

文章编号:1007-9629(2022)12-1321-08

老化对改性沥青宽温度域黏弹特性的影响

金大勇^{1,2}, 颜川奇^{1,2,*}, 易宏宇^{1,2}, 郑 茂³, 艾长发^{1,2}

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学 道路工程四川省重点实验室, 四川 成都 610031; 3. 四川省交通建设集团股份有限公司, 四川 成都 610047)

摘要:采用红外光谱与凝胶渗透色谱研究改性沥青的老化机理,并依托宽域温度扫描试验,检测沥青材料在 20~140 ℃ 内的线性黏弹特性变化,讨论短期老化与长期老化的影响规律.结果表明:苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)改性沥青是典型的两相材料,其老化过程由沥青相氧化硬化与 SBS 相氧化裂解耦合组成;沥青相老化时吸收氧气发生聚合,相对分子质量逐渐增大,沥青逐渐变硬变弹;SBS 相老化时吸氧裂解,相对分子质量逐渐变小,沥青逐渐变软变黏,2 种行为同时存在,共同影响改性沥青的黏弹特性;温度较低时,沥青硬化作用占优,老化后相位角下降,模量上升;温度较高时,SBS 裂解作用占优,老化后相位角上升,模量不变甚至下降;短期老化中,SBS 裂解作用较为明显,长期老化中,沥青硬化作用占据上风.

关键词:SBS 改性沥青;老化;温度扫描试验;线性黏弹特性

中图分类号:U414.1

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.12.015

Influence of Aging on the Wide-Temperature-Range Viscoelasticity of Modified Asphalt

JIN Dayong^{1,2}, YAN Chuanqi^{1,2,*}, YI Hongyu^{1,2}, ZHENG Mao³, AI Changfa^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Key Laboratory of Road Engineering of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. Sichuan Provincial Communications Construction Group Co., Ltd., Chengdu 610047, China)

Abstract: Infrared spectroscopy and gel permeation chromatography were used to study the mechanism of modified asphalt, and rely on the wide range of temperature scanning test to detect changes in linear viscoelastic characteristics in the range of 20–140 ℃, discussing the short-term aging and long-term aging influence. The results show that the styreneic block copolymers(SBS) modified asphalt is a typical two-phase material whose aging process is composed of asphalt oxidation hardening with SBS phase oxidation. When the asphalt phase is aged, the oxygen is absorbed, the relative molecular mass gradually increased, and the asphalt becomes hard and elastic. When SBS is subjected to oxygen, the relative molecular mass is gradually smaller, and the asphalt gradually becomes soft and viscous. The two behaviors exist simultaneously and affect the viscoelastic characteristics. When the temperature is low, the asphalt phase hardening is predominating, the phase angle of aging is decreased, the modulus rises. When the temperature is high, the SBS degradation dominates, the phase angle increases, and the modulus may even decline. In short-term aging, SBS degradation is more obvious, while in long-term aging, the asphalt phase hardening dominates.

Key words: SBS modified asphalt; aging; temperature sweep test; linear viscoelastic

收稿日期:2021-09-12; 修订日期:2021-10-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52008353);四川省科技计划资助项目(2021JDTD0023);成都市技术创新研发项目(2021-YF05-01175-SN)

第一作者:金大勇(1972—),男,四川遂宁人,中国市政工程西南设计研究总院有限公司教授级高级工程师,学士.E-mail: 491937217@qq.com

通讯作者:颜川奇(1992—),男,四川乐山人,西南交通大学副教授,硕士生导师,博士.E-mail: Ycq@swjtu.edu.cn

道路沥青是一种易老化的黏弹材料,其老化前后的黏弹特性与力学性能息息相关,一直是沥青材料研究领域的热点话题.20世纪90年代,美国公路战略研究计划(SHRP)基于沥青老化前后的黏弹特性,开发了著名的沥青性能分级方法,即PG分级方法.

在流变测试过程中,沥青的黏弹特性受到应力、应变、温度以及松弛时间4个因素的影响^[1].实际测试中,往往需要固定其中数个因素,再研究剩余因素的影响.在SHRP规范所考虑的线性黏弹性区间内,应力与应变受到严格控制,不会改变沥青黏弹特性.另一方面,根据黏弹聚合物的时温等效原理,时间和温度的影响可以依靠WLF方程或Arrhenius方程进行相互转换.因此,采用温度扫描试验可对沥青的黏弹特性进行较为全面的评价^[2].Airey等^[3-6]采用温度扫描试验,研究了老化、SBS改性、胶粉改性对沥青材料黏弹特性的影响.但这些研究涉及的温度扫描区间较窄,不能完全展示沥青在不同温度下的黏弹行为.

苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)改性沥青(SBSMA)可以有效提升道路的性能.但大量研究^[7-9]表明老化会导致SBSMA各方面性能出现下降.SBSMA的老化行为非常复杂,一直是行业研究的重点^[10-11].Yan等^[12]研究了高掺量SBS改性沥青的老化机理,发现老化过程中SBS发生了明显裂解.赵永利等^[13]采用红外光谱(FTIR)对改性沥青的老化及其中的SBS裂解机理进行了阐释.但以往研究主要针对高、中、低某一特定温度区间内的特定性能进行研究,对于改性沥青在较宽温度域内的老化行为把握不足.

沥青材料在服役过程中直接接触大气环境,昼夜温差明显,且在施工时需要面临135℃甚至更高的温度.作为一种黏弹材料,沥青温度敏感性极强,因此针对宽温度域环境下沥青黏弹行为进行研究十分有必要.另外,随着中国高速公路建设的放缓,大量路面进入服役中后期,老化作用开始显现,掌握老化的影响规律也非常重要.本文结合FTIR与凝胶渗透色谱(GPC)技术,从官能团和相对分子质量的角度总结改性沥青的老化机理.同时,采用20~140℃的宽域温度扫描试验研究基质沥青与改性沥青的黏弹特性,评价老化在宽温度域内对黏弹特性的影响,为耐久路面材料的研发提供理论基础.

1 试验

1.1 沥青材料

采用埃索70号基质沥青(BA)与岳阳巴陵石化

YH-791H线型SBS改性剂来制备改性沥青(SBSMA).设置4.5%、7.5%共2种SBS掺量(质量分数,本文所涉及的掺量均为质量分数),对应改性沥青分别记作SBSMA4.5、SBSMA7.5.同时,为了研究基质沥青性质对改性沥青的影响,还采用更软的110号埃索基质沥青制备了SBS掺量为7.5%的改性软沥青SBSMA-S进行试验.SBS本质上是一种橡胶,因此作为对照组,采用粒径为0.6mm的子午胎胶粉,制备了胶粉掺量为12%、18%(工业常用掺量)的橡胶沥青RMA12和RMA18.制备改性沥青时,首先在185℃下使用高速剪切机对改性剂与基质沥青进行剪切,以加快改性剂的溶胀,然后在185℃下持续低速搅拌发育4h,获得改性沥青.

1.2 室内模拟老化

为了研究短期老化的影响,参照JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,采用旋转薄膜烘箱老化(RTFOT)对基质沥青BA、SBSMA7.5和SBSMA-S进行短期老化.选用较高SBS掺量是为了凸显老化过程中SBS氧化裂解作用的影响.现阶段老化研究中,基质沥青的氧化硬化机理已经研究得较为透彻,但SBS裂解的影响还比较模糊.研究表明SBS掺量为4.5%的改性沥青老化行为介于基质沥青BA与SBSMA7.5之间^[10],因此选用高SBS掺量有利于对SBS裂解行为进行观察.为了研究长期老化的影响,参照JTG E20—2011标准,采用压力老化(PAV)试验对BA、SBSMA7.5进行长期老化,设置老化时长分别为20h(1PAV)和40h(2PAV).

1.3 老化机理研究

采用FTIR及GPC,从官能团及相对分子质量的角度对沥青的老化机理进行研究.官能团分析选用Bruker Tensor 27型红外光谱仪来实现.采用衰减全反射法(ATR)模式.反射晶体采用锗晶体,入射角为45°,检测范围为4000~600cm⁻¹.根据文献[8]推荐的定量分析方法计算羰基指数 $I_{C=O}$ 及聚丁二烯指数 I_{PB} ,分别表征沥青吸氧程度与SBS裂解程度.

相对分子质量分析采用Waters高效液相色谱系统(HPLC)实现.采用四氢呋喃(THF)作为流动相.使用微量天平称取20mg的沥青制样,溶解时间为24h.

1.4 温度扫描试验

沥青是一种非晶聚合物,非晶聚合物的黏弹特性可以采用对数模量($\lg G^*$)—温度(t)扫描曲线来表示.典型的非晶聚合物模量—温度曲线如图1所示.由图1可见,聚合物的模量—温度曲线有玻璃态、橡胶

态(高弹态)和黏流态3种典型状态^[1].沥青的平均相对分子质量很低,分子之间基本没有缠绕交联,因此橡胶态很短,只能观察到玻璃态和黏流态.SBS分子链远长于基质沥青,可以相互缠绕交联,因此可以观察到明显的橡胶态.添加了SBS的改性沥青也展现出更明显的橡胶态特征.通过模量-温度曲线的变化可以对SBS的改性作用以及老化过程中SBS的裂解行为进行研究.

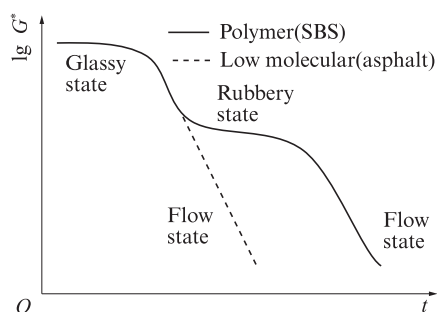


图1 典型的非晶聚合物模量-温度曲线

Fig. 1 A typical amorphous polymer modulus-temperature curve

使用美国TA公司生产的DHR-3动态剪切流变仪(DSR)对各沥青样品进行20~140℃的温度扫描振荡试验,以10℃为扫描间隔,设置振荡频率为10 Hz.在20~30℃时采用8 mm平行板,在30~140℃时采用25 mm平行板,并保证加载范围始终在线性黏弹区间内.获取沥青样品在不同温度下的模量 G^* 与相位角 δ ,并以此计算SHRP车辙因子 $G^*/\sin \delta$.对于每种沥青样品,进行2次平行试验,结果取平均值.

2 结果与分析

2.1 老化机理分析

2.1.1 基质沥青老化机理

首先采用FTIR与GPC对基质沥青的化学机理进行研究.基质沥青老化前后的FTIR图谱如图2所示.采用定量分析方法计算了红外光谱中的羰基指数 $I_{C=O}$,用于量化沥青的热氧老化程度,结果也示于图2.

1700 cm^{-1} 处的羰基以及1040 cm^{-1} 处的亚砷基是常用于评价有机物氧化程度的官能团.由图2可见:基质沥青经历老化后,羰基及亚砷基峰强明显增大,表明沥青在老化过程中不断吸收氧气发生老化,变硬变弹;长期老化后样品的羰基含量远高于RTFOT短期老化,表明其老化程度更加严重.

基质沥青老化前后的GPC检测结果如图3所示.由图3可见,老化后23 min处的吸收峰发生明显增长.此处的吸收峰对应相对分子质量较大的沥青质分子,说明沥青在老化过程中发生吸氧缩合反应,

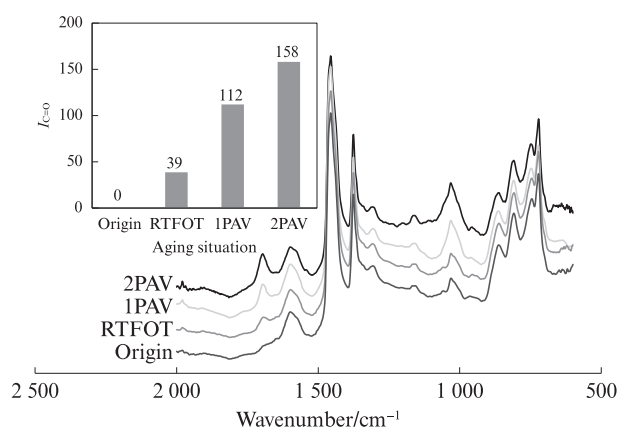


图2 基质沥青老化前后的FTIR图谱及羰基指数

Fig. 2 FTIR spectra and $I_{C=O}$ of base asphalt before and after aging

相对分子质量逐渐增大.结合FTIR与GPC的检测结果,可以将基质沥青的热氧老化机理归纳为:基质沥青在热氧条件下吸收氧气,生成羰基、羧酸、亚砷等含氧官能团;小分子发生聚合反应,相对分子质量逐渐增大,分子间滑移变得困难,模量也随之增大,沥青逐渐变硬变弹.

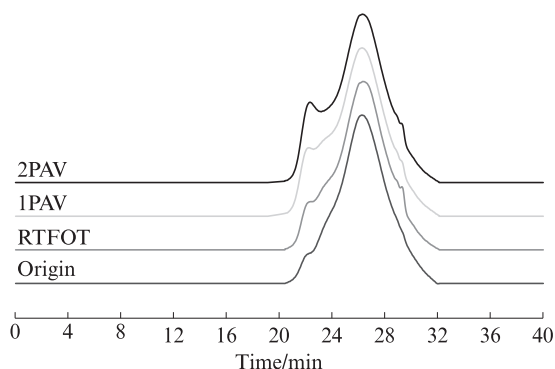


图3 基质沥青老化前后的GPC检测结果

Fig. 3 GPC test results of base asphalt before and after aging

2.1.2 改性沥青老化机理

SBSMA7.5老化前后的FTIR图谱如图4所示.同时,采用半定量分析方法计算了其羰基指数及聚丁二烯指数,分别用于量化沥青的吸氧程度和SBS裂解程度,结果也示于图4.

SBSMA是典型的两相材料,其老化过程由沥青相氧化硬化与SBS相氧化裂解组成.由图4可见:沥青相的氧化硬化与基质沥青的氧化老化过程基本一致,表现为羰基含量的逐渐上升;SBSMA7.5在966 cm^{-1} 处展示出SBS改性剂的特征峰(聚丁二烯官能团);老化过程中,聚丁二烯链段容易受到氧气攻击引起C=C键断裂,导致966 cm^{-1} 处峰的强度逐渐下降,表明SBS在老化过程中发生了裂解,改性效

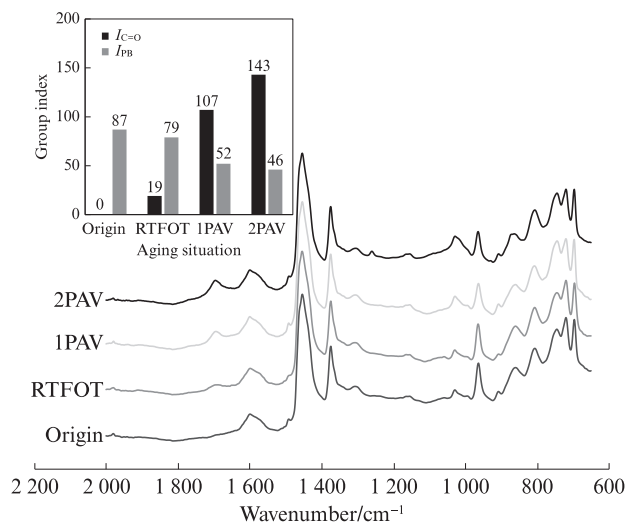


图4 SBSMA7.5老化前后的FTIR图谱、羰基指数及聚丁二烯基指数

Fig. 4 FTIR spectra, $I_{C=O}$ and I_{PB} of SBSMA7.5 before and after aging

果逐渐减弱.

SBSMA7.5老化前后的GPC检测结果如图5所示.由图5可见,SBSMA7.5在16 min左右出现SBS改性剂的特征峰,但随着老化程度的加深,这一特征峰强度逐渐降低.表明SBS改性剂发生裂解,弹性网络受到破坏,改性效果逐渐减弱.FTIR与GPC结果表明:SBSMA的老化行为是一种沥青相硬化与SBS

相裂解组成的耦合过程.2种过程同时进行,共同影响沥青的黏弹特性,导致SBSMA7.5老化过程中的黏弹特性变化较为复杂.

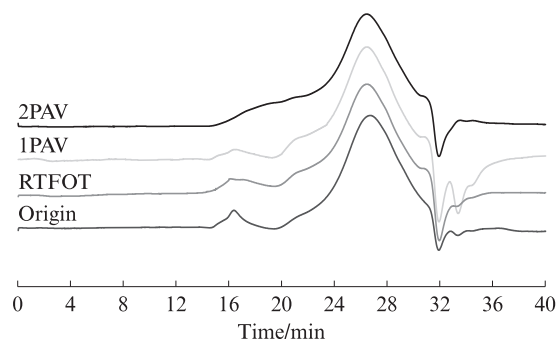


图5 SBSMA7.5老化前后的GPC检测结果

Fig. 5 GPC test results of SBSMA7.5 before and after aging

2.2 老化前改性沥青黏弹特性

为了研究老化对改性沥青黏弹特性的影响,首先要明确老化前改性沥青的黏弹特性.本节采用宽域温度扫描试验来研究SBS和橡胶粉2种典型改性剂对沥青黏弹特性的影响.

2.2.1 SBSMA温度扫描结果分析

不同SBS掺量下SBSMA的温度扫描结果如图6所示.图6中,模量 G^* 采用对数坐标,相位角 δ 采用一般线性坐标.

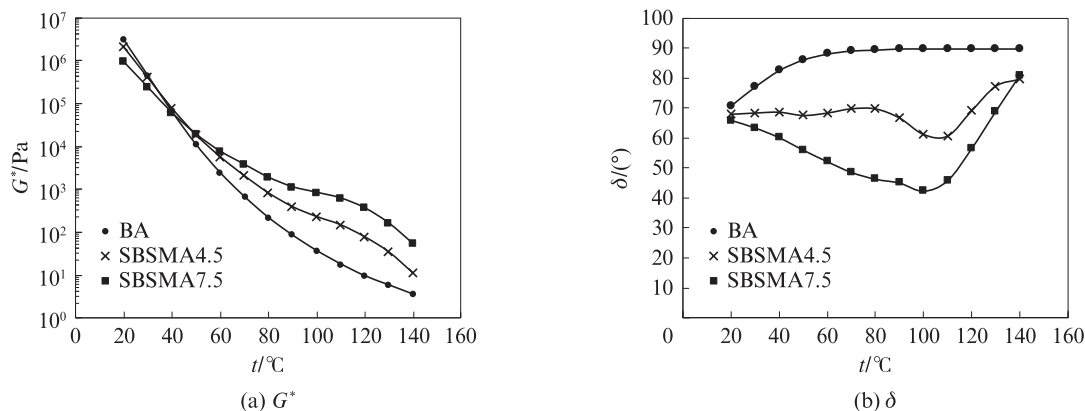


图6 不同SBS掺量下SBSMA的温度扫描结果

Fig. 6 Temperature scan results of SBSMA under different SBS contents

由图6可见,基质沥青模量的温度敏感性最高,随温度上升模量下降最快.这是因为基质沥青的平均相对分子质量较低,分子之间没有交联与缠绕,松弛更加容易.基质沥青低温硬、高温软,导致其低温抗裂与高温抗变形能力都较差.

不同于低相对分子质量的基质沥青,SBSMA中富含SBS长链,表现出更多的橡胶态,模量曲线更平,温度敏感性更低.由图6可见:在20~40℃的中温

区内,SBS中的聚丁二烯链段柔性极强,不容易凝聚或结晶,因此SBSMA的模量低于基质沥青,其抗裂性能提升;在40~100℃的高温区内,SBS的交联网络发挥作用,其模量与高温抗变形能力提升;在100℃以上,SBS中的聚苯乙烯硬段会逐渐熔融解聚(表现出SBS的热塑性),SBSMA的模量迅速下降,相位角迅速上升,高温黏度降低,施工和易性提升.以上特性说明了SBS改性剂对沥青黏弹行为的改善作用.

2.2.2 橡胶沥青温度扫描结果分析

SBS本质上是一种热塑性橡胶.作为对比,也对橡胶沥青RMA进行了温度扫描试验,结果如图7所示.对比图6、7可见,橡胶沥青RMA与SBS改性沥青SBSMA的模量结果存在2处区别:(1)RMA的模量

整体高于SBSMA;(2)橡胶沥青在100℃以上没有模量骤降的现象,即没有表现出热塑性.这是因为橡胶颗粒中的交联为硫化引起的化学交联.化学交联强度远高于物理交联,且不会在高温下熔融.因此橡胶沥青的模量与黏度都更高,高温下也难以进入黏流态.

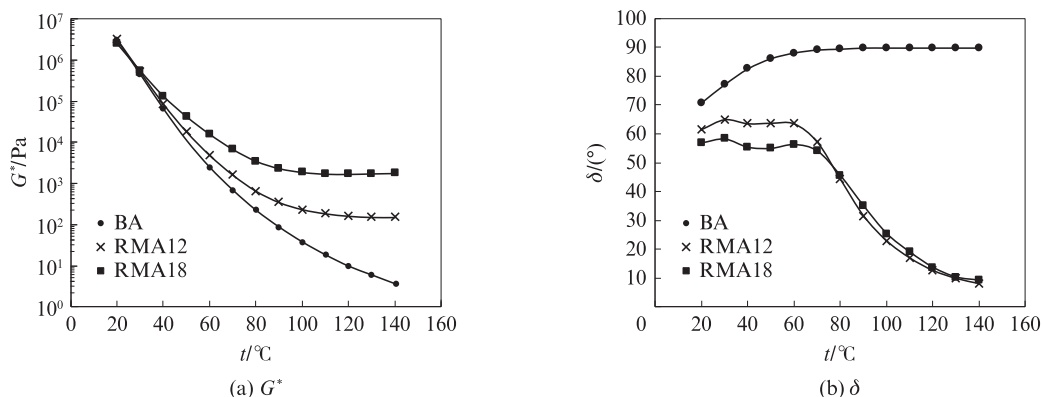


图7 橡胶沥青的温度扫描结果
Fig. 7 Temperature scan results of rubber asphalt

材料在高温下始终表现出一定弹性的行为被称为黏弹固体行为.由图7可以看出,橡胶沥青的相位角在60℃以上持续降低,甚至接近0°,是一种典型的黏弹固体.这也是橡胶沥青施工和易性较差的主要原因.由图6可见,SBSMA在升温时(20~100℃)也存在一定程度的相位角下降,展示出黏弹固体行为,但由于SBS具有热塑性,因此黏弹固体行为随着聚苯乙烯链段熔融而消失.在制备SBSMA时,往往需要添加硫磺作为交联剂(稳定剂),若硫磺添加过量,化学交联度过高,则SBSMA会失去热塑性成为凝

胶,施工和易性下降.

2.3 短期老化对沥青黏弹特性的影响

2.3.1 基质沥青温度扫描结果分析

RTFOT老化前后基质沥青的宽域温度扫描检测结果如图8所示.

由图8可知,短期老化对基质沥青黏弹特性的影响较为简单,老化后模量整体上升,相位角整体下降,说明沥青样品逐渐变硬变弹.结合FTIR和GPC的检测结果,可以将变化的主要原因归纳为沥青吸氧聚合与平均相对分子质量的上升^[14].

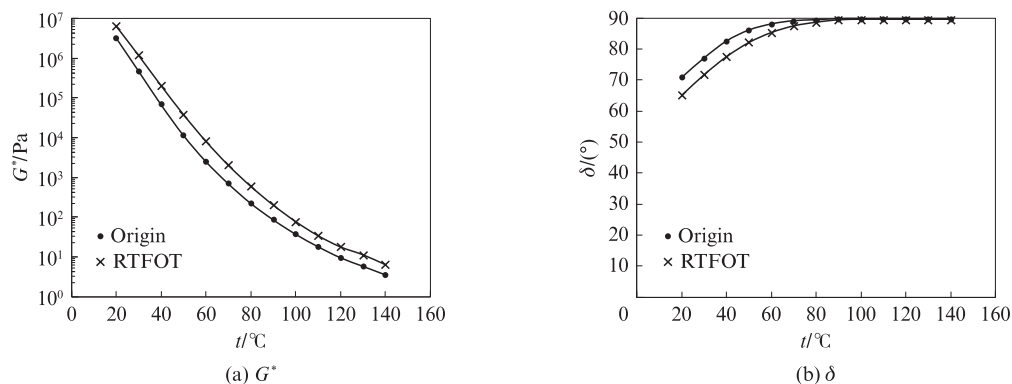


图8 RTFOT老化前后基质沥青的宽域温度扫描检测结果
Fig. 8 Wide-range temperature scanning test results of base asphalt before and after RTFOT aging

2.3.2 SBSMA温度扫描结果分析

RTFOT老化前后SBSMA7.5的宽域温度扫描检测结果如图9所示.

由图9可见:SBSMA7.5老化后的模量略高于老化前;在部分温度区域内(100~130℃),老化后的模量

甚至小于老化前模量.这是因为SBS裂解削弱了SBS网络的增强作用,对沥青起到软化作用,在一定程度上削弱了沥青相氧化的硬化作用.这种SBS裂解软化与沥青相硬化的博弈现象在诸多相关文献中都有报道^[15],但少有针对该博弈现象的温度敏感性的研究.

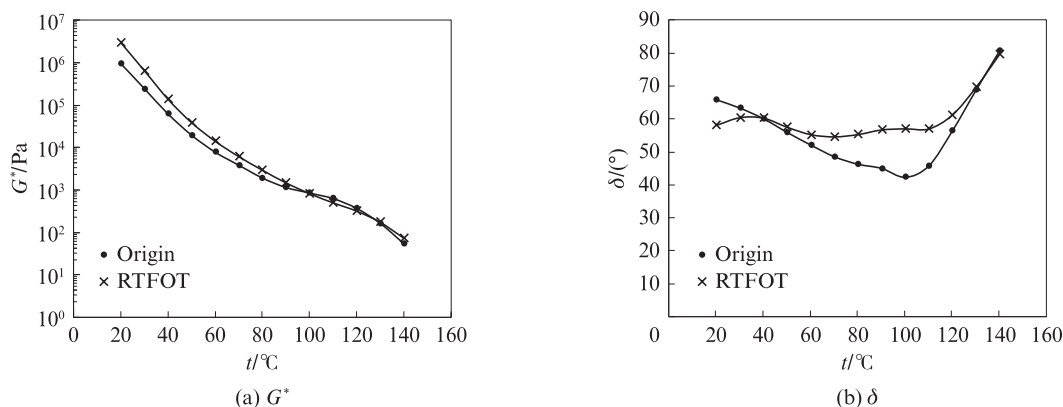


图9 RTFOT老化前后SBSMA7.5的宽域温度扫描检测结果

Fig. 9 Wide-range temperature scanning test results of SBSMA7.5 before and after RTFOT aging

图9中的相位角图也能观察到这种博弈现象:温度在40℃以下时,老化后的SBSMA7.5展示出更多的弹性,这与基质沥青的行为相符;在50~130℃区间内,RTFOT老化后的相位角高于未老化值,说明老化后的SBSMA7.5反而表现出更多黏性.由此可见,SBS裂解软化与沥青相硬化两种作用在不同温度区域内分别占据主导地位.温度较低时,沥青硬化占优,老化后相位角下降,模量上升;温度较高时则是SBS裂解占优,老化后相位角上升,模量不变甚至下降.

一些文献将这种现象理解为SBSMA具有较好的抗老化性能(老化后模量上升不明显),但也有研究^[16]指出,SBSMA这种短期老化后模量不上升甚至

下降的特点导致了SHRP的高温PG分级对于SBSMA的不适用性.

2.3.3 软沥青制备的SBSMA-S温度扫描结果分析

为研究沥青相的不同性质对SBSMA老化过程的影响,对RTFOT老化前后软沥青制备的SBSMA-S进行了检测,结果如图10所示.软沥青制备的SBSMA-S老化后模量下降幅度更大,且相位角在20~140℃范围内都出现上升,说明SBS裂解的软化作用更加明显.这意味着SBSMA的老化行为与基质沥青性质有明显的联系.当基质沥青本身黏度较低时,SBS网络的弹性更容易体现^[17].自然的,SBS裂解时的软化作用也就更显著.

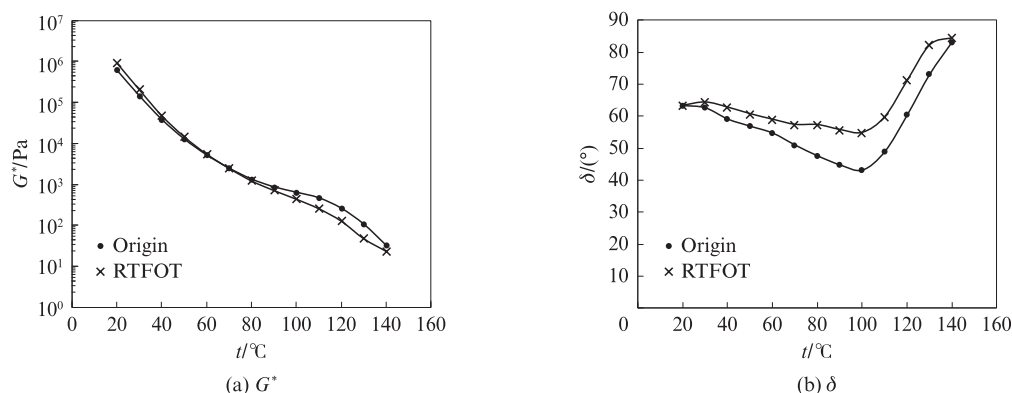


图10 RTFOT老化前后软沥青SBSMA-S的宽域温度扫描检测结果

Fig. 10 Wide-range temperature scanning test results of soft asphalt SBSMA before and after RTFOT aging

2.4 长期老化对黏弹特性的影响

2.4.1 基质沥青温度扫描结果分析

PAV老化前后基质沥青的宽域温度扫描检测结果如图11所示.由图11可见,对于基质沥青而言,长期老化的作用与短期老化一致,老化后沥青呈现出模量单调上升,相位角单调下降的趋势.

2.4.2 SBSMA7.5温度扫描结果分析

PAV老化前后SBSMA7.5的宽域温度扫描检

测结果如图12所示.由图12可见,SBSMA的情况则略显复杂:1PAV后,高温区域SBS裂解的软化作用仍然占据主导地位,老化后样品在高温区的模量低于原样样品;随着老化程度持续加深(2PAV),沥青硬化在所有温度下占据主导地位,老化后SBSMA7.5A的模量呈整体上升趋势.造成这一现象的原因可能有2种:一是根据自由基理论,SBS分子的裂解过程在老化后期逐步放缓;二是当初期少部

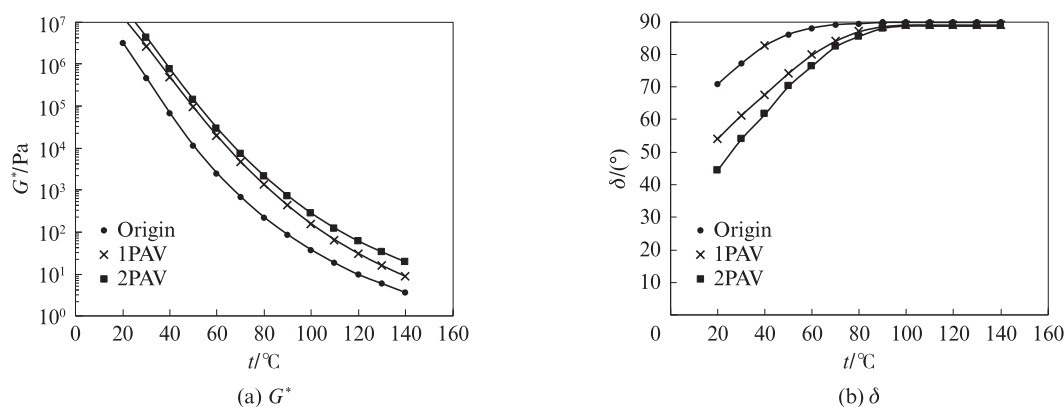


图11 PAV老化前后基质沥青的宽域温度扫描检测结果

Fig. 11 Wide-range temperature scanning test results of base asphalt before and after PAV aging

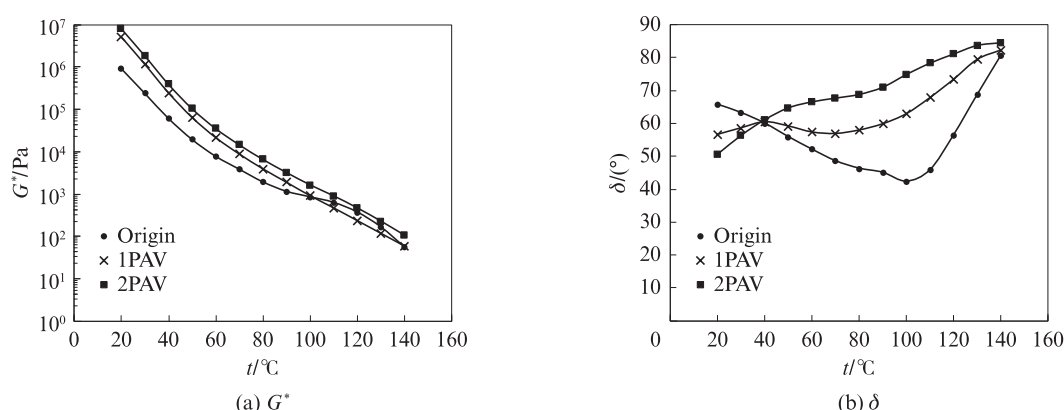


图12 PAV老化前后SBSMA7.5的宽域温度扫描检测结果

Fig. 12 Wide-range temperature scanning test results of SBSMA7.5 before and after PAV aging

分SBS发生裂解时,三维网络的弹性即大幅下降,更多的SBS裂解并不会带来明显的削弱作用,边际效应出现递减.

3 结论

(1)改性剂对沥青黏弹特性的提升如下:20~40 °C中温下,SBS呈柔性,可降低沥青模量,提升其抗裂性能;40~100 °C高温下,SBS呈弹性,可提高沥青模量,增强其抗变形能力;超过100 °C后,SBS展现出热塑性,可提升沥青施工和易性.胶粉与SBS类似,但因其缺乏热塑性,故橡胶沥青施工性较差.

(2)SBS改性沥青是典型的两相材料,其老化过程由沥青相氧化硬化与SBS相氧化裂解耦合组成.沥青相老化时吸氧聚合,相对分子质量增大,模量增大,相位角下降,沥青逐渐变硬变弹;SBS相老化时吸氧裂解,相对分子质量减小,弹性网络遭到破坏,模量下降,相位角上升,沥青逐渐变软变黏.

(3)老化时沥青相氧化硬化与SBS相氧化降解2种行为同时存在,共同影响改性沥青的黏弹特性.温度较低时,沥青硬化占优,老化后相位角下降,模量上

升;温度较高时,SBS裂解占优,老化后相位角上升,模量不变或者下降.短期老化中,SBS裂解作用较为明显;长期老化中,沥青硬化作用逐渐占据上风.

参考文献:

- [1] 金日光, 华幼卿. 高分子物理[M]. 3版. 北京: 化学工业出版社, 2007: 230.
JIN Riguang, HUA Youqing. Polymer physics [M]. 3rd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 230. (in Chinese)
- [2] 刘凤岐, 汤心颐. 高分子物理[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995: 122.
LIU Fengqi, TANG Xinyi. Polymer physics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1995: 122. (in Chinese)
- [3] AIREY G D. Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens [J]. Fuel, 2003, 82 (14): 1709-1719.
- [4] 谭忆秋, 郭猛, 曹丽萍. 常用改性剂对沥青粘弹特性的影响[J]. 中国公路学报, 2013, 26(4): 7-15.
TAN Yiqiu, GUO Meng, CAO Liping. Effects of common modifiers on viscoelastic properties of asphalt [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(4): 7-15. (in Chinese)
- [5] 何立平. 基于DMA方法的橡胶沥青粘弹特性和高温性能研究

- [D]. 西安:长安大学, 2014.
- HE Liping. Research on viscoelastic properties and high temperature performance of rubber asphalt based on DMA method [D]. Xi'an:Chang'an University, 2014. (in Chinese)
- [6] 陈华鑫,周燕,王秉纲. SBS改性沥青老化后的动态力学性能[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2009, 29(1):1-5.
- CHEN Huaxin, ZHOU Yan, WANG Binggang. Dynamic mechanics performance of aged SBS modified-asphalt[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science), 2009, 29(1):1-5. (in Chinese)
- [7] 曹雪娟,雷运波. SBS热氧老化动力学研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, 29(1):157-161.
- CAO Xuejuan, LEI Yunbo. Study on thermal oxidative aging kinetics of SBS[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2010, 29(1):157-161. (in Chinese)
- [8] YAN C Q, HUANG W D, XIAO F P, et al. Proposing a new infrared index quantifying the aging extent of SBS-modified asphalt [J]. Road Materials and Pavement Design, 2018, 19(6):1406-1421.
- [9] 左锋,叶奋,王泽,等. 耦合老化作用下混合料中SBS改性沥青的老化行为研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(2):401-406.
- ZUO Feng, YE Fen, WANG Ze, et al. Aging behavior of SBS modified asphalt mixture under coupled aging [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2):401-406. (in Chinese)
- [10] YAN C Q, HUANG W D, LIN P, et al. Chemical and rheological evaluation of aging properties of high content SBS polymer modified asphalt[J]. Fuel, 2019, 252:417-426.
- [11] 崔亚楠,郭立典,陈东升. SBS改性沥青的复合老化机理[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(5):1183-1191.
- CUI Yanan, GUO Lidian, CHEN Dongsheng. Composite aging mechanism of SBS modified asphalt [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(5):1183-1191. (in Chinese)
- [12] YAN C Q, HUANG W D, LÜ Q, et al. Investigating the field short-term aging of high content polymer-modified asphalt[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2019, 22(10):1263-1272.
- [13] 赵永利,顾凡,黄晓明. 基于FTIR的SBS改性沥青老化特性分析[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(5):620-623.
- ZHAO Yongli, GU Fan, HUANG Xiaoming. Analysis on SBS modified asphalt aging characterization based on Fourier transform infrared spectroscopy[J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(5):620-623. (in Chinese)
- [14] 芦军. 沥青路面老化行为与再生技术研究[D]. 西安:长安大学, 2008.
- LU Jun. Research on asphalt pavement aging behavior and recycling technology[D]. Xi'an:Chang'an University, 2008. (in Chinese)
- [15] CUCINIELLO G, LEANDRI P, FILIPPI S, et al. Effect of ageing on the morphology and creep and recovery of polymer-modified bitumens[J]. Materials and Structures, 2018, 51(5):136.
- [16] 邹桂莲,张肖宁,李智. 改性沥青应用SHRP PG高温分级存在的几点问题[J]. 中南公路工程, 2004, 29(1):42-44, 63.
- ZOU Guilian, ZHANG Xiaoning, LI Zhi. Discussions on high temperature grading of superpave PG system for asphalt binders [J]. Central South Highway Engineering, 2004, 29(1):42-44, 63. (in Chinese)
- [17] LU X H, ISACSSON U. Effect of ageing on bitumen chemistry and rheology[J]. Construction and Building Materials, 2002, 16(1):15-22.