

SBR 和 RET 复配改性沥青的流变性能分析研究

王可

(河南城建学院 土木与交通工程学院, 河南 平顶山 467044)

摘要:为了探讨 SBR 和 RET 复配改性沥青的性能优势,通过原材料的选取,试验首先制备了二者复配、单一及 SBS 改性沥青,并分析了其常规性能指标的变化。在此基础上,借助动态剪切流变仪(DSR)对比分析了不同应力水平下各改性沥青在高温区间的流变性能,以及采用弯曲梁流变仪(BBR)对比评价了不同温度条件下的低温流变性能。分析结果表明:SBR 和 RET 复配改性沥青高温性能突出,3% SBR 和 1.5% RET 复配改性沥青具有与 4% SBS 改性沥青相当的高温性能,且低温性能显著高于 4% SBS 改性沥青,以及 RET 改性剂具有显著提升改性沥青热存储稳定性的作用;DSR 试验表明:3% SBR 和 1.5% RET 改性沥青在整个高温区间内具有最优的弹性恢复性能和抗残余永久变形能力,从而赋予了基质沥青优异的承受交通荷载的能力,且其具有最低的中低温感温性能;BBR 试验表明:随 RET 掺量的提高,RET 单一改性及 SBR 和 RET 复配改性沥青的低温性能均下降,即 RET 掺量的提高不利于沥青低温性能的发挥,但 3% SBR 和 1% RET 复配改性沥青的低温性能优于 4% SBS 改性沥青,且 3% SBR 和 1.5% RET 复配改性沥青具有最低的低温感温性能。

关键词: 道路工程;三元共聚物(RET);SBR 和 RET 复配改性沥青;流变性能

1 引言

由于交通荷载的重型化和自然环境的日益严峻化使得道路工作者对路面材料的性能提出了更高的要求,沥青作为路面铺筑时的核心材料之一,具有十分重要的黏结与黏附作用,其性能与路面在服役期间的路用性能具有密切的关联性。据研究显示,沥青材料对高温抗车辙性能、抗疲劳破坏性能和抗低温缩裂能力的贡献率分别达到了 29%、52% 和 87%。因此,全面地提升沥青材料自身的路用性能具有显著的必要性。

反应型弹性体三元共聚物(Reactive Elastomeric Terpolymer, RET)被证实可作为沥青的一种新型改

性剂,其化学改性原理可达到永久改性沥青的目的,从而赋予基质沥青良好的抗塑性变形的能力及优异的存储稳定性能,但由于相关研究表明 RET 改性剂将会削弱沥青的低温性能,从而限制了其有效地推广应用。同时,丁苯橡胶(Styrene-Butadiene Rubber, SBR)改性剂具有明显改善沥青低温延展性能的能力,但其对沥青高温性能的改善相对不足,从而难以在高温地区推广应用。

针对 RET 和 SBR 改性剂在单一改性时的性能不足问题,道路工作者提出采用改性剂的复配以结合两种改性剂的性能优势,从而制备性能优良的改性沥青的方法和思路,并通过室内试验分析论证了复配改性的可行性,以及分析了改性剂的复配对沥青性能的提

- *****
- [12] 杨庆刚,王雨飞.废弃橡胶轮胎颗粒混合膨胀土路用性能研究[J].山西建筑,2017(36).
- [13] 陈开圣,李振.干湿循环与荷载耦合作用下红黏土胀缩特性[J].建筑科学与工程学报,2018(3).
- [14] 颜椿钊,张雁,郭利勇.废弃轮胎橡胶颗粒改良红黏土强度试验研究[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),

- 2015(4).
- [15] Cetin H, Fener M, Gunaydin O. Geotechnical Properties of Tire-Cohesive Clayey Soil Mixtures as a Fill Material[J]. Engineering Geology, 2006, 88(1): 110-120.
- [16] 付茹,李小青,Matthew Richard Coop. 花岗岩风化土与废弃轮胎混合物力学特性研究[J].岩土力学,2016(9).

升效果。国外 Singh Dharamveer 采用双刃缺口张力试验分析了 SBR—RET 改性沥青的断裂韧性,结果发现二者复配具有显著提升沥青断裂韧性的作用,此外,文献[10—12]制备了 SBR—RET 复配改性沥青,并采用流变学方法在确定改性剂最佳掺量的同时分析了二者改性沥青的路用性能,结果发现复配改性赋予了沥青优异的路用性能,其中 RET 在合适掺量时可达到 SBS 改性沥青的性能标准。综合研究发现,各改性沥青的流变性能已经成为道路研究者关注的问题,流变性能的好坏直接关系沥青路用性能优劣,为此,该文在分析 SBR 和 RET 复配改性沥青常规性能的基础上,从流变学角度对比分析复配、单一和 SBS 改性沥青在高、低温下的流变性能,以期对 SBR 和 RET 复配改性沥青的推广应用奠定理论基础。

2 试验

2.1 原材料

试验选择 70[#] 基质沥青作为改性用基质沥青,试验时首先采用 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中的相关方法对其基本性能进行测试,结果如表 1 所示。SBR1500 颗粒的密度为 1.017 g/cm³,挥发分含量为 0.6%,总灰分含量为 0.85%。反应型 RET 热塑性塑料颗粒为美国产,其性能指标为密度 0.982 g/cm³,熔融指数为 3.6 g/(10 min),熔点为 109℃和凝固点为 80℃。星型 SBS 改性剂,其嵌段比为 3:7。

表 1 70[#] 基质沥青基本性能指标

项目	单位	测试值	规范限值	试验方法
针入度	0.1 mm	72.6	60~80	T0604—2011
软化点	℃	49.7	≥46	T0606—2011
10℃延度	cm	89	≥20	T0605—2011
135℃运动黏度	Pa·s	0.26	—	T0625—2011
RTFOT 后	质量损失	%	±0.8	T0609—2011
	残留针入度比	%	≥61	T0604—2011
	10℃延度	cm	≥6	T0605—2011

2.2 试验方案设计

试验分别制备了不同掺量的 RET 与 SBR 复配改性沥青,同时以基质沥青、SBR 改性沥青、RET 改性沥青和 SBS 改性沥青为对照组,以评价 SBR 和 RET 复配改性沥青的流变性能。采用的试验方案见表 2。

表 2 试验方案

试验编号	基质沥青/%	SBR/%	RET/%	SBS/%
试验 1(E1)	100			
试验 2(E2)	100	3		
试验 3(E3)	100		1.0	
试验 4(E4)	100		1.5	
试验 5(E5)	100	3	1.0	
试验 6(E6)	100	3	1.5	
试验 7(E7)	100			4

2.3 改性沥青制备方法

SBR 改性沥青的制备方法:首先将 500 g70[#] 基质沥青放置于烘箱中,使其加热至 160℃,然后将 3% (占沥青质量分数)的 SBR 改性剂加入基质沥青中,并借助螺旋桨叶轮搅拌器连续搅拌 30 min,以使 SBR 改性剂充分溶胀,然后保持温度不变,采用高速剪切乳化机在 4 000 r/min 转速下持续剪切 40 min,剪切完成后,将其在 160℃烘箱中发育 1 h,即可得到 SBR 改性沥青。RET 改性沥青的制备方法和 SBR 改性沥青的制备方法相同。

SBS 改性沥青的制备方法:首先将 500 g70[#] 基质沥青加热至 180℃,然后添加 5%的 SBS 改性剂,并借助螺旋桨叶轮搅拌器搅拌 30 min 使其充分溶胀,然后采用高速剪切乳化机在转速 4 000 r/min 和剪切温度 180℃条件下剪切 1 h,剪切完成后将其放置于 160℃烘箱中发育 1 h,即可得到 SBS 改性沥青。

SBR 和 RET 复配改性沥青的制备方法:在 3% SBR 改性沥青制备完成的基础上,添加设计用量的 RET,并首先搅拌溶胀 30 min,然后在 160℃、剪切速率 4 000 r/min 条件下剪切 30 min,剪切完成后,在 160℃烘箱中发育 1 h,完成 SBR 和 RET 复配改性沥青的制备。

2.4 性能测试方法

常规性能指标针入度、软化点、5℃延度、60℃动力黏度和 135℃旋转黏度均依据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中的相关方法测试。

流变学性能测试采用动态剪切流变仪(DSR),测试时采用 25 mm 平行板转轴,板间隙调整为 1 mm。试验首先采用温度扫描模式,以 6℃温度为间隔测试各改性沥青在 52~88℃的复数剪切模量 G^* 和相位角 δ ;其次采用重复蠕变恢复模式测试各改性沥青在 60℃时,应力水平为 0.1、3.2 kPa 下的黏弹特性和高

温性能,重复蠕变恢复模式的加卸载特点为首先加载 1 s,然后卸载 9 s,共计进行 100 次循环。

采用弯曲梁流变试验(BBR)对各试样的低温流变性能进行测定,试验测定了各改性沥青在-12、-18 和-24 ℃下的低温流变性能,采用蠕变劲度模量 S 和蠕变速率 m 作为各改性沥青低温流变性能的评价指标,Superpave 规范中规定蠕变劲度模量 S 的取值为

$S \leq 300 \text{ MPa}$,蠕变速率 m 的取值为 $m \geq 0.3$ 。

3 试验结果

3.1 各改性沥青的基本性能指标分析

各改性沥青的 25 ℃针入度、软化点、5 ℃延度、48 h 热存储温度差和 135 ℃运动黏度指标如表 3 所示。

表 3 各改性沥青的常规性能指标测试结果

沥青种类	25 ℃针入度/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	5 ℃延度/ cm	48 h 存储 稳定性/℃	135 ℃运动 黏度/(Pa·s)
100%MA(E1)	73.8	46.0	1.8	0.2	0.63
100%MA+3%SBR(E2)	62.7	54.9	62.5	1.9	1.24
100%MA+1%RET(E3)	64.9	52.5	16.7	0.8	1.18
100%MA+1.5%RET(E4)	60.8	58.0	12.4	0.5	1.53
100%MA+3%SBR+1%RET(E5)	56.6	67.8	51.9	1.6	2.15
100%MA+3%SBR+1.5%RET(E6)	51.0	73.6	45.1	1.0	2.37
100%MA+4%SBS(E7)	57.4	74.7	36.8	3.7	2.06

由表 3 可知:① 各改性沥青的高低温性能较基质沥青明显较高,且 SBR 和 RET 复配改性沥青性能突出,其中,3% SBR+1.5% RET 复配改性沥青的高温性能与 4% SBS 改性沥青相当,而低温性能显著高于 4% SBS 改性沥青,且 SBR 和 RET 复配改性沥青具有优异的热存储稳定性能;② RET 改性剂的加入可显著提高基质沥青的高温性能,且随其掺量的提高,高温性能逐渐增强,同时 RET 改性剂的加入提高了沥青的低温性能,但 RET 改性剂掺量的提高不利于沥青低温性能的发挥。并且,RET 改性沥青具有优异的热存储稳定性,这可能是因为反应型 RET 改性剂与沥青发生了化学反应,即对沥青进行了永久改性;③ SBR 改性剂可赋予基质沥青优异的低温性能,3% SBR 改性沥青的 5 ℃延度可达到 62.5 cm,为基质沥青的 34.7 倍。综上,SBR 和 RET 改性剂复配可发挥各自性能优势而赋予基质沥青优异的高低温性能,这也同时从试验角度证实了 SBR 和 RET 改性剂进行复配而制备改性沥青的可行性。

3.2 SBR 和 RET 复配改性沥青的高温流变性能

3.2.1 温度扫描试验

试验借助于动态剪切流变仪中的温度扫描和不可恢复蠕变(MSCR)模块,分别测试了各改性沥青在经历短期老化前后的复数剪切模量 G^* 、相位角 δ 、不可恢复蠕变柔量和蠕变恢复率指标,以分析 SBR 和

RET 复配改性沥青的高温流变性能。各原样沥青的复数剪切模量 G^* 、相位角 δ 、车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 结果如图 1 所示。

由图 1 可知:随扫描温度的提高,基质沥青及各改性沥青的复数剪切模量 G^* 首先迅速减小而后缓慢减小,相位角 δ 缓慢上升,车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 首先迅速减小而后缓慢减小,这与目前针对沥青高温流变性能的研究结果相一致。此种现象表明沥青在较低温时具有较高的抗车辙性能,随温度的升高,具有黏弹性质质的沥青中弹性成分逐渐减少,黏性成分逐渐增多,从而导致沥青抗车辙性能的衰减;② 改性剂的加入明显改善沥青在整个温度区间的弹性恢复能力及抗车辙性能,其中 3% SBR+1.5% RET 改性沥青的弹性性能和抵抗车辙能力优于 4% SBS 改性沥青,且复配型的改性沥青高温性能高于单一改性剂改性沥青,7 种改性沥青在整个温度区间的弹性性能和抗车辙性能按从大到小排序为:3% SBR+1.5% RET>4% SBS>3% SBR+1% RET>1.5% RET>3% SBR>1% RET>MA。

中、高温范围内的沥青温度敏感性与其抗变形能力密切相关。相关研究表明:可采用对存储模量 G' 的对数值 $\lg G'$ 与扫描温度 T 进行线性回归而得到回归直线斜率 $K(\lg G'=KT+C, C$ 为常数),并采用 K 对沥青温度敏感性进行评价的方法, K 的绝对值越小,

表明沥青试样的温度敏感性越低,即热稳定性越好。各沥青试样的 K 值计算结果如表 4 所示。

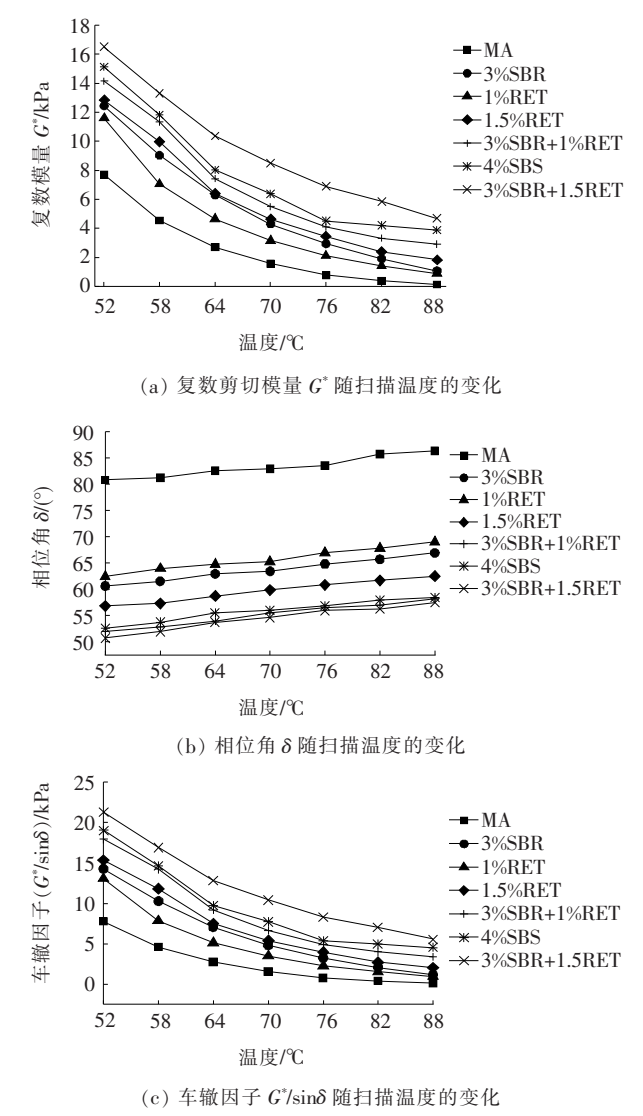


图 1 原样沥青的复数剪切模量 G^* 、相位角 δ 和车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 随扫描温度的变化

表 4 各沥青试样的回归直线斜率 K 和相关系数 R^2					
沥青类型	K	R^2	沥青类型	K	R^2
E1	-0.057	0.977	E5	-0.022	0.980
E2	-0.032	0.992	E6	-0.017	0.996
E3	-0.033	0.998	E7	-0.019	0.953
E4	-0.026	0.996			

由表 4 可看出:① 各改性沥青对温度的敏感程度明显低于基质沥青,其中 3% SBR 和 1.5% RET 复配改性沥青的热稳定性高于 4% SBS,从而具有最优的热稳定性;② 增加 RET 掺量可有效提升改性沥青的热

稳定性,且 SBR 和 RET 复配改性效果明显优于单一改性。因此,在日夜温差变化大、天气剧烈变化的区域, SBR/RET 复配改性沥青能够更好地抵抗变形、预防温差引起的路面疲劳开裂现象。

3.2.2 多应力蠕变恢复试验

由于 60 °C 是中国大多数地区夏季沥青路面出现的高温值,此次试验采用动态剪切流变试验中的蠕变恢复模块(MSCR)在 64 °C 的试验条件下对各原样沥青的蠕变恢复率 R 和不可恢复蠕变柔量 J 进行测定,以评定各沥青的延迟黏弹特性和高温抗永久变形能力。各原样沥青在剪切应力水平为 0.1 kPa 和 3.2 kPa 条件下的蠕变恢复率 $R_{0.1}$ 和 $R_{3.2}$ 以及不可恢复蠕变柔量 $J_{0.1}$ 和 $J_{3.2}$ 结果如图 2 所示。

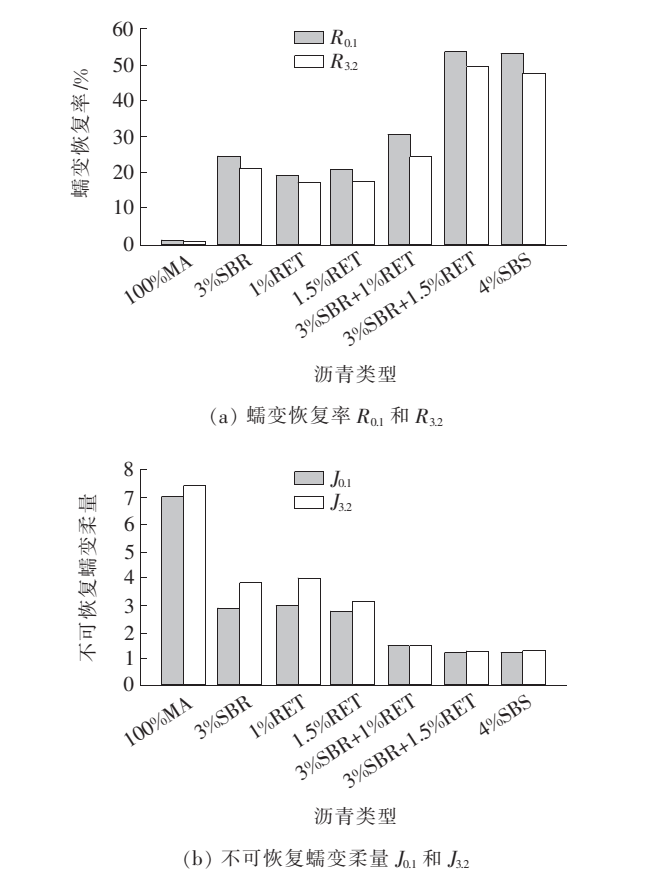


图 2 各改性沥青的蠕变恢复率 R 和不可恢复蠕变柔量 J

由图 2 可知:3% SBR+1.5% RET 改性沥青的蠕变恢复率 $R_{0.1}$ 和 $R_{3.2}$ 分别与 4% SBS 的两者指标相当且略高于 4% SBS 的两种指标,说明 3% SBR+1.5% RET 改性沥青在 60 °C 具有优异的蠕变恢复性能。同时,随 RET 改性剂掺量的增大,RET 单一改性沥青及其与 SBR 复配改性沥青的 $J_{0.1}$ 和 $J_{3.2}$ 值均呈现逐渐减小的趋势,其中 3% SBR 和 1.5% RET 复配

改性沥青的 $J_{0.1}$ 和 $J_{3.2}$ 值均最小,且与 4% SBS 相当,说明 RET 和 SBR 的加入显著增加了沥青中的弹性成分,使得复合改性沥青在荷载作用下产生的残余永久塑性变形减小,赋予了基质沥青良好的承受交通荷载的能力。SBS 改性剂对于沥青高温下抗永久变形能力的改善主要是依靠其优异的弹性变形恢复能力,而 SBR 和 RET 复配改性沥青提升基质沥青高温性能的机理主要是 SBR 和 RET 增大沥青的黏度,以及 RET 属于反应型改性剂,其与沥青发生反应生成的环状结

构物有效束缚了 SBR 改性剂,促使沥青在高温时的弹性成分有效增加,因此提高了沥青的高温流变性能。

3.3 SBR 和 RET 复配改性沥青的低温流变性能

依据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中对沥青进行长期老化作用的试验方法(T0630—2011)首先对沥青进行长期老化,然后借助于弯曲梁流变仪对经历长期老化后各改性沥青在-12、-18 和-24 ℃下的低温流变性能进行测试,测试结果如表 5 所示。

表 5 各改性沥青在不同温度下的蠕变劲度模量 S 和蠕变速率 m

沥青种类	S/MPa			m 值		
	-12 ℃	-18 ℃	-24 ℃	-12 ℃	-18 ℃	-24 ℃
100%MA(E1)	435.4	536.9	648.9	0.134	0.109	0.018
100%MA+3%SBR(E2)	46.8	197.2	337.4	0.557	0.426	0.284
100%MA+1%RET(E3)	315.6	388.1	497.0	0.257	0.199	0.152
100%MA+1.5%RET(E4)	372.7	429.8	556.5	0.206	0.173	0.101
100%MA+3%SBR+1%RET(E5)	98.1	229.7	357.4	0.511	0.335	0.271
100%MA+3%SBR+1.5%RET(E6)	123.8	273.5	403.5	0.449	0.367	0.243
100%MA+4%SBR(E7)	106.7	226.8	364.9	0.493	0.340	0.267

由表 5 可知:① 在-12~-24 ℃内,与基质沥青 MA 相比,各改性沥青的蠕变劲度 S 明显较小且蠕变恢复率 m 值明显较大,其中 3% SBR 改性沥青的低温性能最优,说明对沥青进行 SBR、RET、SBS 及 SBR 和 RET 复配改性可有效提高沥青的低温流变性能;② 与 RET 单一改性沥青相比,SBR 和 RET 复配改性沥青的低温性能明显较好,较 1% RET 改性沥青、3% SBR 和 1.5% RET 复配改性沥青在-12 ℃时的 S 值减小 68.9%、m 值增大 98.8%;③ 3% SBR 和 1% RET 复配改性沥青的低温性能优于 4% SBS 改性沥青,但是随 RET 掺量的提高,无论是 RET 单一改性沥青,还是 SBR 和 RET 复配改性沥青的低温性能均下降,这反映出 RET 改性剂掺量的提高削弱了沥青低温时的应力分散能力,从而不利于改性沥青低温性能的发挥。

与中高温时沥青温度敏感性评价方法一样,采用劲度模量 S 的对数值 lgS 与温度 T 线性回归后的直线斜率 A 评价沥青在低温下的温度敏感性($\lg S=AT+C$,C 为常数)。A 值越小,表明沥青抵抗低温缩裂的能力越强。各沥青试样在低温时的直线斜率 A 值如表 6 所示。

表 6 各沥青试样在低温时的回归直线斜率 A 值

沥青类型	A	R^2	沥青类型	A	R^2
E1	-0.074	0.998	E5	-0.022	0.947
E2	-0.036	0.870	E6	-0.017	0.919
E3	-0.046	0.995	E7	-0.028	0.960
E4	-0.043	0.946			

由表 6 可知:6 种改性沥青的 A 值绝对值较 70# 基质沥青明显较小,这说明改性剂的加入使得沥青对低温的敏感性显著提高。此外可得出 SBR 和 RET 改性剂的复配较单一改性具有较好的低温稳定性,且随 RET 改性剂掺量的增加,改性沥青的低温稳定性逐渐增强,3% SBR 和 1.5% RET 复配改性沥青具有最优的低温稳定性能。

4 结 论

(1) SBR 和 RET 改性剂分别具有显著提升基质沥青低温和高温性能的能力,二者复配后的改性效果显著,其中,3% SBR 和 1.5% RET 复配改性沥青的高温性能可达到 4% SBS 改性沥青的水平,且低温性能

显著高于4%SBS改性沥青。此外,RET掺量的增大可显著改善沥青的热存储稳定性能,且SBR和RET复配改性沥青具有优异的热存储稳定性能,这有效地保证了复配改性沥青的运输和热存储。

(2)与单一改性沥青相比,SBR和RET改性剂复配有效增加了沥青在整个高温区间段内的弹性成分,从而增强了沥青的高温抗车辙能力,其中3%SBR和1.5%RET复配改性沥青的弹性性能和抗车辙能力优于4%SBS改性沥青,且其具有最优的中高温区间的热稳定性能。

(3)与RET单一改性沥青相比,SBR和RET复配改性沥青具有良好的低温性能,其中3%SBR和1%RET复配改性沥青的低温性能优于4%SBS改性沥青,但随RET掺量的提高,RET单一改性沥青和SBR与RET复配改性沥青的低温性能均下降,这说明RET改性剂的掺加对沥青的低温性能将造成不利影响。但是,随RET改性剂掺量的增加,改性沥青在低温区间的热稳定性能将逐渐增强,其中3%SBR和1.5%RET复配沥青对低温的敏感性最低。

参考文献:

[1] 张争奇,杨建华,李卫勇,等.基于圆柱形试件的沥青混合料车辙试验研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2018(10).

[2] 周育名,魏建国,时松,等.多聚磷酸及橡胶粉复合改性沥青性能[J].长安大学学报(自然科学版),2018(5).

[3] 崔新壮,黄丹,刘磊,等.沥青路面病害力学研究进展[J].山东大学学报(工学版),2016(5).

[4] Robinson W J, Doyle J D. Tensile Performance Evaluation of Joint Adhesive for Asphalt Pavements[J]. Construction and Building Materials, 2019, 218: 245—253.

[5] Zhou J, Chen X H, Xu G, et al. Evaluation of Low Temperature Performance for SBS/CR Compound Modified Asphalt Binders Based on Fractional Viscoelastic Model[J]. Construction and Building Materials, 2019, 214: 326—336.

[6] Keyf S. The Modification of Bitumen with Reactive Ethylene Terpolymer, Styrene Butadiene Styrene and Variable Amounts of Ethylene Vinyl Acetate[J]. Research on Chemical Intermediates, 2015, 41(3):1 485—1 497.

[7] Singh D, Ashish P K, Chander S, et al. Effect of Warm—Mix Additives and Lime on Intermediate—Temperature Fracture Property of RET— and PPA—Modified Asphalt Binder[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(7).

[8] 杨国明,李昊,陈松,等.丁苯橡胶含量对改性沥青高低温性能影响的研究[J].化工新型材料,2019(6).

[9] Emami A, Khlehghian S. Investigation of Tribological Behavior of Styrene—Butadiene Rubber Compound on Asphalt—Like Surfaces [J]. Tribology International, 2019, 136: 487—495.

[10] 陈治君,郝培文. RET复配SBR改性沥青流变特性及机理分析[J].北京工业大学学报,2016(11).

[11] 石剑欣.反应型RET复合聚合物改性沥青及其混合料性能研究[J].中外公路,2017(4).

[12] 郝培文,常睿,刘红瑛,等.反应性弹性体三元共聚物改性沥青及其混合料性能与机制[J].复合材料学报,2018(7).

[13] 李映,王大伟,王丹.反应型三元共聚物改性沥青的技术研究[J].石油沥青,2014(5).

[14] 颜可珍,陈明,胡玥.废胶粉/APAO复合改性沥青性能[J].长安大学学报(自然科学版),2018(2).

[15] 常睿,郝培文. RET复配胶粉改性沥青流变特性与改性机理研究[J].材料导报,2016(24).

[16] Xu C, Zhang Z Q, Zhao F Q, et al. Improving the Performance of RET Modified Asphalt with the Addition of Polyurethane Prepolymer (PUP) [J]. Construction and Building Materials, 2019, 206: 560—575.

[17] 田迎春,韩森. RET复配胶粉改性沥青混合料路用性能与耐久性研究[J].公路工程,2019(1).

[18] 郭诗惠,刘炳.纳米材料复配对SBS改性沥青流变及抗老化性能的影响[J].中外公路,2019(3).

[19] 邱延峻,罗浩原,欧阳铨霏,等.不同温拌剂对于沥青性能改性效果的流变分析[J].中外公路,2020(2).