

“再生-改性”沥青性能研究

陈静云¹,刘逍遥^{1,2},孙依人¹,王维营^{1,2}

(1. 大连理工大学交通运输学院,辽宁 大连 116024;2. 交通运输部公路科学研究院,北京 100008)

摘要 目的 研究在再生剂和不同掺量改性剂作用下取得的“再生-改性”沥青的性能,为沥青路面再生-改性技术提供试验和理论依据. 方法 采用两种再生方案对老化沥青进行再生处理,对再生后的沥青进行针入度、软化点、延度、布氏黏度、动态剪切流变和弯曲梁流变等系列试验. 结果 采用添加再生剂方案再生的沥青其针入度、软化点、延度、车辙因子、临界温度、主曲线、劲度模量和蠕变速率与原样沥青非常接近;采用再生剂加改性剂的再生-改性方案可显著提升沥青的高温抗车辙和低温抗开裂的能力,且随着改性剂掺量的增加“再生-改性”沥青的高低温性能均逐渐增强. 结论 采用单一添加再生剂的普通再生方案可恢复沥青的高低温性能,采用再生-改性方案再生后沥青的高低温性能均显著优于原样沥青和普通再生沥青.

关键词 道路工程;“再生-改性”沥青;再生沥青;改性剂;流变性能

中图分类号 TU997;U414

文献标志码 A

Study on the Performance of Recycled-Modified Asphalt

CHEN Jingyun¹, LIU Xiaoyao^{1,2}, SUN Yiren¹, WANG Weiyang^{1,2}

(1. School of Transportation and Logistics, Dalian University of Technology, Dalian, China, 116024 2. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing, China, 100008)

Abstract: The purpose of this paper is to study the performance of recycled-modified asphalt under rejuvenating agent and different contents of modifiers, and to provide a experimental and theoretical basis for asphalt pavement recycling and modification technology. The aged asphalt was recovered by two recycling schemes, and the three indexes of bitumen, Brookfield viscosity, dynamic shear rheology and bending beam rheology tests were performed on the recycled asphalt samples. The results indicated that the three indexes of bitumen, rutting resistance, critical temperature, master curves, stiffness and creep rate of the asphalt binder recovered by the rejuvenating agent were very close to those of the original asphalt. The performance of the high temperature rutting resistance and low temperature anti-cracking of the asphalt binders can be significantly improved through the scheme of adding the rejuvenating agent and modifier. Moreover, the high and low temperature performance of recycled-modified asphalt was enhanced with the increase of the modifier content. The conclusion is that the high and low temperature performance of asphalt can be re-

收稿日期:2018-04-15

基金项目:国家自然科学基金项目(50578031)

作者简介:陈静云(1956—),女,教授,博士,主要从事道路路面工程研究.

stored by adopting the scheme of solely adding rejuvenating agent, while the high and low temperature performance of asphalt that regenerated by the recycled and modified scheme are significantly better than that of the original asphalt and asphalt recovered by the rejuvenating agent.

Key words: road engineering; recycled-modified asphalt; recycling asphalt; modifier; rheological property

沥青路面再生技术具有良好的经济效益和环境效益^[1],然而我国早期路面多采用基质沥青铺筑,通过常规再生手段得到的再生沥青混合料难以满足交通量日益增长对路面性能的要求. 鉴于此,一些研究者开展了对普通沥青路面再生-改性的研究. 张道义等^[2]采用将改性剂加入到再生沥青中剪切搅拌的方法制得“再生-改性”沥青,发现改性剂在提高沥青各项性能的同时,可明显提升沥青的低温性能,具有较好的改性效果. 陈静云^[3]对老化基质沥青再生后进行改性,发现得到的“再生-改性”沥青具有一定的改性沥青的性质,沥青的高低温性能均优于常规方法再生的沥青. 李时雨^[4]在沥青再生过程中添加 SBS 改性剂,发现再生并改性后的混合料性能优于普通沥青混合料. 然而,目前对老化基质沥青路面再生-改性的研究仍旧不够系统. “再生-改性”沥青的性能不同于基质沥青和改性沥青,对其性能进行试验研究具有一定的意义. 为此笔者设计了两种方案对老化沥青进行再生研究. 通过针入度、软化

点、延度、旋转黏度、动态剪切流变(DSR)和弯曲梁流变(BBR)试验对再生沥青的常规性能和流变性能进行分析,采用不同的指标综合评价“再生-改性”沥青的性能.

1 试验

1.1 试验材料

我国回收沥青路面材料存在来源和成分复杂,以及在回收过程中路面材料破碎和筛分不规范等问题,此外常用的抽提回收老化沥青的方式难以将矿粉等杂质从老化沥青抽提液中分离干净,因此采用人工老化的方法制备老化沥青^[5]. 老化沥青是由盘锦 90#基质沥青通过 163 ℃、85 min 旋转薄膜烘箱短期老化试验和 100 ℃、20 h、2.1 MPa 沥青压力老化试验制得^[6-8],基质沥青与人工老化沥青各项指标如表 1 所示. 再生剂选用 ZGSB 型再生剂,改性剂选用 SBS 1301-1,为了降低 SBS 的离析率,增强 SBS 与沥青之间的稳定性,向“再生-改性”沥青中添加一定比例的稳定剂.

表 1 基质沥青与老化沥青的基本性能
Table 1 Properties of virgin and aged asphalt

沥青类型	针入度 (25 ℃)/ 0.1 mm	软化点/ ℃	延度(5 ℃)/ cm	旋转黏度 (135 ℃)/ (Pa·s)	车辙因子 (58 ℃)/ kPa	劲度模量 (-12 ℃)/ MPa	蠕变速率 (-12 ℃)
90#基质沥青	84	45.5	3	0.253	2.03	211	0.358
老化沥青	31	54.5	0	0.514	8.97	—	—

1.2 试验方法

为了研究再生剂和不同掺量改性剂作用下“再生-改性”沥青的性能,笔者设计了两种再生方案. 方案一:普通再生方案,即向老化沥青中加入再生剂剪切搅拌后得到再生沥青. 方案二:再生剂加改性剂的再生-改性方

案,即向方案一制得的再生沥青中加入掺量分别为 2.5%、3%、3.5% 和 4% 的 SBS 改性剂,然后分别加入 0.3% 的稳定剂,剪切搅拌后得到 4 种不同改性剂掺量的“再生-改性”沥青. 对两种再生方案制得的 5 种再生沥青和 90#沥青分别进行常规性能和流变性

能试验,试验流程如图 1 所示.

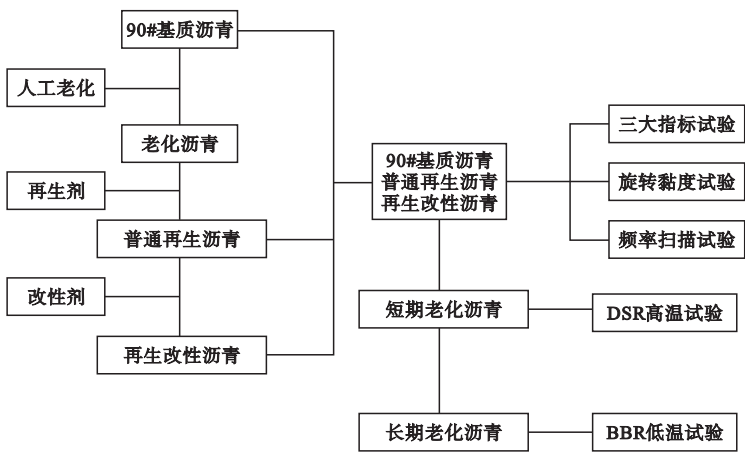


图 1 试验流程图
Fig. 1 Test flow chart

2 试验结果分析

2.1 常规性能

分别对 6 种沥青进行针入度、软化点和延度试验,试验结果如表 2 所示.

表 2 常规性能试验结果

Table 2 Test results of three indexes of bitumen			
沥青类型	针入度 (25 ℃)/ 0.1 mm	软化点/ ℃	延度 (5 ℃)/ cm
90#基质沥青	84	45.5	3
普通再生沥青	82	45.5	4
2.5% SBS 再生改性沥青	55	51	16
3% SBS 再生改性沥青	54	51.5	21
3.5% SBS 再生改性沥青	54	54.5	39
4% SBS 再生改性沥青	52	56	45

由表 2 可知,采用方案一再生后,沥青的针入度、软化点和延度基本恢复到 90#沥青的水平;采用方案二再生后,沥青的延度升高且随 SBS 掺量的增加而明显增大,表明沥青的抗低温开裂性能随 SBS 掺量的增加而明显提升.此外,添加改性剂后沥青的针入度减小、软化点增大,但随着 SBS 改性剂掺量的增加,针入度和软化点均变化不大,可见采用针入度和软化点等指标评价“再生-改性”沥青的性能不太合适.

2.2 旋转黏度

沥青黏度可以反映沥青对集料的裹覆性及其流变性能,是评价沥青混合料施工和易性及确定混合料拌和、压实温度的重要指标^[9-11].笔者采用布氏旋转黏度计,根据 AASHTO T316^[12]规范分别对不同再生沥青进行 135 ℃ 下的旋转黏度试验,规范要求 135 ℃ 下的旋转黏度不得超出 3 Pa·s,试验结果如表 3 所示.

表 3 再生沥青旋转黏度值

Table 3 Brookfield viscosity values of recycled asphalt	
沥青类型	旋转黏度(135 ℃)/(Pa·s)
普通再生沥青	0.339
2.5% SBS 再生改性沥青	0.741
3% SBS 再生改性沥青	0.811
3.5% SBS 再生改性沥青	0.964
4% SBS 再生改性沥青	1.170
4.5% SBS 再生改性沥青	2.975

由表 3 可知,5 种再生沥青的旋转黏度均符合 AASHTO T316 规范要求,说明方案二在黏度指标上是可行的.此外,由 4.5% SBS “再生改性”沥青对应的旋转黏度可知,其值已接近临界值 3 Pa·s,说明对老化沥青再生-改性时 SBS 掺量并非越高越好.

2.3 高温性能

2.3.1 车辙因子指标分析

在 Superpave 沥青结合料规范中,采用车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 表征沥青的高温抗车辙能力,相同温度下 $G^*/\sin\delta$ 越大,沥青高温抗车辙能力越强^[13].且要求原样沥青的 $G^*/\sin\delta$

不得小于 1.0 kPa,经短期老化后 $G^*/\sin\delta$ 不得小于 2.2 kPa.笔者采用 Malvern 公司生产的动态剪切流变仪分别对 90#沥青和 5 种再生沥青进行老化前后的动态剪切流变试验,不同试验温度下各沥青的车辙因子试验结果如图 2 所示.

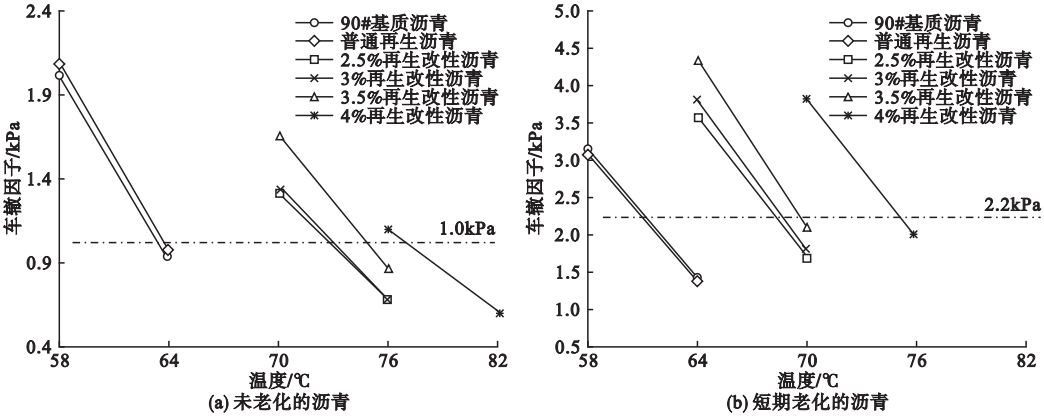


图 2 不同试验温度下沥青的 $G^*/\sin\delta$

Fig. 2 $G^*/\sin\delta$ values of asphalt at various test temperatures

由图 2(a)可知,普通再生沥青与 90#沥青的车辙因子非常接近,说明采用方案一再生后沥青的抗车辙能力基本恢复到 90#沥青的水平.在试验温度为 64℃时,90#沥青和普通再生沥青的车辙因子均小于 1.0 kPa,已不符合 Superpave 沥青结合料规范要求.然而采用方案二再生后的 4 种不同改性剂掺量的再生改性沥青的车辙因子在 70℃时仍大于 1.0 kPa,且车辙因子随改性剂掺量的增加而逐渐增大,表明再生-改性技术可提高沥青的高温抗车辙能力,且增大改性剂掺量可增

强沥青的高温性能.此外,由图 2 的试验可知,短期老化前后沥青车辙因子的变化规律呈现出一致性.

2.3.2 临界温度指标分析

在 Superpave 沥青结合料规范中规定,以原样沥青车辙因子 $G^*/\sin\delta \geq 1.0$ kPa,经短期老化后沥青残留物车辙因子 $G^*/\sin\delta \geq 2.2$ kPa 的最低温度作为临界温度^[14].临界温度越高,沥青高温抗永久变形的能力越强,高温性能越好^[15-16].不同沥青的临界温度试验结果如图 3 所示.

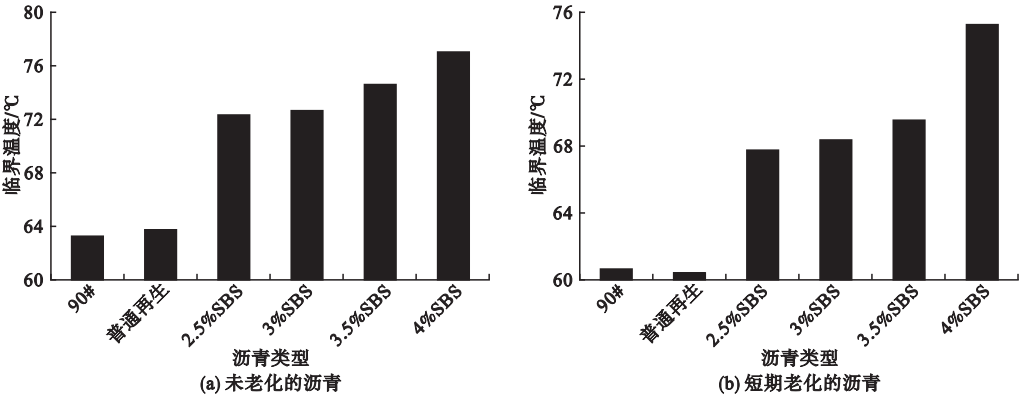


图 3 沥青的临界温度

Fig. 3 Critical temperature of asphalt

由图3可知,短期老化前后沥青的临界温度呈现出相似的变化规律,采用普通再生方案再生的沥青临界温度和90#沥青的基本相同,表明采用方案一可使沥青的高温性能基本恢复到90#沥青的水平.采用方案二再生后,沥青的临界温度较90#沥青和普通再生沥青提升明显,且随着改性剂掺量的增加,临界温度逐渐提升,表明掺加改性剂可以提高沥青的高温性能.

2.4 频率扫描试验与主曲线

DSR 频率扫描试验用于研究沥青不同加载频率和温度下的流变特性.根据时间-温度等效原理可得到沥青的主曲线,从而在更宽的频率范围内评价沥青的流变性能.笔者分别对90#沥青和5种再生沥青进行频率扫描试验,频率扫描范围为0.1~50 Hz,试验温度分别为4℃、16℃、28℃、40℃、52℃、64℃和76℃.其中40℃(含40℃)以下选用8 mm 转子,剪应变幅值取0.05%;40℃以上选用25 mm 转子,剪应变幅值取0.1%.图4为2.5% SBS 掺量的“再生-改性”沥青的频率扫描试验结果.

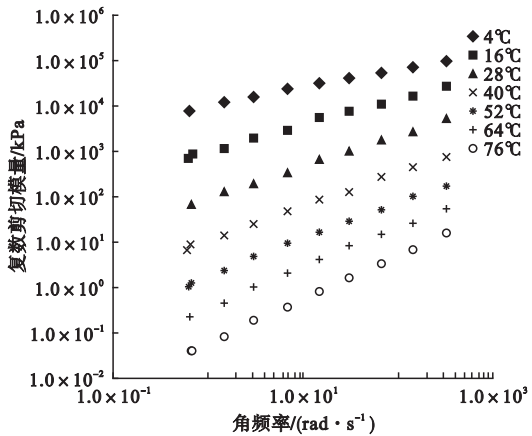


图4 2.5% SBS 掺量的再生改性沥青复数剪切模量

Fig. 4 Complex shear modulus of recycled and modified asphalt containing 2.5% SBS

由图4可知,频率固定时,沥青的复数剪切模量 G^* 随温度的升高而降低;温度固定时, G^* 随频率的增大而增大,这一变化趋势与沥青路面在实际使用过程中复数剪切模量

的变化规律一致.90#基质沥青、普通再生沥青及另外3种不同改性剂掺量的再生改性沥青的复数剪切模量也呈现出相同的规律.

根据时间-温度等效原理,将不同试验温度下测得的复数剪切模量沿着对数频率轴进行平移叠加,从而得到沥青在选定参考温度下的复数剪切模量主曲线.笔者选用2S2P1D模型对沥青的黏弹性参数进行拟合^[17-18],2S2P1D模型由2个弹簧单元、2个抛物线单元和1个黏壶单元组成,模型构成如图5所示,其表达式为

$$G^*(i\omega) = G_e + \frac{G_g - G_e}{1 + \alpha(i\omega\tau_0)^{-k} + (i\omega\tau_0)^{-h} + (i\omega\beta\tau_0)^{-1}} \quad (1)$$

式中: G_e 为平衡剪切模量; G_g 为瞬态剪切模量,取 10^9 Pa; α 、 k 、 h 、 β 、 τ_0 为模型参数, $0 < k < h < 1$; i 为虚数单位; $\eta = (G_g - G_e)\beta\tau_0$ 为牛顿黏壶的黏度.

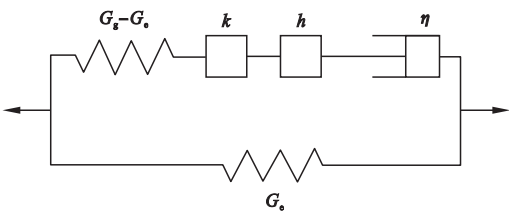


图5 2S2P1D 模型

Fig. 5 2S2P1D model

采用自由时间-温度移位因子构建主曲线,目标误差函数 f 为

$$f = \frac{1}{M} \sqrt{\sum_{j=1}^M \left(1 - \frac{G'_{c,j}}{G'_{m,j}}\right)^2} + \frac{1}{M} \sqrt{\sum_{j=1}^M \left(1 - \frac{G''_{c,j}}{G''_{m,j}}\right)^2} \quad (2)$$

式中: $G'_{c,j}$ 、 $G''_{c,j}$ 为储能剪切模量和损耗剪切模量的预测值; $G'_{m,j}$ 、 $G''_{m,j}$ 为储能剪切模量和损耗剪切模量的实测值.

笔者温度取为40℃,表4为6种沥青的2S2P1D模型的模型参数和拟合误差,图6为复数剪切模量主曲线的构建过程,图7为6种沥青的复数剪切模量主曲线.

表4 2S2P1D 模型参数和拟合误差

Table 4 Parameters and fitting errors of 2S2P1D model

沥青种类	α	k	h	β	$\tau_0/10^{-7}\text{ s}$	瞬态剪切模量/Pa	误差函数/%
90#基质沥青	12.46	0.40	0.76	3.72	2.28	10^9	6.19
普通再生沥青	18.19	0.49	0.74	3.99	2.28	10^9	5.89
2.5% SBS 再生改性沥青	22.75	0.48	0.74	10.75	2.28	10^9	4.94
3% SBS 再生改性沥青	23.91	0.51	0.71	10.31	2.28	10^9	4.97
3.5% SBS 再生改性沥青	20.41	0.45	0.84	41.29	2.28	10^9	3.67
4% SBS 再生改性沥青	21.01	0.42	0.84	585.94	2.28	10^9	3.54

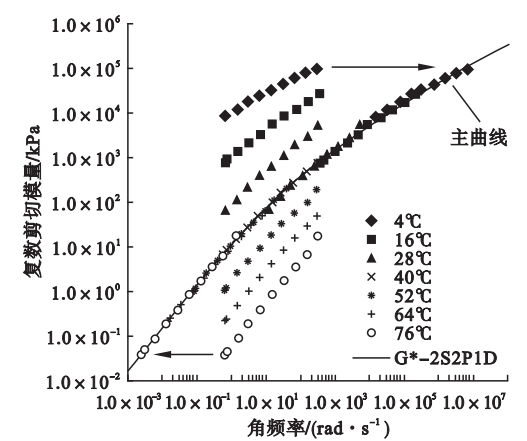


图6 通过平移生成主曲线的过程示意图

Fig. 6 The schematic diagram of the process of generating the master curve by translation

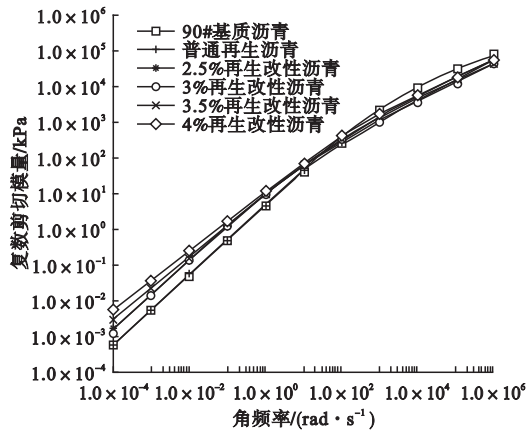


图7 不同沥青复数剪切模量主曲线

Fig. 7 Complex shear modulus master curves of different asphalt

根据时间-温度等效原理——低频表征沥青的高温性能,高频表征低温性能,可通过分析主曲线中频率的变化来评价沥青的高低温性能. 沥青在低频(高温)区时,沥青的复

数剪切模量越大,其硬度越大,抵抗高温变形的能力越强,沥青高温性能越好;在高频(低温)区,沥青的复数剪切模量越小,其低温韧性越大,沥青低温性能越好.

由图7可知,普通再生沥青的复数剪切模量主曲线在低频区几乎与90#沥青重合,高频区位于90#沥青下方,说明采用方案一再再生后沥青的高温性能基本恢复、低温性能优于原样沥青. 此外,4种不同改性剂掺量的再生改性沥青的复数剪切模量主曲线在低频区均位于90#沥青上方,高频区均位于90#沥青下方,表明采用方案二再生后的沥青相比原样沥青具有更好的高低温性能,与沥青常规性能 and 高温性能的试验结果一致. 同时在低频区,随改性剂掺量的增加,沥青复数剪切模量逐渐增大,高温性能逐渐增强,在高频区变化规律不明显.

2.5 低温性能

美国 SHRP 计划通过采用弯曲梁流变仪测定沥青劲度模量 S 和蠕变速率 m 的方法评价沥青的低温性能. 相同试验温度下劲度模量越低、蠕变速率越高的沥青低温性能越好^[19-24]. 笔者采用 Cannon 弯曲梁流变仪,测定经短期和长期老化后6种沥青的 S 值和 m 值. $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下6种沥青的劲度模量 S 和蠕变速率 m 如图8所示. 由图8可知,普通再生沥青的劲度模量和蠕变速率与90#沥青相差不大,说明采用方案一再再生后沥青的低温性能得到有效恢复. 采用方案二再生后,随着SBS掺量的增加,沥青的劲度模量逐渐下降、

蠕变速率逐渐上升,表明采用方案二的再生方法可以提升沥青的低温性能,且沥青的低温性能随 SBS 掺量的增加逐渐增强,说明

“再生-改性”沥青相比 90#原样沥青拥有更好的低温抗裂性能,与延度的试验结果一致。

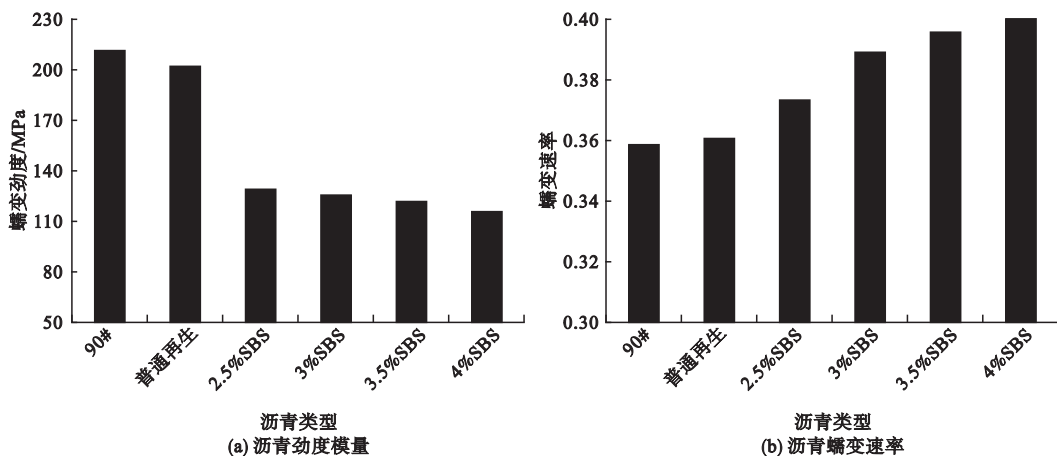


图8 -12 °C 沥青 BBR 试验结果

Fig. 8 The BBR test results of asphalt in -12 °C

3 结 论

(1)采用再生剂再生的沥青针入度、软化点、延度、车辙因子、临界温度、主曲线、劲度模量和蠕变速率与原样沥青非常接近,表明普通再生方案可以恢复沥青的高低温性能。

(2)“再生-改性”沥青的旋转黏度满足规范要求,即对老化沥青进行再生-改性处理的做法在黏度指标上是可行的。此外 4.5% SBS 掺量下的“再生-改性”沥青的黏度值已经接近临界值 3 Pa·s,因此对老化沥青再生-改性时 SBS 掺量并非越高越好。

(3)延度和弯曲梁流变试验的结果表明,采用再生-改性方案可显著提升沥青的抗低温开裂能力,且随着 SBS 掺量的增加,“再生-改性”沥青低温性能逐渐增强;车辙因子和临界温度的试验结果表明,“再生-改性”沥青的高温性能提升明显,且随着 SBS 掺量的增加沥青高温性能逐渐增强;通过不同沥青主曲线的对比分析可知,“再生-改性”沥青相比 90#原样沥青拥有更好的高低温性能。

(4)综合常规性能和流变性能的试验结果可知,对老化沥青再生-改性的方法是可行的,且再生-改性后沥青的高低温性能均显著优于原样基质沥青和普通再生沥青。

参考文献

- [1] 聂忆华,康彦晶,刘苹. 旧沥青路面厂拌热再生利用经济效益分析模型研究[J]. 公路工程, 2013, 38(4): 120-123.
(NIE Yihua, KANG Yanjing, LIU Ping. Economic benefits analysis model of hot plant-mix recycling asphalt pavements[J]. Highway engineering, 2013, 38(4): 120-123.)
- [2] 张道义,屈言宾,赵永利,等. 对再生沥青进行改性的可行性分析[J]. 石油沥青, 2008, 22(1): 69-71.
(ZHANG Daoyi, QU Yanbin, ZHAO Yongli, et al. The feasibility analysis of modifying the recycled asphalt[J]. Petroleum asphalt, 2008, 22(1): 69-71.)
- [3] 陈静云. 沥青路面再生方法的试验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2011.
(CHEN Jingyun. Experimental study on recycling methods of asphalt pavements[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.)
- [4] 李时雨. 再生沥青改性的机理与试验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2015.
(LI Shiyu. Study on the mechanism and experiment of modified regenerated asphalt[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.)
- [5] 俞志龙. 厂拌热再生沥青混合料路用性能及施工工艺研究[D]. 重庆:重庆交通大学,

2013.
(YU Zhilong. Research on the pavement performance and construction technology of hot mix plant recycling [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.)
- [6] MA T, YUAN H. Aging Behavior Characterization of SBS-modified Asphalt for Recycling Purpose [C]. Design: Performance, and Application, 2013.
 - [7] SUN L, WANG Y, ZHANG Y. Aging mechanism and effective recycling ratio of SBS modified asphalt [J]. Construction and building materials, 2014, 70(70): 26–35.
 - [8] AASHTO T 240–13. Standard method of test for effect of heat and air on a moving film of asphalt (rolling thin-film oven test) [S]. Washington DC: AASHTO, 2013.
 - [9] 陈静云, 李健, 王维营. 不同老化沥青掺量下的温拌再生沥青性能研究 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017, 33(5): 863–869.
(CHEN Jingyun, LI Jian, WANG Weiying. Performance of warm recycled asphalt binders with different aged asphalt percentage [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2017, 33(5): 863–869.)
 - [10] CONG P, LUO W, XU P, et al. Investigation on recycling of SBS modified asphalt binders containing fresh asphalt and rejuvenating agents [J]. Construction and building materials, 2015, 91: 225–231.
 - [11] YAO H, DAI Q, YOU Z, et al. Rheological properties, low-temperature cracking resistance, and optical performance of exfoliated graphite nanoplatelets modified asphalt binder [J]. Construction & building materials, 2016, 113: 988–996.
 - [12] AASHTO T 316–13. Standard method of test for viscosity determination of asphalt binder using rotational viscometer [S]. Washington DC: AASHTO, 2013.
 - [13] 季节, 武昊, 索智, 等. THFS 对沥青感温性能的影响分析 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017(3): 475–482.
(JI Jie, WU Hao, SUO Zhi, et al. Analysis on temperature susceptibility of asphalt binder affected by THFS [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2017(3): 475–482.)
 - [14] 李雪连, 周志刚, 陈宇亮, 等. Sasobit 对 SBS 改性沥青性能的影响研究 [J]. 实验力学, 2015, 30(3): 331–338.
(LI Xuelian, ZHOU Zhigang, CHEN Yuliang, et al. On the effect of Sasobit on the performance of SBS modified asphalt [J]. Journal of experimental mechanics, 2015, 30(3): 331–338.)
 - [15] XIAO F, AMIRKHANIAN S, WANG H, et al. Rheological property investigations for polymer and polyphosphoric acid modified asphalt binders at high temperatures [J]. Construction and building materials, 2014, 64(12): 316–323.
 - [16] The Asphalt Institute. Performance graded asphalt binder specification and testing, SP-1 [M]. Asphalt Institute, Lexington, 2003.
 - [17] 孙依人. 沥青混合料黏弹性表征及细观力学预测 [D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
(SUN Yiren. Viscoelastic characterization and mesomechanical prediction of asphalt mixture [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.)
 - [18] OLARD F, DI BENEDETTO H. General “2S2PID” model and relation between the linear viscoelastic behaviours of bituminous binders and mixes [J]. Road materials and pavement design, 2003, 4(2): 185–224.
 - [19] LIU S, CAO W, SHANG S, et al. Analysis and application of relationships between low-temperature rheological performance parameters of asphalt binders [J]. Construction & building materials, 2010, 24(4): 471–478.
 - [20] WANG W, CHEN J, SUN Y, et al. Laboratory performance analysis of high percentage artificial RAP binder with WMA additives [J]. Construction and building materials, 2017, 147: 58–65.
 - [21] 周庆华, 沙爱民. 高模量沥青混凝土蠕变特性研究 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2012, 33(4): 23–27.
(ZHOU Qinghua, SHA Aimin. Research on creep performance for high modulus asphalt concrete [J]. Journal of Zhengzhou university (engineering science), 2012, 33(4): 23–27.)
 - [22] 汤豆, 连城. SBS 掺量对改性沥青及其混合料低温性能影响 [J]. 内蒙古公路与运输, 2015(5): 8–12.
(TANG Dou, LIAN Cheng. Content on SBS modified asphalt and mix at low temperature performance [J]. Highways and transportation in inner Mongolia, 2015(5): 8–12.)
 - [23] 李超, 郭迪, 王子豪, 等. 多聚磷酸改性沥青结合料高低温流变特性 [J]. 功能材料, 2016, 47(6): 6022–6028.
(LI Chao, WU Di, WANG Zihao, et al. High and low temperature rheological properties of polyphosphoric acid modified asphalt binder [J]. Journal of functional materials, 2016, 47(6): 6022–6028.)
 - [24] 王琨, 郝培文. BBR 试验的沥青低温性能及粘弹性分析 [J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2016, 35(10): 1138–1143.
(WANG Kun, HAO Peiwen. Analysis of asphalt low temperature performance and viscoelasticity based on BBR test [J]. Journal of Liaoning technical university (natural science), 2016, 35(10): 1138–1143.)