

剪切温度对生物废油改性胶粉沥青的影响

杨军¹, 张佳运¹, 朱浩然², 徐刚¹, 魏建明³, 龚明辉¹

(1. 东南大学交通学院, 江苏南京 210096; 2. 苏交科集团股份有限公司, 江苏南京 210000;
3. 北京低碳清洁能源研究所, 北京 102211)

摘要: 研究剪切温度对生物废油改性胶粉沥青性能的影响, 选择 50 号和 70 号基质沥青为研究对象, 分别加入等量的生物废油和橡胶粉, 剪切时间相同, 制备不同剪切温度下的生物废油改性胶粉沥青样品, 通过黏度、动态剪切流变试验和弯曲梁流变试验研究不同剪切温度下沥青样品流变性能的变化。对沥青样品进行短期老化和长期老化试验, 研究沥青老化后性能的变化。借助傅里叶红外光谱试验研究沥青样品中官能团的变化, 揭示剪切温度影响的微观机制。结果表明: 随着剪切温度的提高, 生物废油改性胶粉沥青的黏度、高温性能、中温性能和低温性能均先增强后减弱, 且具有一定的抗老化能力; 生物废油促进了胶粉的溶胀; 高温剪切, 沥青老化明显, 胶粉发生脱硫降解反应, 导致沥青性能降低; 生物废油改性胶粉沥青的最佳剪切温度为 145 ~ 155 °C。

关键词: 生物废油; 剪切温度; 流变性能; 微观机制

中图分类号: TE 626.86 **文献标志码:** A

引用格式: 杨军, 张佳运, 朱浩然, 等. 剪切温度对生物废油改性胶粉沥青的影响[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2018, 42(3):162-169.

YANG Jun, ZHANG Jiayun, ZHU Haoran, et al. Influence of shear temperature on waste bio-oil modified crumb rubber asphalt[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018, 42(3):162-169.

Influence of shear temperature on waste bio-oil modified crumb rubber asphalt

YANG Jun¹, ZHANG Jiayun¹, ZHU Haoran², XU Gang¹, WEI Jianming³, GONG Minghui¹

(1. School of Transportation in Southeast University, Nanjing 210096, China;
2. JSTI Group, Nanjing 210000, China;
3. National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, Beijing 102211, China)

Abstract: The influence of shear temperature on waste bio-oil (WBO) modified crumb rubber asphalt was investigated. Pen50 and Pen70 neat asphalts were chosen as base binders in this research. The WBO-modified crumb rubber asphalt samples were prepared at different shear temperatures for the same shear time and with the same contents of WBO and crumb rubber. Rheological properties of asphalt samples were then evaluated through viscosity test, dynamic shear rheometer test and bending beam rheometer test, respectively. And the properties of the aged asphalts were investigated after the asphalt samples were aged with laboratory short-term and long-term aging methods. Moreover, the microscopic mechanism of shear temperature was analyzed by studying the functional groups of the asphalt samples in Fourier transform infrared spectrum. The experimental results indicate that with the increase of shear temperature, the viscosity, high-temperature performance, medium-temperature performance, as well as the low-temperature performance of the modified asphalts were improved firstly, then declined. And the modified asphalts present aging resistance. It is also found that WBO enhances the rubber swelling. In addition, aging of asphalt is distinct and devulcanization as well as degradation happens of crumb rubber at high shear tempera-

收稿日期:2018-01-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51778140);江苏省六大人才高峰高层次人才选拔培养项目(JZ-007);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJLX16_0069)

作者简介:杨军(1968-),女,教授,博士,博士生导师,研究方向为高性能路面材料技术。E-mail:yangjun@seu.edu.cn。

ture, which causes the degradation of asphalt performance. On the basis of the experiment the optimum shear temperature of WBO-modified crumb rubber asphalt is from 145 °C to 155 °C.

Keywords: waste bio-oil; shear temperature; rheological properties; microscopic mechanism

胶粉沥青是一种性能优良的路面材料,具有路用性能好、温度敏感性低、耐久性好和经济环保等特点。在实际应用中,由于胶粉不易在沥青中分散,胶粉沥青存在储存稳定性不足的问题^[1]。生物废油是生物燃料和生物润滑油等产业的副产物,其可再生、成本低廉,可作为传统沥青的再生剂和改性剂^[2]。Fini等^[3-4]研究了从猪肥料中获得的生物胶结料作为胶粉沥青的改性剂,表明猪肥料生物胶结料能促进胶粉的脱硫以及橡胶聚合物与沥青的互溶,提高胶粉沥青的低温性能。生物废油可以促进胶粉在沥青中的溶胀,从而提高胶粉沥青的储存稳定性并提高胶粉沥青的路用性能。添加5%生物废油时,胶粉沥青黏度达到最大值。不同剪切温度下获得的生物废油改性胶粉沥青(后面简称为生物胶粉沥青)的黏度有较大差异。研究^[5-7]表明:当制备时间一样时,制备温度对于胶粉沥青就存在较大影响,若制备温度低则胶粉无法充分溶胀以及分散均匀;制备温度高则引起基质沥青的老化与胶粉自身的裂解,从而使得胶粉沥青无法满足性能要求。笔者通过改变剪切温度制备不同沥青样品,采用流变试验获取生物胶粉沥青的性能变化规律,并借助红外光谱试验分析其性能变化机制。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

采用中国石油化工股份有限公司生产的50号基质沥青和70号基质沥青(简称为50号沥青和70号沥青),其基本性能指标如表1所示。

表1 基质沥青基本性能

Table 1 Basic performance of matrix asphalt

沥青	软化点/°C	针入度(25 °C)/10 ⁻¹ mm	闪点/°C	密度(15 °C)/(g·cm ⁻³)	黏度(135 °C)/(Pa·s)
50号沥青	49.7	59	310	1.061	0.605
70号沥青	45.6	68	315	1.043	0.478

废胶粉为广东省深圳市某橡胶粉材料企业生产的0.425 mm胶粉,为常温粉碎方法生产。

生物废油为湖北天门某化工企业的副产品,其原料为生物油脂,通过一系列化学反应获得。生物废油常温下为黑色黏稠液体,15 °C密度为1.03 g/cm³,酸值为50,闪点为240 °C,60 °C黏度为0.163 Pa·s。生物废油的掺量选取为5%。

1.2 试验方法

将生物废油、废旧胶粉和基质沥青(160 °C条件下加热至液态的50号沥青和70号沥青)按照质量配比0.5:2:7.5分别取样。依照先将胶粉与沥青剪切(剪切速率为5 000 r/min)30 min,后加生物废油剪切60 min的流程,制备不同剪切温度下(135、145、155、165和175 °C)的生物胶粉沥青。随后将制得的样品在各自对应温度下发育30 min后取样进行后续性能测试。

对不同剪切温度下制备的生物胶粉沥青分别进行黏度试验、动态剪切流变试验和弯曲梁流变试验。黏度试验的仪器为布氏黏度仪,按照规范ASTM D4402^[8]进行,试验温度设定在135 °C。依据ASTM D7552和ASTM D6648^[9-10],采用动态剪切流变试验测定各样品的高温性能,通过弯曲梁流变试验测定-18 °C下各样品的低温性能变化。根据测试结果评价剪切温度对生物胶粉沥青流变性能的影响。对制备的沥青样品分别进行短期老化试验和长期老化试验,短期老化试验为沥青薄膜加热试验^[10](T0609-2011),长期老化试验为压力老化容器加速沥青老化试验^[11](T0630-2011);通过动态剪切流变试验评价沥青样品长期老化后的中温抗疲劳性能;通过弯曲梁流变试验研究沥青样品老化后低温性能抗裂性能的变化,评价生物胶粉沥青的抗老化能力。

对生物胶粉沥青样品进行傅里叶红外光谱试验,根据试验结果,从微观角度分析、解释剪切温度对沥青性能影响的机制。

2 结果分析

2.1 黏度试验

50号沥青和70号沥青在不同剪切温度下的生物胶粉沥青的135 °C黏度试验结果见图1。

由图1看出,随着剪切温度的升高,生物胶粉沥青的黏度变化呈现驼峰曲线的变化形式,即先增加,达到峰值后再降低。其中,剪切温度为145 °C时,50号沥青的生物胶粉沥青黏度达到峰值,而剪切温度为155 °C时,70号沥青的生物胶粉沥青黏度达到峰值。对于2种沥青,剪切温度较低时(小于145 °C),黏度曲线缓慢递增,表明剪切温度的增加促进生物废油、胶粉及沥青三者之间的相互作用;剪切温

度较高时(大于 155 °C),黏度曲线急剧下降,表明高温导致生物废油、胶粉和沥青三者相互作用体系快速破坏,这其中可能有着复杂的物理和化学反应。根据黏度试验结果,生物胶粉沥青的剪切温度范围为 145 ~ 155 °C时,生物胶粉沥青的黏度达到峰值。

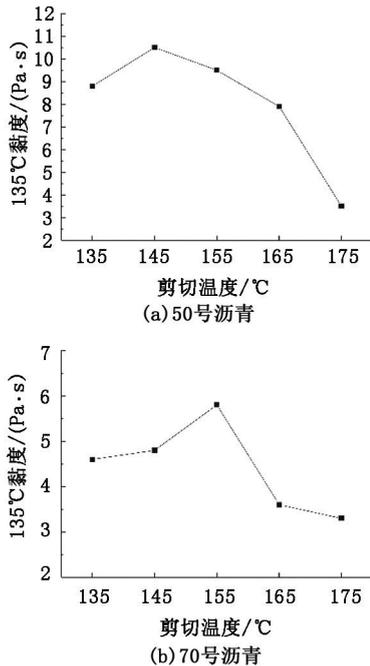


图1 生物胶粉沥青随剪切温度变化的黏度
Fig.1 Viscosity of bio-modified crumb rubber asphalt under different shear temperatures

2.2 动态剪切流变试验

对生物胶粉沥青样品进行高温动态剪切流变试验,评价沥青样品的高温抗车辙能力;对长期老化沥青样品进行中温动态剪切流变试验,评价生物胶粉沥青长期老化后的抗疲劳性能。

2种基质沥青的生物胶粉沥青样品在高温下的复数模量 G^* 、相位角 δ 和车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 分别如图2和图3所示。

复数模量和相位角是胶粉网络结构的反映,复数模量越高,相位角越低,说明胶粉网络的交联密度越大,网络结构越强^[12]。由图2和图3看出,剪切温度对沥青复数模量 G^* 和相位角 δ 有影响,随着剪切温度的升高,复数模量呈现出先升后降的变化规律,而相位角则先降后升。这表明初始剪切温度升高并没有破坏胶粉的交联网络,反而促进了胶粉在生物废油以及沥青中的溶胀作用,胶粉网络的交联密度进一步扩大;胶粉颗粒在沥青中充当骨架作用,因此这一阶段沥青的复数模量升高,相位角降低;随着剪切温度的进一步升高,胶粉中交联网络的 C—S 和 S—S 键断裂,交联网络逐渐被破坏,胶粉在高温下发生脱硫、降解反应,橡胶体出现类似生胶的性质,变软、变黏^[13],因此这一阶段复数模量降低,相位角升高。

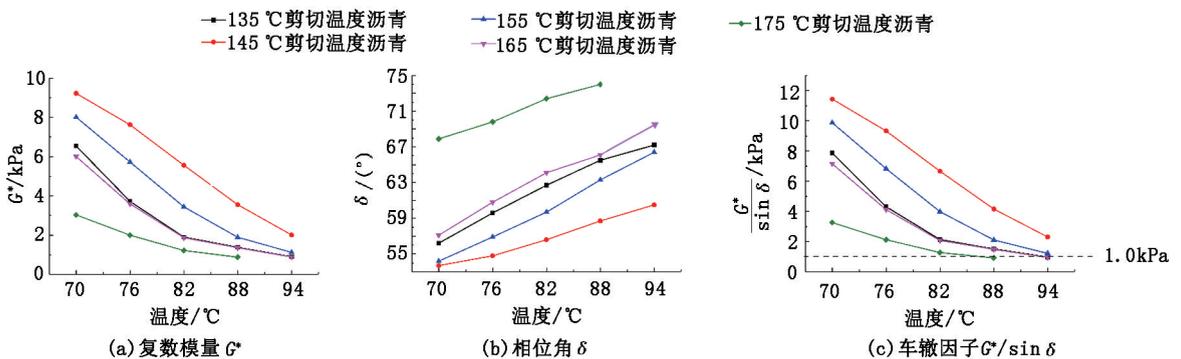


图2 50号沥青的生物胶粉沥青的复数模量 G^* 、相位角 δ 和车辙因子 $G^*/\sin \delta$
Fig.2 Complex modulus (G^*), phase angle (δ), rutting resistance factor ($G^*/\sin \delta$) of bio-modified crumb rubber asphalt (Pen 50)

车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 可表征沥青的抵抗永久变形能力和抗车辙性能。生物胶粉沥青的车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 随剪切温度的升高先增加再降低,说明沥青高温抵抗永久变形能力先提高后降低。沥青的剪切温度分别为 145 和 155 °C时,生物胶粉沥青的高温抗变形能力更好。

可以看出,短期老化后生物胶粉沥青的车辙因子也是随着剪切温度的升高先增加后降低,且变化规律与图2和图3试验结果一致,剪切温度分别为 145 和 155 °C时,车辙因子达到最大。

沥青长期老化后的抗疲劳性能是评价沥青路用性能的重要指标。对长期老化后的生物胶粉沥青样

图4 为生物胶粉沥青短期老化后(TFOT)的车

品进行中温动态剪切流变试验,其复数模量 G^* 、相位角 δ 和疲劳因子 $G^* \sin \delta$ 分别见图 5 和图 6。

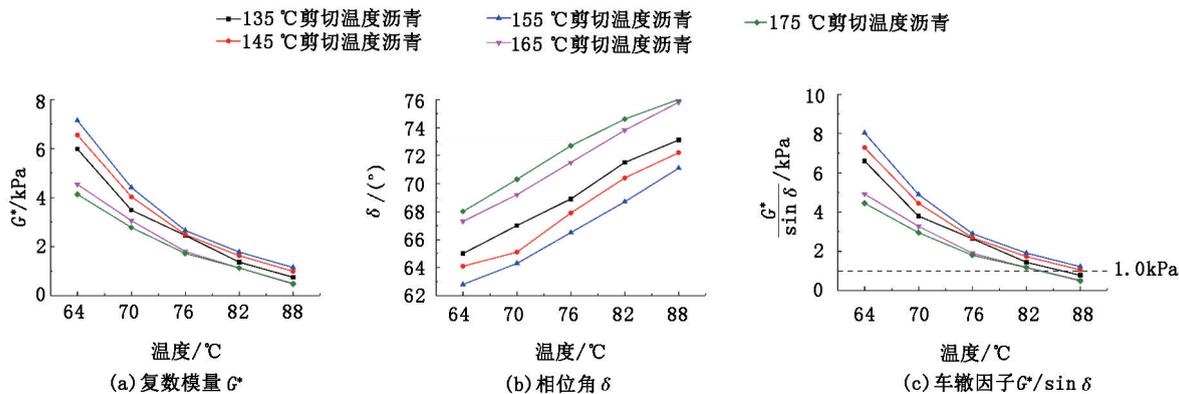


图 3 70 号沥青的生物胶粉沥青的复数模量 G^* 、相位角 δ 和车辙因子 $G^* / \sin \delta$

Fig. 3 Complex modulus (G^*), phase angle (δ), rutting resistance factor ($G^* / \sin \delta$) of bio-modified crumb rubber asphalt (Pen 70)

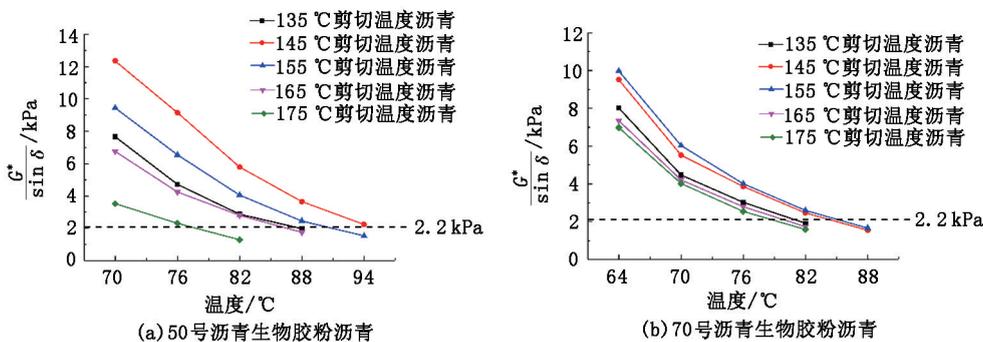


图 4 TFOT 后生物胶粉沥青的车辙因子 $G^* / \sin \delta$

Fig. 4 Rutting resistance factor ($G^* / \sin \delta$) of bio-modified crumb rubber asphalt after TFOT

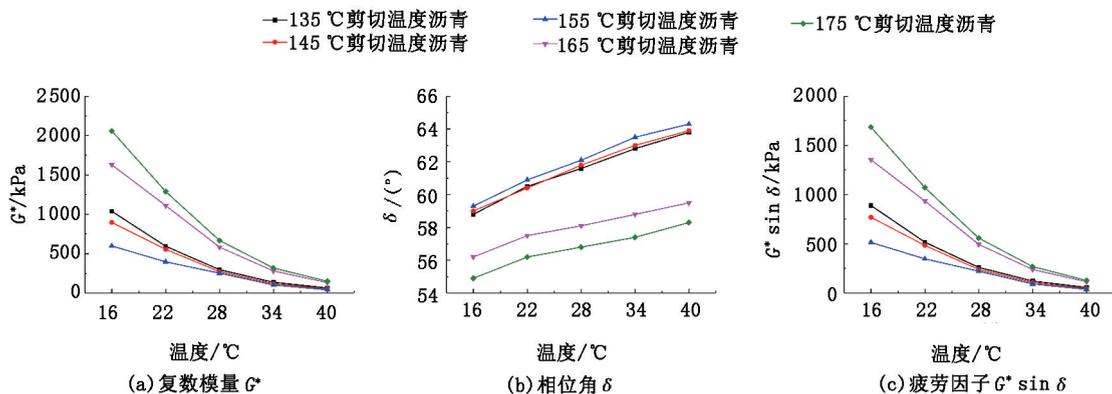


图 5 50 号沥青的生物胶粉沥青长期老化后中温动态剪切流变试验结果

Fig. 5 Dynamic shear rheometer test results under medium temperature of bio-modified crumb rubber asphalt (Pen 50)

疲劳因子 $G^* \sin \delta$ 用于表征沥青在中温条件下对疲劳开裂的抵抗能力, $G^* \sin \delta$ 越小, 则沥青的抗疲劳性能越好。从图 5 和图 6 看出: 随着沥青剪切温度的升高, 疲劳因子 $G^* \sin \delta$ 先降低后升高, 生物胶粉沥青的抗疲劳能力先改善后降低, 155 °C 剪切温度下的生物胶粉沥青的抗疲劳性能最好; 生物胶粉沥青复数模量 G^* 和相位角 δ 的变化规律与图 2

和图 3 中的截然相反。这是由于胶粉在中低温下仍然有较好的黏弹性, 轮胎橡胶的脆点为 $-75\text{ }^\circ\text{C}$, 而基质沥青的脆点为 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ [14], 表明胶粉的低温性能更好, 在中低温下仍然具有较好的黏弹性。由于胶粉的交联网络在沥青中充当骨架作用, 因此 155 °C 剪切温度下的生物胶粉沥青的交联网络更好, 其中低温下表现出更软更黏的特性, 因此其复数模量也

更小,相位角也更大。

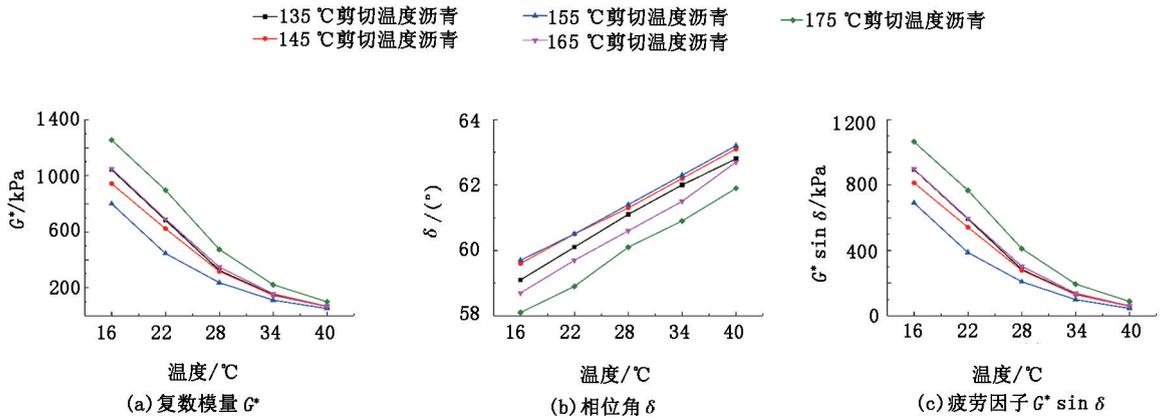


图6 70号沥青的生物胶粉沥青长期老化后中温动态剪切流变试验结果

Fig. 6 Dynamic shear rheometer test results under medium temperature of bio-modified crumb rubber asphalt (Pen 70)

2.3 弯曲梁流变试验

在-18 °C下,对未老化、短期老化和长期老化的生物胶粉沥青样品进行弯曲梁流变试验,以确定剪

切温度对生物胶粉沥青低温性能的影响,试验结果见图7和图8。

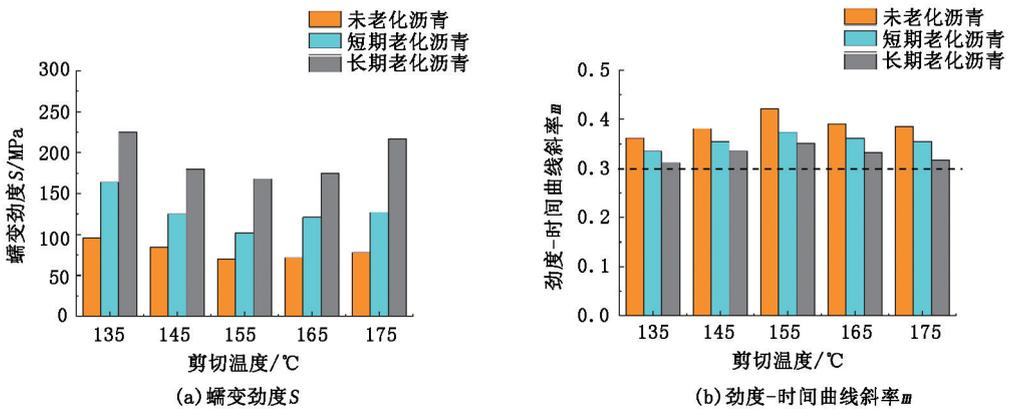


图7 50号沥青的生物胶粉沥青的弯曲梁流变试验结果

Fig. 7 Bending beam rheometer test results of bio-modified crumb rubber asphalt (Pen 50)

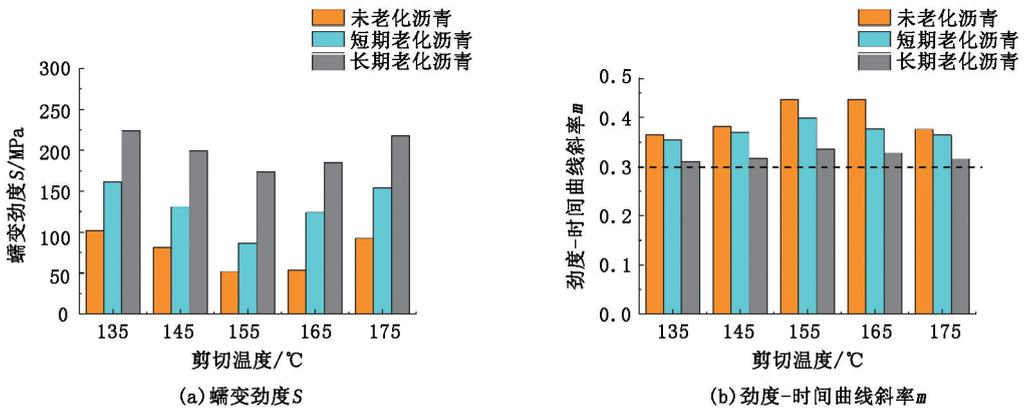


图8 70号沥青的生物胶粉沥青的弯曲梁流变试验结果

Fig. 8 Bending beam rheometer test results of bio-modified crumb rubber asphalt (Pen 70)

SHRP 规范中,蠕变劲度 S 越小,劲度-时间曲线斜率 m 越大,则沥青的低温抗裂性能越好^[15]。可以看出:随着剪切温度的升高,沥青蠕变劲度 S 先

降低后增加,劲度-时间曲线斜率先增加后降低,说明生物胶粉沥青的低温性能也是随剪切温度先提高后降低的;剪切温度为 155 °C 时,生物胶粉沥青的低

温抗裂性能最优。

表2 沥青的弯曲梁流变试验结果

Table 2 Bending beam rheometer test results of asphalts

沥青种类	老化程度	蠕变劲度 S/MPa	劲度-时间曲率 m
50号沥青	未老化	274	0.304
	短期老化	355	0.243
	长期老化	469	0.191
70号沥青	未老化	194	0.330
	短期老化	284	0.287
	长期老化	375	0.221

SHRP 沥青胶结料规范规定,沥青胶结料低温抗裂性能需满足蠕变劲度 $S \leq 300 \text{ MPa}$ 和劲度-时间曲线斜率 $m \geq 0.3$ 。从图7和图8可知,短期老化和长期老化会使得生物胶粉沥青的劲度模量增加,劲度-时间曲线斜率下降,降低沥青的低温抗裂性能。但是,在 $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ 下,无论是短期老化沥青还是长期老化沥青,其蠕变劲度 S 均不大于 300 MPa ,劲度-时间曲线斜率 m 也都不小于 0.3 ,表明生物胶粉沥青在短期老化和长期老化后仍然能在 $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ 具有抵抗低温开裂的能力;表2中50号沥青和70号沥青的弯曲梁流变试验结果表明,基质沥青经过短期老

化与长期老化后,在 $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ 下不能满足沥青的低温抗裂性能要求,这说明生物胶粉沥青相较于基质沥青具有一定的抗老化能力。

2种不同基质沥青的生物胶粉沥青的高中低温性能随剪切温度的变化呈现相同的变化规律;剪切温度为 $145 \sim 155 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,生物胶粉沥青的高中低温性能达到最优。这进一步表明,剪切温度变化初期,温度的提升促进了生物废油、胶粉与沥青这三者间的相互作用,有效改善了沥青的性能;温度提升到一定程度时,三者之间的作用达到饱和,胶粉网络在沥青中的交联达到峰值,沥青性能达到最优;温度继续提升只会抑制三者间的作用。高温条件下,胶粉发生脱硫、降解反应,生物废油与沥青发生老化反应,这些都会导致生物胶粉沥青性能的下降。

2.4 傅里叶红外光谱试验

采用液膜法制备生物废油、0.425 mm 胶粉及沥青的红外光谱样品,试验所用设备为 NEXUS70 型傅里叶变换红外光谱仪。图9为50号沥青、70号沥青、生物废油以及0.425 mm 胶粉的红外光谱图和特征峰区间光谱图。

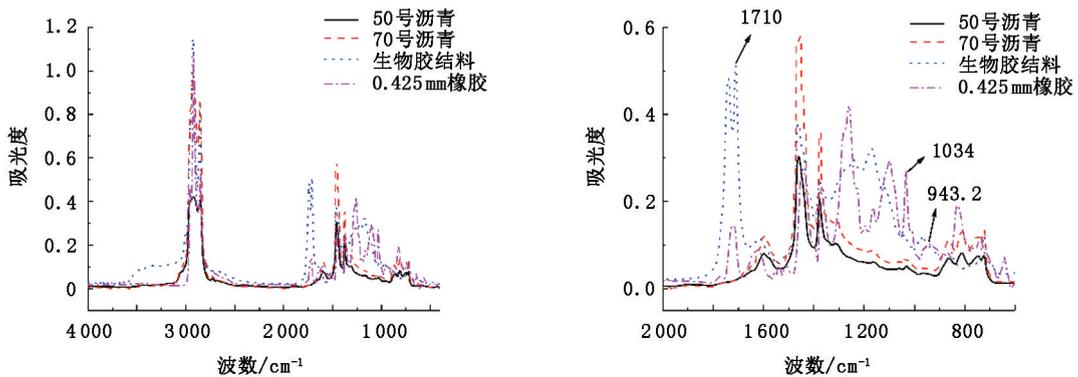


图9 50号沥青、70号沥青、生物废油及0.425 mm 胶粉红外光谱图

Fig.9 Infrared spectra of Pen 50 asphalt, Pen 70 asphalt, waste bio-oil and 0.425 mm crumb rubber

在生物胶粉沥青制备过程中,总会伴随着热氧老化作用以及胶粉的脱硫降解反应。基于沥青红外光谱试验,可以利用羰基吸收峰(1710 cm^{-1})的面积变化表征沥青的老化情况,虽然生物废油的红外光谱中羰基吸收峰(1710 cm^{-1})明显,在基质沥青中加入生物废油会引入较多的羰基,但是因为生物废油的添加比例相同,因此不会对沥青羰基吸收峰相对面积变化产生影响。对于胶粉,其脱硫降解反应会使得烯烃的含量减少,丁二烯双键上 $\text{C}-\text{H}$ 弯曲振动吸收峰(943.2 cm^{-1})的相对面积会减小,因此通过丁二烯中 $\text{C}-\text{H}$ 吸收峰面积的变化评价沥青中胶粉的脱硫降解程度^[16-17]。相关文献^[18]指出,对于胶

粉,亚砷基的 $\text{S}=\text{O}$ 双键伸缩振动吸收峰(1034 cm^{-1})可能是胶粉脱硫过程中 $\text{C}-\text{S}$ 和 $\text{S}-\text{S}$ 键发生断裂的结果,因此计算亚砷基中 $\text{S}=\text{O}$ 吸收峰面积的变化也可以用来评价胶粉的脱硫程度。

图10为50号沥青和70号沥青在不同剪切温度下生物胶粉沥青的红外光谱。采用吸收峰面积比率的方法来研究沥青样品官能团浓度的变化,以 $2000 \sim 600 \text{ cm}^{-1}$ 各吸收峰面积的和为参考面积,考察沥青样品羰基、丁二烯基和亚砷基官能团的面积相对于参考面积的比率变化,计算公式^[19-20]为

$$I_{\text{C=O}} = S(\text{羰基吸收峰}) / S(\sum (2000 \sim 600 \text{ cm}^{-1} \text{ 峰}));$$

$$I_{C=C} = S(\text{丁二烯基吸收峰}) / S(\sum(2000 \sim 600 \text{ cm}^{-1} \text{ 峰}));$$

$$I_{S=O} = S(\text{亚砷基基吸收峰}) / S(\sum(2000 \sim 600 \text{ cm}^{-1} \text{ 峰})).$$

cm⁻¹ 峰)).

各沥青的羰基指数、丁二烯基指数和亚砷基指数的计算结果如表3所示。

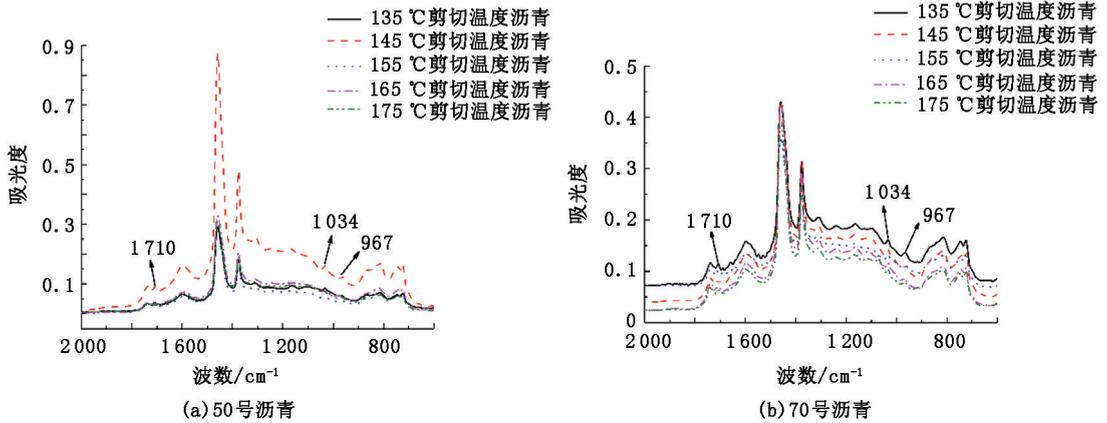


图10 不同剪切温度生物胶粉沥青的红外光谱

Fig. 10 Infrared spectra of bio-modified crumb rubber asphalt under different shear temperatures

表3 生物胶粉沥青的羰基指数、丁二烯基指数和亚砷基指数

Table 3 Carbonyl index, butadiene index and sulfoxide index of bio-modified crumb rubber asphalt

剪切温度/ ℃	50号生物胶粉沥青			70号生物胶粉沥青		
	$I_{C=O}$	$I_{C=C}$	$I_{S=O}$	$I_{C=O}$	$I_{C=C}$	$I_{S=O}$
135	0.00844	0.0202	0.0122	0.00606	0.0122	0.00795
145	0.00836	0.0198	0.0123	0.00585	0.0123	0.00808
155	0.00865	0.0192	0.0125	0.00580	0.0121	0.00810
165	0.00862	0.0178	0.0136	0.00670	0.0111	0.00822
175	0.00910	0.0162	0.0140	0.00681	0.0110	0.00857

从表3可知,对于生物胶粉沥青样品,随着剪切温度的升高,羰基指数先微弱减小后明显增大,表明沥青在剪切温度较低时,氧化组分含量没有明显增加,却有所降低,出现这种情况有两种原因:①剪切温度较低,沥青的氧化反应不明显;②胶粉持续溶胀,吸收了生物废油中的轻质组分。剪切温度较高时,氧化组分含量则明显增加,说明过高的剪切温度会加剧沥青老化。丁二烯基指数刚开始没有明显变化,当温度较高时,丁二烯基指数明显减小,表明分散在沥青中的胶粉发生了明显的脱硫降解,这将会导致沥青性能的降低。此外随着剪切温度的升高,亚砷基指数逐渐升高,但是初始亚砷基指数升高并不明显,说明剪切温度较低时,胶粉的脱硫反应并不明显,C—S和S—S键并没断裂形成亚砷基;随着温度进一步升高,亚砷基指数明显变大,说明高温促进了胶粉的脱硫,C—S和S—S键断裂导致交联网络被破坏,最终造成过高温下剪切的沥青高低温性能明

显降低。氧化会导致沥青黏度升高,但是对于胶粉沥青而言,决定其黏度的是沥青中胶粉的交联网络,因此高温下剪切的生物胶粉沥青的黏度明显降低。

3 结论

(1)随着剪切温度的提高,生物胶粉沥青黏度、高温抗车辙性能、中温抗疲劳性能和低温抗开裂性能的变化规律均为先改善后降低,剪切温度为145~155℃时,沥青的各项流变性能指标最优。

(2)与基质沥青相比,生物胶粉沥青具有一定的抗老化能力。

(3)在剪切温度较低时(小于145℃),提高剪切温度,改善生物废油、胶粉与沥青之间的相互作用,促进胶粉的溶胀反应,改善生物胶粉沥青的性能;在剪切温度较高时(大于155℃),继续提高剪切温度,沥青出现老化反应,胶粉发生脱硫降解反应,生物胶粉沥青的性能降低。

(4)剪切温度较低时,羰基指数减小暗示生物废油可能对于胶粉溶胀有促进,生物废油能作为胶粉沥青的改性剂。

参考文献:

[1] 史磊. 胶粉改性沥青路面推广关键问题研究[J]. 黑龙江交通科技, 2014(2): 65-66.
SHI Lei. Research on the promotion of crumb rubber modified asphalt pavement[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2014(2): 65-66.
[2] 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):55-60.
- 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):55-60.
- [3] FINI E H, OLDHAM D J, ABU-LEBDEH T. Synthesis and characterization of biomodified rubber asphalt: sustainable waste management solution for scrap tire and swine manure[J]. Journal of Environmental Engineering, 2013,139(12):1454-1461.
- [4] BOCOUM A, HOSSEINNEZHAD S, FINI E H. Investigating effect of amine based additives on asphalt rubber rheological properties[J]. Proceedings of 12th ISAP International Conference on Asphalt Pavements,2014(1):921-931.
- [5] 陆晶晶. 橡胶沥青性能影响因素与改性机理研究[D]. 西安:长安大学,2010.
- LU Jingjing. Performance influence factors and mechanism of rubber asphalt[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [6] 孙建刚. 废胶粉改性沥青的性能及机理研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2014.
- SUN Jiangang. Research on performance and mechanism of waste rubber powder modified asphalts[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology,2014.
- [7] 刘延军,刘朝辉,张玉贞. 橡胶粉改性沥青反应过程规律[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(3):154-160.
- LIU Yanjun, LIU Chaohui, ZHANG Yuzhen. Reaction rules of crumb rubber modified asphalt[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science),2017,41(3):154-160.
- [8] American Society for Testing and Materials. Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer; D4402-02[S]. West Conshohocken: ASTM,2002.
- [9] American Society for Testing and Materials. Standard test method for determining the complex shear modulus (G^*) of bituminous mixtures using dynamic shear rheometer; D7552-09[S]. West Conshohocken: ASTM,2009.
- [10] American Society for Testing and Materials. Standard test method for determining the flexural creep stiffness of asphalt binder using the bending beam rheometer (BBR); D6648-01[S]. West Conshohocken: ASTM, 2001.
- [11] 交通运输部公路科学研究院. 公路工程沥青及沥青混合料实验规程[S]. 北京:人民交通出版社,2011.
- [12] 张小英,徐传杰,张玉贞. 剪切温度对橡胶粉-沥青体系热降解规律的影响[J]. 石油炼制与化工,2010,41(1):55-58.
- ZHANG Xiaoying, XU Chuanjie, ZHANG Yuzhen. Effect of shearing temperature on the thermal repolymerization of crumb rubber-asphalt system[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2010,41(1):55-58.
- [13] 王笑风,曹荣吉. 橡胶沥青的改性机理[J]. 长安大学学报(自然科学版),2011,31(2):6-11.
- WANG Xiaofeng, CAO Rongji. Rubber asphalt modification mechanism[J]. Journal of Chang'an University (Edition of Natural Science),2011,31(2):6-11.
- [14] 王尉,何亮,王大为,等. 橡胶沥青及混合料低温性能研究进展[J]. 公路,2016,61(1):181-187.
- WANG Wei, HE Liang, WANG Dawei, et al. Progress of research on rubber asphalt and mixture in low-temperature performance[J]. Highway, 2016,61(1):181-187.
- [15] 王立志,魏建明,张玉贞. 用弯曲梁流变仪评价道路沥青的低温性能[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2009,33(1):150-153.
- WANG Lizhi, WEI Jianming, ZHANG Yuzhen. Evaluation on low temperature performance of paving asphalt using bending beam rheometer[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009,33(1):150-153.
- [16] OUYANG C F, WANG S F, ZHANG Y, et al. Improving the ageing resistance of asphalt by addition of Zinc dialkyldithiophosphate[J]. Fuel, 2006,85(7):1060-1066.
- [17] NIVITHA M R, PRASAD E, KRISHNAN J M. Ageing in modified bitumen using FTIR spectroscopy[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2016,17(7):565-577.
- [18] 何亮,马育,黄晓明,等. 再生胶改性沥青性能及其微观结构研究[J]. 建筑材料学报,2012,15(2):227-231.
- HE Liang, MA Yu, HUANG Xiaoming, et al. Research on performance and microstructure of desulfurized rubber asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2012,15(2):227-231.
- [19] MILLS-BEALE J, YOU Z, FINI E, et al. Aging influence on rheology properties of petroleum-based asphalt modified with bio-binder[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012,26(2):358-366.
- [20] ZHANG F, HU C. The research for crumb rubber/waste plastic compound modified asphalt[J]. Journal of Thermal Analysis & Calorimetry, 2016,124(2):729-741.