

文章编号:1671-8879(2015)06-0042-07

# 添加剂型高模量沥青混合料作用机理

王立志,王 鹏,徐 强,耿立涛

(山东建筑大学 道路与交通工程高校重点实验室,山东 济南 250101)

**摘 要:**高模量沥青混合料以其优异的抗车辙效果而广受关注,尤其是添加剂型高模量沥青混合料,然而添加剂对沥青混合料性质的影响作用机理尚不明确。以傅里叶红外光谱仪(FIR)、沥青抽提仪、扫描电子显微镜(SEM)、动态剪切流变仪(DSR),研究高模量添加剂在沥青混合料中的作用机理。通过 FT-IR 官能团分析添加剂对沥青的影响,分析添加剂与石料的相互作用及沥青混合料性能,对高模量添加剂添加前后的沥青粘弹特性差异及沥青混合料性能进行对比分析。研究结果表明:长链脂肪族碳链的酯类与聚烯烃接枝复配的添加剂,不损伤沥青混合料低温抗裂性;拌和时熔点在  $150\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,粒径较小的添加剂 B 与热集料( $180\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 190\text{ }^{\circ}\text{C}$ )碰撞、被剪切并熔融分散,沥青抽提后其在石料表面残留少,贡献率较高;SEM 图像显示添加剂 B 在沥青中分散均匀,且灰度直方图的灰度值较集中;DSR 研究发现,熔融的添加剂使沥青弹性模量  $G'$  增大,相位角  $\delta$  降低,粘度增大,改善了沥青流变特性;少量未熔融颗粒碾压时嵌挤入混合料空隙中,增大了混合料内摩阻角,提高了沥青混合料的模量。

**关键词:**道路工程;高模量沥青混合料;红外光谱;电镜扫描;灰度直方图;粘弹特性

**中图分类号:**U414.701

**文献标志码:**A

## Mechanism research on additives of high modulus asphalt mixtures

WANG Li-zhi, WANG Peng, XU Qiang, GENG Li-tao

(Key Laboratory of University in Road and Traffic Engineering, Shandong Jianzhu University  
Jinan 250101, Shandong, China)

**Abstract:** High modulus asphalt mixtures have incurred a lot of attention because of great anti-rutting performance, especially additive-type high modulus asphalt mixtures. However, the effect of additive on the performance of asphalt mixture is still unknown. This paper investigated the mechanism of high modulus additives in the hot asphalt mixtures (HAM) by means of Fourier infrared spectrometer (FIR), asphalt extractor, scanning electron microscope (SEM) and dynamic shear rheometer (DSR). By analyzing the effect of additives on asphalt through FT-IR functional group, the interaction between additives and asphalt mixtures, and the properties of asphalt mixtures, this paper investigated and compared the difference of asphalt viscoelastic behavior before and after adding high modulus additives and the properties of asphalt mixtures. The results show that esters with long fatty group carbon chain and polyolefin are useful constituents to improve low-temperature performance of hot asphalt mixtures. When mixing additive B melts and disperses in hot aggregate ( $180\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 190\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) by colliding and shearing, its

收稿日期:2015-07-20

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2011EEQ008)

作者简介:王立志(1965-),男,山东临沂人,副教授,工学博士,E-mail:wz85503@126.com。

aggregate surface after extraction has little residual additive because of smaller grain size and right melting point (about  $150\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). So it makes more contribution than A. The SEM image shows that B is well-distributed in asphalt binder, displaying a centralized grey value in gray level histogram. DSR shows that asphalt binders which is added high modulus additives improves binder's viscoelastic behaviors, and obtains higher storage modulus  $G'$ , lower phase angle  $\delta$  and higher viscosity. Few unmelted additives interlock into mixtures' voids during compaction, which increases mixtures' internal friction angle and asphalt mixtures modulus. 2 tabs, 5 figs, 17 refs.

**Key words:** road engineering; high modulus asphalt mixture; Fourier infrared spectroscopy; scanning electron microscope; gray level histogram; viscoelastic behavior

## 0 引言

基于沥青路面补强和道路养护,法国最先开始高模量沥青混合料的研究应用,经过近20多年的研究观测,法国高模量沥青混合料在减轻路表车辙、提高基层沥青混合料刚度方面已取得显著成效,也得到多方认可<sup>[1-2]</sup>。法国高模量沥青混凝土标准 NF P98 140/141 指出, $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、10 Hz 复数模量大于等于 14 000 MPa 的沥青混凝土就是高模量沥青混凝土<sup>[3]</sup>。现行提高沥青混凝土模量的方法有<sup>[4]</sup>:①采用低标号硬质沥青作为胶结料制备高模量沥青混凝土;②以天然沥青或其他改性剂制备高模量改性沥青,实现沥青混凝土的模量改进;③以功能性添加剂直接在沥青混合料拌和时加入,以普通石油沥青为胶结料制备高模量沥青混凝土。后者由于工艺简单,不存在高模量改性沥青易离析、高温加热温度过高引发施工和易性不良的问题而受到追捧<sup>[5]</sup>。

目前,添加剂型高模量沥青混合料技术存在的主要问题是添加剂种类繁多,良莠不齐,多数添加剂会对沥青混合料低温性能及疲劳性能造成损伤<sup>[6-11]</sup>,而改善高模量沥青混凝土材料自身的疲劳特性是确保高模量沥青混凝土路面疲劳寿命不受影响的必要条件<sup>[12]</sup>,因此目前国内外对高模量沥青混合料的研究多集中在沥青混合料的疲劳、低温性能的改善,高模量沥青混合料的性能评价及其工程应用等问题上,而对添加剂在沥青混合料的作用机理研究较少。但正是因为对高模量添加剂在沥青混合料中的作用机理不明确,无法确切判断添加剂在沥青混合料中的存在状态,导致添加剂的功能复合时材料选择单一,仅偏向于提高沥青的抗车辙性能,难以兼顾低温抗裂性能,从而导致高模量沥青混合料性能不稳定。

为此,本文以2种自主研发、提高沥青混合料模

量同时不损伤其低温性能的添加剂为研究对象,通过傅里叶红外光谱(FIR)分析添加剂的官能团特性;通过沥青混合料抽提研究添加剂在沥青混合料中的熔融分散状况;模拟拌和过程中沥青与添加剂的作用,制备沥青添加剂共混样本;通过扫描电子显微镜(SEM)分析添加剂对沥青微观结构的影响;通过动态剪切流变仪(DSR)分析添加剂对沥青粘弹特性的影响。探讨添加剂型高模量沥青混合料的作用机理,并为有效选择及复配接枝性能优良的高模量添加剂提供一定数据支持。

## 1 试验原料

以优质石灰岩为集料,石灰岩磨细的矿粉为填料,以齐鲁 70# A 级沥青为胶结料,集料、填料和沥青均满足《公路沥青路面施工技术规范》(F40—2004)技术要求;以自主研发的 A、B 型 2 种高模量添加剂为研究对象,其中 A 型粒度较大,复配原料单一;B 型粒径分布在 10~20 目之间,综合多种原料复配。

## 2 沥青混合料组成设计及性能

选择中面层常用的连续密级配沥青混合料 AC-20,以马歇尔设计方法设计沥青混合料,其沥青用量 4.3%,设计空隙率 4.0%,分析沥青混合料的路用性能,其矿质混合料级配组成见下页表 1。高模量添加剂在沥青混合料拌和时直接加入拌锅。通过高模量添加剂为沥青混合料用量的 0.2%~0.6%<sup>[13]</sup>,本文选取用量为 0.35%。按照《公路沥青路面施工技术规范》(F40—2004)规定的试验方法,检测沥青混合料路用性能,动态模量施加半正矢荷载波形,在  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、10 Hz 条件下采用 UTM-100 测定,测定结果见下页表 2。未加入高模量添加剂的沥青混合料记为普通 AC-20,添加 A 型添加剂的沥青混合料记为 A 型+AC-20;添加 B 型添加剂的记为 B 型+AC-20。3 种沥青混合料的级配和沥青用量均相同。

表 1 矿质混合料级配组成

Tab. 1 Composition of gradation of mineral mixtures

混合料类型		各级标准筛孔(mm)的通过率/%												
		31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
AC-20	设计级配	100	100	97	87	72	55	35	22	15.2	10.8	8	6.5	5
	级配上限	100	100	100	92	80	72	56	44	33.0	24.0	17	13.0	7
	级配下限	100	100	97	87	72	55	35	22	15.2	10.8	8	6.5	5

表 2 沥青混合料路用性能

Tab. 2 Pavement performance of asphalt mixtures

混合料类型	动稳定度/(次·min <sup>-1</sup> )	低温破坏应变/10 <sup>-6</sup>	TSR/%	动态模量/MPa
普通 AC-20	1 250	2 096	81.5	12 933
A 型+AC-20	10 932	2 167	87.0	14 333
B 型+AC-20	14 001	2 323	92.3	15 437

由表 2 可见,2 种高模量添加剂对沥青混合料的动稳定度有大幅度提高,而低温破坏应变基本不变,同时 B 型添加剂对沥青混合料冻融劈裂强度比(TSR)改善明显。2 种添加剂都可以使普通沥青混合料 15 ℃、10 Hz 动态模量达到 14 000 MPa,因此这 2 种添加剂均能使沥青混合料达到高模量沥青混合料的模量要求,本文主要研究其提高模量的原因。

3 机理分析

沥青混合料模量的改善源自于其内摩阻角和粘聚力的变化,而这 2 个因素的改善可从沥青与集料的作用、沥青微观结构及其粘弹特性变化角度分析。因此,本文采用 DSR、FIR、SEM、沥青混合料抽提试验来研究添加剂在沥青混合料中的作用。

3.1 添加剂官能团特征

将 A、B 型添加剂及 70# 基质沥青进行红外分析,研究 2 种添加剂所具备的特定官能团,红外谱图见图 1。

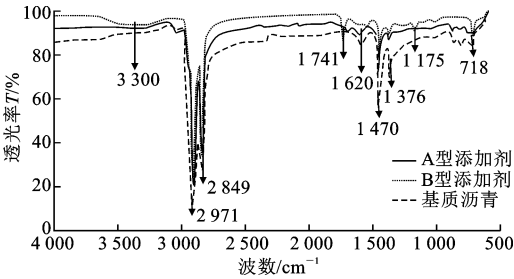


图 1 红外谱图

Fig. 1 Infrared spectrum

由图 1 可见,A 型、B 型和基质沥青样本均在 2 917 cm<sup>-1</sup>、2 850 cm<sup>-1</sup>处有强的吸收峰,相对而言沥青的吸收峰较宽,而添加剂的吸收峰较窄,强度较小,这些吸收峰是脂肪族或芳香族 C—H 的伸缩振

动引起的。在指纹区中 3 个样品均有吸收峰,B 添加剂在 1 741 cm<sup>-1</sup>处有个小的吸收峰,是由 C=O 的伸缩振动引起的,这说明 B 型添加剂中存在一定长链脂肪族酯类物质;A 型添加剂和沥青在 1 620 cm<sup>-1</sup>较弱的吸收峰是共轭双键 C=C 引起的;A、B 型添加剂 1 470 cm<sup>-1</sup>和 1 376 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰是 CH<sub>2</sub> 的弯曲振动,也就是说添加剂的原料之一可能是聚烯烃类物质,而沥青样本在这一区域的吸收峰主要是 C—CH<sub>3</sub> 不对称键或 CH<sub>2</sub> 对称键的伸缩振动;B 型添加剂在 1 175 cm<sup>-1</sup>附近的吸收峰表示可能存在磺酰胺类物质,718 cm<sup>-1</sup>附近的吸收峰是苯环上 C—H 键面外振动吸收峰。而辽宁省交通科学研究院通过高模量沥青混合料的低温性能研究得出:高模量外掺剂引入乙烯-乙酸乙烯酯后,可提高沥青混合料的低温抗裂性能<sup>[14]</sup>。综上,2 种添加剂中的官能团与沥青中相似,但 B 型添加剂的谱图吸收峰更丰富,而这种含有长链脂肪族碳氢链的酯类与聚烯烃类物质接枝的高聚物,其分子结构中存在柔性链段和刚性链段,与沥青共混后,其支化度大,长的脂肪族 C—H 链在沥青中溶胀并与沥青中大分子缠绕,起到类似加筋的作用;刚性链段溶胀后仍以聚集态存在,但体积增大,综合致使沥青增粘增弹。因此,添加剂复配的原则是分子结构刚柔并济,且具有分子链支化度大的长脂肪族 C—H 链。

3.2 添加剂与石料的作用

将烘干热集料(180 ℃~190 ℃)先与高模量添加剂干拌 90 s,观测是否结团;若未出现结团现象,再加入沥青和矿粉制备成高模量沥青混合料。利用水冷式抽提仪分离沥青和集料,并观察添加剂在沥青混合料中的熔融状态,抽提后集料的状态见下页图 2。

高模量添加剂是一种熔点在 130 ℃~150 ℃的高分子接枝聚合物。干拌时,集料温度较高,添加剂吸收集料传递的热,并在拌和锅的机械搅拌作用下,熔融并均匀分散在集料中,熔融的高聚物粘结在集料表面。由于高聚物分子中官能团与沥青中的相似,再加入沥青、矿粉拌和时,这些具有功能性官能

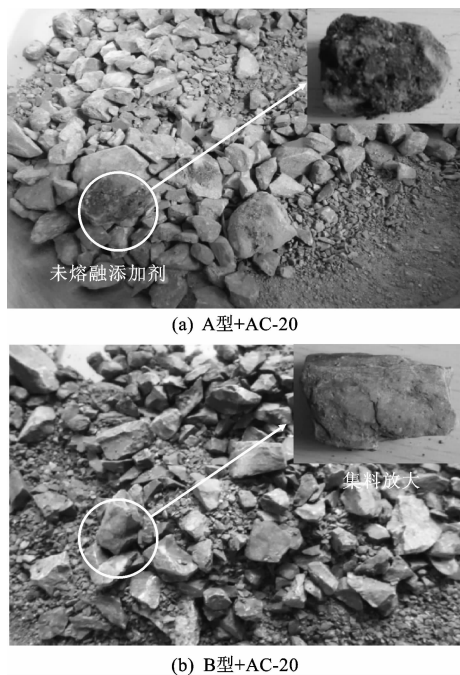


图 2 高模量添加剂抽提后状态

Fig. 2 State of high modulus additives after extraction

团的高聚物易与沥青组分相容,改善沥青胶结料的某些特性,从而提高沥青混合料的模量。而在热集料的碰撞、剪切综合作用下,实现直投式高模量添加剂与沥青的胶结。因此,集料的加热温度通常略高于普通沥青混合料的集料加热温度。

由图 2 可见,A 型+AC-20 抽提后,集料表面残留少部分未熔融的添加剂;B 型+AC-20 抽提后,集料表面干净,这说明 A 型添加剂比 B 型添加剂的贡献率要低,因此 B 型+AC-20 的高低温性能、水稳定性及动态模量都优于同条件下的 A 型+AC-20。从图 2 还可以看出,A 型+AC-20 抽提后集料表面仍有未熔融的添加剂,这说明添加剂粒径适当、分子结构合理,能迅速熔融分散在热集料中并与胶结料相互作用,是提高沥青混合料模量的原因。此外,这 2 种添加剂在拌和时未出现结团现象,若结团严重也会降低添加剂对沥青混合料性能优化的贡献率。而添加剂与胶结料的作用可以通过其对沥青微观结构和粘弹特性的影响来阐述。

### 3.3 添加剂对沥青的影响

采用 BM-100 高速剪切机制备添加剂与沥青共混样本。将添加剂直接加入到热沥青中,剪切时间 30 min,剪切转速 3 500 ~4 000 r/min,温度 180 ℃~190 ℃,分析沥青样本。高模量添加剂掺量为占沥青混合料质量的 0.35%,因此添加剂在沥青中掺量为 6%(质量分数)。

#### 3.3.1 微观结构研究

采用电镜扫描分析添加剂对沥青微观结构的影响,放大倍数 200 μm,电镜扫描结果见图 3。并采用 Matlab 数字图像处理功能分析电镜图片。Matlab 本身具有强大的数据可视化功能,可通过灰度直方图、等高线、像素分析对图片量化分析,而灰度直方图较直观。本文根据高模量添加剂与沥青在灰度上的差异,以 MATLAB 的 rgb2gray 函数将电镜扫描照片转化为灰度图,采用 MATLAB 的 imhist 函数创建图像灰度分布的一维直方图<sup>[15]</sup>,结果如下页图 4 所示。

添加剂在沥青中起到加筋作用,其实现的途径是在沥青中部分溶胀。从图 3 可以看出,基质沥青表面光滑,加入添加剂后沥青表面粗糙,添加剂仍以小颗粒状分散在沥青中。添加剂吸收沥青中的饱和分、芳香分等轻组分发生溶胀,而不可能与沥青完全

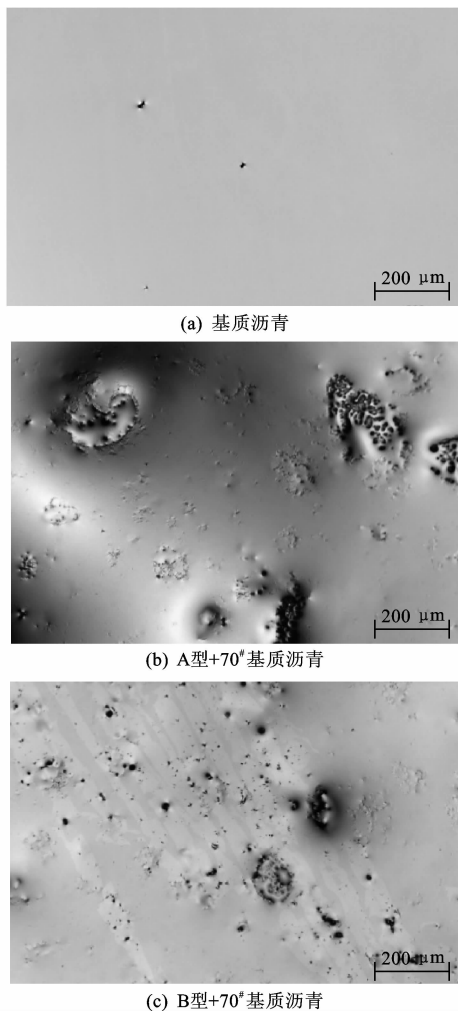


图 3 添加剂颗粒电镜扫描

Fig. 3 Additives particles in scanning electron microscope test (SEM)

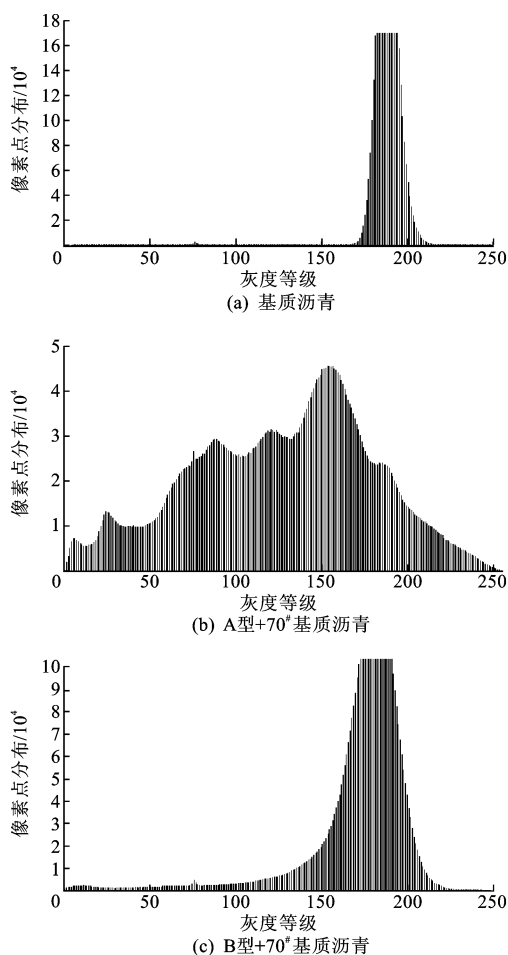


图4 一维灰度直方图

Fig. 4 One dimensional grey level histogram

相容。溶胀后,添加剂分子中长的脂肪族 C—H 链在沥青中舒展、拉伸,并与沥青中大分子碰撞、缠绕、交联,其余刚度较大的分子链段仍以聚集态的形式存在,也就是宏观可见的小颗粒,但其体积增大。因为溶胀导致沥青体系中供给大分子运动的有效空间减少,空穴量降低,增加分子碰撞的几率,并产生一定的空间位阻效应,所以致使沥青粘度增大,沥青混合料粘聚力增强。

高聚物颗粒的存在对沥青混合料是无害的,这些高聚物仍是沥青混合料中的弹性成分,即使未溶胀,在沥青混合料碾压后也可嵌挤到混合料空隙中,加强了混合料之间的相互作用力,使混合料之间更加紧密,致使混合料内摩阻角增加,从而提高了沥青混合料承受荷载的能力。若直接制成高模量沥青,大颗粒很难在沥青中均匀分散,热存储稳定性差、延度小是不可避免的。但这并不是指添加剂溶胀与否无关紧要,添加剂对沥青混合料性能改善就是通过其与沥青相互作用实现的。因此添加剂在沥青中的溶胀程度、分散状况均会影响其对沥青混合料性能

改善的效果。从图 3(b)可以看出 A 型添加剂在沥青中溶胀,但颗粒相对较大,致使沥青宏观表面粗糙。图 3(c)中,B 型添加剂以更加细小的颗粒分散在沥青中,分散相对比较均匀,存在少许大颗粒,但大颗粒的粒径也小于 A 型添加剂在沥青中粒径。这也是 B 型添加剂获得的沥青混合料高低温性能均优于 A 型添加剂的原因。从图 3 可以看出,B 型添加剂相对于 A 型添加剂,颗粒分散均匀,溶胀效果较好,这也可以通过图 4 进一步说明。

对于改性沥青材料,可以通过一维灰度直方图的灰度分布范围的宽窄说明材料的均匀程度,而材料中的颗粒大小、分布都会影响直方图中的灰度分布。图 4 中,70# 基质沥青灰度分布较集中,分布范围集中在 175~200 内;添加 A 型添加剂的沥青胶结料灰度分布范围较广,添加 B 型添加剂的沥青灰度值分布范围相对集中。这是因为 70# 基质沥青为均相材料,而添加高模量的沥青胶结料为非均相材料,颗粒的存在致使其灰度分布较基质沥青宽。对比 A、B 型添加剂的灰度直方图,A 型添加剂的灰度在 0~255 范围内都有,而 B 型添加剂的灰度相对比较集中,这说明 A 型添加剂在基质沥青内部分散均匀性差,与沥青的胶溶程度不高,不同粒径的添加剂微粒仍然独立存在于沥青胶体结构体系之外。而 B 型添加剂与沥青的胶溶程度良好,能够最大程度将添加剂材料自身的性能贡献到沥青胶结料中,因此获得的沥青混合料性能更佳。综上,添加剂可以在沥青中胶溶,致使沥青粘度增大;而未溶大颗粒在碾压时可嵌挤到沥青混合料空隙中,增大沥青混合料的内摩阻角,从而提高沥青混合料模量。

### 3.3.2 沥青粘弹性

采用动态剪切流变仪 CAV100,分析添加剂对沥青复数模量  $G^*$ 、弹性模量  $G'$ 、损失模量  $G''$ 、相位角  $\delta$  等粘弹特性的影响。沥青厚度 1 mm,应力水平 120 Pa,正弦波加载,频率 1.59 Hz,其各项指标随温度的变化趋势见下页图 5。

沥青的复数模量  $G^*$  用以度量材料重复剪切变形时的总阻力,相当于沥青的劲度模量,由弹性部分  $G'$  (可恢复部分) 和粘性部分  $G''$  (不可恢复部分) 组成<sup>[16]</sup>。从图 5(a)~(c)可以看出,随着温度增加,沥青的  $G^*$ 、 $G'$ 、 $G''$  均逐渐降低。温度影响材料分子的热运动,通常温度越高,分子热运动越剧烈,越有利于分子链段的运动<sup>[17]</sup>,则相同受力情况下材料的变形能力就越大,材料的劲度模量就越低,即  $G^*$  随温度升高而降低。而同温度时,加入添加剂后沥青

相位角  $\delta$  表征材料弹性和粘性成分相对比例,  $\delta$  越大, 材料的粘性越大, 弹性越小; 越小则反之。图 5(d) 中基质沥青相位角随温度增加逐渐升高, 几乎接近粘性流体 ( $\delta = 90^\circ$ ), 而加入添加剂后沥青的  $\delta$  却随温度升高略有降低, 这说明添加剂的加入提高了沥青弹性成分的相对比例。在  $G^*$  绝对值相同时, 若  $\delta$  明显较小, 则说明沥青更富有弹性, 荷载卸载后变形更容易恢复, 这也是加入添加剂后沥青的  $\delta$  远小于基质沥青  $\delta$  的原因。而由于 A 型添加剂在沥青中的分散效果较差, 也使 A 型添加剂在综合性能上不如 B 型添加剂。综上, 添加剂的作用使  $G'$  增大,  $\delta$  降低, 增加沥青弹性成分的相对比例, 提高沥青抵抗外力的能力, 改善沥青高弹态的温度稳定性; 而添加剂在沥青中颗粒大小、分散熔融状况均能影响其对沥青性能改善的效果。

## 4 结 语

(1) 通过 FT-IR 官能团分析及添加剂对沥青的影响研究得出, 分子结构中软硬段比例合适, 具有支化度大、含长碳氢链的柔性链段与苯环刚性链段复合的接枝化合物, 能部分溶胀于沥青中, 柔性链段溶胀舒展、拉伸, 并与沥青中分子碰撞缠绕, 刚性链段以聚集态存在, 降低沥青体系的空穴量, 起到加筋、增粘、增弹的效果, 改善沥青的粘弹特性, 增加沥青混合料的粘聚力。

(2) 通过添加剂与石料的相互作用及沥青混合料性能研究, 得出高模量添加剂通过拌和过程中与热集料的碰撞、剪切, 实现熔融分散, 并与沥青胶结, 集料的热效应是关键, 因此集料加热温度应控制在  $180\text{ }^\circ\text{C} \sim 190\text{ }^\circ\text{C}$ 。而添加剂粒径适当, 分子结构合理, 熔融分散效果较好, 贡献率较大, 获得的沥青混合料模量大、高低温性能良好。

(3) 从添加高模量添加剂前后沥青粘弹特性差异及沥青混合料性能对比分析得出: 高聚物提高沥青混合料中的弹性成分, 残存在沥青中的添加剂微粒在施工过程中由于高温的作用而软化, 再经过碾压后嵌挤到混合料的空隙中, 加强了混合料之间的相互作用力, 使混合料之间更加紧密, 内摩阻角增大, 增加沥青混合料承受荷载能力, 从而提高了沥青混合料的模量。

## 参考文献:

## References:

[1] Cai X, Wang D Y. Evaluation of rutting performance

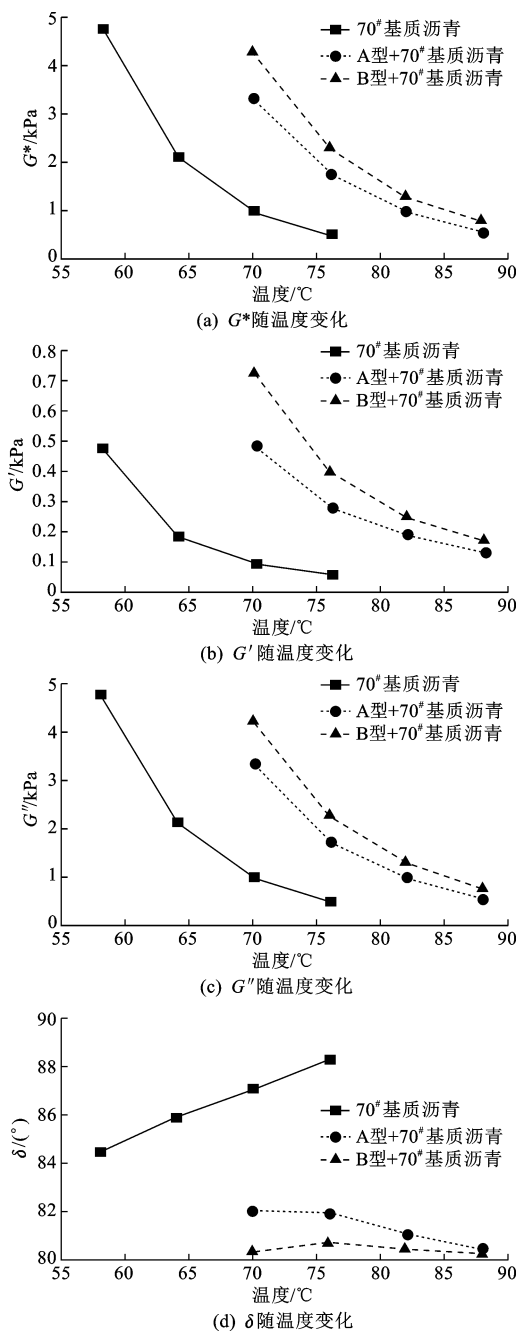


图 5 沥青粘弹特性随温度变化

Fig. 5 Viscoelastic behavior changes of asphalt binder as temperature changes

$G^*$ 、 $G'$ 、 $G''$  远大于基质沥青的数值。这主要是因为高聚物与沥青共混后, 在沥青中形成类似海岛状结构, 电镜扫描  $200\text{ }\mu\text{m}$  下观测高聚物以细小颗粒状存在于沥青中, 在外力作用下, 这些细小颗粒成为应力集中点, 吸收外力产生的多余能量, 也致使材料产生相同变形时所承受的应力水平更大, 从而使沥青的  $G^*$ 、 $G'$ 、 $G''$  都大于同温度下的基质沥青数值。而通过对比, 添加剂对  $G'$  的提高幅度是较大的, 这也可以通过  $\delta$  的变化加以说明。

- of asphalt mixture based on the granular media theory and aggregate contact characteristics[J]. Road Materials and Pavement Design, 2013, 14(2): 325-340.
- [2] 王 刚, 刘黎萍, 孙立军. 高模量沥青混凝土抗变形性能研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2012, 40(2): 217-222.
- WANG Gang, LIU Li-ping, SUN Li-jun. Research on anti-deformation properties of high modulus asphalt concrete[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40(2): 217-222. (in Chinese)
- [3] 法国 RST“沥青混合料的设计”工作组. 法国沥青混合料设计指南[R]. 南京: 江苏省交通科学研究院股份有限公司, 2010.
- French Working Team of RST“Bituminous Mixtures Design”. LPC bituminous mixtures design guide[R]. Nanjing: Jiangsu Transportation Research Institute, 2010. (in Chinese)
- [4] 杨 朋. 高模量沥青及其混合料特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- YANG Peng. Characteristic behavior of high modulus asphalt and high modulus asphalt mixtures[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [5] Jean-Francois C. Development and use of hard-grade asphalt and of high-modulus asphalt mixes in France [J]. Perpetual Bituminous Pavement, Transportation Research Board, 2001, 503(12): 12-31.
- [6] 欧阳伟. 高模量沥青混凝土抗车辙性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
- OUYANG Wei. Study on application technology of high modular asphalt concrete[D]. Shenyang: North-eastern University, 2010. (in Chinese)
- [7] Wu C Y, Jing B, Li X Y. Performance evaluation of high-modulus asphalt mixture[J]. Advanced Materials Research, 2011, 311-313: 2138-2141.
- [8] Lee H J, Lee J H, Park H M. Performance evaluation of high modulus asphalt mixtures for long life asphalt pavements[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(5): 1079-1087.
- [9] Li Y L, Tan Y Q, Meng L. Application study on high modulus asphalt concrete in bridge pavement[J]. Advanced Materials Research, 2011, 243-249: 4424-4427.
- [10] Hofko B. Addressing the permanent deformation behavior of hot mix asphalt by triaxial cyclic compression testing with cyclic confining pressure[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2015, 2(1): 17-29.
- [11] 陈静云, 孙依人, 张 岩, 等. 沥青混合料动态粘弹性行为分析的模拟方法[J]. 中国公路学报, 2014, 27(8): 11-16.
- CHEN Jing-yun, SUN Yi-ren, ZHANG Yan, et al. Modeling method for analysis of dynamic viscoelastic behavior of asphalt mixture [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(8): 11-16. (in Chinese)
- [12] 周庆华, 沙爱民. 高模量沥青混凝土路面疲劳研究[J]. 土木工程与管理学报, 2013, 30(1): 30-34.
- ZHOU Qing-hua, SHA Ai-min. Research on fatigue performance for high modulus asphalt concrete pavement[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2013, 30(1): 30-34. (in Chinese)
- [13] 李洪斌. 高模量沥青混合料路用性能的试验研究[J]. 公路, 2011(2): 123-126.
- LI Hong-bin. Research on pavement performance of high modulus asphalt concrete [J]. Highway, 2011(2): 123-126. (in Chinese)
- [14] 李洪斌. 高模量沥青混合料低温性能的试验研究[J]. 公路, 2011(11): 169-171.
- LI Hong-bin. Research on low-temperature pavement performance of high modulus asphalt concrete [J]. Highway, 2011(1): 169-171. (in Chinese)
- [15] 刘益新, 郭依正. 灰度直方图特征提取的 MATLAB 实现[J]. 电脑知识与技术, 2009, 5(32): 9032-9034.
- LIU Yi-xin, GUO Yi-zheng. Gray-scale histograms feature extraction using MATLAB [J]. Computer Knowledge and Technology, 2009, 5(32): 9032-9034. (in Chinese)
- [16] 刘宏富, 郑建龙, 钱国平, 等. 硬质沥青及其混合料疲劳性能对比试验研究[J]. 中外公路, 2011, 31(5): 205-301.
- LIU Hong-fu, ZHENG Jian-long, QIAN Guo-ping, et al. Research on fatigue performance for hard asphalt and asphalt mixture[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2011, 31(5): 205-301. (in Chinese)
- [17] 莫石秀. 湖沥青改性沥青作用机理及混合料性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- MO Shi-xiu. Study on Trinidad lake asphalt modified asphalt action mechanism and mixture performance [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)