的流动性增强，其黏性成分增加，相位角增大.

通过对比发现，随着超硬质沥青 SHA 掺量的增加，复数模量 G^* 增大，相位角 δ 减小. 复数模量增加，意味着沥青结合料的刚度越大，其抗变形能力增强. 而相位角减小，说明其弹性成分比例提高，即在承受相同荷载作用的情况下，其变形可恢复性能增加，抵抗高温变形的能力增强.

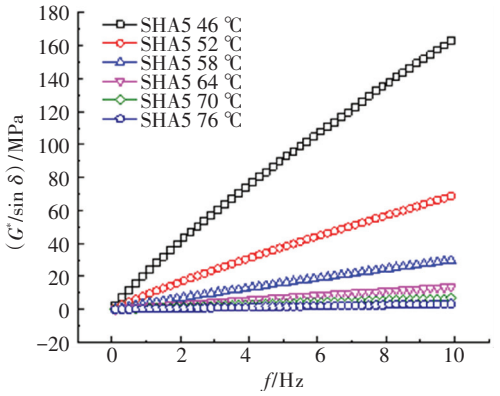
2.1.2　超硬质沥青 SHA 掺量的车辙因子随频率的变化

利用动态剪切流变仪，进行频率扫描，试验结果如图 3、4 所示.

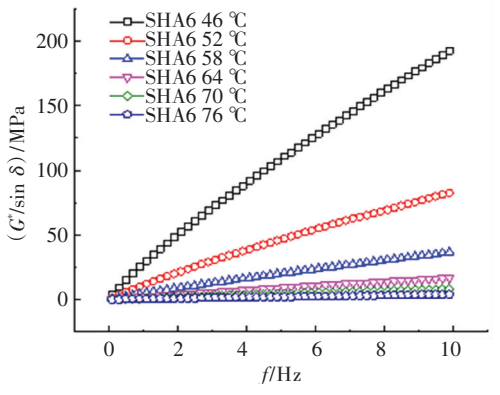
加载频率的大小可以对应于路面行车速度. 高频代表行车速度快，低频代表行车速度慢. 分析图 3、4 可得：1）无论是高温还是低温，随着频率的增加，车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 呈线性增长. 而且超硬质沥青的掺量越大，车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 的增幅越大，沥青结合料趋于表现弹性性能，表明其黏性大，抗变形能力强；随着试验温度的升高，车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 迅速下降，沥青结合料趋于表现黏性性能，此时变形转向黏性流动变形. 2）当 SHA0、SHA6、SHA7、SHA8 低于 58 ℃时，抗车辙因子对频率的依赖性依次降低，依赖性表现为随着频率的升高抗车辙因子也逐渐增大；当温度大于 58 ℃时，抗车辙因子对于频率的依赖性降低，当温度达到 70 ℃时，出现平台区，此时抗车辙因子趋近于 0. 抗车辙因子是衡量抗车辙性能的指标之一，在 58 ℃以下时，沥青处于均相体状态，其高温性能稳定. 3）相同掺量的超硬质沥青结合料在温度较低的试验条件下区分明显；在较高的试验温度下，基质沥青与改性沥青的区分度不明显. 4）不同温度下，车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 随着频率的降低而降低，两者呈线性变化.



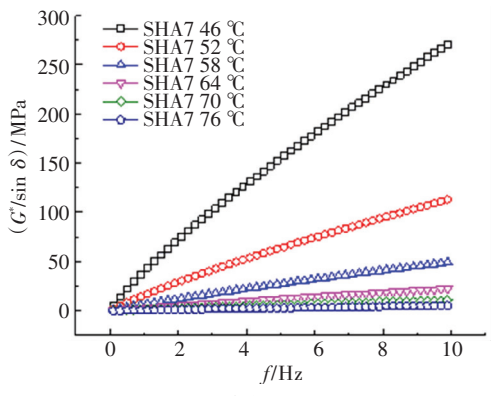
(a) SHA0



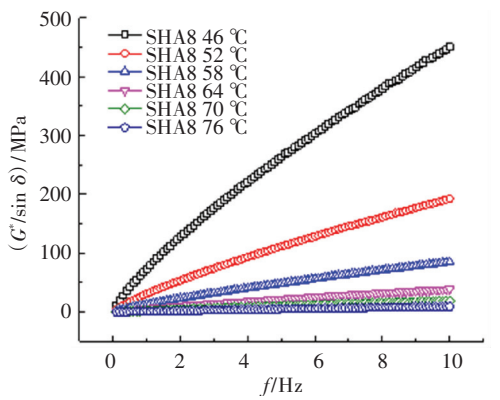
(b) SHA5



(c) SHA6



(d) SHA7



(e) SHA8

图 3　不同 SHA 掺量的车辙因子随频率的变化曲线

Fig.3　Variation of rutting factor of different proportions of SHA with frequency

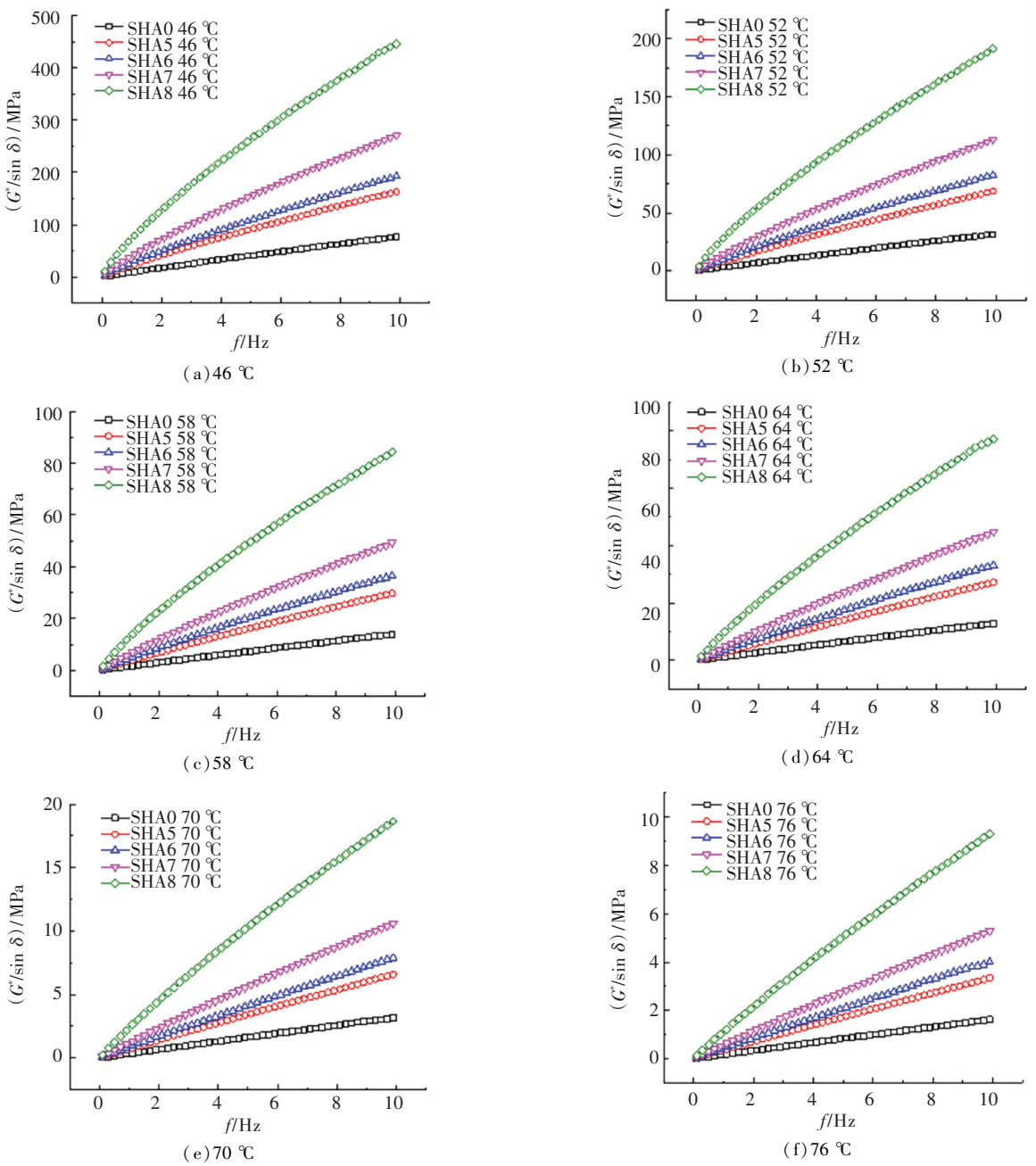


图 4 不同温度下改性沥青的车辙因子随频率的变化曲线

Fig.4 Variation of rutting factor of modified asphalt with frequency under different temperature

2.2 温度扫描

车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 是美国 SHRP 体系中高温评价指标之一,SHRP 规范中要求:原样沥青的车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 不应低于 1.0 kPa,若低于 1.0 kPa,表明此时沥青在该试验温度下不满足使用要求. 图 5 所示为各超硬质沥青结合料不同温度条件下的车辙因子的测试结果.

从图 5 中温度–车辙因子的变化曲线可知:1)随着超硬质沥青 SHA 掺量的增加,车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 大幅上升,说明 SHA 改性沥青的高温抗变形能力得到明显改善,宏观表现为高温抗车辙能力增强. 2)随着试验温度的升高,超硬质沥青 SHA 的 $G^*/\sin\delta$ 值呈现下降的趋势,从图 5 中可以发现 $G^*/\sin\delta$ 下降速率在[46 ℃,58 ℃]和[58 ℃,76 ℃]时的表现有所差异. 在[46 ℃,58 ℃]时,随着温度的升高,车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 迅速降低,即此时 SHA 改性沥青的温度敏感性高,抗变形能力下降明显;在[58 ℃,76 ℃]时,随着温度的升高,车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 缓慢降低,这时改性沥青的温度敏感性较低,抗变形能力下降不明显. 3)虽然在[46 ℃,58 ℃]时,超硬质沥青 SHA 的抗变形能力很强,但此时改性沥青的温度敏感性非常强.

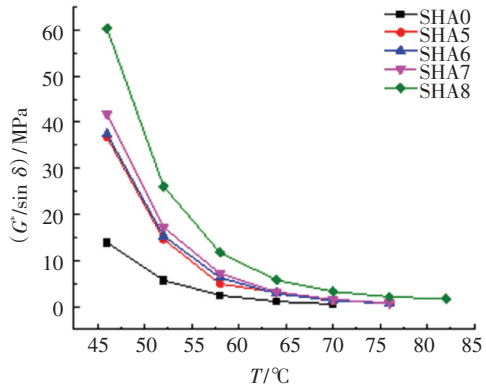


图 5　车辙因子与温度的变化曲线

Fig.5　Variation of rutting factor with temperature

2.3　多应力重复蠕变试验

蠕变试验是指材料在恒定应力作用下，变形随着时间逐渐增加的力学现象[18]. 为了研究超硬质沥青 SHA 在高温性能下的黏弹性能，制备不同掺量的 SHA 改性沥青结合料试样 SHA5、SHA6、SHA7 和 SHA8，经过旋转薄膜烘箱试验（RTFOT）老化处理后，对上述 4 组改性沥青结合料进行多应力蠕变恢复试验（MSCR）. 试验温度为 64 ℃，应力水平分别为 0.1、3.2 kPa，平均应变恢复率 R 和不可恢复蠕变柔量 J_{nr} 测试结果如图 6、7 所示.

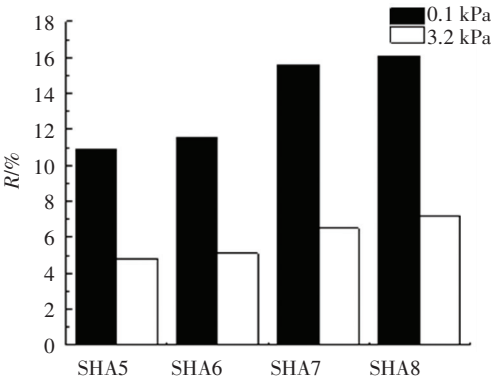


图 6　平均应变恢复率 *R*

Fig.6　Average strain recovery rate

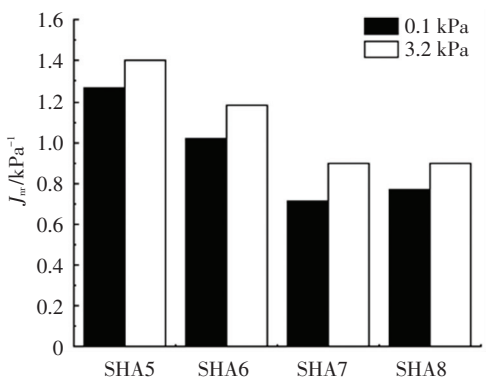


图 7　不可恢复蠕变柔量 J_{nr}

Fig.7　Unrecoverable creep compliance

平均应变恢复率 R 表征沥青结合料弹性变形的能力，同一掺量不同应力水平对比如图 6 所示，由图 6 可以直观得知：超硬质沥青 SHA 掺量为 8%时平均应变恢复率最大，在 3.2 kPa 应力下，各个掺量的超硬质沥青 SHA 平均应变恢复率 R 均至少下降 50%之多，永久变形能力明显下降，说明其在高应力状态下蠕变恢复性能差. 虽然平均应变恢复率 R 可以很好地表征沥青结合料弹性变形的能力，但是最终变形积累量则依赖于不可恢复蠕变柔量 J_{nr}. 由图 7 可以得出，高应力水平下，同一掺量的超硬质沥青 SHA 具有较高的不可恢复蠕变柔量，意味着永久变形量大.

从图 6 可以看出：1）随着 SHA 掺量的增加，平均应变恢复率逐渐升高，表明 SHA 的掺加，改变了改性沥青结合料的黏弹性组成比例，改性沥青的延迟弹性恢复性能增强，黏性变形减小. 在荷载作用下，SHA 改性沥青产生较小的剪切变形，其高温抗变形能力提高；且平均应变恢复率呈先快后慢的增长趋势，表明较高掺量下改性沥青平均应变恢复率对掺量变化的敏感性降低. 2）对于相同掺量的 SHA 改性沥青，当应力水平从 0.1 kPa 增加至 3.2 kPa 时，其平均应变恢复率大幅度减小.

从图 7 可以看出：1）随着 SHA 改性剂掺量的增加，改性沥青结合料的不可恢复蠕变柔量逐渐减小，表明 SHA 对沥青结合料产生加筋作用，使得改性沥青结合料的不可恢复变形量减小；而且随着 SHA 掺量的增加，改性沥青抗高温永久变形的能力增强. 2）综合分析发现，在 0.1 kPa 时，随着掺量的增加，平均应变恢复率逐渐增大，掺量 8%的改性沥青的平均应变恢复率最大；应力水平在 3.2 kPa 时的平均应变恢复率的变化规律与应力水平在 0.1 kPa 时相同，并且其平均恢复率略有增大. 比较两种不同应力条件下的结果，由于应力的增大，平均恢复率下降至原本的一半以上，平均不可恢复蠕变柔量 J_{nr} 稍有增大. 因此，有必要考虑较大应力对于改性沥青性能的影响.

2.4　弯曲梁流变试验

基于沥青流变特性，采用黏弹指标比常规指标可以更好地反映改性沥青的低温断裂特性. 弯曲梁流变试验（BBR）可以通过低温蠕变劲度 S 和蠕变速率 m 两个指标表征沥青结合料的低温抗开裂性能，如图 8、9 所示. 其中 S 反映沥青结合料的柔性，即抵抗永久变形的能力，S 值越小，说明沥青结合料的柔性越优，反之，S 越大，说明沥青脆性越大，柔韧性差；m 反映沥青结合料的应力松弛性能，m 越大，意味着会产生较大的松弛，使路面在低温时产生的应

力尽快释放掉,避免出现剩余应力,保证了低温抗开裂性能[19]. 因此,美国 SHRP 规范规定 $S \leqslant 300$ MPa, $m \geqslant 0.3$[20].

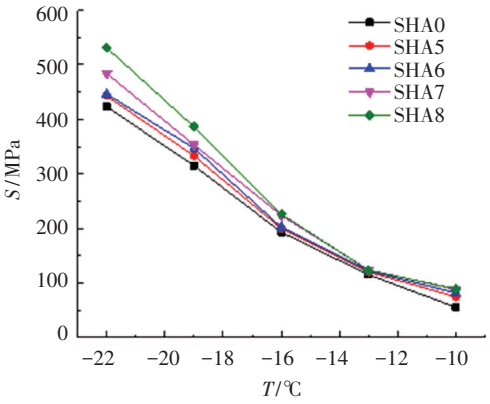


图 8 SHA 改性沥青的 S 值

Fig.8 S values of SHA modified asphalt

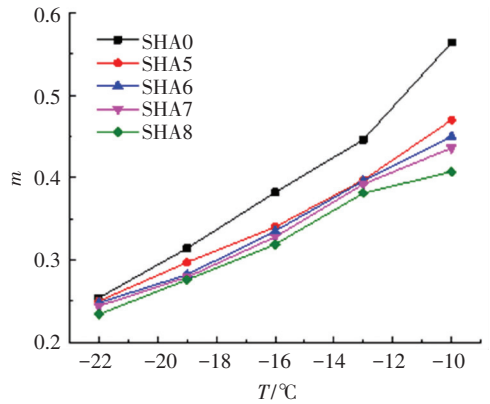


图 9 SHA 改性沥青的 m 值

Fig.9 m values of SHA modified asphalt

试验结果表明:在相同的试验条件下,对于同一试验温度,低温蠕变劲度 S 随超硬质沥青 SHA 的掺量增加呈递增趋势,说明改性沥青呈现脆性. 而蠕变速率 m 均随超硬质沥青 SHA 掺量的增加呈递减趋势,但是趋势并不明显,PG 分级可知,均在同一 PG 分级等级内,由此可以得出超硬质沥青的添加对沥青的低温流变性能影响不大.

2.5 PG 分级

根据 Superpave 的沥青路用性能规范,采用 PG 分级表示设计使用温度的适用范围. AASHTO M320-03 将沥青分为 7 个高温等级和每个高温等级对应的不同低温等级,7 个高温等级分别为 PG46、PG52、PG58、PG64、PG70、PG76、PG82,低温等级在 -10~-46 ℃之间,每 6 ℃一档[21]. 表 3 为 PG 分级结果,由表 3 可知,掺加了超硬质沥青 SHA 后,SHA5、SHA6、SHA7 较基质沥青提高了 1 个等级,SHA8 较基质沥青提高了 3 个等级,低温分级与原样沥青相同.

表 3 PG 分级结果

Tab.3 PG classification results

沥青结合料类型	PG 分级	$(G^*/\sin\delta)$/kPa	S/MPa	m
SHA0	64-16	1.10	193	0.382
SHA5	70-16	1.17	200	0.340
SHA6	70-16	1.31	202	0.335
SHA7	70-16	1.50	224	0.328
SHA8	82-16	1.66	226	0.319

3 结 论

1)通过动态剪切流变试验、小梁弯曲蠕变试验及多应力蠕变恢复试验,对 SHA0、SHA5、SHA6、SHA7、SHA8 等不同掺量的 SHA 改性沥青结合料进行了试验,通过复数模量 G^*、相位角 δ、车辙因子 $G^*/\sin\delta$、平均应变恢复率 R、不可恢复蠕变柔量 J_{nr}、低温蠕变劲度 S 和蠕变速率 m 指标分析其流变性能.

2)随着超硬质沥青 SHA 掺量的增加,沥青结合料的复数模量、车辙因子和平均应变恢复率增大,相位角和不可恢复蠕变柔量减小,说明 SHA 的掺加可以显著改善沥青的高温抗变形性能,提高沥青的抗车辙能力.

3)超硬质沥青 SHA 沥青结合料的 Black 曲线为平滑的连续曲线,表明其满足时温等效原理.

4)综合考虑沥青结合料的高温抗变形性能和低温抗裂性能,超硬质沥青 SHA 的掺量应控制在 7%~8%之间.

参考文献

[1] 陈茂山,张胜振,韩来喜,等.超硬质沥青:Q/DQMZY 0009—2017[S].北京:中国神华煤制油化工有限公司,2017
CHEN Maoshan, ZHANG Shengzhen, HAN Laixi, et al. Super hard asphalt: Q/DQMZY 0009—2017[S]. Beijing: China Shenhua Coal to Liquid and Chemical Co., Ltd., 2017

[2] 李小红."三高"劣质煤气化应用研究[D].太原:太原理工大学,2010
LI Xiaohong. Study on the gasification of "tri-high" poor quality coal [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010

[3] 舒歌平,沈小波.舒歌平:我经历的煤直接液化历程[J].能源,2014(11):100
SHU Geping, SHEN Xiaobo. Shu Geping: my experience of coal direct liquefaction process[J]. Energy, 2014(11):100

[4] 战经秋.煤制液体燃料过程中可弃型催化剂的设计与实验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008
ZHAN Jingqiu. The design and experimental research of disposable catalyzer in the process of coal liquefaction[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008

[5] 滕吉文,乔勇虎,宋鹏汉.我国煤炭需求、探查潜力与高效利用分析[J].地球物理学报,2016,59(12):4633
TENG Jiwen, QIAO Yonghu, SONG Penghan. Analysis of explora-

tion，potential reserves and high efficient utilization of coal in China [J]. Chinese Journal of Geophysics，2016，59(12)：4633. DOI：10.6038/cjg20161224

[6] 陈浜.基于视觉计算的煤岩识别方法研究[D].北京：中国矿业大学，2018
CHEN Bang. Methodological studies of coal-rock recognition through visual computing[D]. Beijing：China University of Mining and Technology，2018

[7] 王赛霞，杨建丽，刘振宇.煤直接液化残渣对道路沥青改性作用的初步评价[J].燃料化学学报，2007，35(1)：110
WANG Zhaixia，YANG Jianli，LIU Zhenyu. Preliminary study on direct coal liquefaction residue as paving asphalt modifier[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology，2007，35(1)：110. DOI：10.3969/j.issn.0253-2409.2007.01.021

[8] 季节，石越峰，索智，等.DCLR 与 TLA 共混改性沥青的性能对比[J].燃料化学学报，2015，43(9)：1061
JI Jie，SHI Yuefeng，SUO Zhi，et al. Comparison on properties of modified asphalt blended with DCLR and TLA[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology，2015，43(9)：1061

[9] 范芸珠.煤直接液化残渣性质及应用的探索性研究[D].上海：华东理工大学，2011
FAN Yunzhu. Exploratory study the properties and applications of direct coal liquefaction residues[D]. Shanghai：East China University of Science and Technology，2011

[10] 何亮. 煤液化残渣复合改性沥青制备及其性能研究[D].西安：长安大学，2013
HE Liang. Study on the preparation and performance of asphalt modified by coal liquefaction residue[D]. Xi'an：Chang'an University，2013

[11] 中华人民共和国交通运输部.公路沥青路面施工技术规范：JTG F40—2004[S].北京：人民交通出版社，2004
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical specification for construction of highway asphalt pavements：JTG F40—2004[S]. Beijing：China Communications Press，2004

[12] 孙启文，吴建民，张宗森，等.煤间接液化技术及其研究进展[J].北京：化工进展，2013，32(1)：1
SUN Qiwen，WU Jianmin，ZHANG Zongsen，et al. Indirect coal liquefaction technology and its research progress[J]. Beijing：Chemical Industry and Engineering Progress，2013，32(1)：1

[13] 赵九野.水泥沥青复合胶浆本构模型及细观结构研究[D].哈尔滨：哈尔滨工业大学，2014
ZHAO Jiuye. Cement asphalt mastic constitutive model and microstructure research[D]. Harbin：Harbin Institute of Technology，2014

[14] 何立平.基于 DMA 方法的橡胶沥青粘弹特性和高温性能研究[D].西安：长安大学，2014
HE Liping. Research on the viscoelastic characteristic and high temperature properties based DMA of rubber asphalt[D]. Xi'an：Chang'an University，2014

[15] 詹小丽.基于 DMA 方法对沥青粘弹性能的研究[D].哈尔滨：哈尔滨工业大学，2007
ZHAN Xiaoli. Research on the viscoelastic properties of asphalt using DMA[D]. Harbin：Harbin Institute of Technology，2007

[16] 董雨明.硬质沥青及其混合料流变特性与低温性能研究[D].哈尔滨：哈尔滨工业大学，2015
DONG Yuming. Research on rheological property and low temperature performance of hard grade bitumen and its mixture[D]. Harbin：Harbin Institute of Technology，2015

[17] 谭忆秋，曹丽萍，董泽蛟.SBS 改性沥青低温性能的影响因素分析[J].哈尔滨工业大学学报，2004，36(12)：1631
TAN Yiqiu，CAO Liping，DONG Zejiao. Influence factors analysis of the low temperature performance of SBS modified asphalt[J]. Journal of Harbin Institute of Technology，2004，36(12)：1631

[18] 许亚男.基于黏弹特性的沥青普适本构模型研究[D].哈尔滨：哈尔滨工业大学，2016
XU Yanan. Research of the universal constitutive model of asphalt binder based on viscoelastic characteristics[D]. Harbin：Harbin Institute of Technology，2016

[19] 谭忆秋，符永康，纪伦，等.橡胶沥青低温评价指标[J].哈尔滨工业大学学报，2016，48(3)：67
TAN Yiqiu，FU Yongkang，JI Lun，et al. Low-temperature evaluation index of rubber asphalt[J]. Journal of Harbin Institute of Technology，2016，48(3)：67. DOI：10.11918/j.issn.0367-6234.2016.03.011

[20] Standard test method for determining flexural creep stiffness of asphalt binder using the bending beam rheometer (BBR)：AASHTO TP1-1998[S]. Washington DC：American Association of State Highway and Transportation Officials，1998

[21] 李笑尘.SUPERPAVE 中的沥青 PG 分级浅析[C]//中国公路学会养护与管理分会第七届学术年会论文集.北京：中国公路学会养护与管理分会，2017：8
LI Xiaochen. Brief analysis of asphalt PG grade in SUPERPAVE[C]//Proceedings of the 7th Annual Conference of Maintenance and Management Branch of China Highway Society. Beijing：Maintenance and Management Branch of China Highway Society，2017：8

（编辑　魏希柱）