

文章编号:1007-9629(2021)05-1024-09

# 高黏SBS改性沥青的流变性能与化学特性

黄卫东<sup>1</sup>, 高杰<sup>1</sup>, 郝庚任<sup>2</sup>, 刘力源<sup>1,3</sup>, 吕泉<sup>1</sup>

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 香港理工大学建设及环境学院, 香港 999077; 3. 山西交通科学研究院集团有限公司黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室, 山西太原 030006)

**摘要:**为研究SBS掺量、稳定剂含量和老化对高黏SBS改性沥青流变性能与化学特性的影响,针对SBS掺量和稳定剂含量不同的高黏SBS改性沥青,分别采用动态剪切流变仪(DSR)和凝胶渗透色谱(GPC)试验对老化(短期老化和长期老化)前后的改性沥青进行流变性能与化学特性分析。结果表明:相位角主曲线可以很好地表征高黏SBS改性沥青在老化过程中的流变性能;高黏SBS改性沥青中由于广泛的交联作用,使得SBS中形成了大量共价键,因此即便是长期老化,仍有足够数目的共价键来维持SBS结构的完整性;相比无稳定剂的SBS改性沥青,稳定剂的添加大幅度改善了高黏SBS改性沥青的性能,但在已有稳定剂的基础上再增加稳定剂的含量对其性能的提升有限;SBS掺量高的改性沥青需要更长的搅拌时间,以保证SBS在沥青中发生充分溶胀;稳定剂含量高的改性沥青也需要更长的搅拌时间,使SBS分子之间发生交联作用。

**关键词:**高黏SBS改性沥青;老化;流变性能;化学特性;重均相对分子量

中图分类号:U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.05.017

## Rheological Properties and Chemical Properties of High Viscosity SBS Modified Asphalt

HUANG Weidong<sup>1</sup>, GAO Jie<sup>1</sup>, HAO Gengren<sup>2</sup>, LIU Liyuan<sup>1,3</sup>, LÜ Quan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Construction and Environment, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China; 3. Key Laboratory of Highway Construction and Maintenance Technology of Ministry of Transport in Loess Region, Shanxi Transportation Research Institute Group Co., Ltd., Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** In order to study the influence of SBS content, stabilizer content and aging on the rheological properties and chemical properties of high viscosity SBS modified asphalt, dynamic shear flow was adopted for high viscosity SBS modified asphalt with different SBS content and stabilizer content. The rheological properties and chemical characteristics of modified asphalt before and after aging (short-term aging and long-term aging) were tested by the dynamic shear rheometer (DSR) and gel permeation chromatography (GPC) tests. The results show that the phase angle master curve can well characterize the changes in rheological properties of high viscosity SBS modified asphalt during aging; in high viscosity SBS modified asphalt due to extensive cross-linking, a large number of covalent bonds are formed in SBS. Therefore, even after long-term aging, there are still enough covalent bonds to maintain the integrity of the SBS structure; compared with the SBS modified asphalt without stabilizers, the addition of stabilizers greatly improves the performance of the high viscosity SBS modified as-

收稿日期:2020-04-18; 修订日期:2020-05-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778481, 51978518, 51908426)

第一作者:黄卫东(1970—),男,四川安岳人,同济大学研究员,博士生导师,博士.E-mail: hwd@tongji.edu.cn

通讯作者:吕泉(1991—),男,浙江义乌人,同济大学在读博士后,博士.E-mail: 1991lvquan@tongji.edu.cn

phalt. But increasing the content of stabilizer if stabilizer is already contained the performance, then has only limited improvement high content of SBS modified asphalt requires a longer mixing time to make SBS fully swell and stabilize in the asphalt. The higher the content of the agent, the longer blending time is needed to make the cross-linking between the SBS molecules occur.

**Key words:** high viscosity SBS modified asphalt; aging; rheological property; chemical property; weight average relative molecular mass

排水沥青路面具有优良的排水和降噪等功能,随着海绵城市理念的推广,其在全球得到越来越广泛的应用<sup>[1]</sup>.同时,高黏改性沥青因其优良的性能被大量应用在排水沥青路面中.目前高黏改性沥青多采用高掺量(6%~12%)SBS<sup>[2-3]</sup>进行制备.随着日本经验的推广,中国于2002年后大量使用高黏改性沥青.目前,中国排水路面使用较多的是日本TPS(Tafpack-super)改性沥青,高黏SBS改性沥青应用较少,仅在厦门城市道路中成功使用<sup>[3]</sup>.研究人员对这2种高黏沥青进行了大量对比研究.如曹庭维<sup>[4]</sup>采用动态剪切流变仪(DSR)对TPS改性沥青的复数剪切模量、车辙因子及抗剪切蠕变特性进行研究,结果表明,随着TPS掺量的增加,改性沥青的复数剪切模量、车辙因子及抗剪切变形能力均得到显著提高.另外,SBS改性沥青的性能介于TPS掺量为8%~12%的TPS改性沥青之间.刘少鹏等<sup>[5]</sup>研究表明,SBS掺量为6%的改性沥青零剪切黏度略大于高黏TPS改性沥青,远大于SBS掺量为5%的改性沥青.李红平等<sup>[6]</sup>比较分析了SBS改性沥青和TPS改性沥青排水路面的性能,发现2种改性沥青均满足排水沥青混凝土路面相关规定;Lu等<sup>[7]</sup>对比了老化前后改性沥青与基质沥青复数模量、相位角的变化规律,发现老化后高掺量SBS改性沥青的相位角非但没有减小,还出现了一定程度的上升.上述研究均表明高黏SBS改性沥青具有较好的应用前景,然而这些研究大多侧重于高黏SBS改性沥青与TPS改性沥青的性能对

比,有关高黏SBS改性沥青流变性能与化学特性的研究较少.

本研究采用DSR试验和凝胶渗透色谱(GPC)试验研究了SBS掺量(质量分数,文中涉及的掺量、含量等均为质量分数)、稳定剂含量及老化对高黏SBS改性沥青流变性能与化学特性的影响,以期高黏SBS改性沥青在排水沥青路面中更广泛的应用提供参考.

## 1 试验

### 1.1 原材料

基质沥青选用埃索70<sup>#</sup>沥青;SBS选用独山子石化产星型SBS(T161B);稳定剂选用硫磺,其粒度分布如表1所示,满足GB/T 2449—2006《工业硫磺》中优等品的要求.

表1 硫磺的粒度分布

Particle size/ $\mu\text{m}$	>150	75-150
Sieve residue (by mass)/%	0	0.4

分别制备SBS掺量为4.5%,稳定剂含量为0.15%的普通SBS改性沥青;SBS掺量为7.5%、9.0%和12.0%,稳定剂含量为0.15%的高黏SBS改性沥青;SBS掺量为9.0%,稳定剂含量为0、0.05%、0.10%的高黏SBS改性沥青.各沥青的基本性能按照JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》测试得到,结果见表2.

表2 各沥青的制备方案及基本性能

Table 2 Composition details and basic performances of asphalts

Asphalt No.	w(SBS)/%	w(sulphur)/%	Penetration/(0.1 mm)	Softening point/ $^{\circ}\text{C}$	Ductility(5 $^{\circ}\text{C}$ )/cm	Viscosity(135 $^{\circ}\text{C}$ )/(Pa·s)
E70	0	0	64.0	50.9	—	0.493
E4.5R0.15w	4.5	0.15	53.2	98.8	42.40	2.922
E7.5R0.15w	7.5	0.15	40.3	110.9	34.15	29.396
E9R0.15w	9.0	0.15	39.1	112.3	40.35	59.363
E9R0w	9.0	0	44.4	84.0	36.00	5.968
E9R0.05w	9.0	0.05	40.2	105.9	36.05	50.193
E9R0.1w	9.0	0.10	36.4	102.3	37.75	51.365
E12R0.15w	12.0	0.15	39.5	115.7	44.15	89.167

## 1.2 试验方法

在180℃下,将SBS分次加入基质沥青中,采用高速剪切机剪切、挤压30 min;再用搅拌机搅拌60 min;最后加入稳定剂,再次搅拌90 min.分别对原样、短期老化(旋转薄膜烘箱老化(RTFOT))和长期老化(压力老化(PAV))的沥青进行DSR试验和GPC试验,并对试验结果进行分析。

### 1.2.1 动态剪切流变试验

采用DSR测试并分析沥青的流变性能,其频率扫描测试范围为0.1~30.0 Hz.本文以10℃为间隔,进行5~75℃的频率扫描试验,其中5~25℃使用8 mm转子,35~75℃使用25 mm转子。

根据频率扫描试验结果,以25℃为参考温度,根据时温等效原理,采用Sigmoidal模型构建沥青的复数剪切模量主曲线<sup>[8]</sup>,其中移位因子由模型自动调整,以获得最佳拟合效果.该移位因子同样用于平移相位角,并基于Double Logistic模型拟合得到相位角主曲线<sup>[9]</sup>.复数剪切模量 $G^*$ 和相位角 $\delta$ 计算表达式为:

$$\lg |G^*| = \nu + \frac{\alpha}{1 + \exp(\beta + \gamma \lg f_r)} \quad (1)$$

$$\delta = \delta_p - \delta_p \cdot H(f_r - f_p) \cdot \left(1 - \exp[-s_R \cdot \lg^2 \frac{f_p}{f_r}]\right) + \delta_L \cdot H(f_p - f_r) \cdot \left(1 - \exp[-s_L \cdot \lg^2 \frac{f_p}{f_r}]\right) \quad (2)$$

式中: $f_r$ 为换算频率; $\nu$ 为 $\lg |G^*|$ 低频渐近值; $\alpha$ 为 $\lg |G^*|$ 高频渐近值与低频渐近值的差值; $\beta$ 、 $\gamma$ 为形状参数; $f_p$ 为相位角达到平台区域的频率; $\delta_p$ 为相位角平台值; $s_R$ 为相位角平台区右侧形状参数; $\delta_L$ 、 $s_L$ 为控制相位角平台左侧形状的参数; $H(f_r - f_p)$ 和 $H(f_p - f_r)$ 为单位阶跃函数,将相位角分为左右两个部分。

### 1.2.2 凝胶渗透色谱试验

采用PL-GPC50型凝胶渗透色谱仪分析改性沥青的化学特性,3根色谱柱长均为300 mm,检测器为紫外吸收光谱检测器;流动相为四氢呋喃,流速为1.0 mL/min;试样溶液质量浓度为2 mg/mL,进样量为100  $\mu$ L。

参考美国路易斯安纳州立大学的研究成果<sup>[10]</sup>,将SBS改性沥青的GPC曲线与时间轴所围成的面积分为3个区域:重均相对分子质量( $M_w$ )大于19 000的部分为聚合物区域, $M_w$ 在3 000~19 000的部分为沥青质区域, $M_w$ 小于3 000的部分为轻质组分区域.SBS改性沥青的GPC曲线分割示意图如图1所示。

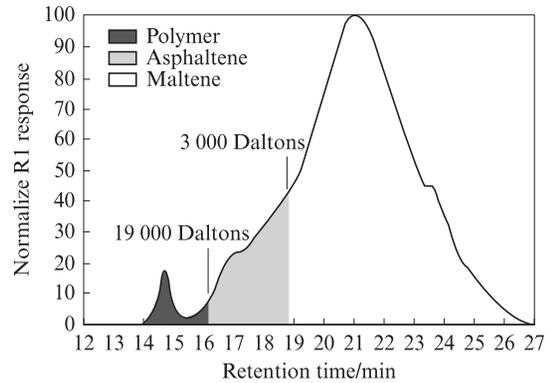


图1 改性沥青的GPC曲线分割示意图

Fig. 1 GPC curve segmentation diagram of modified asphalt

SBS的 $M_w$ 和数均相对分子质量( $M_n$ )计算表达式为:

$$M_w = \sum_{i=1}^n \frac{w_i \times M_i}{w_i} \quad (3)$$

$$M_n = \sum_{i=1}^n \frac{N_i \times M_i}{N_i} \quad (4)$$

式中: $M_i$ 为单链的相对分子质量; $w_i$ 为单链的链质量; $N_i$ 为单链的链数目。

### 1.2.3 老化试验

试验采用的旋转薄膜烘箱老化(RTFOT)和压力老化(PAV)试验均严格按照JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程规范》进行。

## 2 结果及讨论

### 2.1 SBS掺量对高黏SBS改性沥青流变性能与化学特性的影响

2.1.1 老化前后不同SBS掺量改性沥青的流变性能  
在稳定剂含量为0.15%条件下,研究了SBS掺量对原样、短期老化及长期老化沥青复数剪切模量主曲线和相位角主曲线的影响,并与基质沥青E70进行对比,如图2所示。

由图2可见:(1)老化前后,无论SBS掺量大小,各沥青的复数剪切模量均随着频率的增大而不断上升;短期老化对沥青复数剪切模量没有显著影响,但长期老化后,各SBS改性沥青的复数剪切模量基本无差异。(2)老化前,SBS改性沥青的相位角主曲线形状完全不同于基质沥青,随着频率的降低,SBS改性沥青的相位角先升高后降低,且存在平台期.在该平台区,SBS改性沥青中沥青相的黏性作用和SBS相的弹性作用达到一个平衡状态;短期老化后,SBS改性沥青的相位角主曲线形状基本没有发生改变;长期老化后,SBS改性沥青E4.5R0.15w的相位角平台

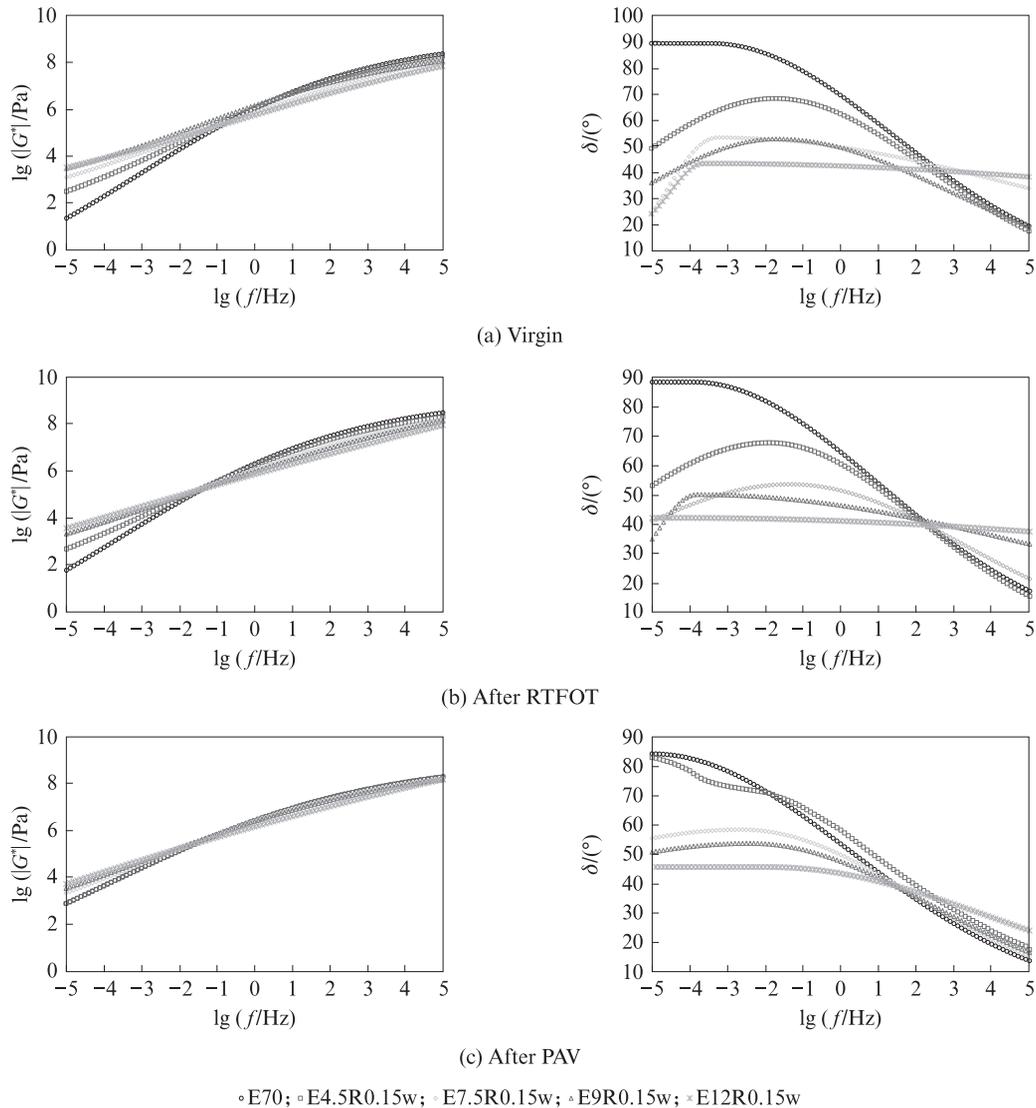


图2 SBS 掺量对改性沥青复数剪切模量主曲线和相位角主曲线的影响  
 Fig. 2 Influence of SBS content on the main curve of complex shear modulus and phase angle of modified asphalt

区消失,但SBS改性沥青E7.5R0.15w、E9R0.15w、E12R0.15w的相位角平台区仍然存在,由此可见,长期老化导致SBS降解,但SBS掺量较高的改性沥青降解之后仍然有足够的SBS来保证相位角平台区的呈现.

2.1.2 不同SBS掺量高黏SBS改性沥青的流变性能定量分析

就采用同种基质沥青制备的SBS改性沥青而言,若相同老化条件下沥青相的老化程度一致,则平台区的相位角值就可以用来比较相同老化状态下SBS改性沥青中SBS相的作用.表3列出了SBS改性沥青的平台区相位角值.由表3可知,老化前后,改性沥青平台区相位角值均随SBS掺量的增加而减小.由此可见,SBS掺量确实是相位角主曲线中平台区形成,以及决定平台区所处位置的主要

因素.

由于不同老化状态下沥青相的老化程度不一样,对于同种沥青在不同老化状态下SBS相的降解程度不能用平台区相位角值来表征.表4为基质沥青老化前后平台区处的相位角值和频率值.由表4可知:随着老化程度的增大,基质沥青平台区处的相位角值不断下降;在不同老化状态下,基质沥青平台区处的频率值依次为 $f_p(\text{PAV}) < f_p(\text{RTFOT}) < f_p(\text{virgin})$ ,同时由于基质沥青的相位角曲线到达平台区后不会再随着频率发生改变,因此可以认为当频率 $f_p$ 等于 $f_p(\text{PAV})$ 时,3种老化状态的沥青均已处于各自的平台区,即 $f_p < f_p(\text{PAV})$ 时,三者的相位角均为恒定值.

假设在相同老化条件下,每种SBS改性沥青中沥青相的老化程度均与基质沥青的老化程度相同,那么相位角主曲线在经过平台区后的下降主要就是

表3 SBS改性沥青平台区相位角值  
Table 3 Phase angle values of SBS modified asphalt platform area

Status	E70	E4.5R0.15w	E7.5R0.15w	E9R0.15w	E12R0.15w
Virgin	89.46	68.39	53.41	52.90	43.47
RTFOT	88.41	67.76	53.61	50.15	41.41
PAV	84.47	67.96	58.56	53.90	45.77

表4 基质沥青老化前后平台区处的相位角值和频率值  
Table 4 Phase angle value and frequency value of platform area before and after aging of matrix asphalt

Index	Virgin	RTFOT	PAV
$\delta/(\circ)$	89.46	88.41	84.47
$\lg(f_p/\text{Hz})$	-3.41	-3.92	-5.00

由SBS相的作用造成的,因此可以采用SBS改性沥青与对应状态下基质沥青平台区的相位角差值,即 $\Delta\delta$ 来反应SBS相在低频区的力学贡献. $\Delta\delta(f_p=10^{-3.5}\text{Hz})$ 随SBS掺量的变化如图3所示.由图3可知:(1)当SBS掺量为4.5%时,SBS改性沥青的 $\Delta\delta$ 随着老化的进行不断减小,说明SBS发生降解,使SBS相的网络结构遭到破坏,进而造成SBS相的力学贡献下降;(2)短期老化后,SBS掺量为7.5%和12.0%的高黏SBS改性沥青的 $\Delta\delta$ 反而增大,说明SBS掺量较高的改性沥青经过短期老化后,SBS相的力学贡献增大.这可能是由于在最初制备时,采用了普通SBS改性沥青的搅拌时间,造成一部分SBS未来得及发生溶胀和交联,而在短期老化的加热和搅拌中,这部分SBS会发生进一步的溶胀和交联,使

短期老化后的SBS相的力学强度增大,所以SBS掺量高的改性沥青在制备时需要更长的搅拌时间来使SBS在沥青中发生充分溶胀;(3)长期老化后,各SBS改性沥青的 $\Delta\delta$ 均明显减小,可见长期老化对SBS的降解作用要远远大于短期老化.

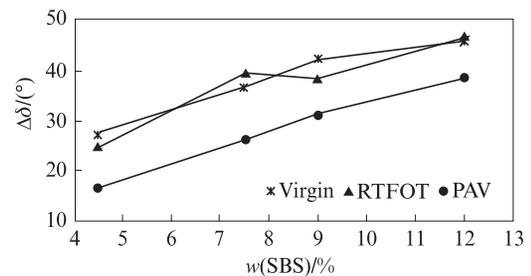


图3 SBS改性沥青平台区相位角差值  
Fig. 3 Difference of phase angle of SBS modified asphalt platform area

### 2.1.3 不同SBS掺量高黏SBS改性沥青的化学特性分析

高黏SBS改性沥青中SBS的 $M_w$ 和 $M_n$ 随SBS掺量的变化如图4所示.为分析聚合物的降解幅度,分别计算了两者的变化率也置于图4中.

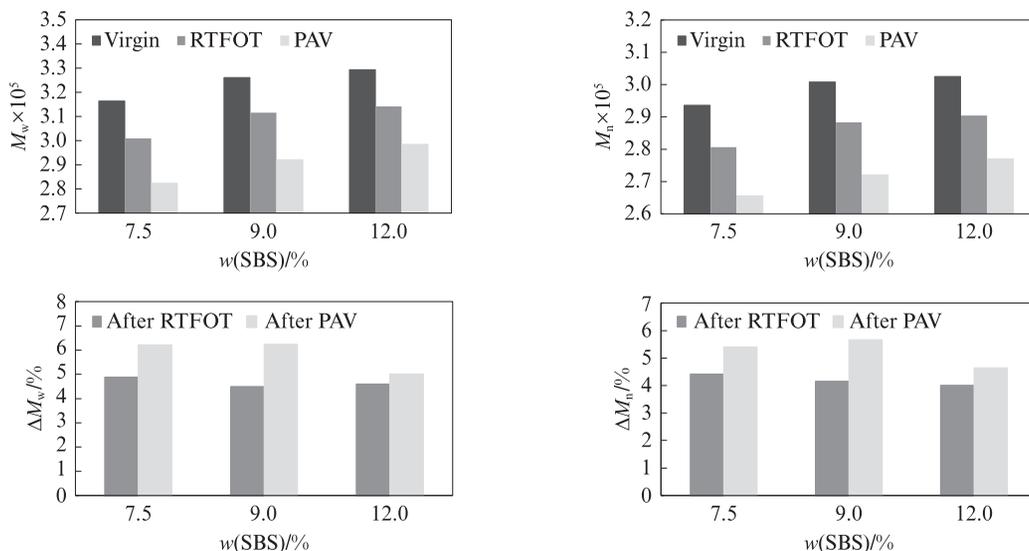


图4 不同SBS掺量高黏SBS改性沥青中聚合物的重均相对分子质量和数均相对分子质量变化  
Fig. 4 Changes in weight average relative molecular mass and number average relative molecular mass of polymers in high viscosity SBS modified asphalt with different SBS contents

由图4可知,  $M_w$  和  $M_n$  的变化趋势完全一致. 本文选用  $M_w$  分析高黏SBS改性沥青的化学特性. 由图4还可知:(1)随着SBS掺量的增加,聚合物的  $M_w$  不断增大,这是因为在相同稳定剂含量和相同制备工艺条件下,SBS掺量越高,SBS分子间发生交联反应的机会就越大,从而使SBS的链长不断增长、 $M_w$  不断增大;(2)随着老化的进行,SBS改性沥青中聚合物的  $M_w$  减小,这是因为随着老化的进行,之前交联反应所形成的共价键(S键)被破坏;(3)长期老化过程中聚合物  $M_w$  的减小幅度大于短期老化,但差

距不大.

## 2.2 稳定剂含量对高黏SBS改性沥青流变性能与化学特性的影响

### 2.2.1 老化前后不同稳定剂含量SBS改性沥青的流变性能分析

稳定剂会在SBS之间形成共价键<sup>[11]</sup>,能够增强SBS之间的交联作用.在SBS掺量为9.0%的条件下,不同稳定剂含量高黏SBS改性沥青的复数剪切模量主曲线和相位角主曲线如图5所示.

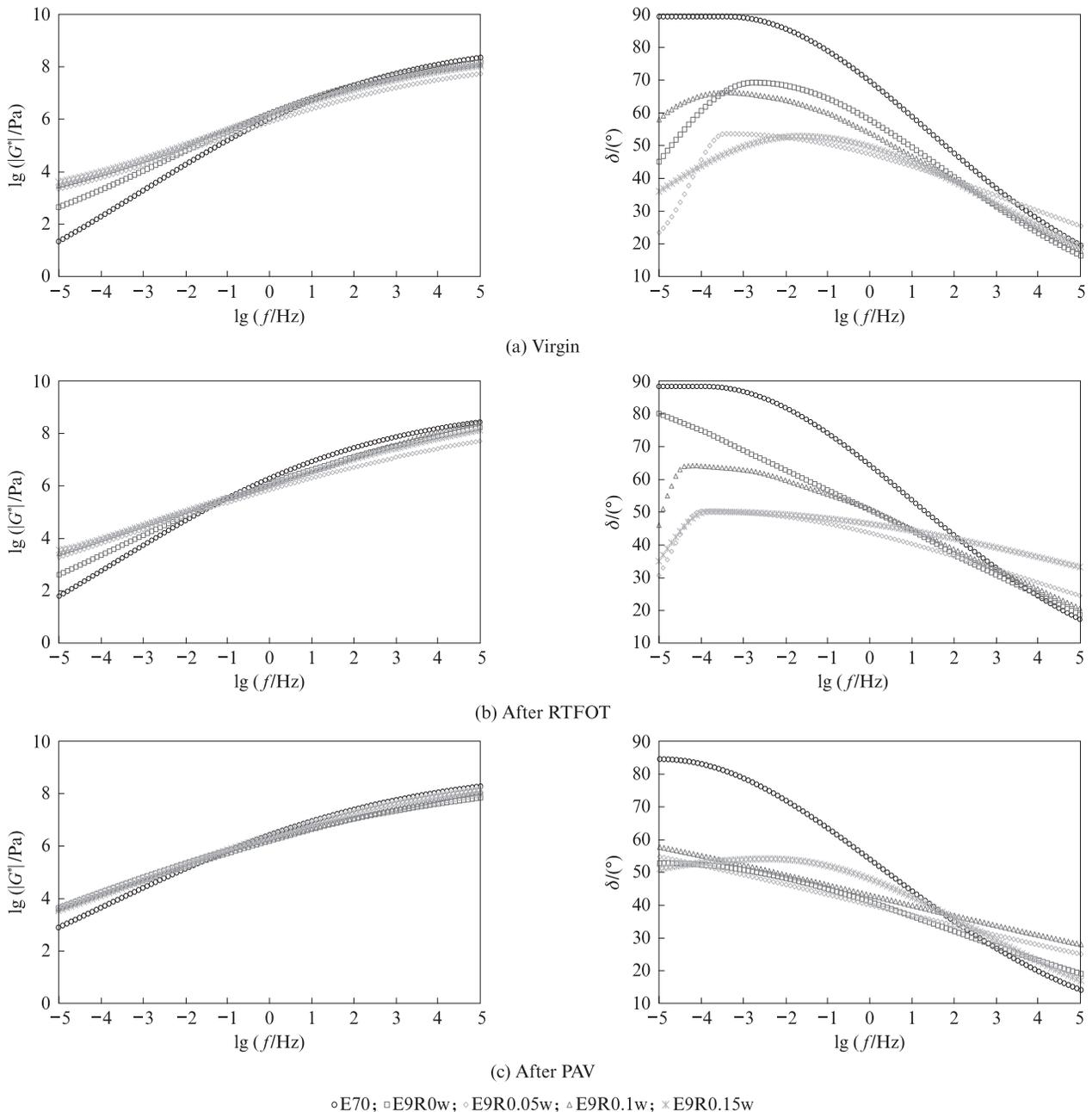


图5 稳定剂含量对高黏SBS改性沥青复数剪切模量主曲线和相位角主曲线的影响  
 Fig. 5 Influence of stabilizer content on main curve of complex shear modulus and phase angle of high viscosity SBS modified asphalt

由图5可见:(1)在频率相同的条件下,随着稳定剂含量的提高,高黏SBS改性沥青的复数剪切模量不断上升,尤其是在低频区域,这是因为稳定剂的加入促进了SBS之间交联作用的发生,从而提高了SBS相的强度;(2)添加稳定剂后,稳定剂含量对高黏SBS改性沥青复数剪切模量的影响较小,但与未添加稳定剂相比,添加稳定剂的改性沥青复数剪切模量变化较大;(3)长期老化后,未添加稳定剂和添加稳定剂的高黏SBS改性沥青在低频区的差异变小。

由图5还可见:(1)原样状态下不论是否添加稳定剂,高黏SBS改性沥青的相位角主曲线均存在平台区;(2)短期老化后,未添加稳定剂的高黏SBS改性

青相位角的平台区消失,这意味着如果不添加稳定剂,那么SBS相的网络结构在短期老化过程中就会被完全破坏,导致SBS的改性作用大大降低,而添加稳定剂的改性沥青,无论稳定剂含量多少,其相位角主曲线均有平台区,均保持着SBS网络结构的完整性,也就是说稳定剂增强了改性沥青的抗老化能力;(3)长期老化后,未添加稳定剂和添加稳定剂的高黏SBS改性沥青的相位角曲线已无太明显差异。

### 2.2.2 不同稳定剂含量高黏SBS改性沥青的流变性能定量分析

不同稳定剂含量高黏SBS改性沥青在原样、短期和长期老化状态下的相位角主曲线平台区相位角值如表5所示。

表5 不同稳定剂含量高黏SBS改性沥青平台区相位角值  
Table 5 Phase angle values of high-viscosity SBS modified asphalt platform area with different stabilizer contents

Status	E9R0w	E9R0.05w	E9R0.1w	E9R0.15w
Virgin	69.19	53.69	65.97	52.90
RTFOT	84.37	50.32	64.68	50.15
PAV	52.49	64.96	77.44	53.90

由表5可知,未老化和短期老化后,添加稳定剂的3种SBS改性沥青的平台区相位角值要明显小于未添加稳定剂的改性沥青。可见稳定剂的加入提高了SBS相在沥青中的强度。但是长期老化后,添加稳定剂的改性沥青平台区相位角值反而增大,这说明随着SBS网络结构的解体,稳定剂的增强效果消失。

不同稳定剂含量高黏SBS改性沥青的相位角差值 $\Delta\delta(f_p=10^{-3.5}\text{Hz})$ 如图6所示。

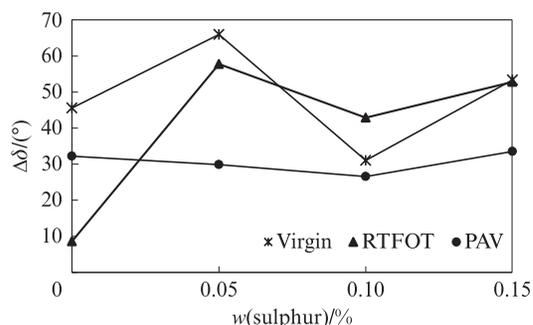


图6 不同稳定剂含量高黏SBS改性沥青的相位角差值

Fig. 6 Difference of phase angle of high-viscosity SBS modified asphalt with different stabilizer contents

由图6可知:(1)短期老化后,未添加稳定剂和添加0.05%稳定剂的高黏SBS改性沥青的 $\Delta\delta$ 减

小,而添加0.10%稳定剂的改性沥青的 $\Delta\delta$ 增大。这是因为在SBS掺量为9.0%的改性沥青中含有大量SBS,而稳定剂能够促进改性沥青中SBS之间的交联作用发生;但初始制备高黏SBS改性沥青的时间较短,使得一部分SBS还未来得及与稳定剂发生交联作用,所以稳定剂添加量较大的改性沥青会在短期老化的过程中进一步发生SBS之间的交联作用,这说明高掺量SBS改性沥青中添加的稳定剂含量较大时,需要更长的搅拌时间来使SBS分子之间发生交联作用;(2)长期老化后,4种高黏SBS改性沥青的 $\Delta\delta$ 均在减小,这说明SBS发生降解。

### 2.2.3 不同稳定剂含量高黏SBS改性沥青的化学特性分析

SBS改性沥青中聚合物的重均相对分子质量和数均相对分子质量随稳定剂含量的变化如图7所示。由图7可知:(1)原样状态下,聚合物的重均相对分子质量随稳定剂含量的增加而增大,这意味着稳定剂含量增高,SBS分子间的交联作用增强。(2)老化后,稳定剂的含量越高,聚合物重均相对分子质量减小的幅度越大;E9R0.05w, E9R0.1w和E9R0.15w的重均相对分子质量的减小幅度显著大于E9R0w,说明短期老化和长期老化主要破坏的是由于稳定剂加入而发生的交联反应中形成的共价键。

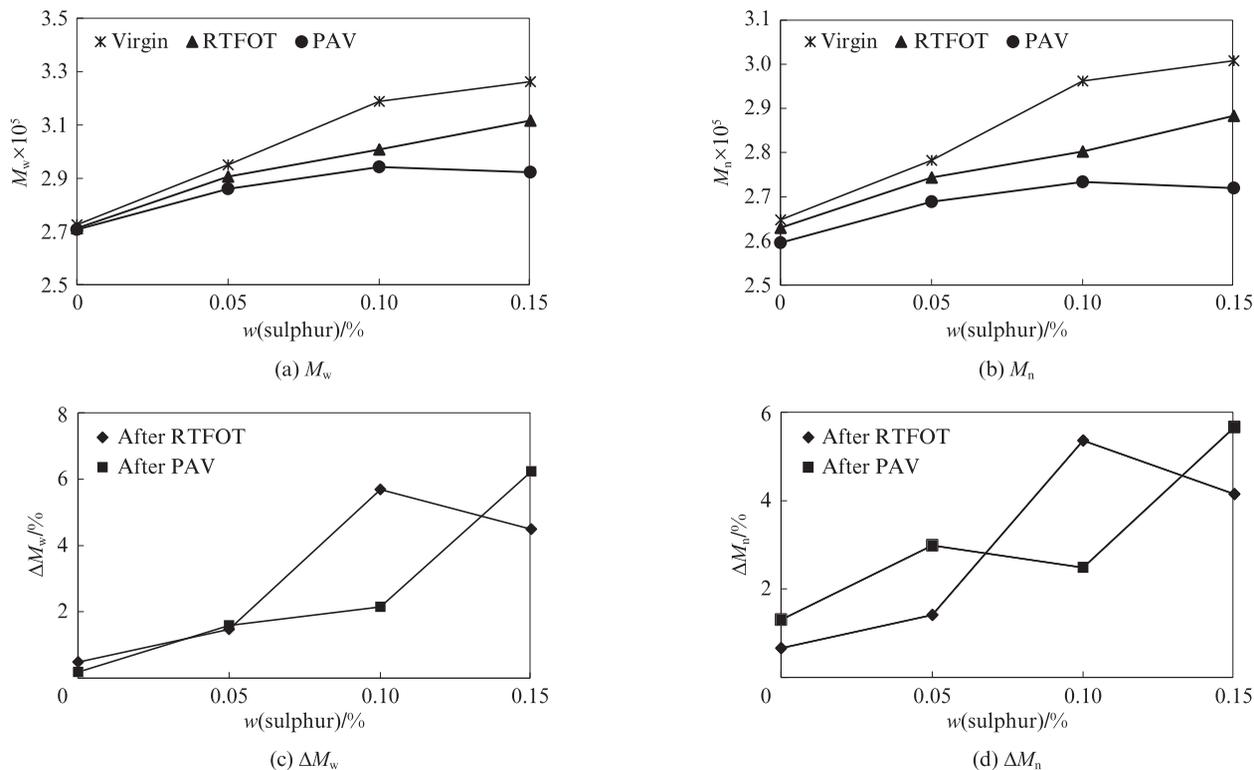


图7 不同稳定剂含量高黏SBS改性沥青中聚合物的重均相对分子质量和数均相对分子质量变化  
 Fig. 7 Changes of weight average relative molecular mass and number average relative molecular mass of polymers in high viscosity SBS modified asphalt with different stabilizer contents

### 3 结论

(1)相较于基质沥青,高黏SBS改性沥青的相位角主曲线存在平台区,该平台区可反应SBS网络结构的完整程度.相位角差值 $\Delta\delta$ 既可用于评价不同老化状态下SBS相在高黏SBS改性沥青中的力学贡献,也可作为其流变性能的评价参考指标.

(2)相较于普通SBS改性沥青,高黏SBS改性沥青,特别是SBS掺量达到或超过7.5%,以及稳定剂含量较高时,需要更长的搅拌时间.

(3)老化过程主要破坏的是沥青化学交联作用形成的共价键.高黏SBS改性沥青中存在广泛的交联作用,即便是长期老化,仍然有足够数目的共价键维持SBS结构的完整性,表现为相位角主曲线的平台区依然存在;这也意味着在实际路面使用过程中,高黏SBS改性沥青的性能衰减要慢于普通SBS改性沥青.

(4)相比未添加稳定剂的改性沥青,添加稳定剂可大幅改善高黏SBS改性沥青的性能,但在已有稳定剂的基础上再增加稳定剂含量对其性能的提升有限.

### 参考文献:

[ 1 ] MORGAN P A, STAIT R E, REEVES S, et al. The feasibility of using twin-layer porous asphalt surfaces on England's strategic road network [R]. Berkshire: Transport Research Laboratory, 2007:106.  
 [ 2 ] 倪彤元. 沥青改性及其在透水沥青混凝土中的应用[D]. 杭州:浙江工业大学, 2009.  
 NI Tongyuan. Asphalt modification and its application in permeable asphalt concrete [D]. Huangzhou: Zhejiang University of Technology, 2009. (in Chinese)  
 [ 3 ] 王姝. 透水沥青路面(OGFC)在厦门城市道路的应用[J]. 福建建设科技, 2008(5):59-60.  
 WANG Shu. Application of permeable asphalt pavement (OGFC) in Xiamen urban roads[J]. Fujian Construction Technology, 2008 (5): 59-60. (in Chinese)  
 [ 4 ] 曹庭维. 掺高黏度沥青添加剂排水性沥青混合料的性能研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2008.  
 CAO Tingwei. Performance study on drainage asphalt mixture with high viscosity asphalt additives[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008. (in Chinese)  
 [ 5 ] 刘少鹏, 黄卫东, 纪淑贞, 等. 高掺量SBS改性沥青及其在OGFC中的应用[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2013, 10(3):20-25.