

文章编号:1007-9629(2021)04-0833-09

钢桥面铺装常用改性沥青高温性能关键指标分析

丁子豪¹, 倪富健¹, 李 松¹, 蒋继望¹, 陆永强²

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 211189; 2. 浙江嘉绍跨江大桥投资发展有限公司, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 通过多应力蠕变恢复(MSCR)试验,分析了3种高性能改性沥青(A、B、C沥青)和SBS改性沥青(D沥青)的不可恢复蠕变柔量(J_{nr})、蠕变恢复率(R)及相应的应力敏感性指标;通过室内车辙试验和动态蠕变试验,分析了4种改性沥青混合料的高温抗变形性能指标及其相关性。结果表明:与B、D沥青相比,A、C沥青在不同应力条件下的 J_{nr} 值较小, R 值较大,对应力的敏感程度较低;A、C沥青混合料的高温性能要明显优于B、D沥青混合料;相较于室内车辙试验,动态蠕变试验与改性沥青 J_{nr} 、 R 之间的相关性更好;使用高应力(3.2、6.4、12.8 kPa)条件下MSCR试验获取的 J_{nr} 及 R 值来评价改性沥青混合料的高温性能较为合理;A、C沥青的应用可以显著提升钢桥面铺装磨耗层的高温稳定性。

关键词: 改性沥青; 高温性能; 多应力蠕变恢复试验; 相关性分析; 钢桥面铺装

中图分类号:U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.04.022

Analysis on the Key Indicators of High-Temperature Performance of Modified Asphalts Commonly Used in Steel Bridge Deck Pavement

DING Zihao¹, NI Fujian¹, LI Song¹, JIANG Jiawang¹, LU Yongqiang²

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. Zhejiang Jiashao Cross River Bridge Investment and Development Co., Ltd., Shaoxing 312000, China)

Abstract: High-temperature performance of three high-performance modified asphalts (A, B and C) and SBS modified asphalt were characterized by multiple stress creep recovery (MSCR) test. Their non-recoverable creep compliance (J_{nr}), percent recovery (R) and the corresponding stress sensitivity indexes were analyzed. The high-temperature performance of asphalt mixtures fabricated by those four asphalt binders were evaluated through wheel tracking tests and dynamic creep tests. Ultimately, regression analyses were carried out between high-temperature performance parameters of asphalt binder and asphalt mixture. The results show that the J_{nr} of A and C is comparatively smaller and percent recovery is bigger than SBS modified asphalt and B under different stresses. In addition, the stress-sensitivity of A and C is lower than that of B and SBS modified asphalt. Furthermore, the high-temperature rutting resistance of A mixture and C mixture is superior to the other two asphalt mixtures. Comparing with tracking tests, the dynamic creep tests show better correlation with J_{nr} and R . It is more reasonable to use J_{nr} and R of asphalt binders at 3.2, 6.4 and 12.8 kPa to evaluate the high-temperature performance of modified asphalt mixtures. The application of A and C could improve the high-temperature stability performance of steel bridge deck pavement dramatically.

Key words: modified asphalt; high-temperature performance; multiple stress creep recovery (MSCR) test; correlation analysis; steel bridge deck pavement

收稿日期:2020-04-17; 修订日期:2020-07-01

基金项目:江苏省交通运输科技项目(2016Y01)

第一作者:丁子豪(1992—),男,江苏东台人,东南大学硕士生. E-mail:dingzihao@seu.edu.cn

通讯作者:倪富健(1968—),男,江苏海安人,东南大学教授,博士生导师,博士. E-mail:nifujian@gmail.com

与同一地区的路面相比,钢桥面铺装层高温作用时间较长,温度场变化更为剧烈^[1],更容易出现车辙、推移和脱空等热稳定型病害,不利于车辆舒适安全地行驶^[2]。随着重载车辆的日益增多,早期桥面铺装工程中常用的 SBS 改性沥青已经显得力不能及。在此背景之下,越来越多的高性能改性沥青应运而生。

南京长江二桥曾大规模使用环氧沥青,其良好的服役状态是国内大跨径钢桥面铺装的标杆^[3]。高弹沥青可以适应钢桥面变形量大的特点,疲劳性能突出^[4],已被成功地应用到南京栖霞山长江大桥^[5]。高黏沥青对集料具有极强的黏附性,在排水性路面中良好的使用效果迅速引起了桥面铺装研究人员的关注^[6],并在济南市桥面铺装维修工程中得到了良好的反馈^[7]。重载改性沥青具有抗永久变形能力强、耐久性好等诸多优势^[8],曾被应用到沪宁高速公路钢桥面铺装工程,铺装层通车 1 a 后仍未出现病害^[9]。聚氨酯改性沥青具有良好的高低温性能及耐疲劳性能,可有效应对钢桥面铺装工程中的病害^[10]。

为了评价沥青胶结料的高温性能,美国 SHRP 计划提出沥青车辙因子($G^* / \sin \delta$)指标,但该指标是在线性黏弹性范围内测试得到的,与路面实际受力情况差别较大,难以真实地反映改性沥青的高温性能^[11]。研究人员发现,基于黏弹性理论的多应力蠕变恢复(MSCR)试验,在评价改性沥青高温性能方面存在着显著的优势^[12]。然而,随着改性沥青高温性能的增强,标准 MSCR 试验在反映改性沥青高温性能方面也显现出一定的局限性。针对此弊端,部分学者指出在 MSCR 试验中使用较大应力得到的参数,以便更加有效地反映改性沥青的高温抗车辙性能^[13-14]。

鉴于此,本文在标准 MSCR 试验的基础上适当

扩大应力施加范围,并采用改进后的 MSCR 试验,定量评价钢桥面铺装常用改性沥青的高温黏弹性性能。此外,对不同改性沥青及其混合料的高温性能试验结果进行了相关性分析,确定了能够表征混合料高温性能优劣的沥青评价指标,为其在钢桥面铺装领域的进一步推广与应用奠定理论基础。

1 试验材料

1.1 改性沥青

本文选取钢桥面铺装工程中使用过的 3 种高性能改性沥青(以下简称 A、B、C 沥青)及 SBS 改性沥青(以下简称 D 沥青)作为研究对象,4 种改性沥青的基本技术指标见表 1。

表 1 改性沥青常规性能指标
Table 1 Properties of modified asphalts

Index	Asphalt A	Asphalt B	Asphalt C	Asphalt D
Penetration(25 °C)/(0.1 mm)	31	77	59	65
Ductility(5 °C)/cm	5	79	44	28
Softening point/°C	68	95	87	76
Dynamic viscosity(60 °C)/(Pa·s)	4 987	92 362	133 100	3 905
Elastic recovery(25 °C)/%	81	98	92	84

1.2 混合料

本文选用钢桥面铺装磨耗层常用级配 SMA-13 作为沥青混合料的级配类型,且通过仅改变沥青胶结料的类型,来分析不同改性沥青对其沥青混合料高温抗车辙性能的影响。表 2 给出了 SMA-13 沥青混合料的设计级配,其中粗、细集料均采用玄武岩,填料使用石灰岩矿粉,且技术指标均满足 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》。纤维为短切玄武岩纤维,其用量为沥青混合料质量的 0.3%。

表 2 SMA-13 沥青混合料设计级配
Table 2 Design gradation of SMA-13 asphalt mixture

Sieve size/mm	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
Passing ratio(by mass)/%	100.0	93.8	63.1	24.5	22.3	19.4	15.3	13.1	12.1	9.9

不同改性沥青混合料的最佳沥青用量通过马歇尔试验来确定,A~D 沥青混合料的最佳油石比(质量分数)分别为 6.0%、6.1%、6.0%、5.9%。

本次研究采用室内车辙试验及动态蠕变试验来评价改性沥青混合料的高温性能。室内车辙试验中,根据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,碾压成型尺寸为 300 mm×300 mm×50 mm 的混合料试件,每种改性沥青成型 3 块。动态蠕变试验中,首先使用旋转压实仪成型尺寸为 $\phi 150 \times$

180 mm 的改性沥青混合料,再经过钻芯与切割得到尺寸为 $\phi 100 \times 150$ mm 的标准试件。

2 试验方法

2.1 多应力蠕变恢复试验

AASHTO TP 70《Standard method of test for multiple stress creep recovery(MSCR) test of asphalt binder using a dynamic shear rheometer(DSR)》中的 MSCR 试验使用了 2 级应力,分别为

0.1、3.2 kPa。为了更好地反映改性沥青的非线性黏弹性能,本次研究额外增加了 6.4、12.8、25.6 kPa 3 级应力。因此,本文使用 5 级应力下的 MSCR 试验来定量评价不同改性沥青的高温性能。MSCR 试验样本均为经过旋转薄膜烘箱短期老化后的沥青。

本次研究使用安东帕公司生产的 MCR-102 流变仪进行 MSCR 试验,试验温度设置为 64 ℃,每级应力进行 10 次加载循环,每个加载循环包括 1 s 的加载阶段及 9 s 的卸载阶段。

MSCR 试验获得的主要评价指标包括不可恢复蠕变柔量 J_{nr} 及蠕变恢复率(R)。其中, J_{nr} 通常用来评价沥青的高温抗变形能力,且数值越小,高温性能越好; R 可有效反映沥青高温下的弹性恢复性能,一般情况下, R 值越大,沥青的弹性恢复性能越好^[15]。 J_{nr} 与 R 的计算过程如式(1)~(6)所示。

$$\epsilon_1 = \epsilon_c - \epsilon_0 \quad (1)$$

$$\epsilon_{10} = \epsilon_r - \epsilon_0 \quad (2)$$

$$J_{nr}(\tau, N) = \frac{\epsilon_{10}}{\tau} \quad (3)$$

$$J_{nr} = \frac{\text{Sum}[J_{nr}(\tau, N)]}{10} \quad (4)$$

$$\epsilon_r(\tau, N) = \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_{10}) \times 100\%}{\epsilon_1} \quad (5)$$

$$R = \frac{\text{Sum}[\epsilon_r(\tau, N)]}{10} \quad (6)$$

式中: ϵ_0 为每个周期蠕变阶段的初始应变值,%; ϵ_c 为每个周期蠕变阶段的最终应变值,%; ϵ_r 为每个周期恢复阶段的最终应变值,%; τ 为施加的剪切应力,分别为 0.1、3.2、6.4、12.8、25.6 kPa; N 为相应的蠕变恢复周期数,每级应力下取 1~10。

AASHTO 规范基于 J_{nr} 和 R 指标的结果,同样定义了沥青应力敏感性指标 $J_{nr \text{ diff}}$ 和 R_{diff} ,它反映了应力在 $\tau_1 \sim \tau_2$ ($\tau_1 < \tau_2$) 变化过程中 J_{nr} 和 R 指标的变化情况。一般情况下,沥青的 $J_{nr \text{ diff}}$ 值越大,其对应力的变化越敏感,高温稳定性能也就越差。而 R_{diff} 指标可以反映沥青蠕变恢复率对应力的敏感程度,且沥青的 R_{diff} 值越小,其弹性恢复性能受力的变化影响就越小。 $J_{nr \text{ diff}}$ 和 R_{diff} 指标的计算见式(7)~(8)。

$$J_{nr \text{ diff}}(\tau_1, \tau_2) = \frac{(J_{nr \tau_2} - J_{nr \tau_1})}{J_{nr \tau_1}} \times 100\% \quad (7)$$

$$R_{\text{diff}}(\tau_1, \tau_2) = \frac{(R_{\tau_1} - R_{\tau_2})}{R_{\tau_1}} \times 100\% \quad (8)$$

2.2 室内车辙试验

室内车辙试验参照 JTG E20—2011 中 T0719 的方法进行,试验仪器为国产 SYD-0719C-2 自动车辙仪,试验温度为 60 ℃。车辙试验结束之后,可在车

辙仪的数字显示屏上直接读取试件在 45 min 时的车辙变形 d_1 、60 min 时的车辙变形 d_2 以及混合料的动稳定度 DS,最终取同一改性沥青 3 块车辙板试件的均值作为各参数的结果。

2.3 动态蠕变试验

动态蠕变试验是基于文献[16]中的相关方法进行,试验装置为 UTM 万能试验机,由加载系统、温控系统及控制系统 3 个部分组成。温控系统可保证试验温度控制在 $(60 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 范围内。动态蠕变试验中轴向压力设置为 700 kPa,且不设围压,加载波形为半正弦波,加载 0.1 s 后卸载 0.9 s,即 1 个蠕变恢复周期为 1 s。试验的终止条件为竖向累计应变达到 50 000 $\mu\text{m}/\text{m}$ 或者重复加载次数达到 10 000 次。

3 改性沥青高温流变性能试验结果与分析

3.1 MSCR 试验应变曲线分析

图 1 为 4 种改性沥青的 MSCR 试验曲线图。由图 1 可见:4 种改性沥青的累计应变均随着时间的推移呈增大趋势,其中 D 沥青的累计应变最大, B 沥青次之, A、C 沥青相对前两者较小,且相差不大;对于 0.1、3.2 kPa 2 级较小应力,4 种改性沥青的应变率都比较小;当施加应力为 6.4 kPa 时, B、D 沥青的应变率开始有明显的增长趋势,并在 25.6 kPa 时达到峰值; A、C 沥青在 6.4、12.8 kPa 下的应变率仍处于较低的水平,直至 25.6 kPa 才出现一定的增长趋势。从累计应变的角度分析, A、C 沥青的高温抗变形能力要明显强于 B、D 沥青,尤其是在应力较大的情况之下。

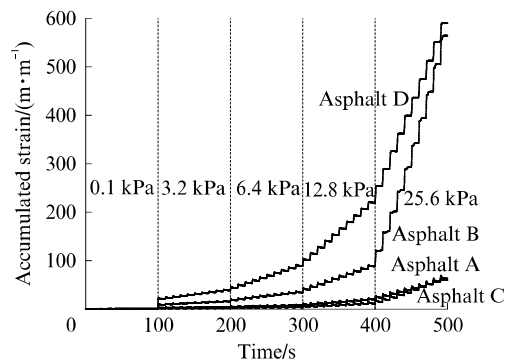


图 1 4 种改性沥青的 MSCR 试验曲线

Fig. 1 MSCR curves of four modified asphalts

进一步,对 4 种改性沥青在 12.8、25.6 kPa 下的应变情况进行单独分析。图 2 为 4 种改性沥青在 12.8 k、25.6 kPa 下的 MSCR 曲线。由图 2 可见:当应力为 12.8 kPa 时, A、C 沥青仍具有较强的蠕变恢

复能力,B、D 沥青的蠕变恢复能力显著降低;当应力为 25.6 kPa 时,B、D 沥青在第 1 个周期的卸载阶段就出现了累计应变不减反增的现象,这说明沥青在此大应力状态下产生了明显的内部破坏,出现了较大的损伤累计,蠕变恢复能力基本丧失;C 沥青在

第 6 个周期时也开始发生破坏,但其仍具备一定的蠕变恢复能力,随着加载时间的推移,其内部损伤会不断累积,在第 10 个周期的末端蠕变恢复能力已经较弱;A 沥青在 25.6 kPa 的 10 个周期内一直没有出现损伤,蠕变恢复能力仍处于较高的水准。

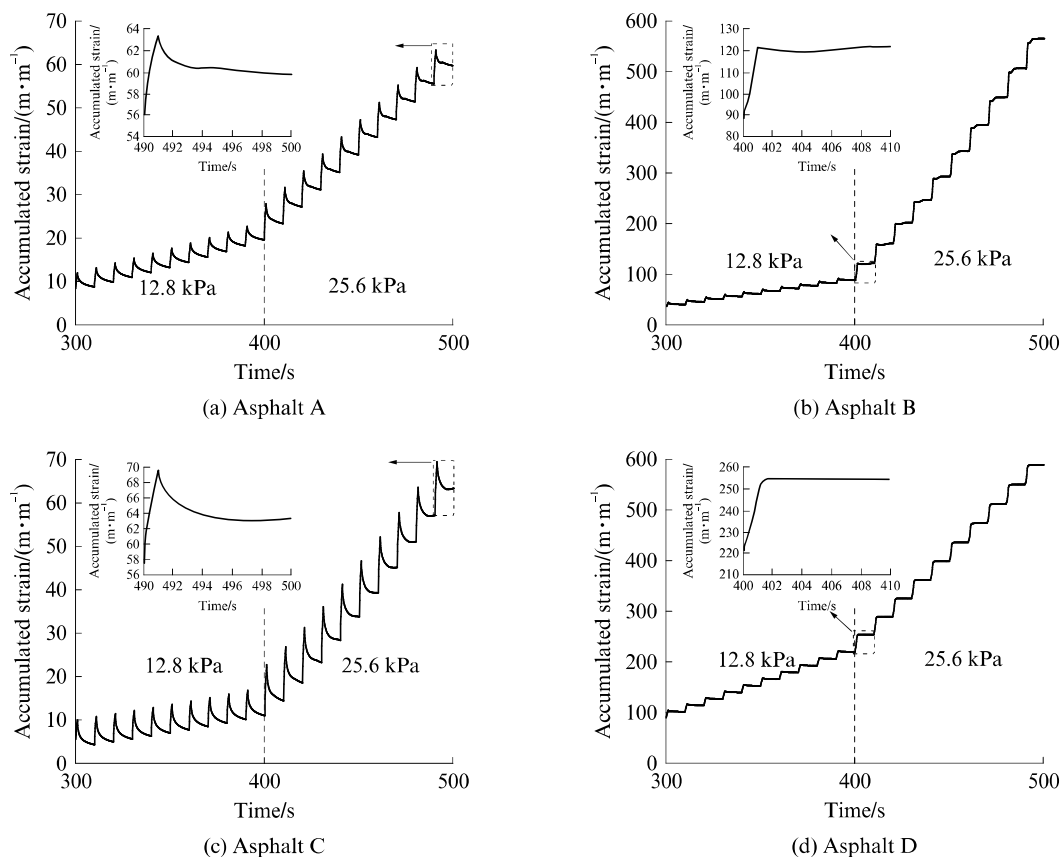


图2 4种改性沥青在12.8、25.6 kPa下的MSCR曲线
Fig. 2 MSCR curves of four modified asphalts at 12.8, 25.6 kPa

3.2 MSCR 试验指标结果分析

3.2.1 不可恢复蠕变柔量

根据 3.1 的分析,当应力为 25.6 kPa 时,B、C、D 3 种改性沥青均产生了不同程度的内部破坏, ϵ_r 值已经不是仅依靠沥青的弹性恢复能力而产生的累计应变,故本文不讨论 25.6 kPa 下各沥青的 J_{nr} 及 R 值。

4 种改性沥青在 0.1~12.8 kPa 下 J_{nr} 值变化情况如图 3 所示。由图 3 可见,在各级应力条件下,不同改性沥青的 J_{nr} 值按照从大到小的顺序为 D 沥青 > B 沥青 > A 沥青 > C 沥青。从不可恢复蠕变柔量的角度分析可知,C 沥青的高温性能最好,A 沥青次之,然后是 B 沥青,D 沥青高温性能最差。

3.2.2 不可恢复蠕变柔量应力敏感性指标

4 种改性沥青的 $J_{nr \text{ diff}}$ 值如图 4 所示。由图 4 可

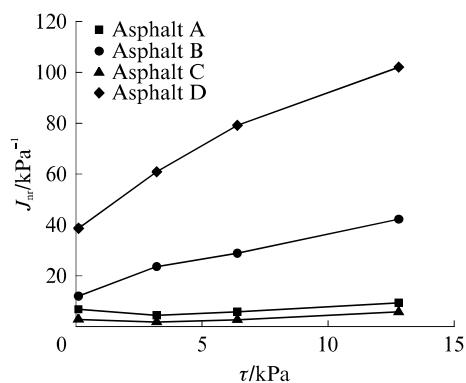


图3 4种改性沥青在不同应力下的 J_{nr} 值
Fig. 3 J_{nr} values of four modified asphalts at different stresses

见:A、C 沥青的 $J_{nr \text{ diff}(0.1, 3.2)}$ 及 $J_{nr \text{ diff}(0.1, 6.4)}$ 均小于 0,说明 A、C 沥青对较小的应力变化非常不敏感;B、

D 沥青的 $J_{nr \text{ diff}(0.1, 3.2)}$ 均大于 50%, $J_{nr \text{ diff}(0.1, 6.4)}$ 均大于 100%, 且前者要略大于后者, 故 B 沥青对较小的应力变化最为敏感; 当施加应力在 0.1~12.8 kPa 之间变化时, A、C 沥青的 $J_{nr \text{ diff}(0.1, 12.8)}$ 值开始增大, 但仍明显小于 B、D 沥青, B、D 沥青对较大的应力变化非常敏感, 从而解释了前文中提到的这 2 种沥青在 25.6 kPa 下第 1 个蠕变恢复周期即出现内部损坏的原因; C 沥青对较大应力的敏感程度低于 B、D 沥青, 但要明显高于 A 沥青, 所以其在 25.6 kPa 下的第 6 个周期才出现了一定的破坏; A 沥青的 $J_{nr \text{ diff}(0.1, 12.8)}$ 值最小, 故其对较大的应力变化敏感程度最低, 保障了其能够在 25.6 kPa 下仍保持良好的蠕变恢复性能。

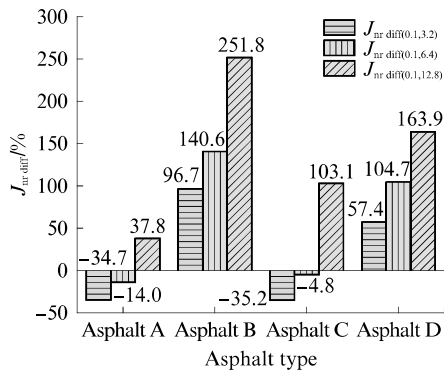


图4 4种改性沥青的 $J_{nr \text{ diff}}$ 值

Fig. 4 $J_{nr \text{ diff}}$ values of four modified asphalts

3.2.3 蠕变恢复率

4 种改性沥青不同应力下的蠕变恢复率如图 5 所示。由图 5 可见: B、D 沥青的 R 值随着应力的提高而显著减小, 说明其弹性恢复性能随着应力的提高而迅速衰减; 对于 A、C 沥青, 当应力在 0.1~3.2 kPa 之间变化时, 其 R 值反而呈增大趋势, 这是由于较小的应力还没有达到它们内部改性剂的最佳工作状态, 随着应力的提高, 改性剂的潜能才被逐渐激发, 改性沥青的弹性性能因此会有所提高; 当应力大于 3.2 kPa 时, A、C 沥青的弹性性能也开始随着应力的变大而逐渐降低。显然, 若 MSCR 试验中应力水平过低, 部分改性沥青的黏弹性性能就不能被较好地表征。综上, C 沥青在 0.1~12.8 kPa 之间的弹性恢复性能最佳, A 沥青次之, B 沥青在较大应力状态下弱于 A 沥青, 而 D 沥青的弹性恢复性能最差。

3.2.4 蠕变恢复率应力敏感性指标

图 6 为 4 种改性沥青蠕变恢复率应力敏感性指标 R_{diff} 的计算结果。由图 6 可见: A、C 沥青的 $R_{\text{diff}(0.1, 3.2)}$ 及

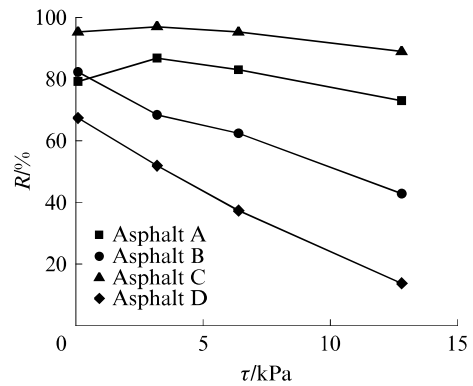


图5 4种改性沥青在不同应力下的 R 值

Fig. 5 R values of four modified asphalts at different stresses

$R_{\text{diff}(0.1, 6.4)}$ 均小于 0, 这与 3.2.3 提到的改性剂尚未达到最佳工作状态有关。B、D 沥青的 $R_{\text{diff}(0.1, 3.2)}$ 及 $R_{\text{diff}(0.1, 6.4)}$ 均大于 0, 且 D 沥青的值要明显大于 B 沥青, 这表明较小的应力变化就会引起 D 沥青弹性性能的降低; 当应力在 0.1~12.8 kPa 之间变化时, A、C 沥青的 $R_{\text{diff}(0.1, 12.8)}$ 值要远远小于 B、D 沥青, 这表明较大的应力变化对 A、C 沥青弹性性能的衰减影响较小; D 沥青的 R_{diff} 值要明显大于其余 3 种改性沥青, 这表明 D 沥青的弹性性能对应力的变化最为敏感, 更容易在应力增大的过程中失去其弹性恢复性能。

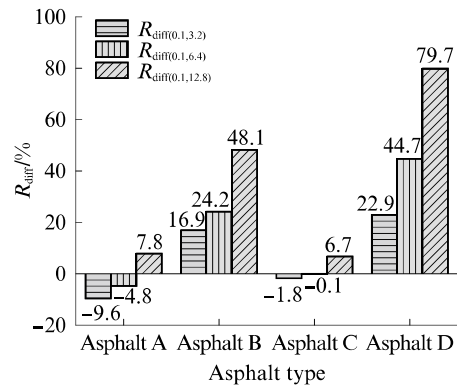


图6 4种改性沥青的 R_{diff} 值

Fig. 6 R_{diff} values of four modified asphalts

4 改性沥青混合料高温性能试验结果与分析

4.1 车辙试验

4 种改性沥青混合料车辙试验结果见表 3。由表 3 可见: A 沥青混合料 60 min 时的总变形量最小, C 沥青混合料略大于 A 沥青混合料, D、B 沥青混合料的总变形量明显大于前两者, 且 B 沥青混合料的变

形量最大;在动稳定度方面,A 沥青混合料最大,C 沥青混合料略小于 A 沥青,D 沥青混合料位列第 3,而 B 沥青混合料的动稳定度最小.根据车辙试验的结果可知,4 种改性沥青混合料的高温抗车辙性能强弱顺序为:A 沥青混合料>C 沥青混合料>D 沥青混合料>B 沥青混合料.

表 3 车辙试验结果
Table 3 Results of wheel tracking test

Asphalt mixture type	Rutting depth of 45 mins/mm	Rutting depth of 60 mins/mm	Dynamic stability/(cycle · mm ⁻¹)	
			Test value	Specification requirement
A	0.908 8	0.954 3	13 846	≥3 000
B	1.502 9	1.612 5	5 748	
C	0.931 1	0.985 7	11 538	
D	1.325 6	1.413 0	7 208	

4.2 动态蠕变试验

沥青混合料的典型动态蠕变试验由初始阶段、第 2 阶段及第 3 阶段组成.4 种改性沥青混合料的动态蠕变曲线见图 7.由图 7 可见:B、D 沥青混合料已经进入到第 3 阶段,D 沥青混合料竖向累计变形达到 50 000 μm/m 时的加载次数要明显小于 B 沥青混合料;A、C 沥青混合料仍稳定处于第 2 阶段,相同时间内 A 沥青混合料的竖向累计变形更小.

表 4 4 种改性沥青混合料动态蠕变曲线的相关参数
Table 4 Parameters of dynamic creep curve of four modified asphalt mixtures

Asphalt mixture type	Primary stage		Critical point	Secondary stage		Strain rate in secondary stage/(μm · m ⁻¹ · s ⁻¹)	Flow number
	Fitting model	R ²		Fitting model	R ²		
A	$y=1\,449.5x^{0.255\,5}$	0.966 4	1 661	$y=0.725x+8\,501$	0.992 7	0.725	6 017
B	$y=2\,849.6x^{0.281\,3}$	0.994 7	2 825	$y=3.779x+16\,836$	0.999 8	3.779	
C	$y=2\,072.4x^{0.239\,9}$	0.979 4	1 409	$y=0.957x+10\,660$	0.997 2	0.957	
D	$y=3\,198.0x^{0.252\,0}$	0.983 8	869	$y=6.273x+11\,555$	0.995 7	6.273	

5 改性沥青及其混合料高温性能评价指标相关性分析

为了研究改性沥青对沥青混合料高温性能的影响,进一步对改性沥青高温性能评价指标与混合料高温性能评价指标之间的相关性进行了分析.对于沥青胶结料,选取 MSCR 试验中可以直接反映沥青高温性能的 J_{nr} 及 R ;对于沥青混合料,选取室内车辙试验得到的动稳定度指标及动态蠕变试验得到的第 2 阶段应变率指标.

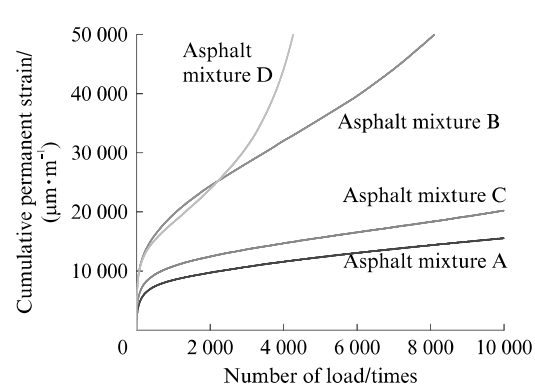


图 7 4 种改性沥青混合料的蠕变曲线
Fig. 7 Creep curves of dynamic creep test of four modified asphalt mixtures

对蠕变曲线作进一步的分析,使用相关方法确定初始阶段与第 2 阶段的临界点及流变次数^[17],并对初始阶段和第 2 阶段的曲线进行了函数拟合,结果见表 4.相关研究表明,沥青混合料蠕变试验第 2 阶段曲线的斜率(第 2 阶段的应变率)及流变次数指标可以较好地评价沥青混合料的高温稳定性能^[18].一般情况下,沥青混合料第 2 阶段的应变率越小,流动次数越大,其高温稳定性能就越强.根据表 4 第 2 阶段的应变率及流变次数 2 项指标,可以得到 4 种改性沥青混合料高温抗永久变形能力的强弱顺序为:A 沥青混合料>C 沥青混合料>B 沥青混合料>D 沥青混合料.

5.1 J_{nr} 指标与沥青混合料高温性能评价指标相关性分析

图 8 为改性沥青混合料高温性能评价指标与 J_{nr} 指标拟合曲线.由图 8 可见: J_{nr} 与动稳定度之间的回归曲线呈单调递减,表明随着改性沥青 J_{nr} 的提高,其混合料的动稳定度有减小的趋势,混合料的抗车辙性能会逐步降低;而 J_{nr} 与第 2 阶段应变率之间存在较好的单调递增线性关系,也就是说,改性沥青 J_{nr} 值越大,其混合料动态蠕变试验第 2 阶段的应变率就越大,混合料会更快地进入到蠕变第 3 阶段,最

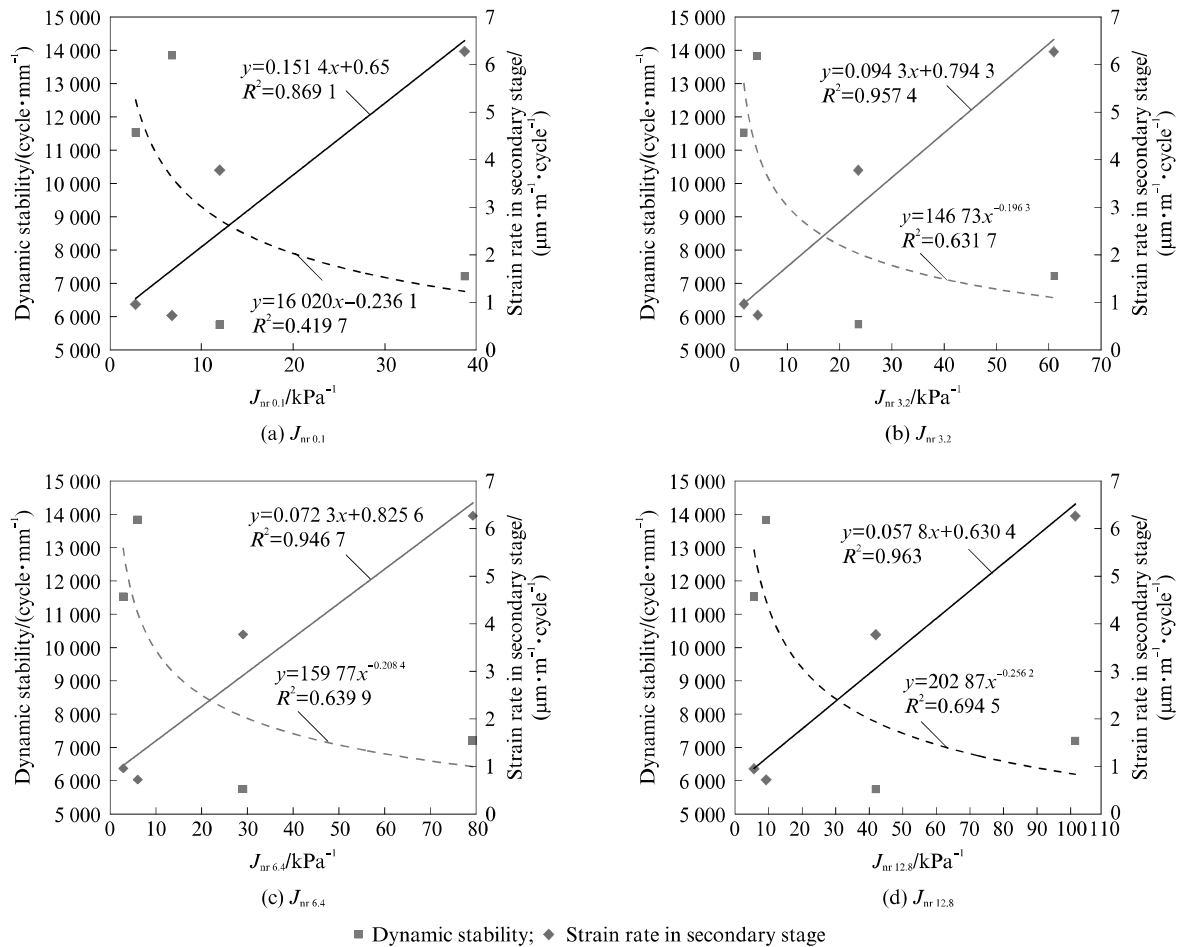
图8 改性沥青混合料高温性能评价指标与 J_{nr} 指标拟合曲线

Fig. 8 Fitting curves of high-temperature evaluation parameters of modified asphalt mixtures and J_{nr} of modified asphalts

终发生流动破坏;与动稳定度指标相比,第2阶段应变率指标与 J_{nr} 之间的相关系数更大,4个加载应力下 R^2 均大于0.85,表明第2阶段应变率与 J_{nr} 之间的相关性较好。

5.2 R 指标与沥青混合料高温性能评价指标相关性分析

图9为改性沥青混合料高温性能评价指标与 R 指标拟合曲线。由图9可见:当应力为0.1 kPa时, R 与动稳定度及第2阶段应变率之间的相关性均较差, R^2 分别仅为0.1346与0.5768,这表明改性沥青在0.1 kPa下的蠕变恢复能力难以真实反映其混合料的高温性能;随着应力水平的提高, R 与第2阶段应变率之间的相关系数明显增大,介于0.93~

0.95之间,表明两者之间具有良好的相关性; R 与第2阶段应变率之间的拟合函数均为单调递减函数。因此,随着改性沥青高温下弹性恢复性能的增强,其混合料蠕变试验第2阶段的应变率就会越小,混合料的高温抗永久变形能力也就越强。

综合上述相关性分析结果,可以得出以下结论: J_{nr} 及 R 指标与动态蠕变试验第2阶段应变率之间的相关性要优于动稳定度。因此,动态加载下的蠕变试验要比室内车辙试验更能体现改性沥青的高温黏弹性性能。此外,当应力为0.1 kPa时, J_{nr} 及 R 指标与混合料高温性能评价指标之间的相关性均较差,故使用较大应力下MSCR试验的结果评价沥青混合料的高温性能更为可靠。

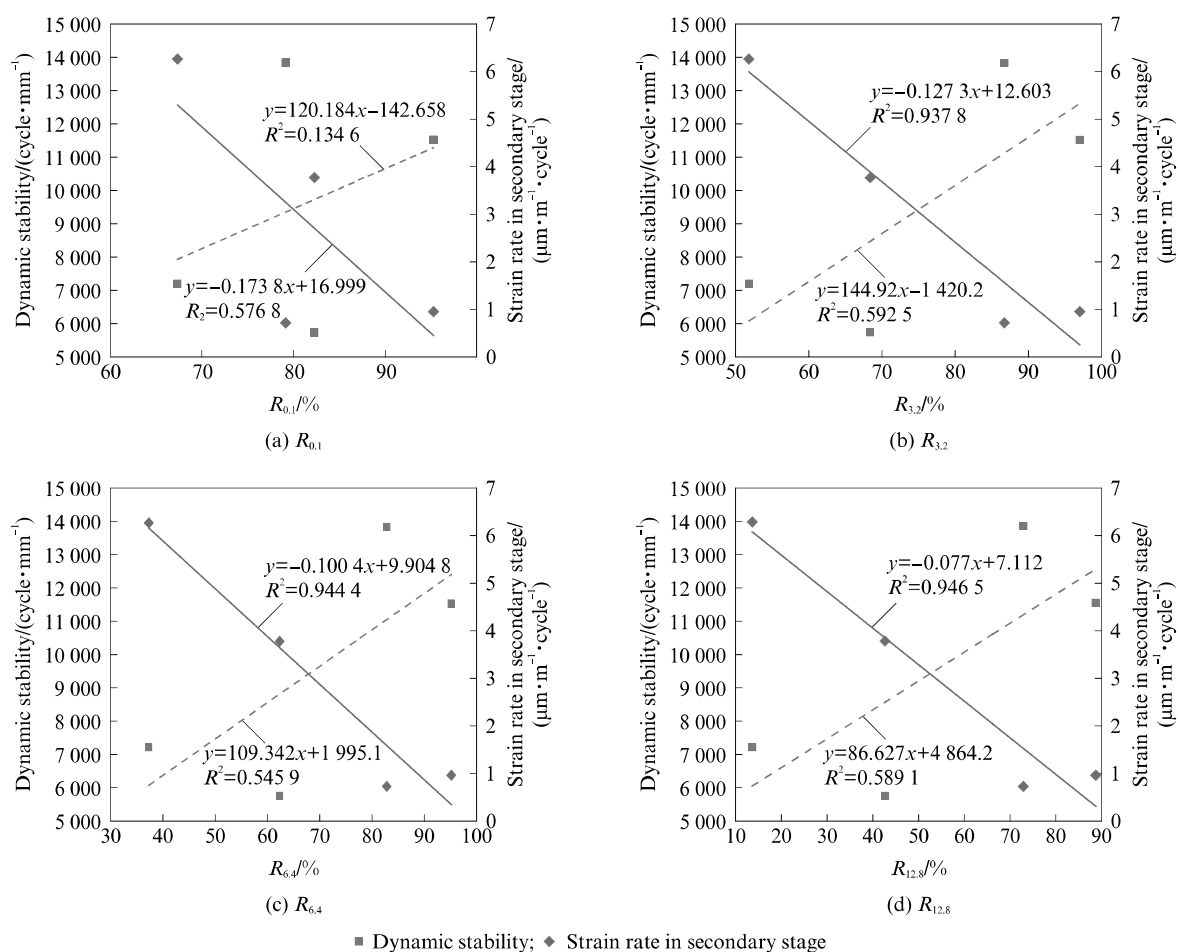


图9 改性沥青混合料高温性能评价指标与R指标拟合曲线

Fig. 9 Fitting curves of high-temperature evaluation parameters of modified asphalt mixtures and R of modified asphalts

6 结论

(1)MSCR 试验中,3 种高性能改性沥青的累计应变均小于普通 SBS 改性沥青;当应力在 0.1~12.8 kPa 范围内时, J_{nr} 值大小顺序为:D 沥青>B 沥青>A 沥青>C 沥青;A、C 沥青的 R 值要远大于 B、D 沥青;A 沥青的 J_{nr} 值对较大的应力变化最不敏感,D 沥青的蠕变恢复率应力敏感程度最高。

(2)室内车辙试验中,A、C 沥青混合料的抗车辙性能明显优于 D 沥青混合料,B 沥青混合料要略差;动态蠕变试验中,A、B、C 沥青混合料的抗永久变形能力均要优于 D 沥青混合料。

(3)相较于室内车辙试验,混合料动态蠕变试验的结果与改性沥青的 J_{nr} 、R 值之间的相关性更好,使用应力为 3.2、6.4、12.8 kPa 下的 J_{nr} 、R 值来评价改性沥青混合料的高温性能更为合理。

(4)根据沥青及沥青混合料高温性能试验结果,A、C 沥青的高温性能要明显优于 B、D 沥青。因此,

在重载交通较多的钢桥面上,为了减少高温车辙损害,将 A、C 沥青作为铺装结构磨损层的胶结料具有更为显著的优势。

参考文献:

- [1] 逯彦秋,陈宜言,孙占琦,等.钢桥桥面铺装层的温度场分布特征[J].华南理工大学学报(自然科学版),2009,37(8):116-121,126.
LU Yanqiu, Chen Yiyan, Sun Zhanqi, et al. Characteristics of temperature field distribution of steel bridge deck pavement [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science), 2009, 37(8): 116-121, 126. (in Chinese)
- [2] 黄卫.大跨径桥梁钢桥面铺装设计[J].土木工程学报,2007(9):65-77.
HUANG Wei. Design of deck pavement for long-span steel bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2007(9): 65-77. (in Chinese)
- [3] 王建伟,于力,罗桑.南京长江第二大桥环氧沥青混凝土铺装服役 13 年回顾[J].公路,2015,60(8):37-40.
WANG Jianwei, YU Li, LUO Sang. Service condition survey and analysis of epoxy asphalt concrete pavement on Nanjing

- second yangtze river bridge after thirteen years life[J]. Highway, 2015, 60(8):37-40. (in Chinese)
- [4] 郝增恒,张肖宁,盛兴跃,等.高弹改性沥青在钢桥面铺装中的应用研究[J].公路交通科技,2009,26(4):22-28.
HAO Zengheng, ZHANG Xiaoning, SHENG Xingyue, et al. Application of modified asphalt with high elasticity in steel deck pavement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(4):22-28. (in Chinese)
- [5] 詹俞,李国芬,王宏畅.南京长江第四大桥钢桥面铺装疲劳性能试验研究[J].中国工程科学,2013,15(8):75-78.
ZHAN Yu, LI Guofeng, WANG Hongchang. Study on fatigue performance of steel deck pavement for the fourth Nanjing yangtze river bridge[J]. Engineering Science, 2013, 15(8):75-78. (in Chinese)
- [6] GENG L, XU Q, REN R, et al. Performance research of high-viscosity asphalt mixture as deck-paving materials for steel bridges[J]. Road Materials and Pavement Design, 2017, 18(1):208-220.
- [7] 任瑞波,耿立涛,王立志,等.一种 SMA-5 型高黏沥青混合料的设计与性能评价[J].建筑材料学报,2016,19(4):762-766.
REN Ruibo, Geng Litao, WANG Lizhi, et al. Design and performance evaluation of a SMA-5 high viscosity asphalt mixture[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(4):762-766. (in Chinese)
- [8] MA X, NI F, CHEN R, et al. Evaluation and application of long-lasting asphalt mixture[J]. Transportation Research Record, 2009, 2127(1):137-145.
- [9] 范海波.高强沥青混凝土在弯坡斜钢桥桥面铺装中的应用研究[D].南京:东南大学,2008.
FAN Haibo. Research on the applying of high strength asphalt concrete in bridge deck pavement of inclined steel bridge with curved slope[D]. Nanjing: Southeast University, 2008. (in Chinese)
- [10] ZHANG Z, SUN J, JIA M, et al. Study on a thermosetting polyurethane modified asphalt suitable for bridge deck pavements: Formula and properties[J]. Construction and Building Materials, 2020, 241:118-122.
- [11] 黄卫东,郑茂,唐乃彭,等.SBS 改性沥青高温性能评价指标的比较[J].建筑材料学报,2017,20(1):139-144.
HUANG Weidong, ZHENG Mao, TANG Naipeng, et al. Comparison of evaluation parameters for high temperature performance of SBS modified asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(1):139-144. (in Chinese)
- [12] 唐乃彭,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.
TANG Naipeng, HUANG Weidong. High temperature performance evaluation and grading of SBS modified asphalt based on multiple stress creep recovery test[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(4):665-671. (in Chinese)
- [13] GOLALIPOUR A, BAHIA H, TABATABAEE H. Critical considerations toward better implementation of the multiple stress creep and recovery test[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(5):04016295.
- [14] ZHOU Z, GU X, JIANG J, et al. Nonrecoverable behavior of polymer modified and reclaimed asphalt pavement modified binder under different multiple stress creep recovery tests[J]. Transportation Research Record, 2018, 2672(28):324-336.
- [15] D'ANGELO J. The relationship of the MSCR test to rutting[J]. Road Materials and Pavement Design, 2009, 10 (Suppl 1):61-80.
- [16] WITCZAK M, KALOUSH K, PELLINEN T, et al. Simple performance test for superpave mix design[R]. Washington D.C.: National Academy Press, 2002.
- [17] GOH S, YOU Z. A simple stepwise method to determine and evaluate the initiation of tertiary flow for asphalt mixtures under dynamic creep test[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(11):3398-3405.
- [18] DONG N, NI F, LI S, et al. Characterization of permanent deformation performance of asphalt mixture by multi-sequenced repeated load test[J]. Construction and Building Materials, 2018, 180:425-436.