

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyh.2020.10.043

SBS-SBR 复合改性沥青黏弹特性研究

王剑君

(甘肃省兰州公路管理局, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 采用物理共混方法制备 SBS 改性沥青、SBR 改性沥青和 SBS-SBR 复合改性沥青, 基于动态剪切流变仪(DSR)测试沥青在温度扫描模式下的复数模量和相位角, 评价沥青的高温性能; 采用多应力蠕变恢复试验(MSCR)测试沥青在蠕变加载过程中的应力响应特征, 最后基于 BBR 试验评价沥青的低温性能。结果表明: 在沥青中掺入 SBS 和 SBR 能够大幅提高沥青的高温抗变形能力, 疲劳极限温度能够表征沥青的抗疲劳性能, 沥青的粘性特征和疲劳性能具有相关性, 基质沥青在高温下具有良好的疲劳特性; MSCR 试验结果表明, 改性沥青具有显著的弹性恢复特性, 沥青的可恢复变形随着应力的增大逐渐降低; 低温梁流变试验(BBR)结果显示, 掺入 SBS 与 SBR 能够提高沥青在低温下的应力松弛能力和抗裂性能。

关键词: 道路工程; 改性沥青; DSR; 重复蠕变试验; 低温性能

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2020)10-0154-05

0 引言

随着我国经济的不断发展, 公路交通已经成为人员、物资交流的主要载体, 在经济增长的过程中起到了重要作用, 其中沥青路面具有耐久性好、舒适性高、易养护等特征, 已经成为我国的主要路面形式。随着交通量与交通荷载的不断增长, 提高路面强度和耐久性成为公路建设中亟待解决的问题。为提高沥青路面的性能, 我国普遍采用改性沥青混合料修筑高等级沥青路面。在沥青中掺入 SBS、SBR 等改性剂能够有效改善沥青和沥青混合料的性能, 对沥青路面的耐久性也有显著的提升效果。

改性沥青的力学特性对沥青混合料的路用性能有直接影响, 采用黏弹性理论研究沥青的力学响应规律, 可以用于评价和预估沥青及沥青混合料的路用性能。对于沥青的力学行为研究是表征其路用性能的主要方法, SBS、SBR 改性沥青是一种粘弹性材料, 在应力作用下的响应特征具有明显的时间滞后性。其力学性能对温度极为敏感, 在高温下具有明显的粘性特征, 低温下表现为塑性或弹性。根据 SHARP 计划的研究成果, 基于动态剪切流变仪(DSR)、旋转粘度计(RV)、直接拉伸仪(DTT)和弯曲梁流变仪(BBR)可以模拟沥青在不同温度域和剪应力、正应力、弯拉应力下的蠕变、恢复、松弛、线弹性变形等过程。本文使用 SBS、SBR 制备了一种 SBS-SBR 复合改性沥青,

基于动态剪切流变仪和弯曲梁流变仪(BBR)测试沥青的变形特征, 研究改性剂对沥青路用性能和疲劳特性的影响规律^[1-10]。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

本文选择巴陵石化生产的线型 SBS 和山东显元化工生产的 SBR 胶粉作为改性剂, 改性剂的技术指标见表 1、表 2。采用物理共混方法制备 SBS 改性沥青(5%SBS)、SBR 改性沥青(3%SBR)、复合改性沥青(5%SBS+3%SBR), 沥青的常规性能见表 3。

表 1 SBS 的技术指标

技术指标	线型 SBS
嵌段比	30/70
拉伸强度 /MPa	24
300%定伸应力 /MPa	2.4
断裂伸长率 /%	900
邵氏硬度 A	72

表 2 SBR 胶粉技术指标

项目	SBR 胶粉
外观	白色粉末
细度(20 目标准筛通过率) /%	99.4
水分 /%	0.8
分子量	>20 万
结合苯乙烯质量分数 /%	27.5
生胶门尼粘度, ML(1+4)100℃)	49
300%定伸应力 /MPa	13.7
拉伸强度 /MPa	30.4
断裂伸长率 /%	530

收稿日期: 2020-02-28

作者简介: 王剑君(1977—), 男, 学士, 高级工程师, 从事道路新材料研发和公路预防性养护工作。

表3 沥青性能指标

指标	复合改性 沥青	SBS 改性 沥青	SBR 改性 沥青	基质 沥青
针入度 /0.1mm	51.8	57	64.1	71
软化点 /℃	78.6	70.4	54.7	52
延度 /cm	93.1	31.6	122	>100
RTFOT				
质量变化 /%	0.33	-0.21	0.4	-0.14
针入度比 /%	92.4	85.1	79.1	62
延度 ² /cm	47.2	21.6	53.3	26.8

注:改性沥青延度试验温度为 5℃,基质沥青延度试验温度为 15℃。

1.2 试验方法

1.2.1 温度扫描

采用动态剪切流变仪对基质沥青、SBS 改性沥青、SBR 改性沥青以及 SBS-SBR 复合改性沥青的动态剪切流变特性进行测试。试验采用温度扫描模式,温度区间为 52℃~82℃,温度间隔为 6℃,试验频率为 10r/s。测试沥青的复数模量(G^*)和相位角(δ),其中 G^* 是沥青在加载过程中最大剪应力和最大剪应变之比,表征沥青材料在剪切作用下的黏阻力大小。

1.2.2 多应力蠕变恢复实验(MSCR)

基于动态剪切流变仪(DSR)在应力控制条件下对沥青进行加-卸载试验,绘制沥青的力学响应曲线,沥青在一次加卸载过程中的应力响应示意图见图 1。

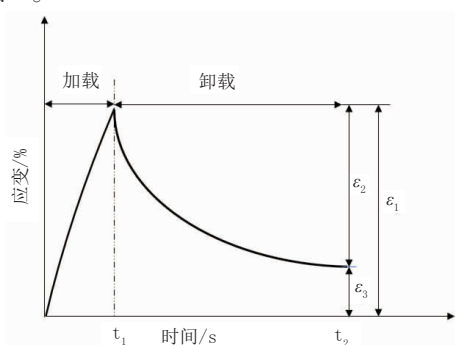


图1 蠕变-恢复实验示意图

如图 1 所示,沥青经过加载产生应变为 ε_1 ,卸载后掺量应变为 ε_2 ,经过加卸载后残留应变为 $\varepsilon_3=\varepsilon_1-\varepsilon_2$ 。

采用多应力蠕变恢复实验(MSCR)测试沥青在外力作用下的应力响应曲线。通过式 1~式 4 计算沥青平均应变恢复率 $R(P)$ 和平均不可恢复蠕变柔量 $J_{nr}(P)$,使用平均应变恢复率 $R(P)$ 和平均不可恢复蠕变柔量 $J_{nr}(P)$ 描述沥青的蠕变-恢复特性。

每次循环的应变恢复率为:

$$\gamma(P, N) = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \times 100\% \quad (1)$$

平均应变恢复率计算公式为:

$$R(P) = \frac{\sum_{N=1}^{10} \gamma(P, N)}{10} \quad (2)$$

每次循环的不可恢复蠕变柔量为:

$$J_{nr}(P, N) = \frac{\varepsilon_3}{P} \quad (3)$$

平均不可恢复蠕变柔量计算公式为:

$$J_{nr}(P, N) = \frac{\sum_{N=1}^{10} J_{nr}(P, N)}{10} \quad (4)$$

式中: ε_2 为蠕变卸载过程的可恢复应变; ε_1 为蠕变加载过程的最大应变; ε_3 为每次蠕变循环后沥青的不可恢复应变增量; P 为蠕变实验的应力水平(一般为 100 Pa 和 3 200 Pa)。

1.2.3 BBR 试验

低温梁流变试验是应用工程上梁在弯拉应力作用下的应变特征分析沥青的低温蠕变特性,试验结果主要由蠕变劲度 S 和 m 值表示。

$$S = \frac{PL^3}{4bh^3\delta_t} \quad (5)$$

式中: S 为蠕变劲度, kPa; P 为外部恒载, 980 mN; L 为梁支架间距, 102 mm; B 为梁高, 12.5 mm; H 为梁宽, 6.25 mm; δ_t 为 t 时刻小梁跨中挠度, mm。

m 值表示 S 随时间的变化率, 是蠕变劲度-时间双对数坐标图上的斜率, 常采用加载 60 s 时的劲度模量(S)和 m 值作为沥青低温性能的评价指标。

2 实验结果与分析

2.1 高温及疲劳性能分析

基于动态剪切流变仪,在温度扫描模式下测试基质沥青、SBR 改性沥青、SBS 改性沥青、复合改性沥青的复数模量和相位角。计算抗车辙因子 $G^*/\sin \delta$,将 $G^*/\sin \delta$ 达到 1 kPa 时对应的温度作为抗车辙极限温度。采用 $G^*\sin \delta$ 表征沥青抵抗剪切疲劳破坏的能力,并将 $G^*\sin \delta$ 达到 5 kPa 时对应的温度为疲劳极限温度,实验结果见图 2~图 4。

分析图 2 可知,随着温度的升高,基质沥青、SBS 改性沥青、SBR 改性沥青和复合改性沥青的模量降低,相位角增大。复数模量是表征沥青抗变形能力的物理量,值越大表明沥青抗变形能力越强,相位角是表征沥青应力应变协调的物理量,值越大表明沥青趋于粘性体。随着温度的上升,沥青

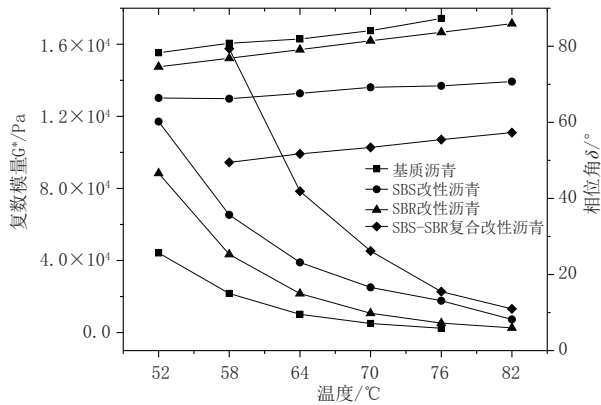
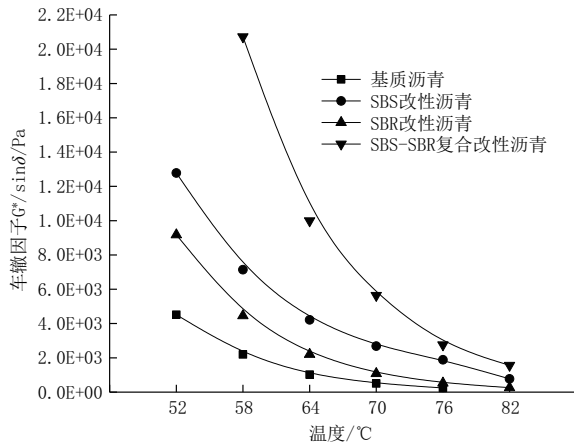
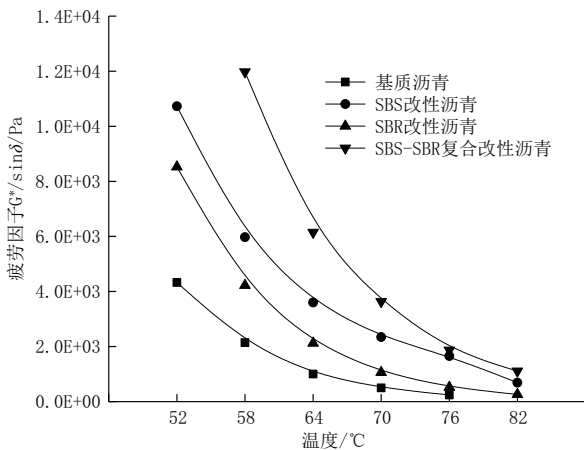


图2 四种沥青复数模量与相位角

图3 四种沥青车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 图4 四种沥青疲劳因子 $G^*/\sin\delta$

抗变形能力降低,性质有黏弹性向黏性体转变。对比4种沥青的相位角和复数模量,在相同试验温度下,相位角由大到小排序为:基质沥青>SBR改性沥青>SBS改性沥青>SBS-SBR复合改性沥青;复数模量由大到小排序为SBS-SBR复合改性沥青>SBS改性沥青>SBR改性沥青>基质沥青。SBS、SBR均可以提高沥青的模量,并使沥青的应力响应特性向黏弹性转变。此外,SBS-SBR复合改性沥青的复数模量明显大于SBS、SBR改性沥青,相位角低于SBS、SBR改性沥青,表明SBS与

SBR复合掺配对沥青模量具有显著提升效果,沥青在应力作用下的可恢复变形增大。

分析沥青的车辙因子可知,4种沥青的抗车辙因子均随温度上升而逐渐降低,且降低幅度较大。以SBS改性沥青为例,其52℃车辙因子为12 781.7 Pa,70℃车辙因子为2 683.8 Pa,下降了79%。表明沥青的应变规律具有较高的温度敏感性,沥青混合料在高温状态下容易产生车辙。四种沥青的车辙因子和疲劳因子具有相同的变化趋势,均随温度上升而降低。在相同温度下沥青车辙因子、疲劳因子由大到小排序为SBS-SBR复合改性沥青>SBS改性沥青>SBR改性沥青>基质沥青,表明在沥青中加入SBS、SBR可以提高沥青的模量和沥青混合料的抗车辙能力和抗疲劳破坏能力。为进一步评价沥青的高温性能和疲劳特性,采用三阶多项式拟合沥青车辙因子-温度、疲劳因子-温度的回归方程,见表4。计算极限抗车辙温度(W_R)和极限抗疲劳温度(W_F), W_R 为沥青抗车辙因子为1 kPa时对应的温度, W_F 为抗疲劳因子为5 kPa时对应的温度,计算结果见表5。

表4 沥青性能-时间回归分析结果

指标	沥青	回归方程	R^2
车辙因子-温度	基质沥青	$y=137\ 086-5\ 515.8x+74.7x^2-0.4x^3$	0.999 97
	SBS改性沥青	$y=309\ 330-12\ 198x+163.1x^2-0.73x^3$	0.999 82
	SBR改性沥青	$y=240\ 326-9\ 380x+122.9x^2-0.54x^3$	0.998 24
	复合改性沥青	$y=86\ 3254-32\ 843x+420.7x^2-1.81x^3$	0.993 75
疲劳因子-温度	基质沥青	$y=126\ 203-5\ 047.1x+67.9x^2-0.3x^3$	0.999 99
	SBS改性沥青	$y=265\ 334-10\ 520x+141x^2-0.6x^3$	0.999 62
	SBR改性沥青	$y=215\ 362-8\ 365.8x+109.2x^2-0.5x^3$	0.998 47
	复合改性沥青	$y=437\ 189-16\ 431x+208.5x^2-0.9x^3$	0.994 15

表5 沥青极限抗车辙温度与极限抗疲劳温度

指标	基质沥青	SBS改性沥青	SBR改性沥青	SBS-SBR复合改性沥青
$W_R/^\circ\text{C}$	64.1	79.9	70	84.3
$W_F/^\circ\text{C}$	50.8	60.4	57.2	66.4

由表4的回归方程可知,四种沥青车辙因子、疲劳因子与温度的拟合方程均具有较高的相关系数,采用三阶多项式拟合沥青的动态剪切性能指标与温度的关系是可行的,根据表4的回归方程计算沥青极限抗车辙温度与极限抗疲劳温度。

由表5的数据可知,4种沥青的抗车辙极限温度由高到低排序为SBS-SBR复合改性沥青>SBS改性沥青>SBR改性沥青>基质沥青,使用复合改性工艺使基质沥青的极限抗车辙温度增大了20.2℃,有效提高了沥青的抗变形能力和沥青混合料的高温稳定性。4种沥青的极限抗疲劳温度由高到低排序为SBS-SBR复合改性沥青>SBS改性沥青>SBR改性沥青>基质沥青。表明在50℃~60℃温度区域内基质沥青具有较好的抗疲劳性能,分析其原因是,在该温度条件下,基质沥青的黏性特征逐渐增强,而改性沥青由于具有较低的温度敏感性,其弹性特征仍较为显著;黏弹塑性材料的疲劳特性与黏性特征成正比,因此基质沥青在该温度下的疲劳特性较好。然而,由于沥青的力学特性对温度和加载方式具有极强的依耐性,仅采用温度扫描评价沥青的力学性能具有较大的局限性,因此本文采用多应力蠕变恢复试验和BBR试验测试沥青在不同应力条件和温度下的力学特性。

2.2 多应力蠕变恢复试验分析

在100 Pa和3 200 Pa条件下对基质沥青、SBS改性沥青、SBR改性沥青、SBS-SBR复合改性沥青进行蠕变-恢复试验,测试其应力响应曲线,试验条件为:动态剪切流变仪应力控制模式,试样直径为25 mm,平行板间距为1 000 μm,蠕变实验应力为100 Pa和3 200 Pa两种模式,各加载10个周期,每个周期前1 s为加载阶段,后9 s为恢复阶段,实验温度为64℃。4种沥青在第一周期和全周期的蠕变恢复曲线见图5、图6。

由图5、图6可知,4种沥青在控制应力模式下具有类似的蠕变-恢复规律,在蠕变-恢复第一周期内,均在加载1 s时达到应变峰值,然后随着卸载,应变逐渐恢复。在相同应力水平下(100 Pa和3 200 Pa),4种沥青的应变峰值由大到小排序为:基质沥青>SBR改性沥青>SBS改性沥青>复合改性沥青,随着SBS、SBR的加入,沥青的模量增大,在应力作用下的应变减小。对比,4种沥青100 Pa和3 200 Pa条件下第一周期的应变峰值可知,随着应力由100 Pa增加到3 200 Pa,沥青的应变大幅增加,应力卸载后的蠕变恢复趋势减缓。为进一步分析4种沥青的蠕变-恢复规律,根据式(1)~式(4)计算沥青的平均应变恢复率 $R(P)$ 和平均不可恢复蠕变柔量 $J_{nr}(P)$,结果见表6。

分析表6的数据可知,在相同应力水平下,4种沥青的平均应变恢复率 $R(P)$ 由大到小排序为:复合改性沥青>SBS改性沥青>SBR改性沥青>

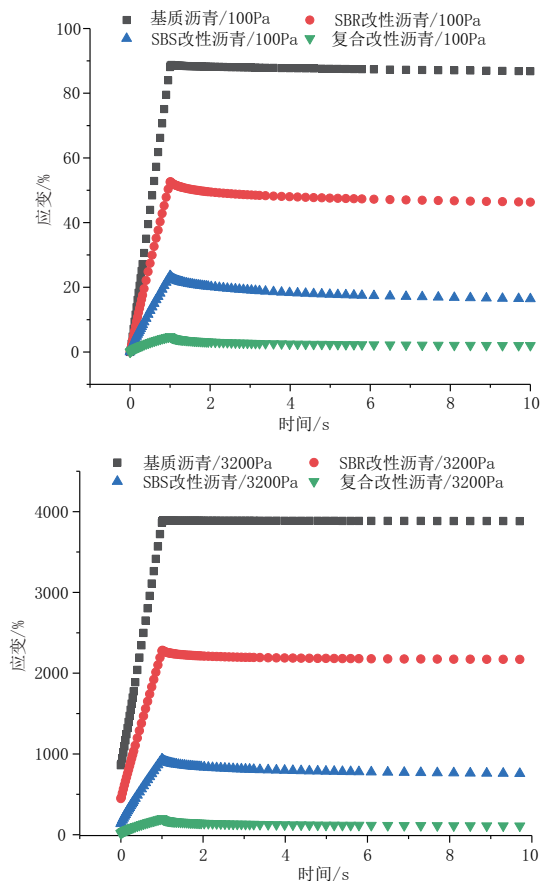


图5 4种沥青100 Pa、3 200 Pa蠕变恢复第一周期试验结果

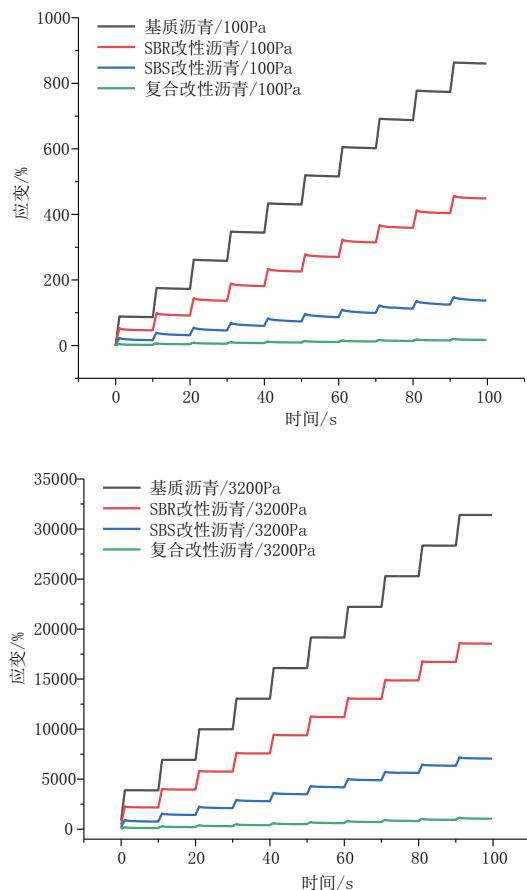


图6 4种沥青100 Pa、3 200 Pa蠕变恢复试验结果

表 6 4 种沥青平均应变恢复率 $R(P)$ 和平均不可恢复蠕变柔量 $J_{nr}(P)$

应力	参数	基质沥青	SBR 改性沥青	SBS 改性沥青	复合改性沥青
100 Pa	$R(P)/\%$	3.43	14.42	27.49	37.06
	$J_{nr}(P)/\text{kPa}^{-1}$	7.81	4.76	2.17	1.14
3 200 Pa	$R(P)/\%$	0.25	3.77	16.72	25.78
	$J_{nr}(P)/\text{kPa}^{-1}$	10.07	5.81	2.26	1.65

基质沥青。在 100 Pa 和 3 200 Pa 条件下,复合改性沥青的平均应变恢复率是基质沥青的 10.8、103.1 倍,表明在采用 SBS 与 SBR 对基质沥青进行复合改性,能够使沥青的蠕变恢复能力得到大幅提升,在高应力水平下的改善效果较低应力水平更为显著。平均不可恢复蠕变柔量 $J_{nr}(P)$ 由大到小排序为基质沥青>SBR 改性沥青>SBS 改性沥青>复合改性沥青,表明随着 SBS、SBR 的掺入,沥青在应力作用下产生的塑性变形减少,可恢复变形增大,沥青黏弹特性中的弹性特征更加显著。

此外,对比沥青在 100 Pa 和 3 200 Pa 条件下的 MSCR 指标还可以发现,沥青在低应力水平下的平均应变恢复率 $R(P)$ 大于高应力水平下的指标,平均不可恢复蠕变柔量 $J_{nr}(P)$ 随应力增大而降低。表明沥青在低应力作用下产生的变形相对容易恢复,沥青中的累积变形随应力增大而不断增加。

2.3 低温性能分析

采用低温梁流变试验仪测试基质沥青、SBS 改性沥青、SBR 改性沥青和复合改性沥青在 -10°C 、 -15°C 、 -20°C 条件下的低温性能,试验结果见图 7。

由图 7 可知,在 -10°C 、 -15°C 条件下,四种沥青的低温蠕变劲度模量由大到小排序为基质沥青>SBR 改性沥青>SBS 改性沥青>复合改性沥青, -20°C 时为 SBR 改性沥青>基质沥青>SBS 改性沥青>复合改性沥青。根据沥青恒应力作用下的应变规律,蠕变劲度模量越小,低温性能越好,可知,四种沥青中复合改性沥青的低温性能最好,SBS 改性沥青次之,SBR 改性沥青和基质沥青的低温性能较差。沥青的 m 值随着温度的降低而减小,沥青的 m 值表征沥青劲度模量-时间双对数曲线的变化率,值越小,沥青的应力松弛能力越低,抗开裂性能越差。在相同温度下,对比四种沥青的 m 改性沥青的 m 值可知,复合改性沥青最大,基质沥青最小,SBS 和 SBR 能够提高沥青的应力松弛能力。

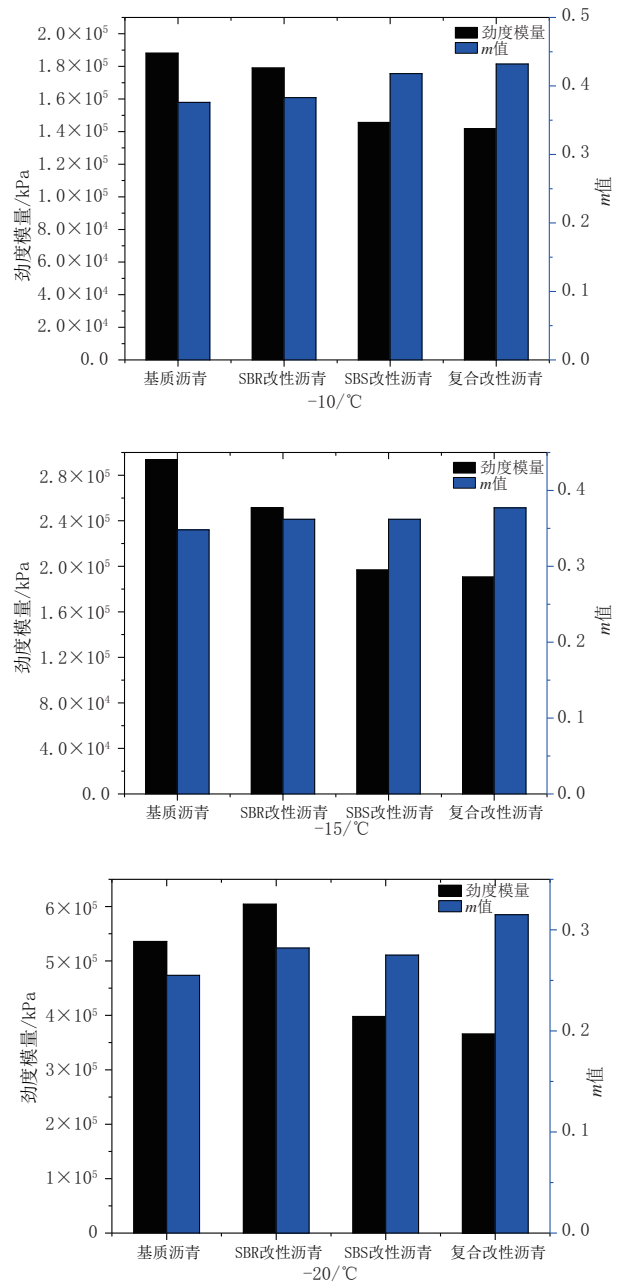


图 7 四种沥青 -10°C 、 -15°C 、 -20°C 加载 60s 时低温蠕变劲度模量与 m 值

3 结 论

(1) 四种沥青的复数模量与相位角差异显著,在相同温度下 SBS-SBR 改性沥青的复数模量最大,基质沥青的最小;采用相位角评价沥青的粘性特征,随着温度的升高,基质沥青的粘性特性最显著,改性沥青在高温下仍具有较高的弹性。

(2) 采用抗车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 与疲劳因子 $G^*\sin \delta$ 表征沥青的高温性能和疲劳特性,结果显示,改性剂对沥青高温抗变形能力改善效果显著; $G^*\sin \delta$ 能够表征沥青在高温状态下的疲劳特性,沥青的粘性特征越明显,抵抗疲劳破坏的能力

(下转第 162 页)

土体湿陷性由中等转变为轻,深度为 200 cm 的土体湿陷性消除效果较差。

(3)冲击碾压对湿陷性黄土的处理深度约为 1.5 m,当冲击碾压 40 遍时,深度 80 cm 范围的黄土压实度高达 94.5%,深度为 150 cm 范围内的黄土压实度达到 88.2%。

(4)冲击碾压能够有效增加湿陷性黄土的沉降量及土体压缩模量,冲击碾压 25 遍时效果最显著;当冲击碾压超过 25 遍后,湿陷性黄土沉降量逐渐稳定,对于深度为 80 cm 的土体,压缩模量随着冲击碾压的继续作用增长速率不断减小。

参考文献:

[1] 陆芳. 浅析湿陷性黄土地区路基常见病害及处理措施[J]. 西部

交通科技,2013(4):15-19.

[2] 张志清,张兴友,胡光艳,等. 湿陷性黄土公路路基病害类型及成因分析[J]. 路基工程,2007(5):160-162.

[3] 杨阳. 湿陷性黄土地区城市道路路基处理的研究[J]. 北方交通,2018,298(2):85-87.

[4] 马骏腾. 公路湿陷性黄土路基处理效果评价研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2009.

[5] 曾繁辉,李念军. 冲击碾压法在低液限粉土路基施工中的应用[J]. 路基工程,2007(3):139-140.

[6] 姚雪贵,杨彪,雷愿锋,等. 冲击压实法在湿陷性黄土高填方地基处理中的试验观测[J]. 工程建设,2011,43(2):38-39.

[7] 孔健. 冲击碾压技术在城市道路建设中的应用[J]. 城市道桥与防洪,2018(12):188-190.

[8] 张晓靖,邱延峻,余斌,等. 冲击碾压在高填方路基中的应用研究[J]. 交通运输工程与信息学报,2011,9(1):70-77.

[9] 颜海. 冲击压实技术在湿陷性黄土地区应用的研究[D]. 石家庄:河北工业大学,2010.

(上接第 158 页)

越强。

(3)蠕变试验表明,在沥青中掺入 SBS、SBR 能够提高沥青的弹性,循环加载后改性沥青的应变恢复率高于基质沥青,不可恢复蠕变柔量小于基质沥青;将 SBS 与 SBR 复合掺配制备的改性沥青的应变恢复能力由于单一材料改性沥青。

(4)通过对沥青的低温性能指标 S 与 m 值进行分析,发现在恒载荷作用下,改性沥青的劲度模量较低, m 值较大,表明 SBS、SBR 能够改善沥青在低温下的应力松弛能力,提高抗裂性能。

参考文献:

[1] 王岚,崔世超,任敏达. 多聚磷酸复配 SBS 改性沥青微观结构特性评价[J]. 材料导报,2019,33(24):4105-4110.

[2] 寇长江,肖鹏,康爱红. SBS 改性沥青高温流变性能与相态结构的关系[J]. 材料科学与工程学报,2017,35(6):906-910,956.

[3] 陈富强,宋永朝,陈富坚. SBS 改性沥青混合料高温性能多指标综合评价[J]. 同济大学学报(自然科学版),2009,37(10):1345-1348,1359.

[4] 方滢,谢玮珺,杨建华. 聚氨酯预聚物改性沥青的制备及其流变行为[J]. 功能材料,2019,50(6):6197-6205.

[5] 曾三海,曾立,梁称. SBS 改性沥青胶料性能的影响因素及原因分析[J]. 新型建筑材料,2019,46(5):134-136.

[6] 弓锐,郭彦强,徐鹏. SBS/SBR 复合改性乳化沥青的性能研究[J]. 中外公路,2019,39(1):234-237.

[7] 程培峰,张展铭,李艺铭. 星点设计-效应面法优化 PPA/SBR 复合改性沥青制备工艺[J]. 公路工程,2019,44(1):184-188.

[8] 朱洪洲,范世平,卢章天. 基于 DSR 时间扫描的沥青常应力疲劳演化规律分析[J]. 公路交通科技,2017,34(11):8-14,37.

[9] 朱洪洲,范世平,卢章天. 基于 DSR Time-Sweep 的沥青常应变疲劳演化规律分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(02):33-38.

[10] 唐乃鹏,黄卫东. 基于 MSCR 试验的 SBS 改性沥青高温性能评价与分级[J]. 建筑材料学报,2016,19(4):665-671.