

文章编号:1007-9629(2021)02-0370-08

高性能改性沥青的弹性恢复试验条件研究

姚鸿儒^{1,2}, 曹亚东³, 周晓龙¹, 乐海淳³

(1. 华东理工大学 石油加工所, 上海 200237; 2. 上海城建日沥特种沥青有限公司, 上海 200231;
3. 上海公路桥梁(集团)有限公司, 上海 200433)

摘要: 通过探索并优化弹性恢复的试验条件来有效评价高性能改性沥青的路用性能。结果表明:改变高性能改性沥青的恢复时间或拉伸长度, 沥青区分度增加均不明显;改变试验温度, 沥青区分度较好;在 25 ℃ 的标准试验温度下, 沥青弹性恢复率受 SBS 掺量的影响很小;在 5 ℃ 的试验温度下, 沥青弹性恢复率受 SBS 掺量的影响较为明显, 沥青区分度好, 且与重复蠕变恢复试验结果具有很好的一致性。因此建议在评价高性能改性沥青性能时, 采用 5 ℃ 弹性恢复率这一指标。

关键词: 高性能; 改性沥青; 弹性恢复; 试验温度; 相关性

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.02.020

Conditions of Elastic Recovery Test for High Performance Modified Asphalts

YAO Hongru^{1,2}, CAO Yadong³, ZHOU Xiaolong¹, LE Haichun³

(1. Petroleum Processing Research Center, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;
2. Shanghai Urban Construction NichiReki Special Asphalt Co., Ltd., Shanghai 200231, China;
3. Shanghai Road and Bridge(Group) Co., Ltd., Shanghai 200433, China)

Abstract: Conditions of elastic recovery were explored and optimized to evaluate the properties of high performance modified asphalts effectively. The results show that it is not obvious to change the hold time or elongation of the high performance modified asphalts while it is obvious to change test temperature. SBS content of high performance modified asphalts has a slight influence on elastic recovery at 25 ℃ but it becomes obvious at 5 ℃. The results accord with those from repeated creep recovery test. So evaluation of high performance modified asphalts is suggested to be carried out at 5 ℃.

Key words: high performance; modified asphalt; elastic recovery; test temperature; correlation

随着道路交通量的增大和安全降噪的需要,要求所用沥青材料具有更优异的性能,而这可以通过聚合物改性沥青来实现。最有效且最常用的聚合物改性剂为苯乙烯(S)-丁二烯(B)-苯乙烯(S)三嵌段共聚物(SBS)。随着 SBS 掺量的增大,改性沥青发生相转变,由富沥青质连续相转变为富聚合物连续相,表现出聚合物的性质,统称为高性能改性沥青,包括水泥混凝土桥面专用改性沥青、重载交通专用改性沥青、高黏度改性沥青和高弹性改性沥青等^[1],相对

于 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》中的 SBS 改性沥青,其性能更为优异。高性能改性沥青在国内外得到了不同程度的推广和应用,也编写了相应的规范^[2-10],但对其评价方法和技术指标还有不同的认识。日本关于高性能改性沥青的研究和应用起步较早且应用较广,目前高性能改性沥青的生产量约占改性沥青的 1/3^[6],并形成整套的规范和评价体系^[11]。在中国和日本的相关规范中,高性能改性沥青评价指标主要有以下几种:

收稿日期:2019-11-14; 修订日期:2019-12-17

基金项目:上海市产业转型升级专项资金(产业技术创新)企业技术创新能力提升项目(沪 J-2018-29)

第一作者:姚鸿儒(1990—),男,山东滕州人,华东理工大学博士生,上海城建日沥特种沥青有限公司工程师。E-mail:yaohongru@126.com

通讯作者:周晓龙(1964—),男,上海人,华东理工大学教授,博士生导师,博士。E-mail:xiaolong@ecust.edu.cn

(1)5℃延度.在聚合物改性剂掺量超过6%时,5℃延度并不随着聚合物改性剂掺量的增大而增大,反而有可能下降^[12].因此,日本对于高性能改性沥青只测其15℃延度.中国规范一般要求高性能改性沥青的5℃延度大于30 cm^[4-6],此要求不算苛刻,但应注意5℃延度与沥青混合料性能并没有一定的相关性.

(2)25℃黏韧性.随着SBS掺量的增大,改性沥青的凝聚力增大.当增大到一定程度时,该凝聚力大于改性沥青与试验器半球圆头之间的黏附力,拉伸变形不到300 mm时改性沥青即从半球圆头上拉脱,从而使试验结果偏小.具体表现为随着SBS掺量的增大,改性沥青的黏韧性反而减小^[13].日本要求高黏度改性沥青25℃黏韧性大于20 N·m,对韧性不做要求;JTG F40—2004则要求高黏度改性沥青25℃黏韧性大于20 N·m,韧性大于15 N·m;有些规范^[4-6]将要求提高到25℃黏韧性大于25 N·m,韧性大于20 N·m.

(3)60℃动力黏度.高黏度改性沥青最初的定义即是60℃黏度高的改性沥青^[14].从本质上而言,高黏度改性沥青是指聚合物改性剂掺量高、聚合物相形成连续相的改性沥青^[15].由于最常使用的聚合物改性剂为SBS,相对于黏性,SBS改性沥青在60℃下更多表现为弹性,因此用黏度来表征已不太恰当,且测试时误差较大,日本已将该指标去除^[11].中国规范一般还保留了这一指标,且将该指标的要求从大于20 000 Pa·s提高到50 000 Pa·s^[4-6].

(4)60℃零剪切黏度.李立寒等^[16]研究认为,60℃零剪切黏度更适合表征高黏度改性沥青的黏度特性,且与沥青混合料的相关性更好^[17].上海地方标准要求高黏度改性沥青的零剪切黏度大于40 000 Pa·s^[3].

(5)−20℃弯拉应变能.沥青胶结料弯曲试验是将沥青浇注成20 mm×20 mm×120 mm的小梁,放置在间距为80 mm的支座上,以100 mm/min的速率在中点加载,求得其应力-应变曲线,进而计算沥青胶结料的弯拉应变能和弯曲劲度模量^[18].研究发现,沥青−20℃弯拉应变能与SBS掺量和0℃肯塔堡飞散损失均具有很强的相关性^[19-20].江苏省要求钢桥面用高弹性改性沥青的−20℃弯拉应变能大于500 kPa^[7].

综上所述,中国目前评价高性能改性沥青的指标,有些随着聚合物改性剂掺量的增大先增大后减小,如5℃延度和25℃黏韧性;有的不太适宜,如60℃动力黏度;有的需要价格高昂的设备,如60℃零剪切黏度;有的则是新试验方法缺乏认可度,如弯曲试验.

本文通过改变弹性恢复的试验条件,探讨试验条件下改性沥青的弹性恢复率与聚合物改性剂(SBS)掺量之间的相关性,设计了一种适用于评价高性能改性沥青性能的试验方法,并通过与重复蠕变恢复试验(RCRT)对比,验证了该方法的有效性.

1 试验

1.1 原材料

I-D改性沥青(I-D)、水泥混凝土桥面专用改性沥青(CB)、高黏度改性沥青(HV)、钢桥面专用高弹性改性沥青(HE),均购自上海城建日沥特种沥青有限公司;高弹性改性沥青A,国内某公司生产;70#东海基质沥青(70#),中国石油化工股份有限公司产;橡胶油(AO),伊朗进口芳烃油;SBS改性剂(SBS),牌号LG501,购自LG化学公司.表1~3为基质沥青、橡胶油和SBS改性剂的技术指标.

表1 基质沥青的技术指标
Table 1 Technical specification of base asphalt

25℃ penetration/ (0.1 mm)	Softening point/ ℃	10℃ ductility/ cm	w/%			
			Saturates	Aromatics	Resins	Asphaltenes
64.8	50.0	14.4	9.9	53.7	17.4	19.0

表2 橡胶油(AO)的技术指标
Table 2 Technical specification of aromatic oil(AO)

40℃ kinematic viscosity/(mm ² ·s)	Relative molecule mass			w/%			
	$\bar{M}_n$ /(g·mol ⁻¹)	$\bar{M}_w$ /(g·mol ⁻¹)	$\bar{M}_w/\bar{M}_n$	Saturates	Aromatics	Resins	Asphaltenes
628	222	425	1.91	4.7	89.4	5.3	0.6

表3 SBS改性剂的技术指标
Table 3 Technical specification of SBS

$m(S)/m(B)$	Diblock/%	Structure	MI(200℃, 5 kg, 10 min)/g	Relative molecule mass		
				$\overline{M}_n/(g \cdot mol^{-1})$	$\overline{M}_w/(g \cdot mol^{-1})$	$\overline{M}_w/\overline{M}_n$
31/69	12.8	Linear	<1	1.65×10^5	1.79×10^5	1.09

1.2 仪器设备

LYY-9A型沥青延伸度仪, WSY-025B型沥青软化点测定仪, WSY-026型沥青针入度试验仪, 无锡市石油仪器设备有限公司; RVDV-II+型布氏黏度仪, 美国 Brookfield 公司; Discovery HR-1 动态剪切流变仪, 美国 TA 仪器; BME100LT 高速剪切机, 上海埃东机电设备有限公司; Iatroscan MK-6 s 薄层色谱仪, 日本雅特隆公司; HLC-8320GPC 体积排除色谱仪, 日本东曹公司。

1.3 SBS改性沥青的制备

将一定比例的橡胶油、SBS 加入到热沥青中, 在 180~190℃下, 用高速剪切机以 4 000 r/min 的速率剪切, 直至 SBS 在沥青中均匀分散, 且分散相粒径小于 1 μm; 在 180℃烘箱中保温 30 min 后, 即制得 SBS 改性沥青。

羽入^[19]的研究表明, SBS 的分散情况对沥青胶结料和混合料的性能有着重要影响。当 SBS 分散相粒径小于 1 μm 时(分散状态Ⅲ), 改性沥青的性能稳定, 混合料性能最优。不同 SBS 掺量的改性沥青达到分散状态Ⅲ时所需时间不同, SBS 掺量越大, 所需时间越长。因此不同 SBS 掺量的改性沥青性能应在同样的分散状态下进行比较, 而不应在同样的剪切时间下进行比较。

1.4 分析测试项目

基质沥青及橡胶油的化学组成¹⁾采用薄层色谱法(TLC-FID)测试^[21]。具体步骤为: 在色谱棒一端点入 1 μL 样品/甲苯溶液, 分别在正庚烷、甲苯、二氯甲烷与甲醇(体积比为 95:5)扩展剂中展开沥青中饱和分、芳香分、胶质至不同高度使其分离; 色谱棒以恒定速度通过氢火焰, 棒薄层上已分离的有机物质从氢火焰中获得能量而离子化, 而氢火焰离子检测器检测碳离子产生的电流, 电流强度与进入火焰区的碳离子物质质量成正比。

沥青相对分子质量及其分布采用体积排除色谱法(SEC)测定。测定时, 以四氢呋喃(THF)为流动相, 流速 0.35 mL/min; 样品浓度 0.5~5.0 mg/mL, 溶剂为 THF; 流动相和溶剂采用的 THF 均为色谱纯; 进样量 10 μL, 泵温箱和柱温箱温度均控制

在 40℃。检测器有 2 个: 示差折光检测器(RI 检测器)和紫外吸收检测器(UV 检测器)。标样为聚苯乙烯。色谱柱有 3 个: TSKgel Super HM-M W0054、TSKgel Super HM-M W0055、TSKgel Super HM-M W0056。

沥青的针入度、延度、软化点、旋转黏度等基本性能分别按照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中 T0604、T0605、T0606、T0625 的规定测定。

沥青的弹性恢复试验按照 JTG E20—2011 中 T0622 的规定, 采用延度试验试模, 但中间部分换为直线侧模。制模后在恒温水浴中保温 1.5 h; 以 50 mm/min 速率拉伸, 达到长度 L (10 cm) 时停止拉伸, 立即用剪刀在中间将沥青试样剪断, 然后在恒温水浴中保持 1 h; 取出试样轻轻捋直, 并使试样尖端正好接触, 测量其残留长度 X (cm)。弹性恢复率 R_E 的计算方法为:

$$R_E = \frac{L-X}{L} \times 100\% \quad (1)$$

沥青重复蠕变恢复试验参考 NCHRP Report 459^[22], 采用平板流变仪, 剪切应力 300 Pa, 作用 1 s, 恢复 9 s; 在一定温度下测试一定周期。恢复率 R = (每个周期峰值应变-末端应变)/最大变分量。

2 结果与讨论

2.1 成品改性沥青的弹性恢复

测试 I-D 改性沥青(I-D)、混凝土桥面专用改性沥青(CB)、高黏度改性沥青(HV)、高弹性改性沥青(HE)4 种成品改性沥青的性能指标, 结果见表 4。

表4 成品改性沥青的性能指标
Table 4 Properties of commercial modified asphalts

Index	I-D	CB	HV	HE
25℃ penetration/(0.1 mm)	47	43	50	64
Softening point/℃	67.0	79.0	82.5	85.5
5℃ ductility/cm	24	24	35	68
135℃ viscosity/(Pa·s)	1.70	2.13	4.72	4.31
25℃ elastic recovery/%	86	94	95	99

1) 本文涉及的组成、掺量、比值等除特别指明外均为质量分数或质量比。

由表4可见,虽然4种成品改性沥青的软化点和5℃延度存在很大差别,但它们的25℃弹性恢复率差别并不大.尤其是高弹性改性沥青,在相同条件下,高弹性改性沥青的疲劳寿命可达I-D改性沥青的100倍^[1].如果弹性恢复试验的区分度不够,或规范中提出的技术要求不够(如上海地方标准^[2]仅要求高弹性改性沥青25℃弹性恢复率不小于90%),那么该指标的意义就不大.因此应寻找适合评价高性能改性沥青弹性恢复的试验条件.

弹性恢复试验的标准条件是:试验温度25℃,拉伸速率50 mm/min,拉伸长度10 cm,应力松弛时间为0,恢复时间1 h.分别改变恢复时间、拉伸长度和试验温度,测试4种成品改性沥青的弹性恢复率 R_E ,结果见图1~3.

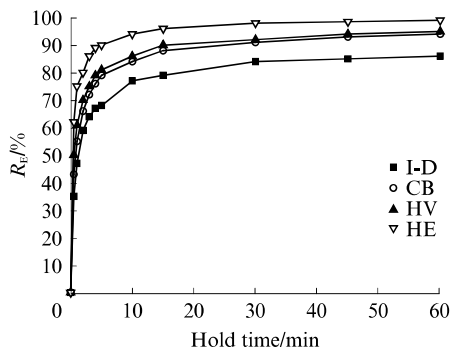


图1 恢复时间与成品改性沥青弹性恢复率的关系

Fig. 1 Relationship between hold time and elastic recovery of commercial modified asphalt

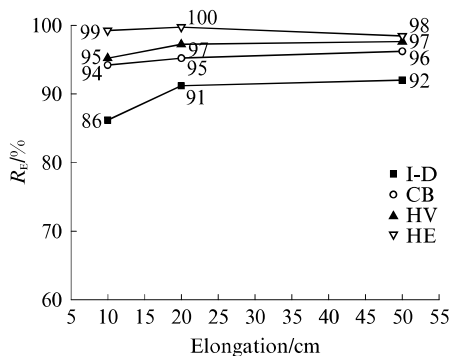


图2 拉伸长度与成品改性沥青弹性恢复率的关系

Fig. 2 Relationship between elongation and elastic recovery of commercial modified asphalt

由图1可见:随着恢复时间的延长,4种成品改性沥青的弹性恢复率增大,并逐渐趋于稳定;如缩短恢复时间,几种改性沥青之间弹性恢复率的差异并不大,且由于试件在快速恢复过程中难以测试准确,影响精确度,故不建议通过缩短恢复时间来提高改性沥青区分度.

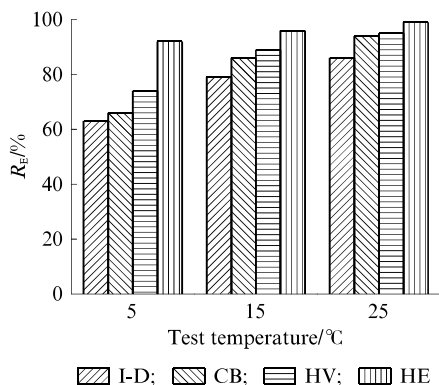


图3 试验温度与成品改性沥青弹性恢复率的关系

Fig. 3 Relationship between test temperature and elastic recovery of commercial modified asphalt

由图2可看出,改性沥青弹性恢复是SBS改性剂在起作用.聚合物弹性恢复的本质是熵弹性.拉伸时,SBS分子沿着拉伸方向取向,拉伸长度越大,熵减少越多,熵增的趋势越大,弹性恢复的趋势越大.拉伸长度在扯断长度的范围内,材料未达到应力屈服,此时拉伸长度对改性沥青弹性恢复的影响不大.故不建议通过增大拉伸长度来提高改性沥青区分度.

普通改性沥青中的富沥青质相为连续相,主要表现为沥青的性质;高性能改性沥青的富聚合物相为连续相,表现出聚合物的性质.分析图3数据可以看出,随着试验温度的升高,改性沥青的相位角逐渐增大,从更多表现为弹性到更多表现为黏性.但普通改性沥青的弹性区域较窄,高性能改性沥青弹性区域较宽^[23].在5℃下,普通改性沥青处于玻璃态向高弹态转变的区域,由于沥青等小分子掺量高,SBS链段运动处于部分被冻结的状态,恢复时SBS链段的运动受到限制,不易回复到拉伸前的状态;高性能改性沥青处于高弹态,SBS链段可以较为容易地恢复到拉伸前的状态.在25℃下,普通改性沥青和高性能改性沥青中的SBS链段均可以较自由地运动,都具有较高的弹性恢复率.因此,将试验温度降低至5℃或许是适于区分普通改性沥青和高性能改性沥青的方法.

2.2 SBS和橡胶油掺量对改性沥青性能的影响

为进一步验证试验温度对改性沥青弹性恢复率的影响,制备了一系列不同SBS掺量(外掺)的改性沥青,分析其在不同试验温度下的弹性恢复率.在实际应用过程中,针入度对改性沥青的性能也具有一定影响,一般而言,针入度大的沥青具有较好的耐疲劳和抗开裂性能,针入度小的沥青具有更好的抗车辙和抗扭转性能^[24-25],需要根据使用场合选择不同

针入度的沥青. 本文通过掺入橡胶油(内掺)来调节不同针入度的样品,并测试各样品的性能,结果见改性沥青针入度,对相同 SBS 掺量的改性沥青制备表 5.

表 5 SBS 和橡胶油掺量与改性沥青性能的关系
Table 5 Relationship between contents of SBS, aromatic oil and properties of modified asphalts

$w_{\text{SBS}}/\%$	$w_{\text{AO}}/\%$	5 ℃ ductility/ cm	25 ℃ penetration/ (0.1 mm)	Softening point/℃	135 ℃ viscosity/ (Pa · s)	$R_E/\%$	
						25 ℃	5 ℃
0	0	7	64	50.5	0.47	20	31
2.0	0	12	54	54.0	0.80	36	50
2.0	1.0	20	65	52.5	0.73	38	56
2.0	2.0	24	70	52.0	0.71	42	56
4.0	0	11	40	63.5	1.48	82	56
4.0	1.5	23	48	58.5	1.32	76	60
4.0	3.0	36	58	57.5	1.18	78	62
6.0	0	14	37	79.5	2.44	92	56
6.0	2.0	23	45	76.5	2.03	92	62
6.0	4.0	42	56	67.0	1.65	97	68
8.0	0	16	33	85.0	4.32	92	64
8.0	3.0	21	47	83.0	3.06	94	67
8.0	6.0	50	94	81.5	1.91	97	88
10.0	0	17	29	90.0	8.42	94	74
10.0	4.0	25	52	88.5	6.62	95	82
10.0	8.0	55	115	83.0	3.99	98	94

由表 5 可知:在橡胶油掺量相同的条件下,随着 SBS 掺量的增大,改性沥青的 5 ℃延度增大,25 ℃针入度降低,软化点升高,135 ℃黏度增大;在 SBS 掺量相同的条件下,随着橡胶油掺量的增大,改性沥青的 5 ℃延度有明显的提高,25 ℃针入度增大,软化点稍有降低,135 ℃黏度减小.

2.3 SBS 掺量对改性沥青 25 ℃弹性恢复率的影响

随着 SBS 掺量的增大,SBS 改性沥青发生相转变.当 SBS 掺量小于 5%时,富沥青质为连续相,富 SBS 相为分散相;SBS 掺量大于 5%时,富 SBS 相为连续相,富沥青质相为分散相.对 2 种相形态的改性沥青分别进行 25 ℃弹性恢复率(R_E)与 SBS 掺量(w_{SBS})和橡胶油掺量(w_{AO})的线性相关分析.

在 25 ℃下,当富沥青质相为连续相时:

$$R_E = 13.6w_{\text{SBS}} + 2.83w_{\text{AO}} + 13.1, R^2 = 0.958 \tag{1}$$

在 25 ℃下,当富 SBS 相为连续相时:

$$R_E = 0.204w_{\text{SBS}} + 0.759w_{\text{AO}} + 90.6, R^2 = 0.829 \tag{2}$$

由线性回归分析可知,改性沥青的弹性恢复率与 SBS 掺量有着很好的相关性.当富沥青质相为连续相时,改性沥青的弹性恢复率受 SBS 掺量影响较大,说明 25 ℃弹性恢复率对于评价普通改性沥青的性能是十分有效的;但当富 SBS 相为连续相时,式

(2)的截距有 90.6,与 SBS 掺量相关的系数仅为 0.204,说明此时改性沥青的弹性恢复率受 SBS 掺量影响较小,25 ℃弹性恢复率不适于评价高性能改性沥青的性能.

2.4 SBS 掺量对改性沥青 5 ℃弹性恢复率的影响

在 5 ℃下,当富沥青质相为连续相时:

$$R_E = 4.91w_{\text{SBS}} + 2.92w_{\text{AO}} + 37.4, R^2 = 0.818 \tag{3}$$

在 5 ℃下,当富 SBS 相为连续相时:

$$R_E = 3.82w_{\text{SBS}} + 3.02w_{\text{AO}} + 33.2, R^2 = 0.936 \tag{4}$$

由线性回归分析可知,改性沥青的弹性恢复率与 SBS 掺量有着很好的相关性.不论富沥青质相为连续相还是富 SBS 相为连续相,改性沥青的弹性恢复率都主要受 SBS 掺量的影响,说明 5 ℃弹性恢复率对于评价普通改性沥青和高性能改性沥青的性能都是十分有效的.但当富沥青质相为连续相时,25 ℃弹性恢复率相对于 5 ℃弹性恢复率而言,受 SBS 掺量的影响更大,沥青区分度更好.因此在评价普通改性沥青性能时,仍推荐按原试验条件,即试验温度为 25 ℃.但当富 SBS 相为连续相时,推荐将试验温度变更为 5 ℃.

2.5 与重复蠕变恢复试验的对比

Bahia 等^[22]认为重复蠕变恢复试验(RCRT)比

车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 与混合料抵抗永久变形能力的相关性更好。重复蠕变恢复试验一般测试温度为 46~82 ℃。本文借鉴该试验方法,在 5 ℃和 25 ℃下进行测试。由于试验温度较低,采用 8 mm 平板流变仪,间距 2 000 μm ;剪切应力 300 Pa,作用 1 s,恢复 9 s,测试 20 个周期。结果取后 10 个周期蠕变恢复率的平均值。其中恢复率 $R=(\text{每个周期峰值应变}-\text{末端应变})/\text{最大变形量}$ 。测试 4 种成品改性沥青的恢复率,结果见图 4。

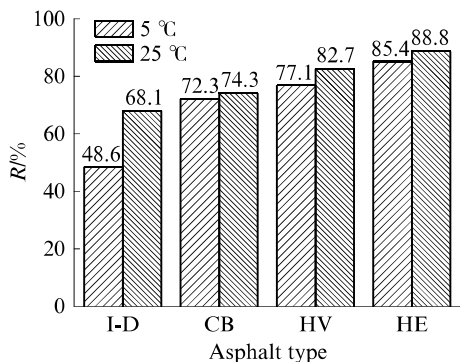


图 4 不同成品改性沥青的恢复率(RCRT)

Fig. 4 Recovery of various commercial modified asphalts by RCRT

由图 4 可见:在 5 ℃和 25 ℃下,重复蠕变恢复试验的 R 值与弹性恢复试验的 R_E 值表现出一致的规律。由于该试验设备精确度更高,因此改性沥青在 5 ℃和 25 ℃下都有很好的区分度。

比较高弹性改性沥青 HE 和 A 的性能指标,结果见表 6。

表 6 2 种高弹性改性沥青性能指标的对比

Table 6 Properties comparison of two high elastic modified asphalts

Index	HE	A	Specification
25 °C penetration/(0.1 mm)	63.0	79.0	60-90
Softening point/°C	85.5	89.0	≥80
5 °C ductility/cm	67.5	59.5	≥50
$R_E(25\text{ °C})/\%$	99.0	98.0	≥90
$R_E(5\text{ °C})/\%$	92.0	83.0	
$R(25\text{ °C})/\%$	88.8	68.4	

由表 6 可知:2 种高弹性改性沥青的性能指标都满足规范要求,从 25 ℃弹性恢复率来看,二者区别不大;但从 5 ℃弹性恢复率和重复蠕变恢复试验的 25 ℃恢复率可以看出,二者具有明显区别。结合表 5 中的针入度和 5 ℃弹性恢复率可以大致推断,高弹性改性沥青 HE 的 SBS 掺量约为 12%,高弹性改性沥青 A 的 SBS 掺量约为 8%,高弹性改性沥青 HE 的性能优于高弹性改性沥青 A。

3 结论

(1)通过改变弹性恢复的试验条件,采用成品改性沥青测试其弹性恢复率,结果表明改变恢复时间和拉伸长度,改性沥青的区分度增加均不明显;改变试验温度则区分度较好。

(2)探讨不同试验温度下的弹性恢复率与改性沥青中 SBS 掺量之间的相关性,结果表明,25 ℃的标准试验温度下,对于高性能改性沥青,其弹性恢复率受 SBS 掺量的影响很小;在 5 ℃的试验温度下,其弹性恢复率受 SBS 掺量的影响较为明显,区分度好。因此建议在评价高性能改性沥青(SBS 掺量大于 5%)性能时,采用 5 ℃弹性恢复率这一指标。

(3)试验结果与重复蠕变恢复试验结果具有较好的一致性。此外,比较了 2 种高弹性改性沥青的性能指标,发现采用 5 ℃弹性恢复率能很好地看出二者的区别。

参考文献:

- [1] 上野贞治,鹰本丈裕.高性能改性沥青在铺装中的应用效果分析[J].城市道桥与防洪,2014(9):69-74.
UENO S, TAKAMOTO T. Analysis on application effect of high-performance modified asphalt in pavement [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2014(9): 69-74. (in Chinese)
- [2] 上海市住房和城乡建设管理委员会. DG/T J08-87—2016:道路、排水管道成品与半成品施工及验收规程[S].上海:同济大学出版社,2016.
Committee of Housing and Urban-Rural Development of Shanghai. DG/T J08-87—2016: The specification for road's and drainage pipe's product and semi-product construction and acceptance[S]. Shanghai: Tongji University Press, 2016. (in Chinese)
- [3] 上海市住房和城乡建设管理委员会. DG/T J08-2074—2016:道路排水性沥青路面技术规范[S].上海:同济大学出版社,2016.
Committee of Housing and Urban-Rural Development of Shanghai. DG/T J08-2074—2016: Technical code for drainage asphalt pavement of road [S]. Shanghai: Tongji University Press, 2016. (in Chinese)
- [4] 中华人民共和国交通运输部. JT/T 860.2—2013:沥青混合料改性添加剂 第 2 部分:高黏度添加剂[S].北京:人民交通出版社,2013.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JT/T 860.2—2013: Modifier for asphalt mixture Part 2: High viscosity additive [S]. Beijing: China Communication Press, 2013. (in Chinese)
- [5] 重庆市城乡建设委员会. DBJ50/T-241—2016:排水沥青路面技术规程[S].重庆:重庆对外建设(集团)有限公司,2016.
Committee of Housing and Urban-Rural Development of Chongqing. DBJ50/T-241—2016: Technical specification for

- porous asphalt pavement[S]. Chongqing: Chongqing International Construction Corporation, 2016. (in Chinese)
- [6] 云南省质量技术监督局. DB 53/T 756—2016: 排水降噪沥青路面应用技术指南[S]. 北京: 人民交通出版社, 2016.
The Quality and Technology Supervision Bureau of Yunnan Province. DB 53/T 756—2016: Technical guidebook for application of drainage and noise reduction asphalt pavement[S]. Beijing: China Communication Press, 2016. (in Chinese)
- [7] 江苏省质量技术监督局. DB 32/T 2678—2014: 复合浇注式沥青钢桥面铺装设计与施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
The Quality and Technology Supervision Bureau of Jiangsu Province. DB 32/T 2678—2014: Standard specification for design and construction of composite gussasphalt steel deck pavement[S]. Beijing: China Communication Press, 2014. (in Chinese)
- [8] 山东省质量技术监督局. DB37/T 2980—2017: 钢桥面浇注式沥青混凝土铺装施工技术规范[S]. 济南: 山东省路桥集团有限公司, 2017.
The Quality and Technology Supervision Bureau of Shandong Province. DB37/T 2980—2017: Technical specification for construction of gussasphalt steel deck pavement[S]. Jinan: Shandong Luqiao Group Co., Ltd., 2017. (in Chinese)
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJJ/T 279—2018: 城镇桥梁沥青混凝土桥面铺装施工技术标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. CJJ/T 279—2018: Technical standard for construction of paving asphalt concrete urban bridge deck[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (in Chinese)
- [10] 中华人民共和国交通运输部. JTG/T 3364-02—2019: 公路钢桥面铺装设计与施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG/T 3364-02—2019: Specification for design and construction of pavement on highway steel deck bridge[S]. Beijing: China Communication Press, 2019. (in Chinese)
- [11] 日本道路協会. 舗装設計施工指針(2006年版)[S]. 東京: 丸善出版, 2006.
Japan Road Association. Guidebook for design and construction of pavement(2006 edition)[S]. Tokyo: Muruzen Publishing, 2006. (in Japanese)
- [12] 古里典久, 石川洋, 小澤光一. 高粘度改質アスファルトの性状評価およびそれらの混合物性状に及ぼす影響[C]//土木学会舗装工学論文集. 東京: 土木学会舗装工学委員会舗装工学論文集編集小委員会, 2001: 61-68.
FURUSATO N, ISHIKAWA H, OZAWA K. Binder property evaluation of high viscosity polymer modified asphalts and the influence on mixture properties[C]//Proceeding of the Committee on Pavement Engineering, JSCE. Tokyo: The Editorial Committee on Journal of JSCE, 2001: 61-68. (in Japanese)
- [13] 深代勝弘, 黄木秀実. 改質アスファルトの舗装維持への貢献[J]. 改質アスファルト, 2005, 25: 19-31.
- FUKADAI K, OKI H. Contribution of modified asphalt to pavement maintenance[J]. Modified Asphalt, 2005, 25: 19-31. (in Japanese)
- [14] 日本道路協会. 舗装設計施工指針[S]. 東京: 丸善出版, 2001.
Japan Road Association. Guidebook for design and construction of pavement[S]. Tokyo: Muruzen Publishing, 2001. (in Japanese)
- [15] 日本改質アスファルト協会技術委員会. 改質アスファルトの名称・標準的性状の変更について[J]. 改質アスファルト, 2006, 27: 38-42.
Technical Committee of Japan Modified Asphalt Association. Changes of names and specification of modified asphalts[J]. Modified Asphalt, 2006, 27: 38-42. (in Japanese)
- [16] 李立寒, 耿韩, 孙艳娜. 高黏度沥青黏度的评价方法与评价指标[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(3): 352-356, 362.
LI Lihan, GENG Han, SUN Yanna. Evaluation method and indicator for viscosity of high-viscosity asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(3): 352-356, 362. (in Chinese)
- [17] 李立寒, 耿韩, 孙艳娜, 等. 高黏度沥青性能评价指标与标准的试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(8): 1155-1160.
LI Lihan, GENG Han, SUN Yanna, et al. Viscosity evaluation indicators and criteria of high-viscosity modified asphalt[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2010, 38(8): 1155-1160. (in Chinese)
- [18] 日本道路協会. 舗装調査・試験法便覧[S]. 東京: 丸善出版, 2007.
Japan Road Association. Handbook for investigation and test methods of pavement[S]. Tokyo: Muruzen Publishing, 2007. (in Japanese)
- [19] 羽入昭吉. SBS改質アスファルトのミクロ構造とバインダおよび混合物の力学的性状に関する研究[D]. 室蘭: 室蘭工業大学, 2007.
HANYU A. Relationship between microstructure of SBS modified asphalt and mechanical properties of binder and performance of mixture[D]. Muroran: Muroran Institute of Technology, 2007. (in Japanese)
- [20] 本松資郎, 高橋茂樹, 上坂憲一, 等. 改質アスファルトの性能評価と混合物性状の関係について[J]. 改質アスファルト, 2002, 19: 8-10.
TOMOMATSU S, TAKAHASHI S, UESAKA K, et al. Relationship between evaluation of modified asphalt and properties of mixture[J]. Modified Asphalt, 2002, 19: 8-10. (in Japanese)
- [21] 中国石化洛阳分公司. Q/SH 3210 0065—2012: 减压渣油四组分测定法(薄层色谱法)[S]. 洛阳: 中国石化洛阳分公司, 2012.
SINOPEC Luoyang Company. Q/SH 3210 0065—2012: Test method of four fractions of vacuum residue(TLC-FID)[S]. Luoyang: Sinopec Luoyang Company, 2012.
- [22] BAHIA H U, HANSON D I, ZENG M, et al. Characterization of modified asphalt binders in superpave mix design(NCHRP Report 459)[R]. Washington D C: Transportation Research Board, 2001.