

SBS 改性生物沥青结合料高温流变特性

高俊锋¹,汪海年¹,尤占平^{1,2},雷 勇¹

(1. 长安大学道路结构与材料交通行业重点实验室,陕西 西安 710064;

2. 密歇根理工大学土木工程与环境学院,美国 霍顿 49931)

摘 要 目的 分析以木屑为原材料获取的生物质重油与基质沥青混溶制备的改性生物沥青的高温流变特性,寻求可替代石油沥青的再生材料. 方法 采用布氏黏度仪(RV)和动态剪切流变仪(DSR),探究不同生物质重油掺量、不同温度下,SBS 改性生物沥青的黏度、车辙因子、相位角和复数模量的变化情况,分析 SBS 改性生物沥青 S110 的拌和与压实温度的确定问题. 通过重复蠕变恢复试验(RCRT),研究应力水平、作用次数对蠕变劲度的黏性成分和累积应变的影响. 结果 生物质重油掺量不大于 10% 时,随着生物质重油掺量的增加,生物沥青的高温性能有所降低;掺量大于 10% 时,老化作用使得其高温性能增加. 生物质重油的加入使得改性生物沥青的黏度有一定程度的下降,且在生物质重油掺量不大于 10% 时,其黏度较基质沥青的黏度有所提高,对其黏附性有一定的改善作用. 应力水平对生物沥青的黏性性能影响较小,但对其累积应变的影响显著. 结论 通过试验得到了改性生物沥青结合料高温流变特性的变化规律,为进一步研究与工程实践提供了数据支持.

关键词 改性沥青;生物质重油;结合料;流变特性;室内试验

中图分类号 TU535;U414

文献标志码 A

High Temperature Rheological Properties on SBS Modified Bio-binder

GAO Junfeng¹, WANG Hainian¹, YOU Zhanping^{1,2}, LEI Yong¹

(1. Road Structure and Materials Key Laboratory for Transportation, Chang'an University, Xi'an, China, 710064;

2. Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan Technological University, Houghton, USA, 49931)

Abstract: To analyze the high temperature rheological properties of modified bio-asphalt prepared by mixing matrix asphalt and bio-oil extracted from sawdust, and to seek alternative materials for petroleum asphalt. The variations of viscosity, rutting factor, phase angle and complex modulus under different contents of bio-oil and different temperatures were tested by rotational viscometer (RV) and dynamic shear rheometer (DSR). The ascertaining of mixing and compaction tempera-

收稿日期:2017-09-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51578075);交通运输部应用基础研究项目(2014319812180)

作者简介:高俊锋(1988—),男,博士研究生,主要从事沥青路面材料与结构性能研究.

ture were analyzed. The effect of stress level and action times on the viscous component of creep stiffness and the cumulative strain was studied through repeated creep recovery test (RCRT). The results showed that, when the content of bio-oil is less than 10%, the high temperature performance of bio-binder decreases with the increase of bio-oil content. When the dosage is more than 10%, the aging effect increases. The addition of bio-oil could make the viscosity of modified bio-asphalt have a certain degree of decline, and the viscosity of the bio-binder is higher than base asphalt. The effect of stress level on the viscous properties of bio-asphalt is small, but its effect on the cumulative strain is significant. The change laws of the rheological properties of modified bio-asphalt were obtained through the experiments, which provides the data support for further research and engineering practice.

Key words: modified asphalt; bio-oil; binder; rheological properties; indoor test

随着我国沥青路面建设的不断发展和沥青路面维修养护的大幅增加,沥青材料的消耗持续上升,而石油资源的逐年减少也制约了沥青材料的生产.同时,生物质能源可再生、分布广且储量大^[1],将生物质能源经过加工提炼,最终可以获得生物质重油^[2-5].将生物质重油加入到石油沥青中进行混溶,或者向生物质重油中加入一定的外掺剂,从而制备成改性生物沥青,以达到能够改性或者替代石油沥青的目的,成为了目前道路领域研究的聚焦点. Fini等^[6-9]研究了由猪粪提炼出的生物质重油与石油沥青混溶之后生物沥青的性能. Mills – Beale等^[10]对由猪粪提炼出的生物质重油与石油沥青混溶制备而成的生物沥青的短期老化前后性能进行了研究. Onochie等^[11]在猪粪便生物改性沥青中掺入纳米黏土和纳米二氧化硅制备成复合改性沥青,并进行了高温黏度与动态剪切频率扫描实验. Raouf等^[12]分析了温度对由橡木木屑最终制得的生物沥青的黏度的影响. Yang等^[13]测试了由柳杉木屑提炼制备的生物沥青的高温黏度与流变特性. 汪海年、高俊锋等^[14-16]采用 DSR 和 RV 对生物沥

青的复数剪切模量、相位角、车辙因子和黏度等进行了研究;利用针入度、软化点、延度等基本性能试验优选了生物沥青结合料,并通过车辙试验、冻融劈裂试验、小梁弯曲试验和低温黏结性能试验考察了生物质重油变化对生物沥青混合料路用性能的影响. 何敏等^[17]采用软化点、针入度和延度等试验,研究了改性生物沥青的常规性能. 然而,国内对改性生物沥青的高温流变研究较少. 基于此,笔者研究了 SBS 改性生物沥青的制备与高温流变特性,分析了不同条件(生物质重油掺量、温度)下 SBS 改性生物沥青的试验结果,得到了 SBS 改性生物沥青高温性能随生物质重油掺量和温度变化的变化规律以及应力水平、作用次数等对生物沥青重复蠕变性能的影响状况,为改性生物沥青的进一步研究提供了基础.

1 试验概况

1.1 材料

1.1.1 基质沥青

基质沥青为茂名 50 号沥青,技术性能见表 1.

表 1 50 号沥青技术指标与技术要求

Table 1 Technical indicators and requirements of base asphalt 50 penetration grade

项目	针入度(25℃)/ 0.1 mm	软化点/℃	延度(10℃)/cm	RTFOT 试验(163℃,85 min)		
				质量变化/ %	残留针入度比 (25℃)/%	延度(10℃)/ cm
50#基质沥青	53	49.5	19.5	-0.286	68.4	6.3
技术要求	40~60	≥49	≥15	≤±0.8	≥63	≥4

1.1.2 生物质重油

研究所用生物质重油的原料为木屑,常温下呈黑褐色膏状,颜色和形态与石油沥青基本一致,其理化特性和元素组成见表2.

表2 木屑产生的生物质重油理化特性和元素组成

Table 2 Physicochemical properties and elemental compositions of bio-oil from sawdust					
元素质量分数/%				密度/ (g·cm ⁻³)	pH
w(C)	w(H)	w(O)	w(N)		
54~56	5.5~7.2	35~45	0~0.2	1.1	2.6

1.1.3 SBS(聚苯乙烯-丁二烯-苯乙烯)

研究所采用的 SBS 为湖南岳化 1301-1 线型.

1.2 改性生物沥青的制备

生物质重油与石油沥青能够很好地相容^[14]. 因此研究采用低速搅拌与高速剪切相结合的方法制备 SBS 改性生物沥青,装置如图1所示.



图1 SBS 改性生物沥青的制备

Fig.1 The preparation of SBS modified bio-asphalt

具体制备方法如下:首先将基质沥青加热至 180 ℃;向其中加入 1% 的 SBS,在该温度下以 500 r/min 的搅拌速率搅拌5 min;然后用高速剪切乳化机剪切 10 min,使 SBS 予以溶胀;以内掺法分别加入 5%、10%、15% 和 20% 的生物质重油,保持温度为 140~145 ℃,剪切 20 min,剪切速率均为 3 000 r/min,制备而成生物沥青,并分别命名为

S105、S110、S115 和 S120;同时,向基质沥青中加入 1% 的 SBS,制备成沥青,命名为 S100. 制备而成的 SBS 改性生物沥青的基本技术指标见表3.

表3 SBS 改性生物沥青的技术指标

Table 3 Indices of SBS modified bio-binder			
沥青试样	针入度(25 ℃)/ 0.1 mm	软化点/ ℃	延度(10 ℃)/ cm
50#	53.0	49.5	19.5
S100	50.0	51.0	20.6
S105	51.1	49.6	23.3
S110	55.4	49.5	24.0
S115	57.8	49.4	24.4
S120	60.5	48.3	25.1

1.3 试验方案

1.3.1 常规剪切流变试验

采用动态剪切流变仪(DSR)对制备而成的 SBS 改性生物沥青和基质沥青进行常规动态剪切流变试验^[18](见图2),分别测得其复数模量 G^* 、相位角 δ 和车辙因子 $G^*/\sin\delta$. 试验温度为 52~82 ℃,每 6 ℃ 为一个温度间隔.



图2 动态剪切流变仪

Fig.2 Dynamic shear rheometer (DSR)

1.3.2 布氏旋转黏度试验

采用布氏黏度仪(RV)来测定改性生物沥青的旋转黏度(见图3). 其中,试验转子为 27 号,转速分别为 10 r/min、20 r/min 和 50 r/min,试验温度分别为 90 ℃、135 ℃ 和 175 ℃.

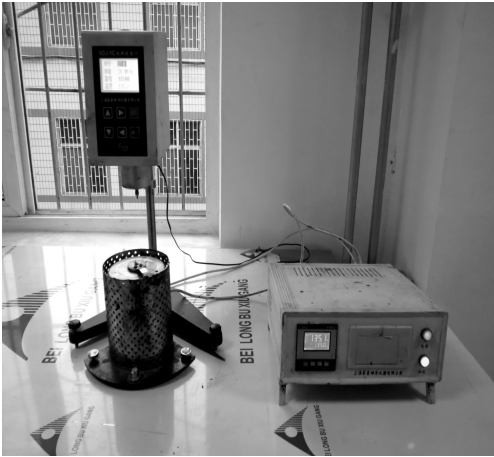


图 3 布氏旋转黏度计

Fig. 3 Brookfield rotational viscometer (RV)

1.3.3 重复蠕变恢复试验

结合已有研究,采用动态剪切流变仪(DSR)对 SBS 改性沥青 S110、基质沥青 50# 和 S100 沥青进行重复蠕变恢复试验(RCRT).

该试验以加载 1s、卸载 9s 作为一个循环,对沥青进行 100 次这样的重复循环,然后用 Burgers 流变模型对第 50 次和 51 次所得试验结果进行拟合,根据拟合参数计算得到蠕变柔量的黏性成分 J_v ,选取蠕变劲度的黏性成分 $G_v = 1/J_v$ 作为评价沥青结合料高温的指标,其值越大,沥青的抗车辙能力越好^[19].

结合我国大部分区域夏季路面温度达 50 ~ 70 ℃ 的实际状况,研究采用应力控制模式,选取应力水平为 50 Pa 和 100 Pa,试验温度取为 60 ℃. 研究采用 Burgers 四元件模型作为试验材料流变模型,对其进行公式变换,得到蠕变柔量 $J(t)$ 的计算方程:

$$J(t) = \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} (1 - e^{-G_2 t / \eta_2}) + \frac{t}{\eta_1} = J_e(t) + J_{de}(t) + J_v(t). \tag{1}$$

蠕变柔量 $J(t)$ 主要由三部分组成:弹性部分 $J_e(t)$ 、延迟弹性部分 $J_{de}(t)$ 和黏性部分 $J_v(t)$. 将 $G_v = 1/J_v$ 作为蠕变劲度的黏性成

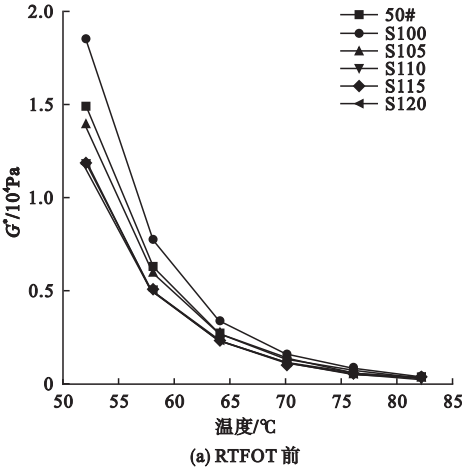
分,将变换后的方程予以拟合得到各参数和 $J_v(t)$,从而计算蠕变劲度的黏性成分 G_v ,以此来评价沥青高温特性的指标.

2 结果与讨论

2.1 基于 DSR 的常规剪切流变特性

2.1.1 复数模量 G^*

不同条件下 SBS 改性生物沥青复数模量的变化如图 4 所示. 可以得出:①RTFOT 前后,50#、S100、S105、S110、S115、S120 的复数模量均随着温度的增加而逐渐降低,且在 64 ℃ 以后下降逐渐变缓,表明随着温度的增加,其抵抗车辙能力逐渐降低,在 64 ℃ 以后降低逐渐变缓. ②RTFOT 前,同一温度下,S100 的复数模量最大,其次是 50# 和 S105,而 S110、S115 和 S120 的复数模量大体相当;表明 SBS 的加入,增加了 50# 沥青抵抗车辙变形的能力,而在此基础上掺入 5% 的生物质重油,其抗车辙能力有所降低;且生物质重油掺量增加至 10%,其抗车辙能力进一步下降;但掺量增加到 20%,复数模量基本保持不变,表明在掺量为 10% 以后,掺量对复数模量的影响较小. ③RTFOT 后,同一温度下,S120 的复数模量最大,其次是 S110 和 S115,接着为 S105、S100、50#;这表明 RTFOT 后,掺量为 20% 的生物沥青变得相对较硬,这是由生物沥青的老化所造成.



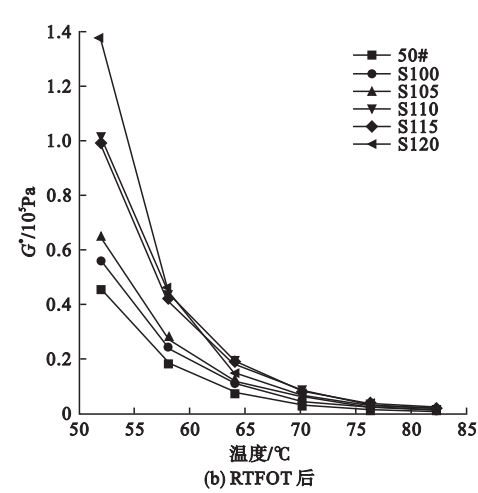


图4 不同试验温度下 SBS 改性生物沥青复数模量的变化

Fig. 4 The variation of complex modulus on SBS modified bio-binder under different temperatures

2.1.2 相位角 δ

不同条件下 SBS 改性生物沥青相位角的变化如图 5 所示。由图 5(a) 可以得出:① S110、S115 的相位角随着温度的增加而逐渐增加,表明其黏性成分随着温度的增加而逐渐增多;而 50#、S100、S105、S120 的相位角

则在 64 ℃ 时达到最大,表明其黏性成分在 64 ℃ 时达到最大。② 与其他掺量的沥青相比,在同样的温度下,S100 的相位角最小,表明 SBS 的加入,增加了沥青的弹性成分。由图 5(b) 可以得出:①RTFOT 后,随着温度的增加,50#、S100、S105、S110、S115 和 S120 的相位角呈增加趋势,表明随着温度的增加,沥青的黏性成分逐渐增加;②同一温度下,各沥青的相位角排序为 $\delta(50\#) > \delta(S100) = \delta(S105) > \delta(S110) = \delta(S115) > \delta(S120)$;表明在 RTFOT 后,50#沥青仍具有较大的黏性成分,而掺入 5% 生物质重油的生物沥青与仅掺入 1% SBS 的沥青的相位角的变化较为一致;生物质重油掺量为 10% 和 15% 的生物沥青的相位角较为一致;随着生物质重油掺量的增加,老化后相位角变化程度增大,这与质量变化呈现规律一致。③生物质重油掺量为 20% 的生物沥青,其相位角最小,表明其黏性成分最少,这是因为掺入较大掺量生物质重油的生物沥青,经过 RTFOT 后,发生了较大幅度的老化。

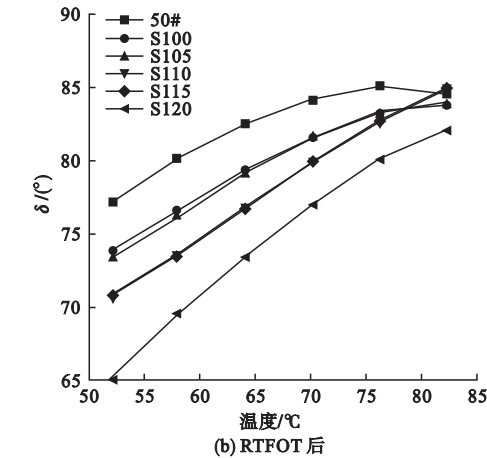
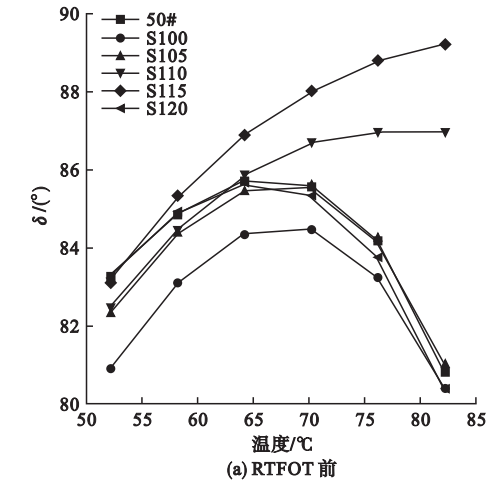


图5 不同试验温度下 SBS 改性生物沥青相位角的变化

Fig. 5 The variation of phase angle on SBS modified bio-binder under different temperatures

2.1.3 车辙因子 $G^*/\sin\delta$

不同条件下 SBS 改性生物沥青车辙因子的变化如图 6 所示。由图可以得出:①RTFOT 前后,50#、S100、S105、S110、S115、S120 的车辙因子均随着温度的增加而逐渐降低,

且在 64 ℃ 以后下降逐渐变缓,表明随着温度的增加,其抵抗车辙能力逐渐降低,在 64 ℃ 以后降低逐渐变缓。②RTFOT 前,同一温度下,S100 的车辙因子最大,其次是 50# 和 S105,而 S110、S115 和 S120 的车辙因子大

体相当;表明 SBS 的加入,增加了 50#沥青抵抗车辙变形的能力,5% 和 10% 生物质重油的加入,降低了其抗车辙性能;但掺量增加到 20%,车辙因子基本保持不变,表明在掺量为 10% 以后,掺量对车辙因子的影响较小. ③ RTFOT 后,同一温度下,各沥青车辙因子的

大小顺序依次为 $G^*/\sin\delta$ (S120) > $G^*/\sin\delta$ (S115) $\approx G^*/\sin\delta$ (S110) > $G^*/\sin\delta$ (S105) > $G^*/\sin\delta$ (50#), 表明 RTFOT 后,随着生物质重油的增加,生物沥青的抗车辙能力逐渐增加,而 S120 和 S115 变得更为脆硬,这是由其老化程度较大所造成.

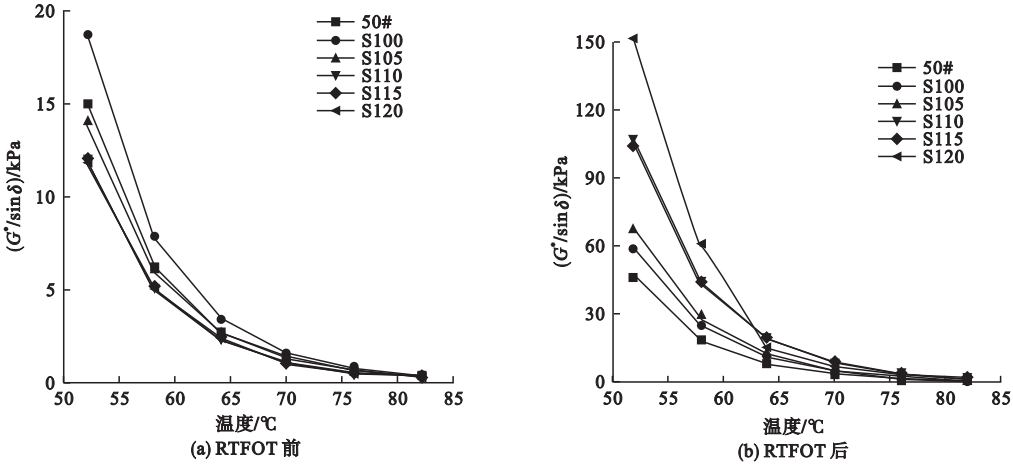


图 6 不同试验温度下 SBS 改性生物沥青车辙因子的变化

Fig. 6 The variation of rutting factor on SBS modified bio-binder under different temperatures

为了进一步分析试验温度对 SBS 改性生物沥青 S110 车辙因子的影响,对其进行单因素方差分析,结果见表 4. 由表可知,短期老化前后 SBS 改性生物沥青的显著性水平

均低于 0.05,表明试验温度能够显著影响生物沥青 S110 的高温车辙因子. 老化后 F 值大于老化前,因此试验温度对老化后 SBS 改性生物沥青的车辙因子的影响较对老化前的大.

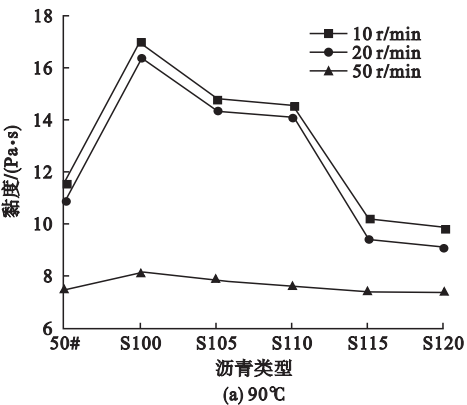
表 4 试验温度对 SBS 改性生物沥青车辙因子的单因素方差分析

项目	短期老化前 ANOVA					短期老化后 ANOVA				
	平方和	df	均方	F	Sig.	平方和	df	均方	F	Sig.
组间	307.029	5	61.406	49 115.938	0.002	24 829.376	5	4 965.875	114 574.941	0.000
组内	0.015	12	0.001	—	—	0.520	12	0.043	—	—
总数	307.044	17	—	—	—	24 829.896	17	—	—	—

2.2 基于 RV 的黏度特性

2.2.1 试验温度、生物质重油掺量和转速对黏度的影响

黏度是反映沥青高温流变特性的重要指标,生物质重油掺量、试验温度和转速都是影响生物沥青的重要因素. 不同试验温度不同转速下 SBS 改性生物沥青布氏旋转黏度的变化曲线如图 7 所示.



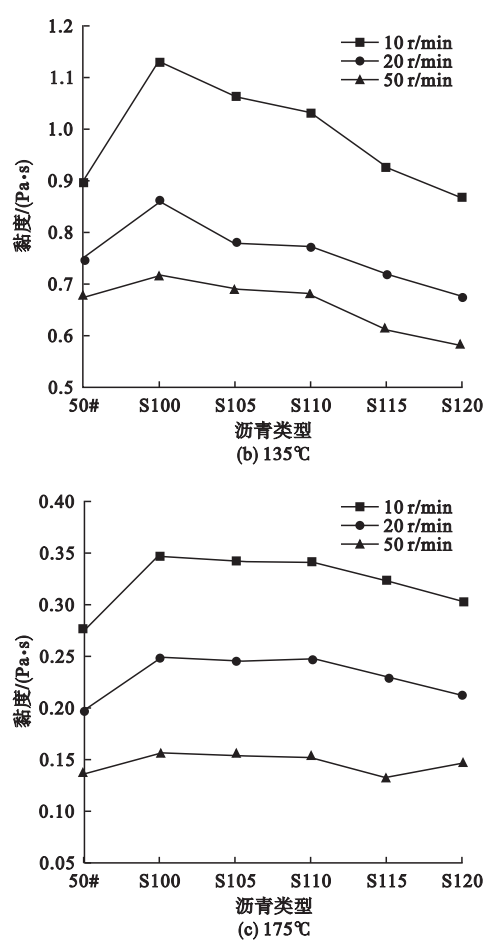


图7 不同试验温度不同转速下SBS改性生物沥青布氏旋转黏度的变化

Fig. 7 The variation of viscosity under different temperatures and different rotational speed

由图7可以看出,在不同的温度条件下,基质沥青和生物沥青的黏度都随着转速(或剪切速率)的增加不断下降,说明在所测温度范围内,基质沥青和生物沥青都表现出非牛顿流体的特性,呈现出伪塑性,即剪切变稀特性。

由图7(a)可以看出,在温度为90℃时,同一转速条件下,各沥青黏度从大到小依次为S100、S105、S110、50#、S115、S120。表明SBS的加入,增加了基质沥青的黏度;且随着生物质重油的增加,SBS改性生物沥青的黏度呈现出下降趋势。当转速为50 r/min时,不同沥青类型,转速的变化相对较小,这是由

转速增大,沥青产生剪切变稀所引起。

由图7(b)、(c)可以看出,在温度为135℃和175℃时,同一转速条件下,各沥青黏度大小随着生物质重油掺量的变化所呈现出的规律与温度为90℃时较为相似。但在转速为10 r/min和20 r/min时,沥青的黏度变化均较温度为90℃时的幅度小。这是由于温度较高的情况下,沥青的流动性相对较好,变异性较温度为90℃时小。而对于生物质重油掺量为20%时的生物沥青S120,当转速为50 r/min时,其黏度较同等转速和温度条件下生物沥青S115有所增加,这是由温度过高,生物质重油本身成分复杂,产生一定程度的老化所引起。

此外,在温度为90℃、135℃或175℃时,同一转速条件下,当生物质重油掺量不大于10%时,SBS改性生物沥青的黏度均较基质沥青有所增加。这对于改善基质沥青的黏附性有较大贡献。

2.2.2 根据黏度确定拌和与压实温度范围

根据已有研究,绘制生物沥青S110的黏温曲线,并确定生物沥青S110的拌和与压实温度。将135℃和175℃条件下对应的表观黏度绘制于图8中。

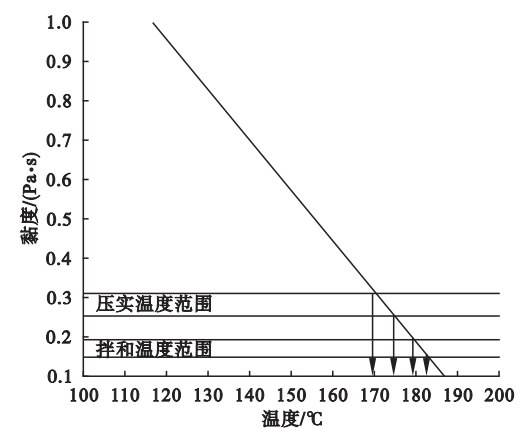


图8 由生物沥青S110的黏温曲线确定拌和与压实温度

Fig. 8 Ascertainning of mixing and compaction temperature on bio-binder S110 based on the viscosity-temperature curve

选取基质沥青黏度范围为 0.15 ~ 0.19 Pa·s 所对应的温度作为拌和温度;黏度范围为 0.25 ~ 0.31 Pa·s 所对应的温度为压实成型温度. 研究采用黏温曲线的方法确定出的拌和与压实温度区域如图 8 所示,分别为 179 ~ 183 ℃ 和 170 ℃ ~ 175 ℃. 该拌和与压实温度较 50#基质沥青高,这是由于温度过高,SBS 改性生物沥青发生了老化,其黏度增大,产生了伪现象.

2.3 重复蠕变恢复试验

2.3.1 应力对重复蠕变恢复试验的影响

为了探究应力对沥青蠕变恢复试验的影响,选取 SBS 改性沥青 S110、基质沥青 50#和 S100 沥青,且选取第一个加载周期的 1s 阶段的蠕变响应进行分析,结果如图 9 所示,不同的曲线代表不同的应力和蠕变柔量.

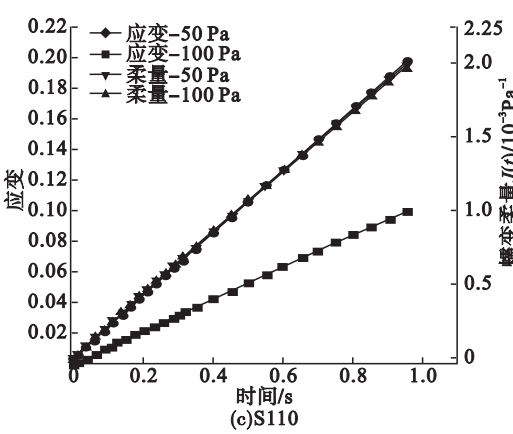
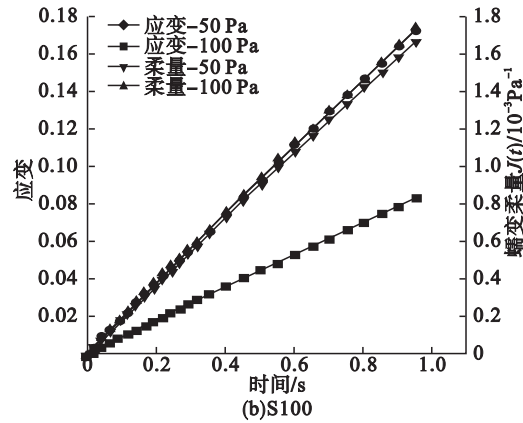
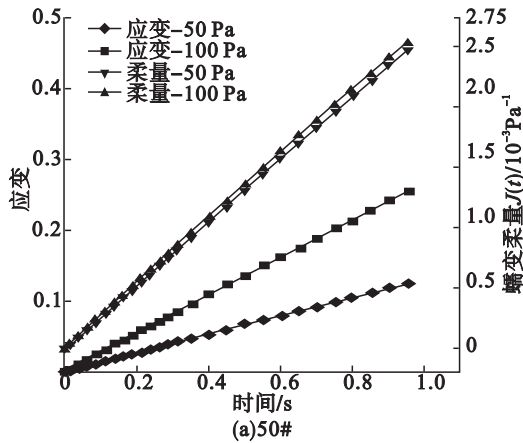


图 9 沥青在 60 ℃ 时的应变和蠕变

Fig. 9 Strain and creep compliance at 60 ℃

由图 9 可以看出:①当应力不同时,随着时间的增加,基质沥青 50#、沥青 S100 和生物沥青 S110 的应变和蠕变柔量均呈线性增加,表明沥青呈现出线性黏性流体的特性. 同时说明在 1s 的时间范围内,沥青已经进入黏性流动的状态. ②同一沥青在同一时间时,随着应力的增加,沥青的应变有所增加. ③对于同一沥青,不同应力状态下,其蠕变柔量变化很小,其曲线甚至重合,这也说明应力水平对蠕变柔量的影响基本上可以忽略,而材料呈现出线性黏弹性的必要条件就是应力与蠕变柔量无关. 因此,基质沥青 50#、沥青 S100 和生物沥青 S110 可视为线性黏弹性材料.

2.3.2 加载次数对生物沥青重复蠕变恢复试验的影响

为了分析不同加载次数和 100 次荷载周期对试验的影响,笔者对不同应力作用下第 1 次、30 次、50 次、80 次和 100 次蠕变恢复后沥青的累积应变进行统计,结果见图 10. 由图 10 可以看出:①对于同一种沥青,随着应力作用次数的增加,其累积应变随之增加,且应力增大时,累积应变也因之增加. ②掺入 SBS 后,同一次数、同一应力下,沥青 S100 的累积应变比基质沥青要小,而生物沥青 S110 的累积应变介于二者之间. 这表明 SBS 的加入,使得沥青的弹性成分增加,而生物物质重油的加入,使得 S100 的黏性成分有所增加. ③

应力大小对累积应变的影响很大,即沥青的变形与应力大小有着重要的关系. 因此,研究不同应力大小对累积应变的影响有助于选择与实际交通荷载相一致的应力水平,以更好用于实践.

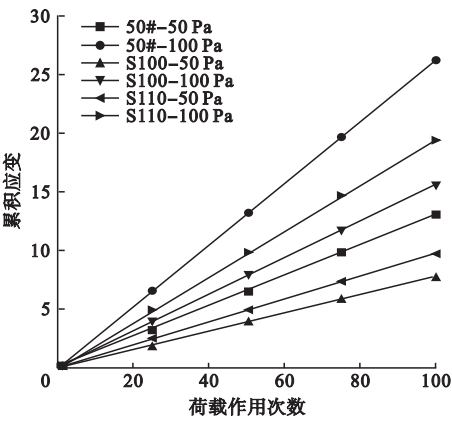


图 10 不同应力作用下累积应变与作用次数的关系

Fig. 10 Relationships between cumulative strain and action times under different stresses

2.3.3 蠕变劲度黏性成分 G_v 与累积应变

以重复蠕变恢复试验得到的沥青蠕变劲度的黏性成分 G_v 与第 100 次累积应变来评价沥青的高温性能. 各种沥青不同应力水平下蠕变劲度黏性成分 G_v 与累积应变见表 5.

表 5 各种沥青不同应力水平下的蠕变劲度的黏性成分与累积应变

Table 5 Viscous component of creep stiffness and cumulative strain of asphalt under different stress levels

沥青试样	应力/Pa	黏性成分 G_v	累积应变
50#	50	384.66	12.958
	100	381.10	26.105
S100	50	561.96	7.816
	100	556.92	15.535
S110	50	484.79	9.800
	100	481.69	19.153

由表 5 可以看出:①同一沥青在不同应力水平下,黏性成分 G_v 的值变化不大,累积应变的变化较大,表明不同的应力水平对各沥青的黏性性能的影响较小,但对累积应变

的影响显著;②在同一应力水平下,生物沥青 S110 的黏性成分 G_v 和累积应变都介于基质沥青和沥青 S100 之间. 这表明,与基质沥青相比,在较低应力水平下,生物沥青 S110 的高温抗车辙性能有所增加.

3 结 论

(1)随着生物质重油掺量的增加,原样 SBS 改性生物沥青复数模量和车辙因子呈降低趋势,相位角呈增大趋势;短期老化后的 SBS 改性生物沥青复数模量增加,相位角降低,而掺量不大于 10% 时,车辙因子有所降低. 生物质重油掺量不大于 10% 时,随着生物质重油掺量的增加,生物沥青的高温性能有所降低;掺量大于 10% 时,老化作用使得其高温性能增加.

(2)生物沥青的黏度随着转速的增加,表现出非牛顿流体的特性,呈现出剪切变稀的现象. 随着生物质重油掺量的增加,SBS 改性生物沥青的黏度呈降低趋势,且在生物质重油掺量不大于 10% 时,其黏度均较基质沥青的黏度有所提高,对其黏附性有一定的改善作用.

(3)根据黏温曲线确定出的 SBS 改性生物沥青 S110 拌和、压实温度与基质沥青相比,产生了伪现象,这是由生物沥青存在一定程度的老化引起.

(4)应力水平对生物沥青的黏性性能的影响较小,对累积应变的影响显著.

参考文献

[1] 张雪辉,陈海生,豆斌林,等. 生物油制备、性质与应用的研究进展[J]. 化工进展,2011,30(11):2404-2416.
(ZHANG Xuehui, CHEN Haisheng, DOU Binlin, et al. Research rogress in production, property and industrial application of bio-oil[J]. Chemical industry and engineering progress, 2011,30(11):2404-2416.)
[2] 董良杰,刘艳阳,李玉柱,等. 生物质快速热裂解制取生物油的试验研究[J]. 吉林农业大学学报,2008,30(4):610-616.

- (DONG Liangjie, LIU Yanyang, LI Yuzhu, et al. Experiment study on biomass fast pyrolysis for producing bio-oil[J]. Journal of Jilin agricultural university, 2008, 30(4): 610–616.)
- [3] MOHAN D, PITTMAN C U, STEELE O H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review[J]. Energy fuels, 2006, 20(3): 848–889.
- [4] RAOUF M A. Development of non-petroleum binders derived from fast pyrolysis bio-oils for use in flexible pavement[D]. Iowa: Ames, Iowa State University, 2010.
- [5] INGRAM L, MOHAN D, BRICKA M, et al. Pyrolysis of wood and bark in an auger reactor: physical properties and chemical analysis of the produced bio-oils[J]. Energy fuels, 2008, 22(1): 614–625.
- [6] FINI E H, AL-QADI I L, YOU Z D, et al. Partial replacement of asphalt binder with bio-binder: characterisation and modification[J]. International journal of pavement engineering, 2012, 13(6): 515–522.
- [7] FINI E H, KALBERER E W, SHAHBAZI A, et al. Chemical characterization of biobinder from swine manure: sustainable modifier for asphalt binder[J]. Journal of materials in civil engineering, 2011, 23(11): 1506–1513.
- [8] FINI E H. Synthesis and characterization of bio-modified rubber (BMR) asphalt: sustainable waste management solution for scrap tire and swine manure[J]. Journal of environmental engineering, 2013, 139(12): 1454–1461.
- [9] FINI E H, YANG S H, XIU S N. Characterization and application of manure-based bio-binder in asphalt industry[C/CD]. TRB 2010 Annual Meeting CD-ROM, 2010.
- [10] MILLS-BEALE J, YOU Z P, FINI E H. Aging influence on rheology properties of petroleum-based asphalt modified with biobinder[J]. Journal of materials in civil engineering, 2014, 26(2): 358–366.
- [11] ONOCHIE A, FINI E H, YANG X, et al. Rheological characterization of nano-particle based bio-modified binder[C/CD]. TRB 2013 Annual Meeting CD-ROM, 2013.
- [12] RAOUF M A, WILLIAMS R C. Determination of pre-treatment procedure required for developing bio-binders from bio-oils[C]. Proceedings of the 2009 Mid-Continent Transportation Research Symposium. Iowa: Ames, Iowa State University, 2009.
- [13] YANG S H, SUCIPTAN T. Rheological behavior of Japanese cedar-based biobinder as partial replacement for bituminous binder[J]. Construction and building materials, 2016, 114: 127–133.
- [14] 汪海年, 高俊锋, 尤占平, 等. 路用生物沥青研究进展[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(7): 57–60.
(WANG Hainian, GAO Junfeng, YOU Zhanping, et al. Advances in bio-binder application on road pavement[J]. Journal of Wuhan university of technology, 2014, 36(7): 57–60.)
- [15] 汪海年, 高俊锋, 赵欣, 等. 基于 DSR 和 RV 的生物沥青结合料流变特性研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(6): 26–33.
(WANG Hainian, GAO Junfeng, ZHAO Xin, et al. Rheological properties on bio-binder based on DSR and RV[J]. Journal of Hunan university (natural sciences), 2015, 42(6): 26–33.)
- [16] 高俊锋, 汪海年, 尤占平, 等. 路用生物沥青及混合料性能研究[J]. 石油炼制与化工, 2017, 48(10): 46–51.
(GAO Junfeng, WANG Hainian, YOU Zhanping, et al. Properties of road bio-binder and its mixture[J]. Petroleum processing and petrochemicals, 2017, 48(10): 46–51.)
- [17] 何敏, 曹东伟, 张海燕, 等. 改性生物沥青常规性能研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(2): 8–12.
(HE Min, CAO Dongwei, ZHANG Haiyan, et al. Study on regular performance of modified bio-asphalt[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2015, 32(2): 8–12.)
- [18] 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, 42(11): 1691–1696.
(CHEN Zhijun, HAO Peiwen. Rheological characteristics of RET compound SBR modified asphalt and its mechanism analysis[J]. Journal of Beijing university of technology, 2016, 42(11): 1691–1696.)
- [19] 陈静云, 赵勇, 李玉华. 基于一种新型蠕变试验仪的沥青蠕变性能[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(2): 193–200.
(CHEN Jingyun, ZHAO Yong, LI Yuhua. Creep properties of asphalt based on a new creep test device[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2016, 42(11): 1691–1696.)