

# 改性沥青的流变性和储存稳定性研究

范维玉, 辛雪, 梁明, 姚艳, 董夫强, 南国枝

(中国石油大学重质油国家重点实验室, 山东青岛 266580)

**摘要:**以高富 AH-50 为基质沥青分别制备 SBS、胶粉和 EVA 改性沥青,利用动态剪切流变仪(DSR)分析不同种类改性沥青动态黏弹参数(储存模量  $G'$  和损失模量  $G''$ )随频率和温度的变化,结合 60 °C 稳态流动试验和 Carreau 模型表征沥青的流变性能,并用储存稳定指数  $I_s$  表征不同改性剂与沥青的相容性能。结果表明:试验范围内,随频率的增加  $G'$  和  $G''$  逐渐变大,相同频率下  $G'$  明显小于  $G''$ ,改性沥青以黏性成分为主,且两者的差值在低频和高温下较大;与基质沥青相比,SBS 和胶粉改性沥青的临界剪切速率  $\gamma_c$  降低幅度远大于 EVA 改性沥青的  $\gamma_c$ ,SBS 和胶粉的掺加使沥青偏离牛顿流体的程度更大,对剪切的敏感性更高;SBS 和胶粉与沥青的相容性较差,在相分离时 SBS 迁移至上段,胶粉迁移至下段,而 EVA 与沥青的相容性较好,体系不易发生相分离。

**关键词:**动态黏弹参数;流变性能;储存稳定性能;改性沥青

**中图分类号:**U 414      **文献标志码:**A

**引用格式:**范维玉,辛雪,梁明,等. 改性沥青的流变性和储存稳定性研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(4):165-170.

FAN Weiyu, XIN Xue, LIANG Ming, et al. Comparative study on the rheological properties and storage stability of modified bitumen prepared by different modifiers[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015,39(4):165-170.

## Comparative study on the rheological properties and storage stability of modified bitumen prepared by different modifiers

FAN Weiyu, XIN Xue, LIANG Ming, YAO Yan, DONG Fuqiang, NAN Guozhi

(State Key Laboratory of Heavy Oil Processing in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

**Abstract:** Three modified bitumens were prepared using different modifiers: SBS, rubber, and EVA with Gao Fu AH-50 as the base bitumen. And the rheological properties were characterized of the modified bitumens by dynamic viscoelastic parameters (storage moduli  $G'$  and loss moduli  $G''$ ) changes with the frequency and temperature using dynamic shear rheometer (DSR) with the combination of viscous flow behavior at 60 °C and the Carreau model. Meanwhile, the compatibility between asphalt and different modifiers were evaluated by the  $I_s$ . It is found that for the modified bitumens the  $G'$  and  $G''$  are improved gradually with the increase of the frequency.  $G'$  is smaller than  $G''$  significantly, which indicates the viscous part is dominant for modified samples. And the difference between the two parameters becomes larger at low frequency and high temperature. The reduced extents of critical shear rate  $\gamma_c$  for SBS and rubber modified bitumens are far bigger than that for EVA modified one, meaning the addition of SBS and rubber make the modified bitumen show more non-Newton fluid behavior with higher shear sensitivity. The compatibility between SBS, rubber and asphalt is not good in terms of  $I_s$ , in which the SBS moves to the tube top, and rubber moves to bottom on the contrary at the phase separation. However, EVA is found to have good compatibility with bitumen.

**Keywords:** dynamic viscoelastic parameters; rheological properties; storage stability; modified bitumen

沥青材料在高等级公路中得到广泛应用<sup>[1]</sup>,但沥青对温度敏感性大,低温下易变脆,高温下易流动,黏弹性能和耐老化性能较差。近年来交通运输量和荷载量的急剧增加导致沥青路面产生了一系列病害形式,如车辙、坑槽和低温开裂等<sup>[2]</sup>。聚合物改性沥青(PMB)是提高沥青高低温性能、降低温度敏感性和改善流变性能最有效的方法<sup>[3]</sup>,改性剂通过降低改性沥青的玻璃化转变温度进而拓宽沥青的使用温度范围,改善抵抗变形和开裂的性能<sup>[4]</sup>。理想的改性剂制备的改性沥青应具有较好的流变性能(工作温度下表现出高黏性质,生产制备混合料时表现适中黏度),储存时维持均相状态,且可以有效抵抗紫外光、热、水损害,不向环境释放有害物质<sup>[5-6]</sup>。目前常用的沥青改性剂有苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)、乙烯-醋酸乙烯酯共聚物(EVA)、胶粉、丁苯橡胶(SBR)、聚乙烯(PE)等<sup>[7-8]</sup>。不同的聚合物由于结构和性质不同导致所制备的改性沥青性能差异较大,笔者选取工程应用中常用的具有代表性的改性剂,以高富 AH-50 为基质沥青,制备不同类型改性沥青,利用动态剪切流变仪(DSR)分析不同种类改性沥青动态黏弹参数(储存模量  $G'$  和损失模量  $G''$ ) 随频率和温度的变化,结合 60 °C 稳态流动试验和 Carreau 模型表征沥青的流变性能,并用储存稳定指数  $I_s$  表征不同改性剂与沥青的相容性能。

## 1 试验

### 1.1 试验原料

选用中海高富 AH-50 为基质沥青,其软化点为 50.1 °C,针入度为 44,10 °C 延度为 14.2 cm,饱和分、芳香分、胶质和沥青质含量分别为 8.6%、49%、26.7%、14.8%;SBS 选取岳阳石化有限公司生产的线型 YH-791H,嵌段比(S/B)为 30/70;胶粉由青岛盛泰隆橡塑有限公司生产,粒径为 0.42 mm;EVA 为广东金运来塑料原料公司生产,相对分子质量为 2 000。

### 1.2 改性沥青制备工艺

SBS 改性沥青由 FLUKE FM300-digital 高剪切分散乳化机在 170 °C、3 000 r/min 下剪切 30 min 后搅拌发育 2 h 制得,掺量选取 3% (PMB-3% SBS) 和 5% (PMB-5% SBS);胶粉和 EVA 改性沥青在 170 °C 下搅拌 2.5 h 制得,掺量分别为 9% (PMB-9% 胶粉) 和 4% (PMB-4% EVA)。同时为了考察制备过程对基质沥青的影响<sup>[9]</sup>,对基质沥青进行与聚合物

改性沥青相同的工艺(170 °C 下搅拌 2.5 h)制备空白对比样品(Processed 高富 AH-50)。

### 1.3 性能评价

沥青的软化点、针入度、延度性质分别按照 JTJ052-2000《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中 T0606-2000、T0604-2000、T0605-1993 标准进行测定;动力黏度测定使用美国 Brookfield 工程实验室生产的 RVDV-II +P Brookfield 黏度仪;微观形态结构采用日本 Olympus 公司生产的 BX51 显微镜检测,试样放大倍数为 100 倍。动态剪切试验由美国 TA 公司生产的应力控制流变仪 AR2000EX 测定,控制应力为 10 Pa,将试样分别在 25、50 和 75 °C 下进行频率扫描试验(频率为 0.1 ~ 100 rad/s)、60 °C 下进行稳态流动试验(剪切速率为  $10^{-3}$  ~  $10^2$  s<sup>-1</sup>)。

## 2 结果分析

### 2.1 基质沥青和改性沥青的基本性能指标

SBS、胶粉和 EVA 改性沥青及空白对比样的基本性能指标如表 1 所示。

表 1 改性沥青的宏观性能

Table 1 Macroscopic properties of modified bitumens

沥青	软化点/°C	25 °C 针入度	10 °C 延度/cm	135 °C 黏度/Pa·s
高富 AH-50	50.1	44	14.2	0.59
对比样品	52.9	38	7.0	0.75
PMB-3% SBS	57.8	35	32.2	1.57
PMB-5% SBS	68.0	28	51.5	2.97
PMB-9% 胶粉	60.4	35	9.3	2.35
PMB-4% EVA	57.8	34	11.8	1.43

与基质沥青相比,SBS 的掺加可以大幅度改善高低温性能,且在合适范围内掺量越大改善效果越明显,这是由于 SBS 颗粒可以均匀分散在沥青中,一方面使沥青软化点和黏度大幅提高,增强其抵抗车辙的能力;另一方面使沥青的脆点降低、低温延度增大,具有较好的柔性和弹性以减少路面裂缝<sup>[10]</sup>。胶粉和 EVA 主要改善沥青的高温性能,对低温性能改善效果没有 SBS 明显,这是由于胶粉和 EVA 的加入会产生吸附和溶胀作用,使得呈连续相的沥青相组成结构被破坏,轻质组分减少、大分子组分增加,聚合物以微细颗粒状分布于沥青中,增加了其高温抗车辙性能。但在低温条件下,沥青中分子链段流动缓慢,分子作用力增加使得沥青的脆性变大。研究结果同时表明,空白样品的软化点和黏度明显高于未经工艺条件的基质沥青,原因是在制备过程中沥青中的软组分部分

氧化转变为沥青质<sup>[11]</sup>,沥青中的沥青质含量越高必然导致其低温延度降低,黏度增加。

## 2.2 流变性能

沥青是一种黏弹性材料,在使用温度下同时显示出弹性和黏性材料的特性,这两种特性之间的关系被用来衡量沥青胶结料抵抗永久变形和疲劳开裂的能力。通过动态剪切试验得到不同类型改性沥青的动态黏弹参数,即储存模量  $G'$  和损失模量  $G''$ ,  $G'$  表示材料储存并可以恢复的能量,体现的是沥青的弹性成分;  $G''$  表示材料在变形过程中由于内部摩擦产生的以热的形式散失的能量,体现的是沥青的黏性成分<sup>[12]</sup>。

### 2.2.1 动态黏弹参数变化规律

动态黏弹参数  $G'$  和  $G''$  随频率  $\omega$  的变化如图 1 所示,温度对改性沥青流变性能的影响见图 2。可以看出,随频率  $\omega$  的增大,所有沥青样品的  $G'$  和  $G''$

都呈现持续增长的趋势,但相同频率下,  $G'$  明显小于  $G''$ , 说明在试验范围内, 沥青主要以黏性成分为主。3 种改性剂的掺加都可以提高 50 °C 下沥青的线黏弹性模量, 这一研究结果有助于改善沥青路面的抗车辙能力。不同改性剂对线黏弹性模量的提高效果不同, SBS 掺量为 5% 制备的改性沥青产生的  $G'$  最高, 略大于胶粉掺量为 9% 的沥青样品。掺加 4% EVA 改性剂的沥青与掺加 3% SBS 改性剂的沥青的  $G'$  在频率高于 1 rad/s 时差别很小, 但在频率低于 1 rad/s 时前者明显高于后者。不同改性沥青之间的  $G'$  和  $G''$  在低频下差别较大, 随着频率的增加差别逐渐缩小并最终达到一个交点。另一方面, 与基质沥青相比, 经过与改性沥青制备过程相同的工艺后的 Processed 高富 AH-50 的  $G'$  和  $G''$  尽管趋势相似, 但均有明显提高, 说明沥青在制备加工过程中经历了初步老化。

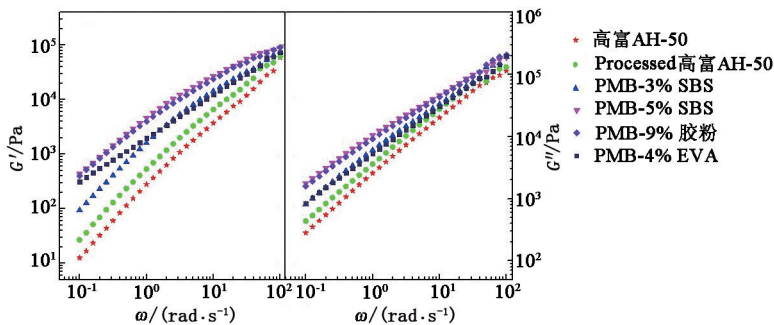


图 1 不同改性沥青动态黏弹参数  $G'$  和  $G''$  随剪切频率  $\omega$  的变化

Fig. 1 Frequency dependence of linear viscoelasticity parameters for modified bitumen prepared by different polymers

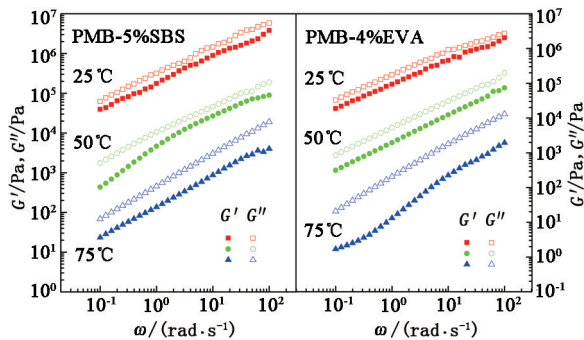


图 2 不同温度下改性沥青动态黏弹参数  $G'$  和  $G''$  的变化

Fig. 2 Temperature dependence of linear viscoelasticity parameters for modified bitumen

由图 2 可以看出,在试验温度下,所研究样品的  $G''$  均大于  $G'$ , 但温度越低, 沥青  $G'$  与  $G''$  间的差值越小, 说明温度越低沥青呈现的弹性性质越明显。

### 2.2.2 60 °C 稳态流动试验

表观黏度随剪切速率的增加而呈现出降低的特性称为剪切稀释性, 并可用  $\gamma_c$  表征出现剪切稀释特

性时的临界剪切速率<sup>[13]</sup>。不同改性沥青 60 °C 下的黏流曲线如图 3 所示, 可以看出, 改性沥青在较宽的速率范围内呈现出牛顿流体行为, 而随着速率的增加, 黏度逐渐降低, 且不同种类的聚合物或相同种类但浓度不同时制备的改性沥青黏度差别较大。沥青零剪切稀释黏度  $\eta_0$  顺序为: PMB-5% SBS > PMB-9% 胶粉 > PMB-4% EVA  $\approx$  PMB-3% SBS > Processed 高富 AH-50 > 高富 AH-50, 这与表 1 中沥青宏观黏度的变化规律一致。对比 2 种不同 SBS 掺量制备的改性沥青, 当聚合物浓度越大时沥青黏度越大, 但出现剪切稀释特性时的临界剪切速率  $\gamma_c$  越小, 偏离牛顿流体的程度越大, 对剪切的敏感性越高。

$\eta$  随剪切速率  $\dot{\gamma}$  的变化可用 Carreau 模型进行较好的拟合<sup>[4]</sup>(图 3):

$$\eta = \frac{\eta_0}{\left[1 + \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c}\right)^2\right]^s} \quad (1)$$

式中,  $\gamma_c$  为出现剪切稀释特性时的临界剪切速率;  $s$  为与曲线斜率有关的参数。不同聚合物改性沥青的 Carreau 模型参数如表 2 所示。经 Carreau 模型拟合得到的参数规律表明, 基质沥青出现剪切稀释时的临界剪切速率  $\gamma_c$  最大且高于空白对比样的  $\gamma_c$ , 说明制备改性沥青的过程会使基质沥青对剪切敏感性提高; 而聚合物改性沥青中 SBS 和胶粉改性沥青的  $\gamma_c$  降低幅度远远高于 EVA 改性沥青的  $\gamma_c$ 。

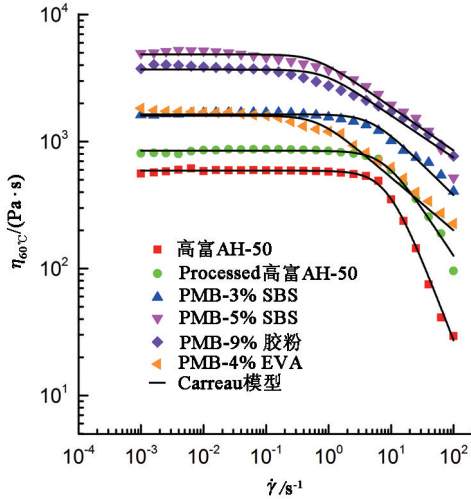


图3 不同改性沥青 60 °C 下的黏流曲线

Fig. 3 Viscous flow curves for different modified bitumen at 60 °C

表2 不同聚合物改性沥青的黏流曲线拟合参数

Table 2 Parameters of viscous flow curves for different polymer modified bitumen

沥青	$\eta_0 / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	$\gamma_c / \text{s}^{-1}$	$s$
高富 AH-50	0.59	9.00	0.64
Processed 高富 AH-50	0.85	7.92	0.38
PMB-3% SBS	1.60	0.68	0.21
PMB-5% SBS	4.87	0.54	0.17
PMB-9% 胶粉	3.69	0.82	0.17
PMB-4% EVA	1.64	4.91	0.24

### 2.2.3 黏温关系变化规律

沥青中的聚合物可以增加改性沥青高温黏度, 降低活化能, 而这一性质可以大大改善沥青的路用性能。理想的改性沥青在环境温度下黏度应足够高以抵抗车辙或永久变形, 而在更高的施工温度 (135 °C) 下黏度应降低使得施工过程更加简便<sup>[14]</sup>。不同改性沥青黏温关系见图 4。本文中所选取的聚合物种类和浓度制备的改性沥青黏度完全符合上述要求, 因此相应的改性沥青的流变性能对工程应用具有较强的指导作用。

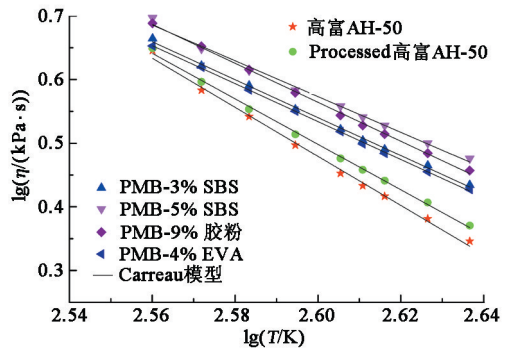


图4 不同改性沥青的黏温关系

Fig. 4 Temperature dependence of viscosity for different polymer modified bitumen

温度对物质黏度的影响很大, 目前国内外已有多种方法定量描述黏温关系。通常在高温 (>60 °C) 时, 可用 Walther 与 Saal 经验式来表征沥青材料的黏温关系<sup>[15]</sup>:

$$\lg(\lg\eta) = b - m \lg T. \tag{2}$$

式中,  $\eta$  为沥青黏度;  $T$  为绝对温度;  $b$  为回归直线在纵轴上的截距;  $m$  为回归直线的斜率。该经验公式表明沥青黏度  $\eta$  的双对数值与温度的对数值呈线性关系。根据经验公式拟合沥青样品的黏度随温度的变化, 得到  $m$  和  $b$  值如表 3 所示。  $m$  值越小表明沥青材料在高温时的温度敏感性越小, 研究表明聚合物的掺加均可以降低黏温曲线的斜率, 即说明聚合物改性沥青的感温性能较基质沥青均有所改善, 且改善最明显的是掺加 5% SBS 的改性沥青。

表3 黏温经验公式拟合参数  $m$  和  $b$

Table 3 Parameters  $m$  and  $b$  of empirical equation

沥青	$m$	$b$
高富 AH-50	3.86	10.51
Processed 高富 AH-50	3.58	9.79
PMB-3% SBS	2.98	8.29
PMB-5% SBS	2.81	7.88
PMB-9% 胶粉	3.06	8.52
PMB-4% EVA	2.98	8.29

### 2.3 储存稳定性能

聚合物改性剂与基质沥青的相容性决定了聚合物改性沥青的储存稳定性, 储存稳定性越好, 改性沥青越稳定, 反之将直接影响改性沥青的使用性能。为了对比研究不同改性剂制备的高富 AH-50 改性沥青储存稳定性的差别, 考察改性沥青在 163 °C 烘箱中随储存时间变化时沥青与改性剂的相容情况, 并定义了储存稳定指数  $I_s$  作为表征改性沥青储存稳定性优劣的定量指标, 结果如表 4 和图 5 所示。  $I_s$  越接近 0, 表明改性剂与沥青的储存稳定性越好。

$$I_s = (\eta_{\text{上}} - \eta_{\text{下}}) / \eta_{\text{原样}} \quad (3)$$

式中,  $\eta_{\text{上}}$  和  $\eta_{\text{下}}$  分别为离析试验后上、下段样品的 135 °C 黏度;  $\eta_{\text{原样}}$  为未经储存稳定的原样的 135 °C 黏度。

不同聚合物制备的改性沥青储存稳定性差别较大<sup>[16-17]</sup>。SBS 和 EVA 改性沥青经储存后  $I_s$  均大于 1.0, 但前者偏离幅度明显较大, 随 SBS 掺量和储存时间的变化明显, 即 SBS 掺量为 3% 时储存稳定性优于掺量为 5% 时储存稳定性, 且随储存时间的增

表 4 聚合物改性沥青上下段黏度随储存时间的变化

Table 4 Variation of viscosity of different storage time for modified bitumen

沥青	12 h		24 h		36 h		48 h	
	$\eta_{\text{上}}$	$\eta_{\text{下}}$	$\eta_{\text{上}}$	$\eta_{\text{下}}$	$\eta_{\text{上}}$	$\eta_{\text{下}}$	$\eta_{\text{上}}$	$\eta_{\text{下}}$
PMB-3% SBS	1.95	1.43	3.08	1.12	6.14	1.33	4.55	1.22
PMB-5% SBS	5.96	1.99	16.19	1.85	24.75	1.65	18.87	1.97
PMB-9% 胶粉	1.47	8.48	2.23	9.06	1.29	10.87	1.24	8.83
PMB-4% EVA	1.58	1.42	1.43	1.33	1.47	1.31	1.48	1.32

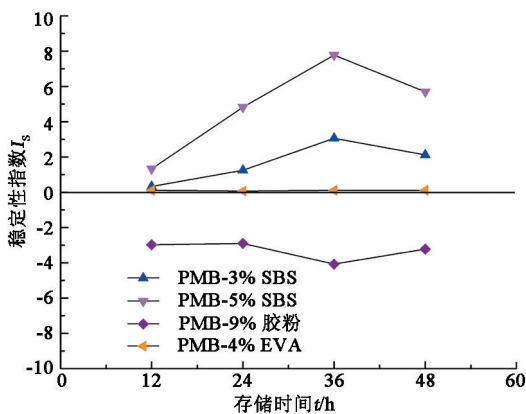


图 5 储存稳定性随储存时间的变化

Fig. 5 Storage time dependence of storage stability for different modified bitumen

为了更好地解释不同改性剂制备的改性沥青储存稳定性的差别, 通过荧光显微镜对改性沥青微观结构进行研究, 结果见图 6。试验范围内聚合物改性沥青是物理共混过程, 与沥青具有良好相容性的大分子聚合物加入沥青中后, 通过溶胀与吸附可使沥青的组构成发生一定的变化。显微图像中亮色部分为富聚合物相, 黑色部分为富沥青相。SBS 属于热塑性弹性体, 分子链中含有苯乙烯(硬段)和丁二烯(软段)<sup>[18]</sup>, 硬段中含有侧基, 软段中含有双键, 使得分子间作用力较弱, 当沥青与 SBS 在热状态下相容后, 沥青中的软组分可以渗透到分子链之间, 发生溶胀形成球状颗粒。溶胀过程使得沥青中产生弹性的网络结构, 全面改善沥青的性能, 但 SBS 与沥青形成非均相体系, 加之两者的溶解度参数相差较大, 在存储过程

加  $I_s$  呈现先增大后减小的趋势; 而 EVA 改性沥青的  $I_s$  仅略大于 0 且随储存时间变化幅度很小。这是由于 SBS 改性沥青中 SBS 与沥青的相容性差, 在高温储存时容易发生相分离使得 SBS 颗粒迁移至离析管的上段, 而 EVA 的溶解度参数和沥青的溶解度参数非常接近, 因而与沥青相容性较好, 分离程度较小。与之相反, 胶粉改性沥青属于热力学不稳定体系, 经储存后胶粉颗粒迁移至离析管下段, 导致下段样品中胶粉浓度增加,  $I_s$  小于 0。

中容易发生相分离, SBS 迁移至离析管上部。胶粉在沥青中的分散形态并不是圆形的, 而是条状或棒状, 有的类似于海星的形状。胶粉改性沥青中的胶粉颗粒在高速搅拌和高温作用下, 易发生解聚和脱硫, 以较小的颗粒分散在沥青中, 因此在受到高温或热储存情况下容易发生相分离。EVA 与沥青的相容性较好, 可以以絮状结构均匀分散在沥青中, 所制备的 EVA 改性沥青中 EVA 与沥青之间没有明显的界面, 结构稳定不易发生聚结、分层或离析。

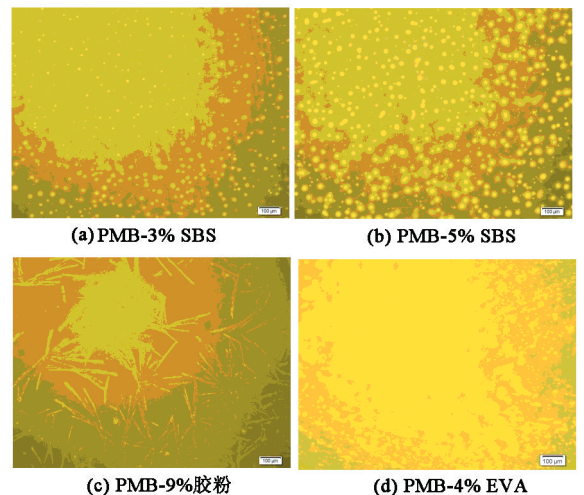


图 6 不同聚合物改性沥青的微观形态结构

Fig. 6 Microscopic morphology of polymer modified bitumen

### 3 结 论

(1) 相同频率下,  $G'$  明显小于  $G''$ , 改性沥青主要以黏性成分为主, 随温度的增加, 两者差值逐渐增

大,说明温度越高改性沥青黏性特征越明显;相同温度下,随频率的增加, $G'$ 和 $G''$ 均逐渐增大,且两者差值逐渐缩小并最终达到一个交点。

(2)与基质沥青相比,SBS和胶粉改性沥青的临界剪稀速率 $\dot{\gamma}_c$ 降低幅度远大于EVA改性沥青的 $\dot{\gamma}_c$ 的降低幅度,SBS和胶粉的掺加使沥青偏离牛顿流体的程度更大,对剪切的敏感性更高。

(3)SBS和胶粉与沥青的相容性差,在储存过程中SBS迁移至离析管上段,胶粉迁移至下段,而EVA与沥青的相容性较好,体系不易发生相分离。

### 参考文献:

- [1] 崔文峰. SBR反应共混改性沥青制备及结构与热储存稳定性研究[D]. 西安:西北师范大学化学化工学院,2008.  
CUI Wenfeng. Study on properties and high-temperature storage stability of SBR-chemical modification asphalt [D]. Xi'an: Chemistry and Chemical Engineering Institute of Northwest Normal University, 2008.
- [2] SENGOZ B, ISIKYAKAR G. Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen[J]. Construction and Building Materials, 2008,22(9):1897-1905.
- [3] YILDIRIM Y. Polymer modified asphalt binders[J]. Construction and Building Materials, 2007,21(1):66-72.
- [4] LU X, ISACSSON U. Modification of road bitumens with thermoplastic polymers[J]. Polymer Testing, 2000,20(1):77-86.
- [5] KHAKIMULLIN Y N, KIMELBLAT V I, CHEBOTAREVA I G, et al. Properties of bitumens modified by thermoplastic elastomers[J]. Mechanics of Composite Materials, 2000,36(5):417-422.
- [6] GOODRICH J L. Asphalt and polymer modified asphalt properties related to the performance of asphalt concrete mix[J]. Association of Asphalt Paving Technologists Proc, 1988,57:116-175.
- [7] AGUIRRE P G, TORRES L M, FONTEIX C, et al. Study of the morphology and rheological behavior of polymer-modified asphalt blends prepared with poly(styrene-*b*-butadiene-*b*-styrene) and poly(styrene-*b*[(butadiene)<sub>1-x</sub>-(Ethylene-co-Butylene)<sub>x</sub>]-*b*-Styrene) of star-like molecular architecture[J]. Polymer Engineering & Science, 2013,53(11):2454-2464.
- [8] 宋官龙,王楠洋,闫玉玲,等. 聚合物改性沥青研究进展[J]. 当代化工,2012,41(10):1066-1068.  
SONG Guanlong, WANG Nanyang, YAN Yuling, et al. Research advance in polymer modified asphalt[J]. Con-
- temporary Chemical Industry, 2012,41(10):1066-1068.
- [9] AIREY G D. Styrene butadiene styrene polymer modification of road bitumens[J]. Journal of Materials Science, 2004,39(3):951-959.
- [10] 陈华鑫. SBS改性沥青路用性能与机理研究[D]. 西安:长安大学公路学院,2006.  
CHEN Huaxin. Characteristics and mechanism of styrene butadiene styrene polymer modified asphalt[D]. Xi'an: Highway Institute of Chang'an University, 2006.
- [11] LUIGI F, LUIGI G, CESARE O R, et al. Structural change of bitumen in the recycling process by using rheology and NMR[J]. Ind Eng Chem Res, 2012,51(50):16346-16353.
- [12] FAWCETT A H, MCNALLY T, MCNALLY G M, et al. Blends of bitumen with polyethylenes[J]. Polymer, 1999,40(23):6337-6349.
- [13] FILIPPOVA A G, KIRILLOVA L G, OKHOTINA N A, et al. Viscosity of polymer-bitumen binders[J]. Colloid Journal, 2000,62(6):755-758.
- [14] GARCIA-MORALES M, PARTAL P, NAVARRO F J, et al. Effect of waste polymer addition on the rheology of modified bitumen[J]. Fuel, 2006,85(7):936-943.
- [15] 刘淑琼,范耀华,张玉贞. 我国几种道路沥青流变特性的初步研究[J]. 石油炼制与化工,1986(10):63-68.  
LIU Shuqiong, FAN Yaohua, ZHANG Yuzhen. Primary research on the rheological properties of the several kinds of road asphalt in our country[J]. Petroleum Processing and Petrochemical, 1986(10):63-68.
- [16] 王铁宝,王晓东,董允,等. 稳定剂对SBS/EVA复配改性沥青性能影响的研究[J]. 河北工业大学学报,2008,30(1):113-117.  
WANG Tiebao, WANG Xiaodong, DONG Yun, et al. Research of the stabilizer on the performance of SBS and EVA composite modified asphalt[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2008,30(1):113-117.
- [17] 尹继明,肖鹏,吕凡任. 胶粉改性沥青存储稳定性影响因素研究[J]. 中外公路,2012,32(2):246-248.  
YIN Jiming, XIAO Peng, LÜ Fanren. Research on storage stability of rubber modified asphalt[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2012,32(2):246-248.
- [18] 郝守良. SBS改性沥青的性能特点研究[J]. 科技与企业,2012(22):329-329.  
HAO Shouliang. Research on the performance characteristics of the SBS modified asphalt[J]. Technology & Business, 2012(22):329-329.

(编辑 刘为清)