

基于 MSCR 试验的 BRA 改性沥青高温性能分析

吴源锋¹, 廖军², 黄晚清³, 冯文凯², 曹明明³

(1. 荣县交通运输局, 四川 荣县 643100; 2. 成都理工大学 环境与土木工程学院; 3. 四川省交通勘察设计研究院有限公司)

摘要:为了更好地评价 BRA 改性沥青高温性能,对 BRA 掺量不同的改性沥青、SBS 改性沥青进行了常规震荡剪切试验(DSR)和多应力蠕变恢复试验(MSCR),对比分析 BRA 改性沥青高温性能,并利用车辙试验验证 BRA 改性沥青混合料高温性能。结果表明:PG 高温性能分级难以准确区分不同种类沥青高温性能;BRA 的掺入能显著增强沥青的高温变形恢复能力及抗永久变形能力;在一定条件下,高 BRA 掺量改性沥青的抗永久变形能力与 SBS 改性沥青相当;BRA 改性沥青的应力敏感性较 SBS 改性沥青而言更不易受温度变化的影响; $J_{nr0.1}$ 、 $J_{nr3.2}$ 可作为 BRA 改性沥青高温性能评价指标。

关键词:道路工程; BRA 改性沥青; 多应力蠕变恢复试验; 高温性能

目前,沥青混凝土路面的车辙、坑槽等病害屡见不鲜,世界各国均把防治沥青混凝土路面车辙病害放在首要位置,各类性能优良的改性沥青应运而生。布敦岩沥青(Buton Rock Asphalt,简称 BRA)作为一种优良天然沥青改性剂,近年来国内外学者对 BRA 进行了广泛研究,Muhammad Karam 等研究表明 BRA 能提高沥青混合料的弹性模量;文献[2]研究表明 BRA 的掺入对基质沥青的低温性能造成不利影响,但明显改善基质沥青的疲劳性能和抗老化性能;文献[3]研究表明 BRA 改性沥青的车辙因子与 BRA 掺量之间有较好的线性函数关系;文献[4]、[5]对 BRA 改性沥青混合料的路用性能进行了研究,结果表明 BRA 能有效改善沥青混合料的高温性能;文献[6]建议结合 SHRP 指标评价 BRA 改性沥青及其混合料性能。鉴于目前利用 MSCR 试验分析 BRA 改性沥青高温性能的研究较少,该文将在沥青 PG 高温分级基础上,基于 MSCR 试验,对比分析 70[#] 基质沥青、SBS 改性沥青、BRA 改性沥青的高温性能。

1 原材料及试验方案

1.1 原材料

选用印尼布敦岩沥青(BRA),某品牌 70[#] 基质沥青,某品牌 SBS 改性沥青,BRA 基本技术指标及测试

结果见表 1。

表 1 布敦岩沥青技术指标及测试结果

| 项目 | 颜色 | 灰分/ % | 含水率/ % | 不同粒度(mm)成分/% | | |
|----|---------|----------|-----------|--------------|--------|-------|
| | | | | 4.75 | 2.36 | 1.18 |
| 实测 | 褐色粉末 | 50.1 | 0.5 | 100 | 99.70 | 87.40 |
| 要求 | 黑色、褐色粉末 | ≤80 | ≤2 | 100 | 95~100 | >80 |

1.2 BRA 改性沥青的制备

BRA 改性沥青的制备方法:按照设计比例称取一定质量的 BRA,将 70[#] 基质沥青放入 150 °C 的烘箱中加热至流动状态,再将烘箱升温至 180 °C 加热 10 min,然后加入事先称取好的 BRA,并用玻璃棒搅拌均匀,采用剪切机以 4 500 r/min 的转速剪切、挤压 30 min,整个制备过程确保沥青温度不超过 180 °C,并根据沥青黏度大小适当调整温度。

不同 BRA 掺量改性沥青常规指标测试结果如表 2 所示。

1.3 沥青及其混合料试验方法

1.3.1 高温分级试验

高温分级试验采用美国 TA 公司生产的型号为 AR1500ex 的动态剪切流变仪,对沥青进行常规震荡剪切试验(DSR),试验样品为原样沥青以及旋转薄膜烘箱加热(RTFOT)后沥青残留物,试验温度为 52~82 °C,

表2 BRA掺量不同的改性沥青常规指标试验结果

| 沥青类型 | 软化点/ | 25℃针入 | 15℃延 |
|---------------------------|------|------------|------|
| | ℃ | 度/(0.1 mm) | 度/cm |
| 70 [#] 沥青+10%BRA | 51.2 | 52.8 | 27.5 |
| 70 [#] 沥青+20%BRA | 51.5 | 49.3 | 22.5 |
| 70 [#] 沥青+30%BRA | 53.8 | 42.0 | 16.4 |
| 70 [#] 沥青+40%BRA | 54.5 | 38.8 | 12.1 |
| 70 [#] 沥青+50%BRA | 56.2 | 34.0 | 9.1 |
| 70 [#] 沥青+60%BRA | 58.8 | 33.4 | 7.1 |

以6℃为一个间隔,选用的转子直径为25 mm,间隙设置为1 mm,震荡剪切频率为10 rad/s,在应变控制模式下进行。以原样沥青车辙因子($G^*/\sin\delta$)不小于1.0 kPa,且RTFOT后沥青残留物 $G^*/\sin\delta$ 不小于2.2 kPa来确定沥青的高温等级,以表征沥青的高温抗车辙性能。

1.3.2 多应力蠕变恢复试验

沥青多应力蠕变恢复试验(MSCR)同样采用AR1500ex型动态剪切流变仪,试验样品为RTFOT后沥青残留物,试验温度同样为52~82℃,以6℃为一个间隔,选用的转子直径为25 mm,间隙设置为1 mm,在应力控制模式下进行,先后分别在0.1、3.2 kPa剪切应力水平下加载1 s,卸载9 s,两个步骤之间不发生间歇,不同的是在0.1 kPa的剪切应力水平下重复进行20个周期,前10个周期用于调整试件,数据不予以采纳,3.2 kPa的剪切应力水平下重复进行10个周期,整个试验共耗时300 s。

依据以下公式计算每个周期内沥青的平均蠕变恢复率 R 、平均不可恢复蠕变柔量 J_{nr} :

$$R = \frac{\gamma_p - \gamma_{nr}}{\gamma_p - \gamma_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$J_{nr} = \frac{\gamma_{nr}}{\tau} \quad (2)$$

式中: γ_p 为峰值应变; γ_{nr} 为残留应变; γ_0 为起始应变; τ 为蠕变剪切应力。

将0.1 kPa和3.2 kPa两个应力水平下10个蠕变恢复周期内的平均蠕变恢复率值分别表示为 $R_{0.1}$ 和 $R_{3.2}$,平均不可恢复蠕变柔量值分别表示为 $J_{nr,0.1}$ 和 $J_{nr,3.2}$ 。平均蠕变恢复率和平均不可恢复蠕变柔量对应的应力敏感性指标 R_{diff} 和 $J_{nr-diff}$ 可根据式(3)、(4)计算而得:

$$R_{diff} = \frac{R_{0.1} - R_{3.2}}{R_{0.1}} \times 100\% \quad (3)$$

$$J_{nr-diff} = \frac{J_{nr,0.1} - J_{nr,3.2}}{J_{nr,0.1}} \times 100\% \quad (4)$$

1.3.3 沥青混合料车辙试验方法

对不同类型沥青混合料进行60℃车辙试验获取车辙深度、动稳定度 DS ,以验证沥青高温性能,其中混合料的级配为AC-20C,粗细集料为石灰岩,填料为石灰岩磨制的矿粉,油石比均设定为4.4%,对每类沥青混合料平行试验3个试件,详细试验步骤及要求见JTG E20-2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》。

2 结果与讨论

2.1 高温分级试验结果分析

对RTFOT老化前后沥青分别进行常规震荡剪切试验(DSR),获取不同试验温度下的 $G^*/\sin\delta$,并根据要求对沥青进行PG高温分级,不同试验温度下沥青的 $G^*/\sin\delta$ 、PG高温分级结果见表3。

表3 沥青的 $G^*/\sin\delta$ 及PG高温等级

| 沥青类型 | RTFOT前($G^*/\sin\delta$)/kPa | | | | | | RTFOT后($G^*/\sin\delta$)/kPa | | | | | | PG高温等级/℃ |
|---------------------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|--------------------------------|-------|-------|------|------|------|----------|
| | 58℃ | 64℃ | 70℃ | 76℃ | 82℃ | 88℃ | 58℃ | 64℃ | 70℃ | 76℃ | 82℃ | 88℃ | |
| 70 [#] 沥青+0%BRA | 5.38 | 2.32 | 1.04 | 0.53 | — | — | 12.57 | 5.61 | 2.59 | 1.30 | — | — | 70 |
| 70 [#] 沥青+10%BRA | 6.21 | 2.93 | 1.44 | 0.74 | — | — | 17.35 | 7.92 | 3.51 | 1.76 | — | — | 70 |
| 70 [#] 沥青+20%BRA | 6.98 | 3.50 | 1.80 | 0.92 | — | — | 20.26 | 9.16 | 4.25 | 2.11 | — | — | 70 |
| 70 [#] 沥青+30%BRA | 10.25 | 5.21 | 2.63 | 1.36 | 0.69 | — | 27.67 | 11.60 | 5.19 | 2.55 | 1.28 | — | 76 |
| 70 [#] 沥青+40%BRA | 12.52 | 6.15 | 2.97 | 1.54 | 0.79 | — | 33.08 | 15.78 | 7.20 | 3.60 | 1.75 | — | 76 |
| 70 [#] 沥青+50%BRA | 15.13 | 6.83 | 3.34 | 1.74 | 0.90 | — | 37.00 | 18.57 | 9.07 | 4.21 | 2.16 | 1.21 | 76 |
| 70 [#] 沥青+60%BRA | 16.53 | 8.25 | 4.22 | 2.13 | 1.11 | 0.61 | 47.75 | 22.72 | 11.06 | 5.40 | 2.84 | 1.46 | 82 |
| SBS改性沥青 | 10.03 | 5.28 | 2.91 | 1.81 | 1.19 | 0.82 | 16.16 | 8.35 | 4.41 | 2.58 | 1.57 | — | 76 |

由表3可知: BRA掺量为0%、10%、20%的沥青PG高温分级均为70℃, BRA掺量为30%、40%、50%的沥青以及SBS改性沥青PG高温分级均为76

℃, BRA掺量为60%的沥青PG高温分级为82℃,表明依据PG高温分级难以准确区分不同种类沥青高温性能。

2.2 MSCR 试验结果分析

2.2.1 蠕变恢复率分析

对 RTFOT 老化后沥青进行 MSCR 试验,按式(1)计算出 0.1 kPa 和 3.2 kPa 应力水平下,不同温度时沥青的 $R_{0.1}$ 、 $R_{3.2}$,具体结果如图 1 所示。

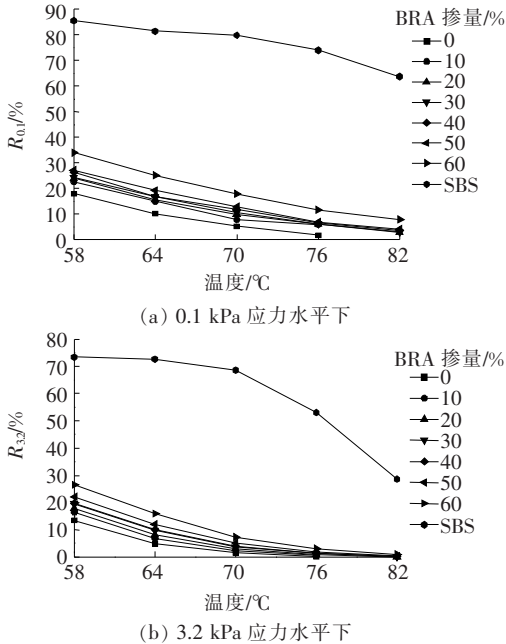


图 1 不同试验温度下各沥青的蠕变恢复率

由图 1 可知:① 沥青的 $R_{0.1}$ 、 $R_{3.2}$ 均随试验温度的升高而逐渐减小,表明沥青的弹性成分在减少,黏性成分在增加,表现为变形恢复能力的降低;② 同一温度下,各掺量 BRA 改性沥青的 $R_{0.1}$ 、 $R_{3.2}$ 均小于 SBS 改性沥青,但明显大于 70# 基质沥青(BRA 掺量为 0%),表明 BRA 的掺入可以明显增加基质沥青的弹性变形,减少黏性变形,表现为沥青高温变形恢复能力增强。

为进一步分析沥青的 R 与 BRA 掺量之间的关系,在 PG 高温分级结果基础上,绘制出试验温度分别为 70、76 °C 时沥青的 R 随 BRA 掺量的变化,如图 2 所示。

由图 2 可知:① $R_{0.1}$ 、 $R_{3.2}$ 均随 BRA 掺量的增加明显增大,表明沥青的弹性成分随之增多,黏性成分随之减少,变形恢复能力逐渐增强;② R 随应力水平的提高或温度的升高而减小,印证了应力和温度对沥青抗变形能力的影响具有等效性这一结论。

2.2.2 不可恢复蠕变柔量分析

文献[11]研究表明 MSCR 试验可以在更大的应力应变范围内模拟、测试和分析沥青胶结料的非线性行为, J_{nr} 更适合作为改性沥青高温性能评价指标,其

值越小表明沥青高温性能越好。0.1 kPa 和 3.2 kPa 应力水平下,沥青的 $J_{nr,0.1}$ 和 $J_{nr,3.2}$ 可根据式(2)计算得到,具体结果如图 3 所示。

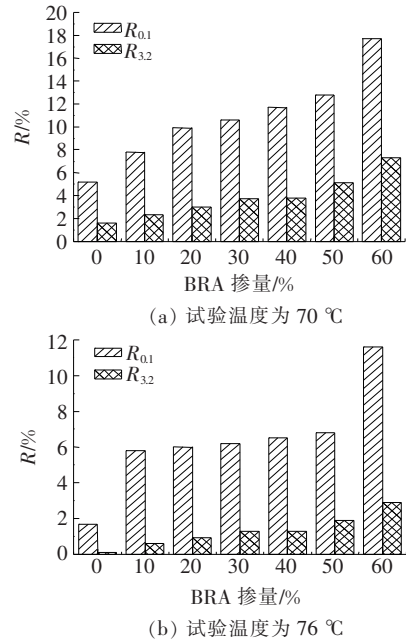


图 2 不同 BRA 掺量沥青的蠕变恢复率

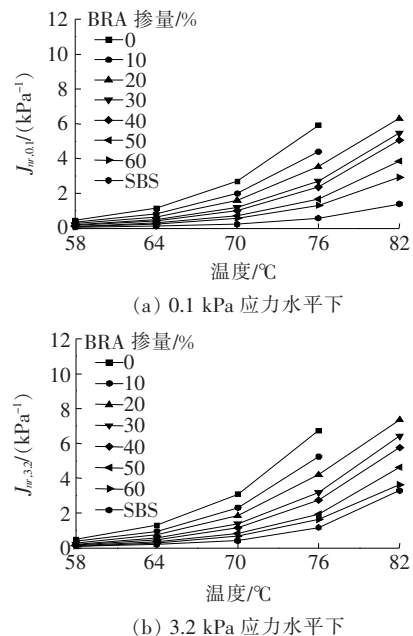


图 3 不同试验温度下各沥青的不可恢复蠕变柔量

由图 3 可知:① 随试验温度的升高,沥青的 J_{nr} 逐渐增大,表明其高温抗永久变形能力逐渐降低;② 温度越高,各掺量 BRA 改性沥青的 J_{nr} 和 70# 基质沥青的 J_{nr} 之间的差值也越大,表明温度越高越能区分沥青高温性能;③ 同一温度下,随 BRA 掺量的增加,其改性沥青的 J_{nr} 逐渐减小,与 70# 基质沥青 J_{nr} 之间

的差值也逐渐增大,表明BRA能明显改善沥青高温抗永久变形能力,且BRA掺量越高改善效果越显著;④应力从0.1 kPa增大到3.2 kPa时,沥青不可恢复蠕变柔量增加,这与实际沥青混凝土路面上较大的轴载会产生较大的车辙深度相符合;⑤各掺量BRA改性沥青的 J_{nr} 明显大于SBS改性沥青,其与SBS改性沥青 J_{nr} 的差值随试验温度的升高而增大,随BRA掺量、应力水平的增加而减小,表明高BRA掺量改性沥青的抗永久变形能力在温度不高、应力较大条件下与SBS改性沥青差别不大,也就是说,在温度不太高的区划内完全可以用高BRA掺量的改性沥青替代SBS改

性沥青;⑥沥青的 $J_{nr,0.1}$ 、 $J_{nr,3.2}$ 与试验温度有较好的指数函数关系,即 $J_{nr}=Ae^{Bx}$,其中 x 为试验温度, A 、 B 为回归系数,具体值见表4。

为分析沥青的 J_{nr} 与BRA掺量的关系,绘制出试验温度分别为70、76℃时沥青的 J_{nr} 随BRA掺量的变化,如图4所示。

由图4可知:拟合发现,试验温度分别为70、76℃时,沥青的 $J_{nr,0.1}$ 、 $J_{nr,3.2}$ 均随BRA掺量的增加呈指数减小趋势,表明BRA掺量较低时,变化BRA掺量对沥青高温性能的影响更为显著,而当掺量较高时,掺量的变化对沥青高温性能的影响更为微弱。

表4 沥青的 J_{nr} 随试验温度变化的回归系数A、B

| 沥青类型 | 应力水平为0.1 kPa | | | 应力水平为3.2 kPa | | |
|---------------|--------------|----------|----------------|--------------|----------|----------------|
| | A | B | R ² | A | B | R ² |
| 70# 沥青 | 0.000 12 | 0.142 77 | 0.998 47 | 0.000 63 | 0.111 78 | 0.979 25 |
| 70# 沥青+10%BRA | 0.000 11 | 0.139 43 | 0.999 71 | 0.000 48 | 0.111 57 | 0.968 26 |
| 70# 沥青+20%BRA | 0.000 05 | 0.149 11 | 0.998 93 | 0.000 27 | 0.116 14 | 0.975 07 |
| 70# 沥青+30%BRA | 0.000 08 | 0.136 59 | 0.998 24 | 0.000 23 | 0.114 48 | 0.972 51 |
| 70# 沥青+40%BRA | 0.000 04 | 0.144 17 | 0.998 22 | 0.000 14 | 0.118 68 | 0.974 17 |
| 70# 沥青+50%BRA | 0.000 02 | 0.147 59 | 0.999 11 | 0.000 10 | 0.118 82 | 0.975 39 |
| 70# 沥青+60%BRA | 0.000 02 | 0.144 88 | 0.998 69 | 0.000 08 | 0.119 38 | 0.972 81 |
| SBS 改性沥青 | 0.000 04 | 0.125 59 | 0.990 08 | 0.000 32 | 0.096 02 | 0.911 84 |

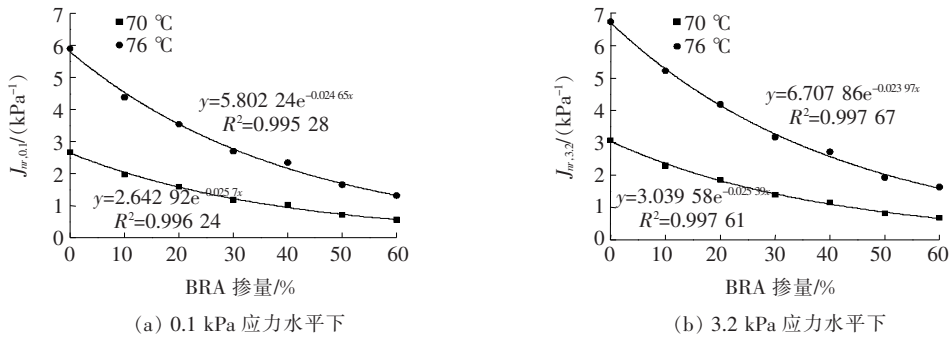


图4 不同BRA掺量沥青的不可恢复蠕变柔量

2.2.3 应力敏感性指标分析

不同温度下沥青的 R_{diff} 、 $J_{nr-diff}$ 可分别根据式(3)、(4)计算得到,具体结果如图5所示。

由图5可知:①各掺量BRA改性沥青的 R_{diff} 以及 $J_{nr-diff}$ 均随温度的升高而增大,表明其 R 和 J_{nr} 的应力敏感性随温度的升高而增大;②SBS改性沥青的 R_{diff} 明显低于各掺量BRA改性沥青,其 R_{diff} 随温度的变化方式与各掺量BRA改性沥青明显不同,当温度高于70℃时,其 R_{diff} 急剧增加,表明SBS改性沥青的应力敏感性(R)明显低于各掺量BRA改性沥青,

但更容易受温度变化的影响;③SBS改性沥青的 $J_{nr-diff}$ 明显大于各掺量BRA改性沥青,其 $J_{nr-diff}$ 随温度的变化与各掺量BRA改性沥青明显不同,当温度高于70℃时,其 $J_{nr-diff}$ 急剧增加,表明SBS改性沥青的应力敏感性(J_{nr})明显大于各掺量BRA改性沥青,且更容易受温度变化的影响。

为分析沥青的 R_{diff} 和 $J_{nr-diff}$ 与BRA掺量的关系,绘制出试验温度分别为70、76℃时沥青的 R_{diff} 和 $J_{nr-diff}$ 随BRA掺量的变化,如图6所示。

由图6可知:①各掺量BRA改性沥青的 R_{diff} 和

$J_{nr-diff}$ 与 BRA 掺量之间无明显的变化规律;② BRA 掺量为 40%~50%时 R_{diff} 和 $J_{nr-diff}$ 均较小,表明该掺量范围内 BRA 改性沥青的 R 和 J_{nr} 的应力敏感性

较其他掺量 BRA 改性沥青低;③ 76 °C 时 BRA 改性沥青的应力敏感指标(R_{diff} 、 $J_{nr-diff}$)均较 70 °C 时高,表明其应力敏感性更大,非线性黏弹性也更为显著。

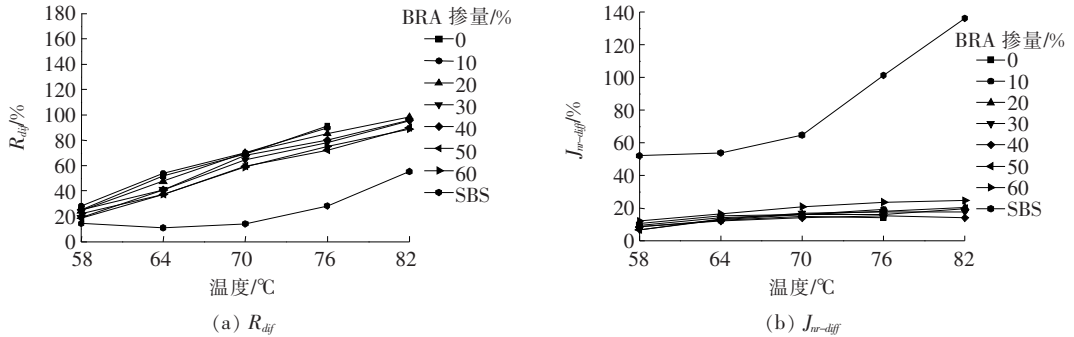


图 5 不同温度下沥青的应力敏感性指标

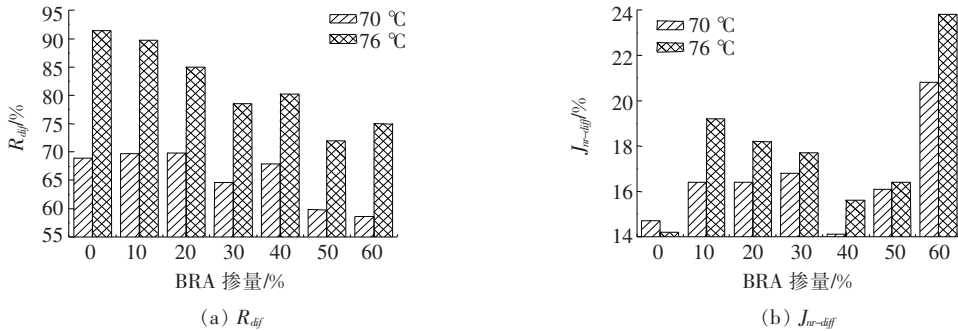


图 6 不同 BRA 掺量沥青的应力敏感性指标

2.3 高温车辙试验结果分析

对沥青混合料进行 60 °C 车辙试验,结果如图 7 所示。

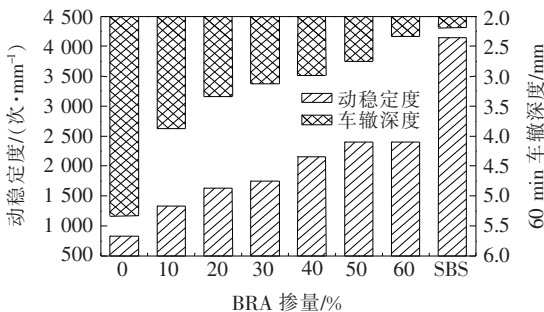


图 7 不同类型沥青混合料动稳定度和车辙深度

由图 7 可知:随 BRA 掺量的增加,沥青混合料的车辙深度逐渐降低,动稳定度逐渐增大,表明其混合料的高温稳定性逐渐增强,与文中测得的 BRA 改性沥青高温评价指标变化情况较为一致。动稳定度表明 BRA 改性沥青高温性能不如 SBS 改性沥青,而与 PG 高温等级在评价沥青高温性能方面存在较大差异,可能还是由于评价原理、试验温度的原因,需进一步研究。

2.4 MSCR 高温评价指标与 DS 的相关性

将各 BRA 掺量改性沥青混合料 DS 分别与 58、

64、70、76 °C 条件下的 $R_{0.1}$ 、 $R_{3.2}$ 、 $J_{nr,0.1}$ 、 $J_{nr,3.2}$ 进行指数函数、线性函数、对数函数、幂函数回归分析。发现 DS 仅与 $R_{0.1}$ 有良好的幂函数关系,而与 $R_{3.2}$ 、 $J_{nr,0.1}$ 、 $J_{nr,3.2}$ 均有较好的对数函数关系,因此统一采用对数函数回归模型,拟合得到的回归方程及其 R^2 如图 8 所示。

由图 8 可知:① $R_{0.1}$ 、 $R_{3.2}$ 、 $J_{nr,0.1}$ 、 $J_{nr,3.2}$ 与各 BRA 掺量改性沥青混合料 DS 的对数函数相关性总体排序为 $J_{nr,3.2} > J_{nr,0.1} > R_{3.2} > R_{0.1}$;② BRA 掺量改性沥青混合料 DS 与 $R_{0.1}$ 、 $R_{3.2}$ 、 $J_{nr,0.1}$ 、 $J_{nr,3.2}$ 之间的关系可以通过对数函数方程表达;③ $J_{nr,3.2}$ 在 BRA 改性沥青高温性能评价上优于 $J_{nr,0.1}$ 、 $R_{0.1}$ 、 $R_{3.2}$ 。

3 结论

利用沥青常规震荡剪切试验和多应力蠕变恢复试验,对文中沥青的 PG 高温分级、平均蠕变恢复率(R)、平均不可恢复蠕变柔量(J_{nr})、应力敏感性以及适用的交通等级进行了研究,并利用中国国内车辙试验验证沥青混合料高温性能,得出以下结论:

(1) PG 高温分级难以准确区分不同种类沥青的

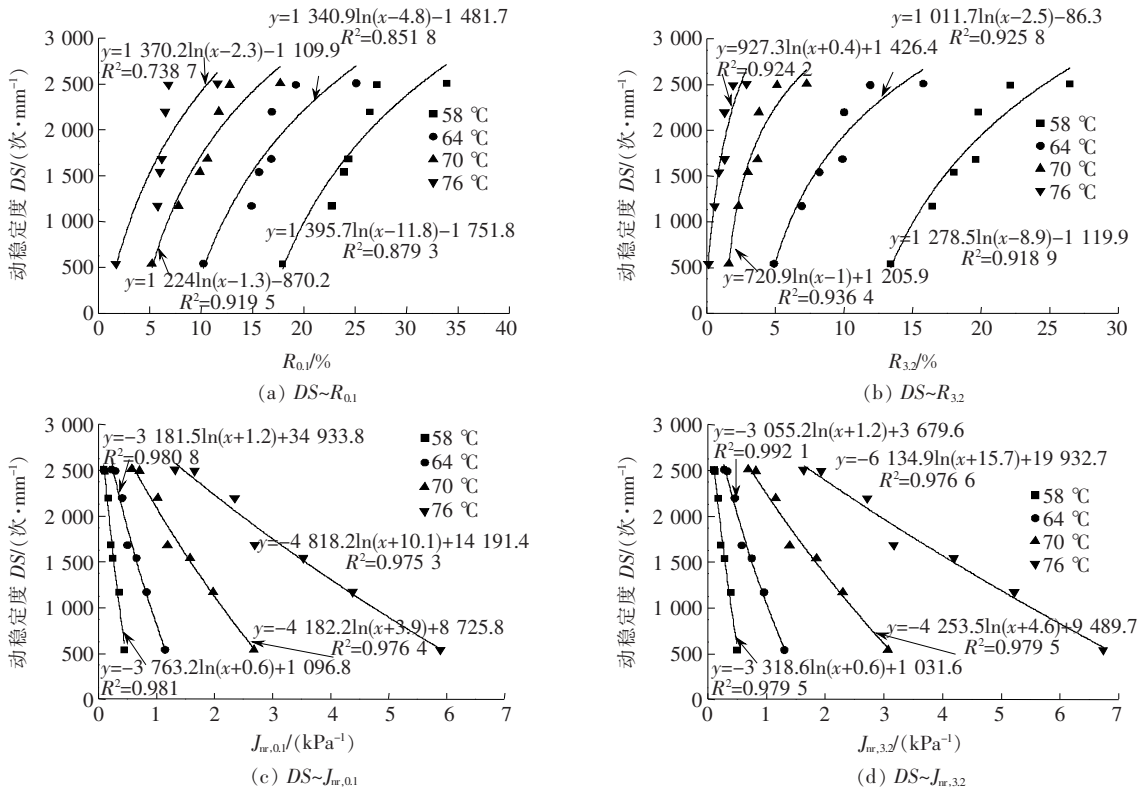


图8 BRA改性沥青混合料DS与评价指标的拟合曲线

高温性能。

(2) BRA的掺入能够增强沥青的高温变形恢复能力及高温抗永久变形能力,高BRA掺量的改性沥青在一定条件下的抗永久变形能力与SBS改性沥青相当。

(3) BRA改性沥青的应力敏感性随温度的升高而逐渐增大,与SBS改性沥青的应力敏感性随温度变化的方式明显不同,当温度高于70℃时,SBS改性沥青的应力敏感性急剧增加。BRA掺量为40%~50%时,BRA应力敏感性较小。

(4) $J_{nr,0.1}$ 、 $J_{nr,3.2}$ 可作为BRA改性沥青高温性能评价指标。

参考文献:

[1] Muhammad Karami, Hamid Nikraz, Surya Sebayang, et al. Laboratory Experiment on Resilient Modulus of BRA Modified Asphalt Mixtures[J]. International Journal of Pavement Research & Technology, 2018, 11(1): 38-46.

[2] 罗东,刘黎萍,孙立军,等.布敦岩沥青改性沥青老化性能和疲劳性能评价[J].交通科学与工程,2016(4).

[3] 吴源锋,廖军,黄晚清,等.布敦岩沥青改性沥青高温性能分析[J].成都大学学报(自然科学版),2019(1).

[4] Shutang Liu, Weidong Cao, Xiaojun Li, et al. Principle Analysis of Mix Design and Performance Evaluation on Superpave Mixture Modified with Buton Rock Asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2018, 176: 549-555.

[5] 曾梦澜,陈伟,朱艳贵,等.布敦岩沥青湿法工艺掺量对改性沥青混合料性能的影响[J].湖南大学学报(自然科学版),2018(11).

[6] 李林萍,程龙,于江,等.岩沥青改性沥青研究分析[J].中外公路,2018(6).

[7] 吴源锋.印尼布敦岩沥青改性沥青及其混合料路用性能研究[D].成都理工大学硕士学位论文,2018.

[8] JT/T 860.5-2014 沥青混合料改性添加剂第5部分:天然沥青[S].

[9] JTG E20-2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].

[10] ASTM D7405-15 American Society for Testing Material. Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer[S].

[11] D'Angelo, John A. The Relationship of the MSCR Test to Rutting[J]. Road Materials and Pavement Design, 2009, 10(S1): 61-80.