

文章编号:1007-9629(2022)09-0945-08

# 基于介电性质的沥青抗老化性能量化表征与分析

胡江三<sup>1,2,\*</sup>, 陆佳宝<sup>2</sup>, 王 岚<sup>1</sup>, 王国忠<sup>2</sup>

(1. 内蒙古工业大学 理学院, 内蒙古 呼和浩特 010051;

2. 内蒙古农业大学 能源与交通工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

**摘要:**通过对热氧老化前后的 90<sup>#</sup> 基质沥青、苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)改性沥青进行三大指标、布氏黏度、频率扫描、线性振幅扫描和介电常数测试,研究了老化前后沥青基础指标、流变学指标、疲劳性能及沥青组分的变化情况,量化了短、长期老化后各指标的变化情况,并建立了沥青组分与性能指标之间的量化关系.结果表明:采用三大指标描述沥青老化程度时,针入度指标评价最为合理;基质沥青的黏度、温度敏感性、复数剪切模量主曲线和抗疲劳性能受热氧老化的影响大于 SBS 改性沥青;基质沥青的黏度和温度敏感性在短期老化过程中变化更明显,SBS 改性沥青的黏度和温度敏感性在长期老化过程中变化更明显;2 种沥青的抗疲劳性能和复数剪切模量的衰减主要发生在长期老化过程中;采用介电常数对沥青组分进行划分,并以此关联沥青老化前后性能变化的分析方法可行的.

**关键词:**沥青;老化;量化表征;流变性能;介电常数

中图分类号:U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.09.009

## Quantitative Characterization and Analysis of Asphalt Aging Resistance Based on Dielectric Properties

HU Jiangsan<sup>1,2,\*</sup>, LU Jiabao<sup>2</sup>, WANG Lan<sup>1</sup>, WANG Guozhong<sup>2</sup>

(1. College of Science, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2. College of Energy and Transportation Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

**Abstract:** Through the tests of three indexes, Brookfield viscosity, frequency scanning, linear amplitude scanning and dielectric constant of 90<sup>#</sup> base asphalt and styrene-butadiene-styrene block copolymer (SBS) modified asphalt before and after thermal-oxidative aging, the changes of asphalt basic indexes, rheological indexes, fatigue properties and asphalt components before and after aging were studied. Moreover, the changes of indexes after short-term and long-term aging were quantified and the quantitative relationship between components and performance indexes was established. The results show that penetration is the most reasonable one among three indexes to describe asphalt aging degree. The viscosity, temperature sensitivity, complex modulus modulus master curve and fatigue resistance of base asphalt are much affected by thermal-oxidative aging than that of SBS modified asphalt. The viscosity and its temperature sensitivity of base asphalt change much obviously during short-term aging, while SBS modified asphalt change much obviously during long-term aging. The attenuation of fatigue resistance and complex shear modulus of the two asphalts mainly occurs in the long-term aging. It is feasible to use the permittivity to divide the asphalt components and correlate the performance changes of asphalt before and after aging.

**Key words:** asphalt; aging; quantitative characterization; rheological property; dielectric constant

收稿日期:2021-07-06; 修订日期:2021-08-03

基金项目:内蒙古自然科学基金资助项目(2019MS05033)

第一作者(通讯作者):胡江三(1989—),男,河北邢台人,内蒙古工业大学博士生,内蒙古农业大学讲师.E-mail:huixiatiao@163.com

施工过程与服役环境导致沥青材料老化,进而所引起的沥青混合料耐久性降低是路面病害产生的主要原因之一<sup>[1-3]</sup>.掌握沥青老化过程中的性能变化规律对于改善沥青混合料抗老化性能、延长材料疲劳寿命和减少碳排放具有重要意义<sup>[4]</sup>.

对沥青室内老化方式的模拟、老化程度与其性能的对对应关系一直是沥青老化研究的热点.张恒龙等<sup>[5-6]</sup>从热氧老化出发,研究了旋转薄膜烘箱加热试验(RTFOT)、压力老化试验(PAV)与路面施工、服役过程中的对应关系,以及2种老化沥青重质组分的变化情况.王佳妮等<sup>[7]</sup>通过对比紫外老化与热氧老化前后沥青四组分的变化,得出了2种老化方式对沥青组分迁移的影响.Lamni等<sup>[8]</sup>通过动态剪切流变(DSR)试验,得出了紫外老化试件与沥青疲劳损伤累积过程之间的对应关系.Kumbarger等<sup>[9]</sup>从沥青组分变化出发,探究了老化沥青的组分变化及三大指标的变化规律.梁波等<sup>[10]</sup>从沥青老化条件、自身性能

等方面出发,总结了老化过程中沥青组分、化学变化及老化对沥青疲劳性能的影响规律.Qin等<sup>[11]</sup>认为流变学指标可以很好地表征沥青老化前后的性能变化,介电常数测试可对沥青中所含物质进行任意分区,具有实时测定和简单高效的优点.

本文通过对热氧老化前后的90#基质沥青、SBS改性沥青进行三大指标(软化点、针入度和延度)、布氏黏度、频率扫描、线性振幅扫描和介电常数测试,量化了上述2种沥青短、长期老化后各指标的变化情况,并参考高分子极性划分范围对沥青组分进行划分,建立了沥青组分与性能指标之间的量化关系.

## 1 试验

### 1.1 原样沥青

采用90#基质沥青和SBS改性沥青(实验室自制,SBS改性剂掺量(质量分数)为4%)作为原样沥青.2种沥青的技术指标如表1所示.

表1 2种沥青的技术指标  
Table 1 Technical indexes of two kinds of asphalt

Technology index	Test result		Specification requirement	
	Base asphalt	SBS asphalt	Base asphalt	SBS asphalt(I-C)
Penetration(25℃, 100 g, 5 s)/(0.1 mm)	80.30	60.80	80-100	60-80
Softening point(R&B)/℃	49.10	69.25	≥45	≥55
Ductility/cm	>150(15℃)	32.5(5℃)	≥100	≥30

短期老化和长期老化分别采用薄膜烘箱加热试验(TFOT)和PAV进行模拟.

### 1.2 基本性能试验

分别对原样、短期老化、长期老化后的90#基质沥青和SBS改性沥青进行三大指标试验和布氏黏度试验,其中布氏黏度试验的测试温度为115、125、135、145、155℃.

### 1.3 DSR试验

分别对原样、短期老化、长期老化后的90#基质沥青和SBS改性沥青进行DSR试验(包括频率扫描试验和线性振幅扫描(LAS)试验),分析2种沥青老化前后的流变性能变化情况.试验参数如表2所示.

### 1.4 介电常数试验

现行试验规程中采用溶剂沉淀及色谱柱法进行

表2 DSR试验参数  
Table 2 Parameters of DSR test

Parameter	Frequency sweep test	Linear amplitude sweep test
Temperature/℃	28-82	25
Sample diameter/mm	8	8
Scanning frequency/Hz	0.1-10.0	10

道路石油沥青的四组分成分分析,但该方法要求的样品质量只有1g,难以保证取样代表性,且操作程序复杂、试验周期长.现阶段,介电特性应用于沥青混合料领域的研究主要集中于对沥青路面密度的预测,如基于介电特性的混合料密度模型的预估、自愈合情况的观测等<sup>[12-13]</sup>.工业微波CT通过测定沥青中不同物质,尤其是老化过程中物质的介电常数来反映沥青组成,且测试需30g左右的样品,能够保证取样的代表性,同时操作简单,可实时观测.因此,本试验采用云麓科技的工业微波CT对2种沥青进行介电常数试验,其测试范围为1.0~6.2.

## 2 基础指标分析

### 2.1 三大指标数据分析

图1为2种沥青三大指标在老化前后的变化.由图1可知:(1)基质沥青的软化点值随着老化程度的加深而增大,主要是热氧老化导致轻质组分向重质组分迁移,沥青质密度增加所致.(2)SBS改性沥青的软化点值在短期老化后减小,长期老化后又有一定程度的恢复,主要是由于短期老化过程中改性沥青的

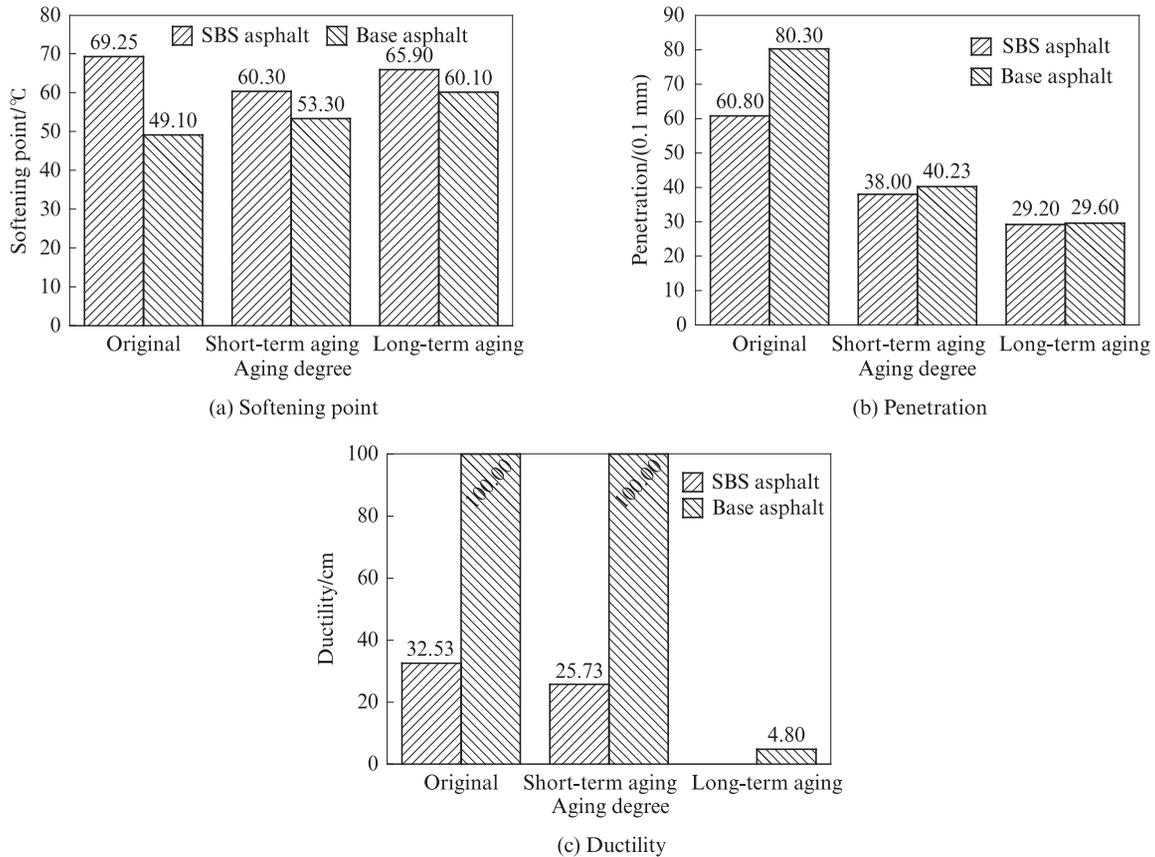


图1 2种沥青的三大指标在老化前后的变化  
Fig. 1 Changes of three indexes of two kinds of asphalt before and after aging

混溶结构(吸附溶胀形成的稳定网格结构)受到破坏,轻质组分析出比例大于组分迁移过程中轻质组分的变化比例;随着老化程度的加深,组分迁移逐渐占据主导作用。(3)2种沥青的针入度值均随着老化程度的加深而减小,且长期老化后2种沥青的针入度值水平基本持平,表明SBS改性作用对针入度的影响不明显。(4)进行延度试验时,基质沥青在原样状态和短期老化后均未拉断,长期老化后延度值急剧减小;SBS改性沥青在短期老化后延度值减小,长期老化后瞬间断裂。

表3为2种沥青的三大指标在短期和长期老化过程中的变化率。

表3 2种沥青的三大指标在短期和长期老化过程中的变化率  
Table 3 Change rates of three indexes of two kinds of asphalt under short-term and long-term aging

Sample	Technology index	Short-term aging	Long-term aging
Base asphalt	Softening point	8.6	12.8
	Penetration	-49.8	-26.6
	Ductility	0	≈100
SBS asphalt	Softening point	-13.0	9.3
	Penetration	-37.5	-23.1
	Ductility	-20.9	≈100

由表3可知:(1)长期老化对基质沥青软化点的影响比短期老化更为明显;老化对SBS改性沥青的影响分为SBS改性剂变化和组分变化两部分,因此其软化点的变化趋势在短期老化和长期老化过程中有所不同。(2)长期老化过程中2种沥青的针入度均有所降低,而短期老化对2种沥青针入度的影响更为明显。(3)长期老化对2种沥青延度的影响明显大于短期老化,基质沥青在短期老化过程中的延度变化率与SBS改性沥青在长期老化过程中的延度变化率均不易采集。鉴于此,建议采用三大指标中的针入度来表征老化作用对沥青性能的影响程度,这与JTG/T 5521—2019《公路沥青路面再生技术规范》中确定回收沥青是否可用的判定指标一致。

2.2 布氏黏度数据分析

图2为2种沥青的布氏黏度-温度曲线(黏温曲线)。由图2可知,2种沥青的布氏黏度值均随着老化程度的加深而增大,这仍可用2.1中沥青的组分迁移理论与SBS改性剂变化来解释。由于试件本身的非均质性,若按照JTG/T 5521—2019要求,以某一温度值(如135℃)下的黏度值变化来分析老化对沥青性能的影响,主观性会较大;而黏温曲线在双对数坐

标下接近于直线,因此采用该直线的特征值(斜率、截距)表征老化对沥青黏性的影响更为准确.

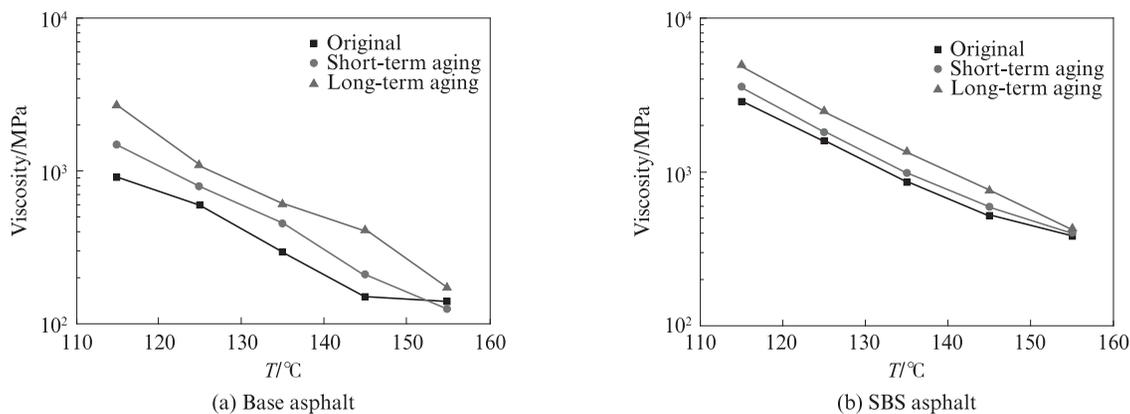


图2 2种沥青的布式黏度-温度曲线

Fig. 2 Brockfield viscosity-temperature curves of two kinds of asphalt

老化过程中沥青拟合曲线截距的变化可体现黏度值的变化程度;拟合曲线斜率的绝对值反映黏度随温度变化的快慢,可间接反映沥青温度敏

感性随老化程度的变化情况.将2种沥青的黏度曲线采用Origin软件进行线性拟合,拟合参数如表4所示.

表4 黏温曲线拟合参数

Table 4 Fitting parameters of viscosity-temperature curves

Sample	Aging degree	$ S $	$\Delta S /\%$	$d$	$\Delta d/\%$	$R^2$
Base asphalt	Original	6.867 22		17.116 77		0.953 8
	Short-term aging	8.373 26	21.9	20.445 74	19.4	0.993 3
	Long-term aging	8.651 04	3.3	21.226 81	3.8	0.980 1
SBS asphalt	Original	6.898 73		17.660 35		0.991 1
	Short-term aging	7.422 39	7.6	18.830 74	6.6	0.995 1
	Long-term aging	8.189 63	10.3	20.572 25	9.2	0.999 6

Note:  $|S|$ —Absolute slope;  $\Delta|S|$ —Change degree of absolute slope;  $d$ —Intercept;  $\Delta d$ —Change degree of intercept;  $R^2$ —Correlation coefficient.

由表4可知:(1)2种沥青拟合曲线的截距( $d$ )和斜率绝对值( $|S|$ )均随老化程度的加深而增大,表明随着老化程度的加深,沥青黏度增大,同时其温度敏感性也有所增大.(2)基质沥青拟合曲线的 $\Delta d$ 和 $\Delta|S|$ 在短期老化过程中较大,表明其黏度和温度敏感性的变化程度比在长期老化过程中更明显;SBS改性沥青拟合曲线的 $\Delta d$ 和 $\Delta|S|$ 在长期老化过程中较大,表明其黏度和温度敏感性的变化程度比在短期老化过程中更明显.这主要是由于SBS改性剂的掺入显著增加了沥青黏度,但SBS改性剂在短期老化过程中会发生裂解,分子结构受到破坏,抵消了一部分由其所带来的增黏作用;随着老化程度的加深,SBS改性剂带来的黏度增加逐渐占主导,黏性增速变快.

由表4还可知,SBS改性沥青长期老化后拟合曲线中 $d$ 的总增量与 $|S|$ 的总增量均小于基质沥青,表明在老化过程中SBS改性沥青的黏度变化和温度敏感性变化程度均小于基质沥青,但长期老化过程对SBS

改性沥青以上2个指标的影响更为显著.

综上所述,基质沥青的黏度和温度敏感性受热氧化老化的影响程度大于SBS改性沥青,且基质沥青的 $\Delta|S|$ 和 $\Delta d$ 在短期老化过程中的变化较明显,SBS改性沥青的 $\Delta|S|$ 和 $\Delta d$ 在长期老化过程中的变化较明显.

### 3 流变学指标分析

由于沥青三大指标试验在操作过程中受人为主观影响较大,为进一步减小主观因素对沥青性能分析的影响,针对DSR试验结果进行如下分析.

#### 3.1 复数剪切模量主曲线分析

利用时温等效原理WLF(Williams-Landel-Ferry)方程计算移位因子,采用广义西格摩德模型(Generalized logistic Sigmoidal)得到复数剪切模量( $E^*$ ),其具体计算式如式(1)~(3)所示.

$$\lg|E^*(f_r)| = \delta + \frac{\alpha - \delta}{(1 + \lambda e^{\beta + \gamma \lg f_r})^{\frac{1}{\lambda}}} \quad (1)$$

$$f_r = f\alpha_t \quad (2)$$

$$\lg \alpha_t = \frac{-C_1(t-t_0)}{C_2+(t-t_0)} \quad (3)$$

式中: $f_r$ 为缩减频率,Hz; $E^*(f_r)$ 为 $f_r$ 下的复数剪切模量,MPa; $\delta$ 为复数剪切模量最小对数值,MPa; $\alpha$ 为复数剪切模量最大对数值,MPa; $f$ 为试验频率,Hz; $\alpha_t$ 为移位因子; $t$ 为试验温度, $^{\circ}\text{C}$ ; $t_0$ 为参考温度, $^{\circ}\text{C}$ ; $\lambda$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $C_1$ 和 $C_2$ 均为拟合参数。

图3为2种沥青在老化前后的复数剪切模量主曲

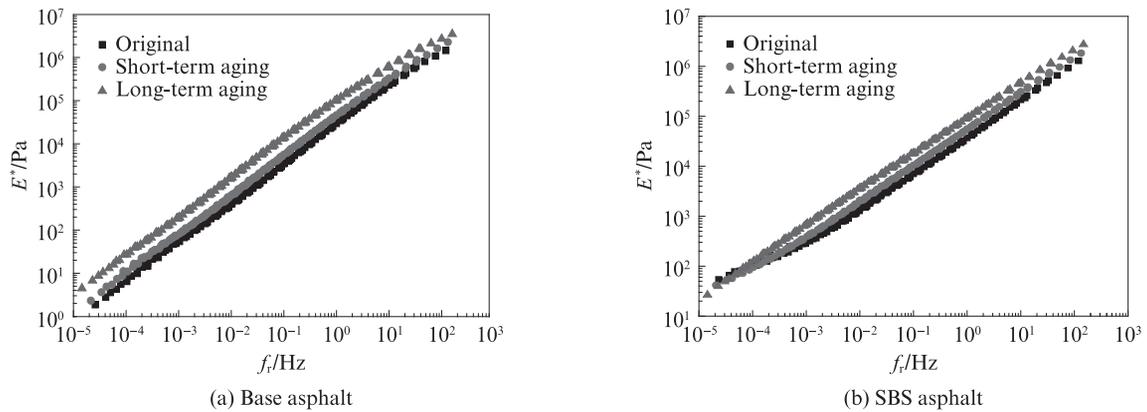


图3 2种沥青的复数剪切模量主曲线

Fig. 3 Complex shear modulus master curves of two kinds of asphalt

采用曲线特征值来量化评价2种老化方式对沥青复数剪切模量变化的影响程度.取0.01~10 Hz条件下复数剪切模量的差值平均值来描述主曲线的线位变化量,记为 $\Delta E^*$ ,用 $\Delta E^*/E^*$ 表示其变化率,列于表5.由表5可知:(1)2种沥青在长期老化过程中 $\Delta E^*$ 与 $\Delta E^*/E^*$ 均大于短期老化过程,说明热氧老化作用对沥青复数剪切模量的影响主要发生在长期老化阶段.(2)SBS改性沥青在长期老化与短期老化过程中的复数剪切模量变化率均小于基质沥青,说明SBS改性沥青的抗老化性能优于基质沥青.

表5 2种沥青复数剪切模量主曲线的线位变化特征值  
Table 5 Characteristic values of line position change of complex modulus master curves of two kinds of asphalt

Sample	Aging degree	$E^*/\text{Pa}$	$\Delta E^*/\text{Pa}$	$\Delta E^*/\%$
Base asphalt	Original	240 52		
	Short-term aging	373 05	132 53	55
	Long-term aging	781 32	408 27	109
SBS asphalt	Original	276 18		
	Short-term aging	413 89	137 71	50
	Long-term aging	722 77	308 88	75

### 3.2 疲劳性能分析

LAS试验是基于沥青的黏弹性连续损伤模型进

行.由图3可见:(1)沥青复数剪切模量随着缩减频率的增大而增大,也可理解为随着温度的降低而增大.(2)基质沥青的3条曲线在双对数坐标下基本平行;SBS改性沥青的3条曲线在低频(高温)时相交,随着频率的增大(温度减小),在0.01 Hz之后逐渐平行,表明SBS改性沥青在低频或高温状态下受热氧老化的影响较小.(3)2种沥青老化后复数剪切模量均有所增大,但短期老化与长期老化后复数剪切模量的增幅不同,长期老化对2种沥青复数剪切模量的影响更大.

行疲劳性能评价和预测的,可通过线性黏弹性损伤原理和连续损伤理论进行沥青疲劳性能分析.将 $|E^*| \sin \delta$ 作为材料内部状态参数来定义损伤,通过Schapery模型,并基于热力学不可逆原理对疲劳损伤进行量化表征;通过对材料内部状态变量与损伤量( $D$ )关系进行拟合,可得到沥青的疲劳寿命与应变之间的关系.

图4为2种沥青的损伤量-加载时间曲线.由图4可知,随着老化程度的加深,2种沥青的损伤量均呈现增大趋势,即老化后沥青的损伤量增大,损伤累积速率增大.因此,从损伤力学的角度分析,老化后沥青的抗疲劳性能变差.

为进一步量化研究2种沥青老化后疲劳性能的变化,将疲劳寿命( $N_f$ )随应变( $\epsilon$ )的变化示于图5.图5中的对数曲线实际为1条直线,斜率的绝对值记为 $B$ .由图5可知:2种沥青的疲劳寿命均随着应变的增大而线性减小;随着老化程度的加深, $B$ 变大. $B$ 越大表明沥青的疲劳寿命随应变的减小越快,即老化后沥青的抗疲劳性能变差,与图4分析结果一致.

将图5疲劳寿命-应变曲线进行线性拟合,其斜率变化率( $\Delta B$ )如表6所示.由表6可知:2种沥青的 $\Delta B$ 在长期老化过程中变化更大;基质沥青的 $\Delta B$ 在2

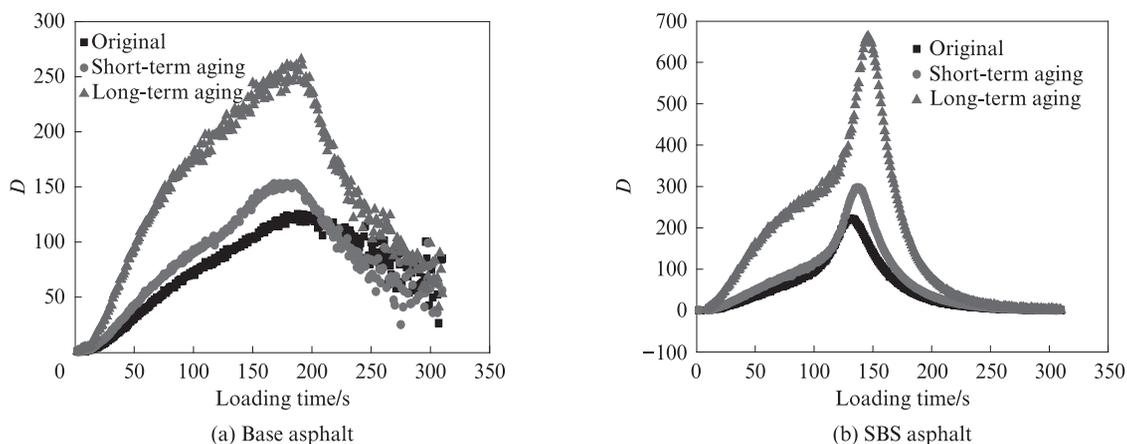


图4 2种沥青的损伤量-加载时间曲线

Fig. 4 Damage-loading time curves of two kinds of asphalt

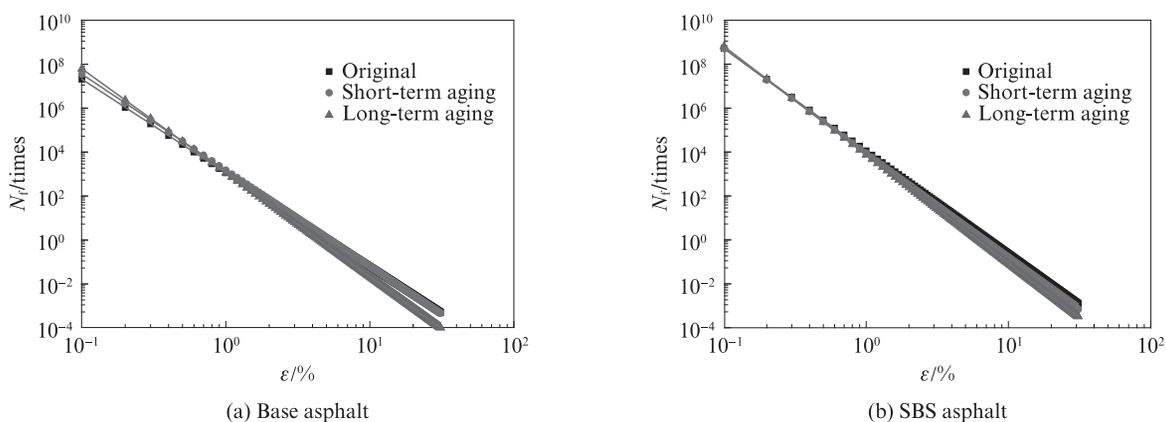


图5 沥青疲劳寿命-应变关系曲线

Fig. 5 Fatigue life-strain curves of two kinds of asphalt

种老化过程中的变化程度大于SBS改性沥青,表明老化对沥青疲劳寿命的影响主要发生在长期老化过程中,而且基质沥青的疲劳寿命受老化程度的影响更为明显.因此,从抗疲劳性能方面分析,SBS改性沥青的抗老化性能优于基质沥青.

表6 2种沥青的疲劳寿命-应变曲线的拟合参数

Table 6 Fitting parameters of fatigue life-strain curves of two kinds of asphalt

Sample	Aging degree	B	$\Delta B/\%$
Base asphalt	Original	4.258	
	Short-term aging	4.366	2.5
	Long-term aging	4.726	8.2
SBS asphalt	Original	4.664	
	Short-term aging	4.766	2.2
	Long-term aging	4.934	3.5

#### 4 介电常数试验结果分析

介电常数的采集频率为5 s/次.考虑空气流动及静电的影响,将介电常数试验值取为5~35 min各介

电常数读数的平均值,重复性试验误差不大于1%,精度高于溶剂沉淀及色谱柱法规范要求.

图6为2种沥青老化前后不同介电常数的各组分含量.

由图6可知:2种沥青中不同组分的介电常数值处于1.00~4.72之间;随着老化程度的加深,介电常数值处于1.63~3.48之间的组分含量明显减少,介电常数值大于3.48的组分含量明显增加,表明随着沥青老化程度的加深,低介电常数组分向高介电常数组分发生迁移,分子极性增大.

由图6还可知,沥青各组分介电常数范围跨越了高分子材料的3种极性范围.因现阶段多种改性沥青为高聚物改性沥青,为进一步量化评价沥青组分与性能的关联度,可参照高分子极性划分范围,根据介电常数范围将沥青组分划分为非极性物质Ⅰ(介电常数值小于2.25)、非极性物质Ⅱ(介电常数值为2.25~2.86)、弱极性物质(介电常数值为2.87~3.48)、极性物质(介电常数值大于3.48).2种沥青老化前后以上4种组分含量如表7所示.

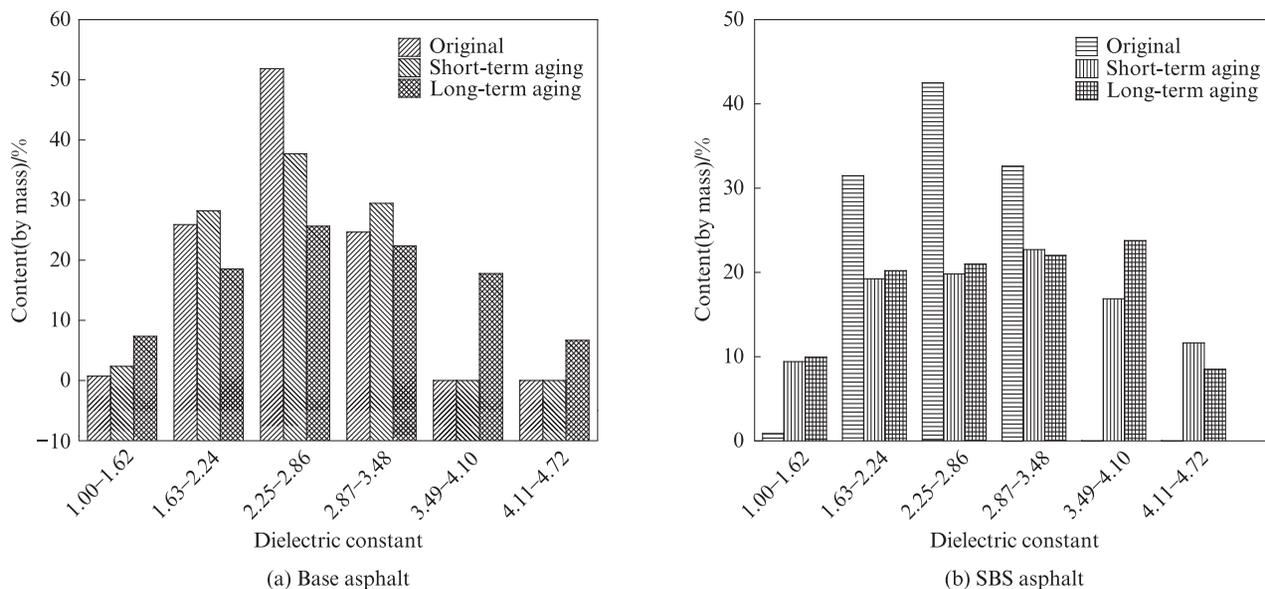


图6 2种沥青中不同介电常数范围的组分含量  
Fig. 6 Content of components in different dielectric constant ranges in two kinds of asphalt

表7 2种沥青的各组分含量  
Table 7 Content of components of two kinds of asphalt

Sample	Aging degree	Nonpolar material I	Nonpolar material II	Low polarity material	Polar material
Base asphalt	Original	26.6	51.9	24.7	0
	Short-term aging	30.6	37.7	29.5	0
	Long-term aging	25.9	25.7	22.4	24.5
SBS asphalt	Original	32.4	42.5	32.6	0
	Short-term aging	28.6	19.8	22.7	28.5
	Long-term aging	30.1	21.0	22.0	32.3

将沥青中的4种组分分别与针入度、软化点、135℃黏度和疲劳寿命-应变曲线斜率(B)做灰色关联度分析,关联指数如表8所示.由表8可知,4种组分对沥青各性能的贡献程度不同,其中对针入度的贡献程度由大到小为非极性物质II>弱极性物质>非极性物质I>极性物质,对软化点的贡献程度由大到小为非极性物质I>弱极性物质>非极性物质II>极性物质,对135℃黏度的贡献程度由大到小为非极性物质I>非极性物质II>弱极性物质>极性物质,对疲劳寿命-应变曲线斜率(B)的贡献程度由大到小为非

极性物质I>弱极性物质>非极性物质II>极性物质.

综上所述,在沥青改性过程中,可根据改性剂介电常数范围及其与基质沥青反应后的介电常数变化情况,结合不同介电常数范围内组分对沥青基础指标与流变性能的影响,按需改变组分的比例,以调整其路用性能.

### 5 结论

(1)采用三大指标描述沥青老化程度时,针入度指标评价最合理;基质沥青的黏度和温度敏感性受热氧老化的影响大于SBS改性沥青,并且在短期老化过程中变化更明显,而SBS改性沥青的黏度和温度敏感性在长期老化过程中变化更明显.

(2)基质沥青与SBS改性沥青的复数剪切模量在长期老化过程中的变化程度大于短期老化过程.SBS改性沥青的复数剪切模量在老化过程中的变化程度小于基质沥青.

表8 沥青组分与性能指标的关联指数

Table 8 Correlation indexes between components and performance indexes of asphalt

Component	Penetration	Softening point	Viscosity (135℃)	B
Nonpolar material I	0.733	0.899	0.684	0.889
Nonpolar material II	0.892	0.677	0.650	0.634
Low polarity material	0.791	0.807	0.624	0.787
Polar material	0.471	0.477	0.504	0.481

(3)基质沥青与SBS改性沥青抗疲劳性能的下降低主要发生在长期老化过程中.SBS改性沥青抗疲劳性能受老化的影响程度小于基质沥青.

(4)采用介电常数对沥青组分进行划分,并以此关联沥青老化前后的性能变化,来进一步指导沥青改性工艺是可行的.

#### 参考文献:

- [ 1 ] 黄小燕,王岚.热氧老化作用下温拌胶粉改性沥青微观特性研究[J].建筑材料学报,2020,23(6):1450-1457.  
HUANG Xiaoyan, WANG Lan. Investigation on microscale characteristics of warm mix rubber modified asphalt depending on thermal-oxidative aging[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(6):1450-1457. (in Chinese)
- [ 2 ] LESUEUR D. The colloidal structure of bitumen:consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2009, 145(1/2): 42-82.
- [ 3 ] WANG P E Y, WEN Y, ZHAO K C, et al. Evolution and locational variation of asphalt binder aging in long-life hot-mix asphalt pavements [J]. Construction and Building Materials, 2014, 68:172-182.
- [ 4 ] 范世平,朱洪洲,钟伟明.基于DSR试验生物重油再生沥青流变性能评价[J].建筑材料学报,2022,25(3):320-326.  
FAN Shiping, ZHU Hongzhou, ZHONG Weiming. Rheological performance evaluation of heavy bio-oil recycled asphalt based on DSR test[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(3): 320-326. (in Chinese)
- [ 5 ] 张恒龙,朱崇政,吴超凡,等.多尺度纳米材料对沥青流变和老化性能的影响[J].建筑材料学报,2019,22(2):238-244.  
ZHANG Henglong, ZHU Chongzheng, WU Chaofan, et al. Influence of multi-dimensional nanomaterials on rheological and aging properties of asphalt [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(2):238-244. (in Chinese)
- [ 6 ] 张恒龙,赵彬,徐国庆,等.不同热氧老化强度对沥青及其再生性能的影响[J].湖南大学学报(自然科学版),2019,46(1):117-123.  
ZHANG Henglong, ZHAO Bin, XU Guoqing, et al. Effects of thermal oxidative aging intensity on asphalt and its recycling properties [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(1):117-123. (in Chinese)
- [ 7 ] 王佳妮,薛忠军,谭忆秋.紫外老化对沥青力学行为及聚集态的影响[J].中国公路学报,2011,24(1):14-19.  
WANG Jiani, XUE Zhongjun, TAN Yiqiu. Influence of ultraviolet aging on mechanical behavior and aggregated state of asphalt [J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(1):14-19. (in Chinese)
- [ 8 ] LAMNII H, ABDELAZIZ M N, AYOUB G, et al. Experimental investigation and modeling attempt on the effects of ultraviolet aging on the fatigue behavior of an LDPE semi-crystalline polymer [J]. International Journal of Fatigue, 2021,142:105952.
- [ 9 ] KUMBARGER Y S, BILIGIRI K P. Understanding aging behaviour of conventional asphalt binders used in India [J]. Transportation Research Procedia, 2016, 17:282-290.
- [ 10 ] 梁波,兰芳,郑健龙.沥青的老化机理与疲劳性能关系的研究进展[J].材料导报,2021,35(9):09083-09096.  
LIANG Bo, LAN Fang, ZHENG Jianglong. Research and development of relationship between aging mechanism and fatigue properties of asphalt [J]. Materials Reports, 2021, 35(9): 09083-09096. (in Chinese)
- [ 11 ] QIN Q, SCHABRON J F, BOYSEN R B, et al. Field aging effect on chemistry and rheology of asphalt binders and rheological predictions for field aging [J]. Fuel, 2014, 121:86-94.