复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第35卷 第6期 6月 2018年
Vol. 35 No. 6 Jun 2018

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20170808.006

老化对改性沥青微观结构及疲劳性能的影响

崔亚楠*[1,2]，陈瑞璞[1]，陈超[3]，张淑艳[1]

（1. 内蒙古工业大学 土木工程学院，呼和浩特 010051；2. 道路结构与材料交通行业重点实验室，北京 100088；
3. 南水北调东线山东干线有限责任公司，济南 250000）

摘　要： 为了研究老化对改性沥青微观结构及疲劳性能的影响，通过沥青常规指标测试试验、动态剪切流变(DSR)试验和AFM测试试验，从宏细观角度分析了老化前后苯乙烯-丁二烯-苯乙烯三嵌段共聚物(SBS)改性沥青和胶粉改性沥青的针入度、延度和软化点及疲劳性能、微观结构的变化情况。结果表明：随着老化程度的加深，两种改性沥青的稠度、硬度增加，高温性能得到改善，而温度敏感性变低，低温抗裂性能变差。综合分析针入度比、延度比和软化点比得出胶粉改性沥青的抗老化性能优于SBS改性沥青；随温度的降低、频率的增大和老化程度的加深，两种改性沥青的抗疲劳性能变差；微观结构观测结果显示，SBS改性沥青具有“蜂型结构”，老化后“蜂型结构”的体积增大、高度增加、数量减少；胶粉改性沥青没有“蜂型结构”，胶粉颗粒与沥青在共混共融过程中发生溶胀、脱硫和降解等行为会影响沥青中“蜂型结构”的形成；老化前后胶粉改性沥青表面形貌粗糙度和高度变化不大；胶粉改性沥青的抗疲劳、抗老化和高温性能总体优于SBS改性沥青。

关键词： SBS改性沥青；胶粉改性沥青；疲劳性能；微观结构

中图分类号： TN332　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1000-3851(2018)06-1619-10

Effect of aging on microstructure and fatigue performance of modified asphalt

CUI Ya'nan*[1,2], CHEN Ruipu[1], CHEN Chao[3], ZHANG Shuyan[1]

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Huhehot 010051, China;
2. Key Laboratory of Road Structure and Materials Transportation, Beijing 100088, China;
3. South-to-North Water Diversion East Route Shandong Co. Ltd., Ji'nan 250000, China)

Abstract: In order to study the effect of aging on microstructure and fatigue properties of modified asphalt, the asphalt routine index test, the Dynamic Shear Rheometer(DSR) test and the AFM test were used to analyse penetration, ductility, softening point, fatigue performance and microstructure of styrene-butadiene-styrene tri-block copolymer(SBS) modified asphalt and rubber powder modified asphalt from the macro and micro perspective before and after aging. The results show that with the deepening of aging, the hardness of modified asphalt increases and the high temperature performance also improves, whlie the temperature sensitivity becomes lower and the low temperature crack resistance becomes worse. The anti-aging properties of rubber modified asphalt are better than that of SBS modified asphalt according to the comprehensive analysis of penetration ratio, ductility ratio and softening point ratio. With the decrease of temperature, the increase of frequency and the deepening of aging, the anti-fatigue performance of two modified asphalt is deteriorated. The microstructure observation results show that SBS modified asphalt has “bee-like structure” and the volume and height of “bee-like structure” increase after aging, but their numbers decrease. There is no “bee-like structure” in the rubber powder modified asphalt, it is due to some reactions like swelling, desulfurization and degradation occured in the blending process of asphalt and rubber powder that restricted the “bee-like structure” formation, and few changes occur in the roughness and the height of rubber powder mod-

收稿日期： 2017-05-25；**录用日期：** 2017-07-13；**网络出版时间：** 2017-08-08　19:03
网络出版地址： https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170808.006
基金项目： 国家自然科学基金（51568054）；道路结构与材料交通行业重点实验室(北京)开放基金课题
通讯作者： 崔亚楠，博士，教授，博士生导师，研究方向为道路工程材料　E-mail：yanancui@aliyun.com
引用格式： 崔亚楠，陈瑞璞，陈超，等. 老化对改性沥青微观结构及疲劳性能的影响[J]. 复合材料学报，2018，35(6)：1619-1628.
CUI Ya'nan, CHEN Ruipu, CHEN Chao, et al. Effect of aging on microstructure and fatigue performance of modified asphalt[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(6): 1619-1628 (in Chinese).

http://fhclxb.buaa.edu.cn

ified asphalt surface after aging. Rubber powder modified asphalt has better fatigue resistance, aging resistance and high temperature performance than that of SBS modified asphalt.

Keywords: SBS modified asphalt; rubber powder modified asphalt; fatigue performance; microstructure

沥青的老化是指沥青在运输储存、拌合摊铺及使用过程中，因温度、降水、光照和交通荷载等作用使沥青发生挥发、氧化和聚合等一系列反应，导致沥青变得脆硬、抵抗疲劳和低温开裂能力降低，最终导致路用性能劣化[1-6]。老化是影响沥青疲劳性能的主要因素之一，因此研究老化作用对沥青疲劳性能的影响规律具有重要意义[7-10]。

目前大多数的国内外学者通过沥青的常规指标(针入度、延度和软化点)测试试验及其路用性能指标对沥青老化后的特性进行评价，Huang等[11-12]通过沥青的针入度、延度和软化点来研究老化对基质沥青和苯乙烯-丁二烯-苯乙烯三嵌段共聚物(SBS)改性沥青流变学性能的影响，Xiao等[13]从微观结构角度分析了老化作用对胶粉改性沥青结构的影响，并分析了胶粉改性沥青的抗老化性能，王岚等[14]发现老化前橡胶粉改性剂及SBS改性剂都能与沥青达到良好共融，老化后橡胶粉改性剂与沥青的界面结合状况优于SBS改性剂与沥青的界面结合状况。

本文通过老化前后两种改性沥青的常规指标测试试验、动态剪切流变(Dynamic shear rheological, DSR)试验及沥青原子力显微镜(Atomic force microscope, AFM)测试试验，从宏细观角度分析了老化对沥青疲劳性能及微观结构的影响。

1　实验材料及方法

1.1　原材料

本文主要采用内蒙古中部地区道路施工常用的掺量为4.5%的SBS改性沥青和胶粉粒径为0.425 mm，掺量为18%的胶粉改性沥青作为本次试验的原材料沥青，两种改性沥青的基本指标如表1所示。

1.2　试验方法

1.2.1　沥青老化试验

利用沥青旋转薄膜加热试验(T0610—2011)和压力老化容器加速沥青老化试验(T0630—2011)，按照标准JTG E20—2011[15]分别对两种改性沥青进行短期老化(RTFOT)试验和长期老化(PAV)试验。

1.2.2　针入度、延度和软化点测试试验

通过针入度仪、延度仪和软化点试验仪来测试老化前后三种沥青的针入度、延度和软化点的变化情况，并计算针入度指数。

1.2.3　沥青AFM试验

本实验采用广州本原纳米公司生产的CSPM4000系列AFM对老化前后的两种改性沥青的微观形貌进行表征，采用轻敲模式。本试验利用“热熔法”制取AFM测试所需要的沥青试样：(1)准备长宽为76 mm×26 mm、厚度为1～1.2 mm的生物用载玻片，保证表面洁净；(2)将短期老化或长期老化后的沥青滴1～2滴至载玻片中央位置；(3)在载玻片沥青两侧适当位置处粘贴2～3圈厚耐热胶带，起到限制沥青扩散的作用；(4)水平放置于环境温度为120℃烘箱加热20 min左右，待沥青靠自身热运动自由扩散至载玻片表面为平面后取出；(5)用同样的方法制备3个平行试样。

1.2.4　DSR试验

采用美国TA公司的Discovery HR-1型动态剪切流变仪对老化前后的两种改性沥青进行温度扫描和频率扫描。采用控制应力模式，沥青控制应力目标水平为120 Pa。温度扫描范围15～40℃，频率为10 rad/s；频率扫描范围0～18 Hz，温度步长为5℃。

表1　改性沥青的基本指标

Table 1　Basic indicators of modified asphalt

Technical index	SBS modified asphalt	Rubber powder modified asphalt
Penetration value(25℃, 5 s, 100 g)/0.1 mm	62	53.8
PI	−0.16	0.3
Softening point/℃	72.6	81.9
Ductility at 10℃(5 cm/min)/cm	77.8	32.2

Notes: SBS—Styrene-butadiene-styrene tri-block copolymer; PI—Penetration index.

http://fhclxb.buaa.edu.cn

2 实验结果与分析

2.1 改性沥青针入度、延度和软化点

本文通过分析沥青针入度、延度、软化点的变化来考虑老化因素对两种改性沥青的影响。由图1(a)～1(c)可以看出，两种改性沥青的常规指标表现为随老化程度的加深，针入度和延度逐渐减小，软化点升高。即老化后沥青的稠度和硬度增加，高温性能得到改善，但老化后沥青的抗变形能力和抗裂性能降低。作为反映沥青感温性的指标，同时也考察了两种改性沥青的针入度指数。由图1(d)可以看出，两种改性沥青的针入度指数也随着老化程度的加深逐渐增大，说明老化后沥青的温度敏感性变低。

由图1(a)可以看出，两种改性沥青随老化程度加深，针入度减小，这是由于沥青老化后轻质组分容易挥发且易被集料吸收或吸附，胶质与沥青质的总量增加，因此导致沥青变硬。由图1(b)可以看出，老化后沥青延度的变化幅度表现为：SBS改性沥青＞胶粉改性沥青，虽然老化后SBS改性沥青的延度值降幅大于胶粉沥青，但老化后SBS改性沥青的延度值仍大于胶粉改性沥青，说明老化后SBS改性沥青的低温抗变形能力略优于胶粉改性沥青。由图1(c)可以看出，老化后的胶粉改性沥青的软化点大于SBS改性沥青，说明老化后的胶粉改性沥青有较好的高温性能。由图1(d)可以看出，胶粉改性沥青的针入度指数大于SBS改性沥青，说明胶粉改性沥青的温度敏感性较低。

为了准确合理地评价沥青的抗老化性能，通过针入度比、延度比和软化点比(老化后的指标与老化前的指标比值)对沥青的抗老化性能进行分析。针入度比大说明其老化中的针入度损失小，抗老化性能好；延度比越大，沥青的抗老化性能越好；软

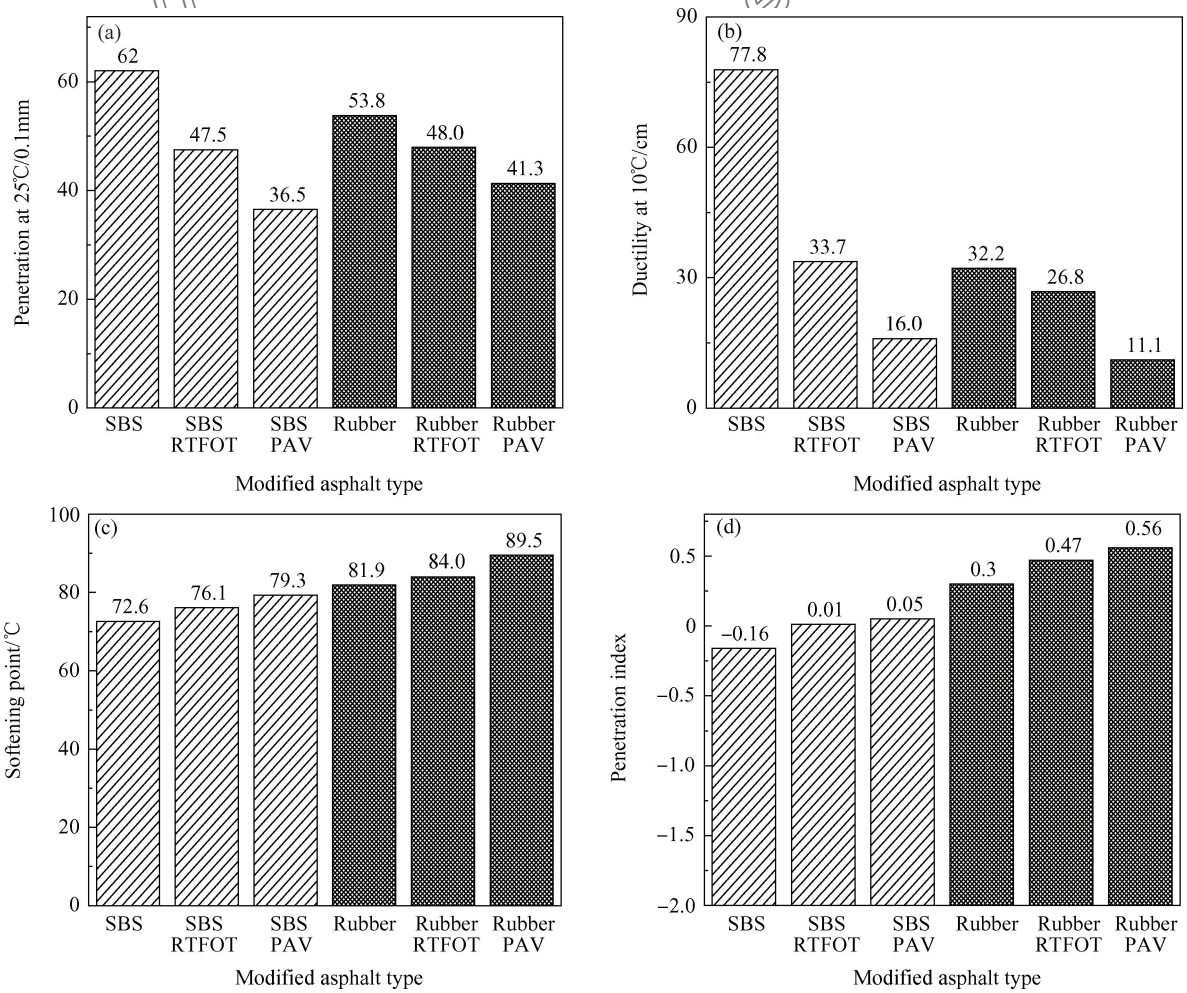


图1 老化前后SBS和胶粉改性沥青的基本指标

Fig. 1 Basic indicators of SBS and rubber powder modified asphalt before and after aging

(RTFOT—Short-time aging；PAV—Long-time aging)

化点比大说明其老化中的硬化程度大，抗老化性能差[2,16]。表 2 为两种改性沥青不同老化阶段的针入度比、延度比和软化点比。可以看出，经过短期和长期老化后，胶粉改性沥青的针入度比和延度比均大于 SBS 改性沥青。经过短期老化后，胶粉改性沥青的软化点比小于 SBS 改性沥青，但是长期老化后，胶粉改性沥青的软化点比略大于 SBS 改性沥青，综合分析以上 3 种沥青抗老化性能评价指标得出胶粉改性沥青的抗老化性能优于 SBS 改性沥青。

2.2　改性沥青 DSR 试验结果

2.2.1　温度扫描

基于动态剪切流变仪的温度扫描试验可以模拟沥青路面在不同温度区间服役时沥青材料的力学特性。根据 Superpave 沥青结合料规范指出，沥青在中温段易发生疲劳破坏，采用沥青的疲劳因子 $G^*\cdot\sin\delta\leqslant 5$ MPa(PAV 残留物)作为沥青疲劳开裂的控制标准，本文选择 15～40℃作为扫描区间，扫描采用降温的方法进行。扫描结果如图 2 和图 3 所示。可以看出，在 15～20℃之间，经长期老化的两种改

表 2　SBS 和胶粉改性沥青不同老化阶段的针入度比、延度比和软化点比

Table 2　Penetration ratio, ductility ratio and softening point ratio of SBS and rubber powder modified asphalt

Index	Asphalt	Original	RTFOT	PAV	(R/O)/%	(P/O)/%
Penetration ratio	SBS modified asphalt	62.0	47.5	36.5	76.6	58.9
	Rubber powder modified asphalt	53.8	48.0	41.3	89.2	76.8
Ductility ratio	SBS modified asphalt	77.8	33.7	16.0	43.3	20.6
	Rubber powder modified asphalt	32.2	26.8	11.1	83.2	34.5
Softening point ratio	SBS modified asphalt	72.6	76.1	79.3	104.8	109.2
	Rubber powder modified asphalt	81.9	84.0	89.5	102.5	109.3

Notes: R/O—RTFOT/Original; P/O—PAV/Original.

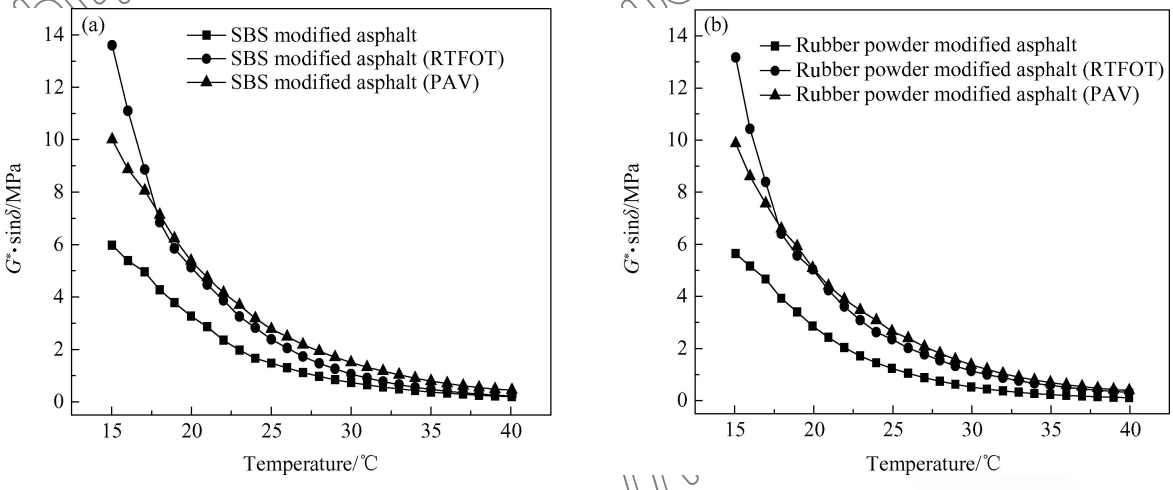


图 2　老化前后的 SBS 改性沥青和胶粉改性沥青的温度扫描结果

Fig. 2　Temperature scanming results of SBS modified asphalt and rubber powder modified asphalt before and after aging

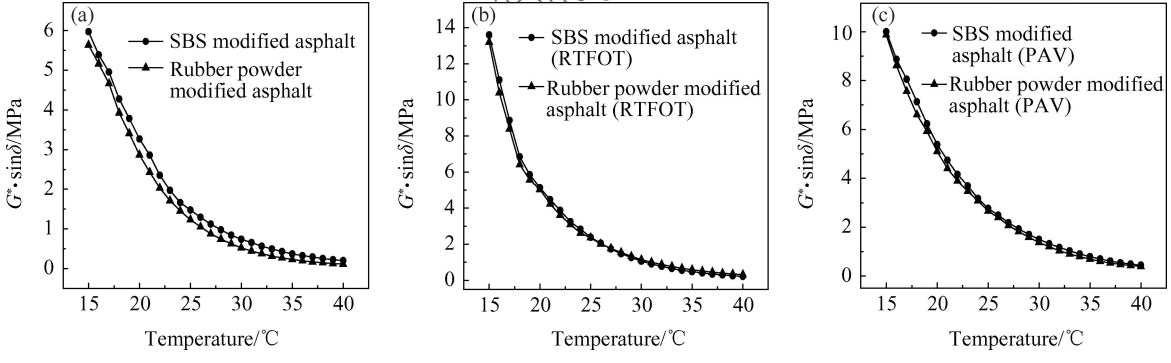


图 3　两种改性沥青及其短期老化和长期老化后的温度扫描结果

Fig. 3　Temperature scanming results of two modified asphalts, before and after short-time and long-time aging

性沥青 $G^*\cdot\sin\delta>5$ MPa，这也证实了沥青在 15～20℃左右易发生疲劳破坏。

由图 2 可以看出，三种不同老化程度的沥青随着试验温度的升高，沥青的疲劳因子 $G^*\cdot\sin\delta$ 逐渐减小，说明随着温度升高，沥青材料黏弹性质中黏性成分增加，弹性成分减少，疲劳因子 G^* Sinδ(损失模量)变小，减少了路面材料因产生应力累积而导致的疲劳破坏[7]。在 15～40℃之间，两种改性沥青的 $G^*\cdot\sin\delta$ 表现为随老化程度的加深，$G^*\cdot\sin\delta$ 逐渐增大，沥青老化后硬度增加，弹性成分增加，降低了沥青的抗疲劳性能，说明老化程度的加深加速了沥青的疲劳破坏。

由图 3 可以看出，随着温度升高、老化程度加深，3 种不同老化程度改性沥青的疲劳因子 $G^*\cdot\sin\delta$ 差异逐渐变小，曲线变得平缓，说明在 15～40℃之间随温度升高，沥青种类及老化程度对沥青的疲劳性能影响趋于稳定。在 15～40℃之间三种不同老化程度的改性沥青总体表现为胶粉改性沥青的 $G^*\cdot\sin\delta$ 小于 SBS 改性沥青，说明胶粉改性沥青的抗疲劳性能优于 SBS 改性沥青。

2.2.2 频率扫描

在不同的行车荷载作用频率下，沥青路面结构主要以动态加载效应的形式表现出来[7]。25℃时、0～18 Hz 的频率扫描测试结果如图 4 和图 5 所示。

由图 4 可以看出，随着频率增大，沥青的疲劳因子 $G^*\cdot\sin\delta$ 逐渐增大，且两种改性沥青的 $G^*\cdot\sin\delta$ 均表现为随老化程度加深而增大，当行车荷载作用频率增大时，相应循环荷载作用在沥青试样的时间变短，产生的变形变小，每次荷载循环所产生的变形中弹性变形的成分会增多[7]，同时老化作用也会使沥青出现由黏性体向弹性体转变的趋势，即弹性成分增加黏性成分减少，最终导致沥青的抗疲劳性能降低，说明随着作用频率增大、老化程度加深，沥青路面的抗疲劳性能逐渐变差。

由图 5 可以看出，在 25℃时不同频率下，3 种不同老化程度的改性沥青总体表现为胶粉改性沥青

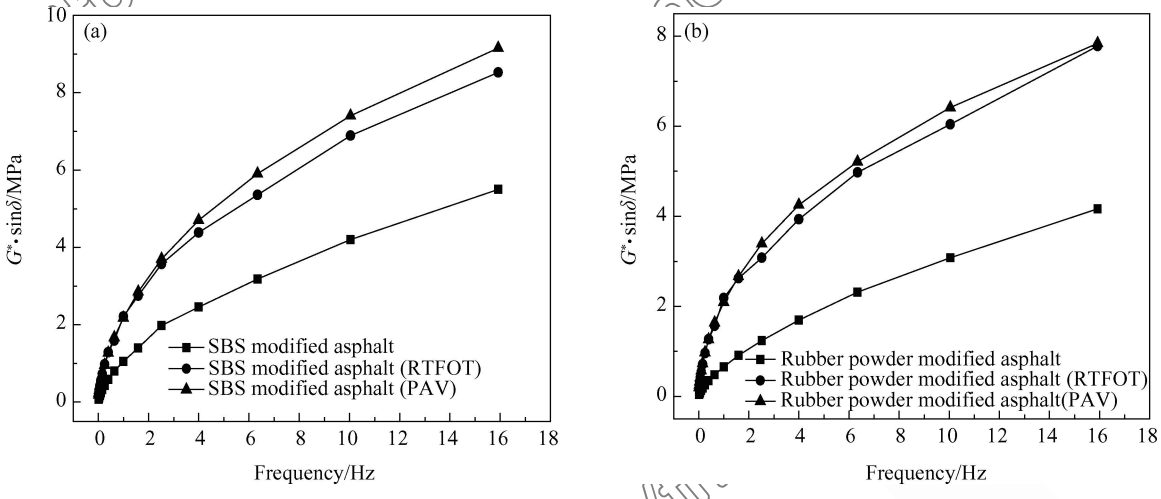


图 4 老化前后的 SBS 改性沥青和胶粉改性沥青的频率扫描结果

Fig. 4 Frequency scanning results of SBS modified asphalt and rubber powder modified asphalt before and after aging

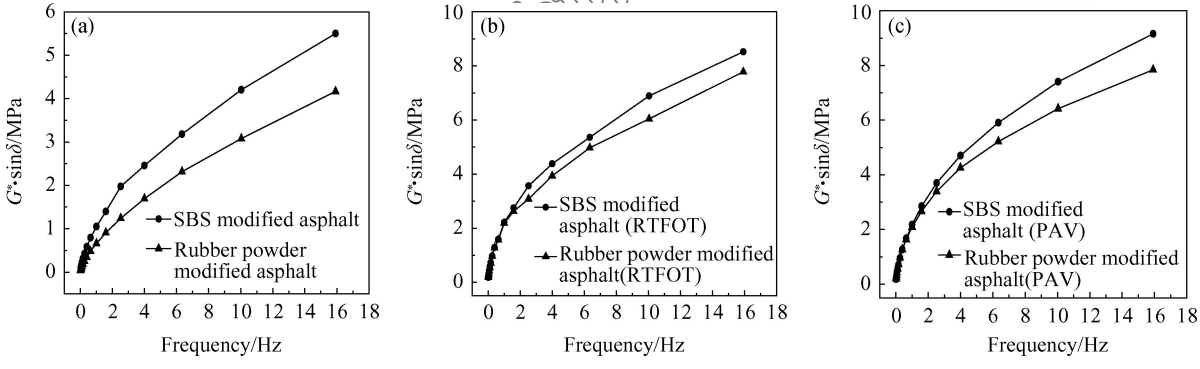


图 5 两种改性沥青及其短期老化和长期老化后的频率扫描结果

Fig. 5 Frequency scanning results of two modified asphalts, before and after short-time and long-time aging

的 $G^*\cdot\sin\delta$ 小于 SBS 改性沥青，说明在 25℃、0～18 Hz 的范围内，老化后的胶粉改性沥青的抗疲劳性能优于 SBS 改性沥青。

2.3　改性沥青微观试验结果

利用图像软件 Imager4.6 可得到两种改性沥青原子力表面微观形貌的粗糙度和高度，通过图像软件 R2V 对沥青形貌图像进行二值化处理，然后使用 Image-Pro Plus 分析目标的个数和面积，从而得到原子力表面微观形貌的相关指标。SBS 改性沥青和胶粉改性沥青在不同老化状态下，微观测试结果如图 6 和图 7 所示。表 3 和表 4 分别为 SBS 改性沥青“蜂型结构”参数和胶粉改性沥青微观结构参数。

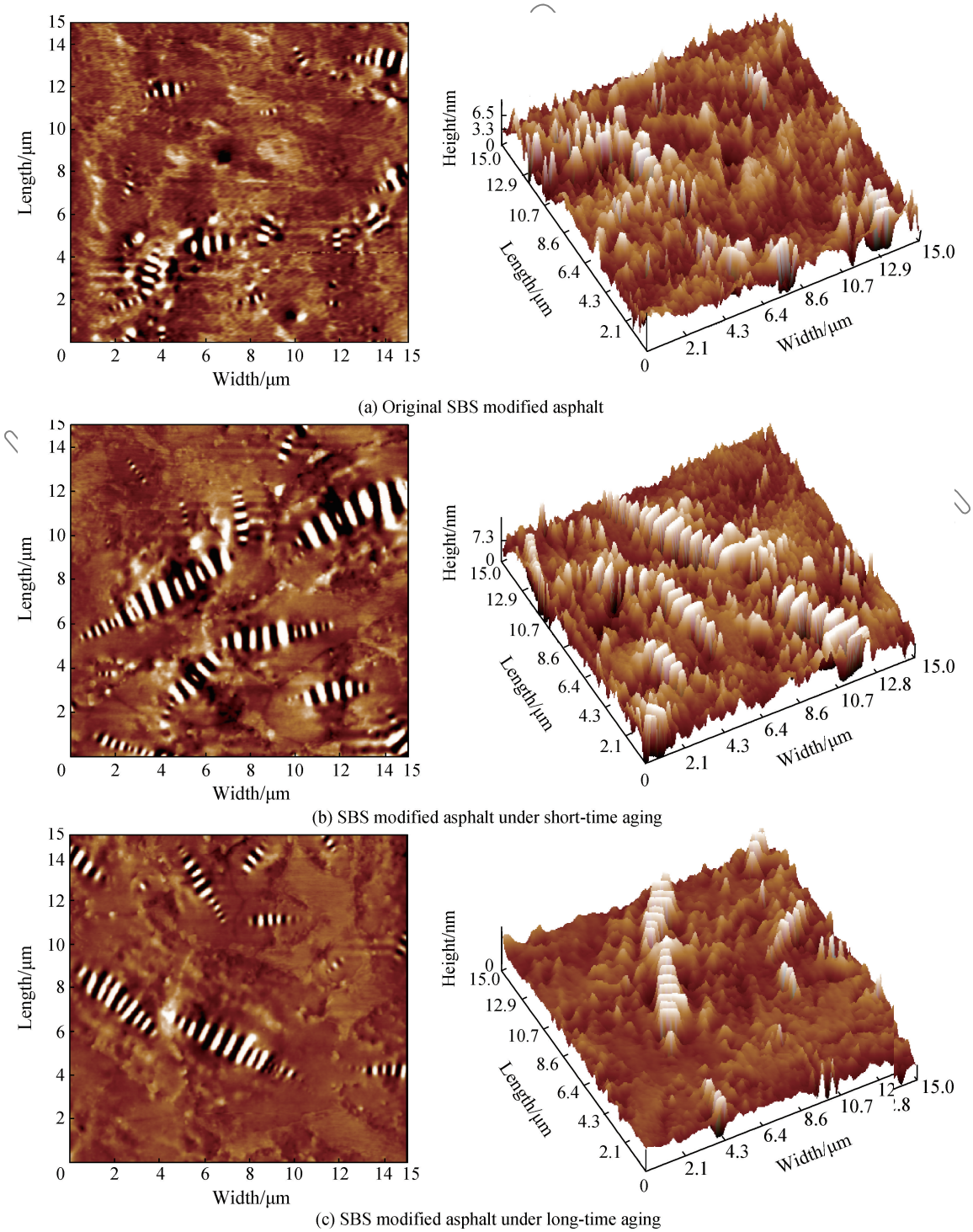
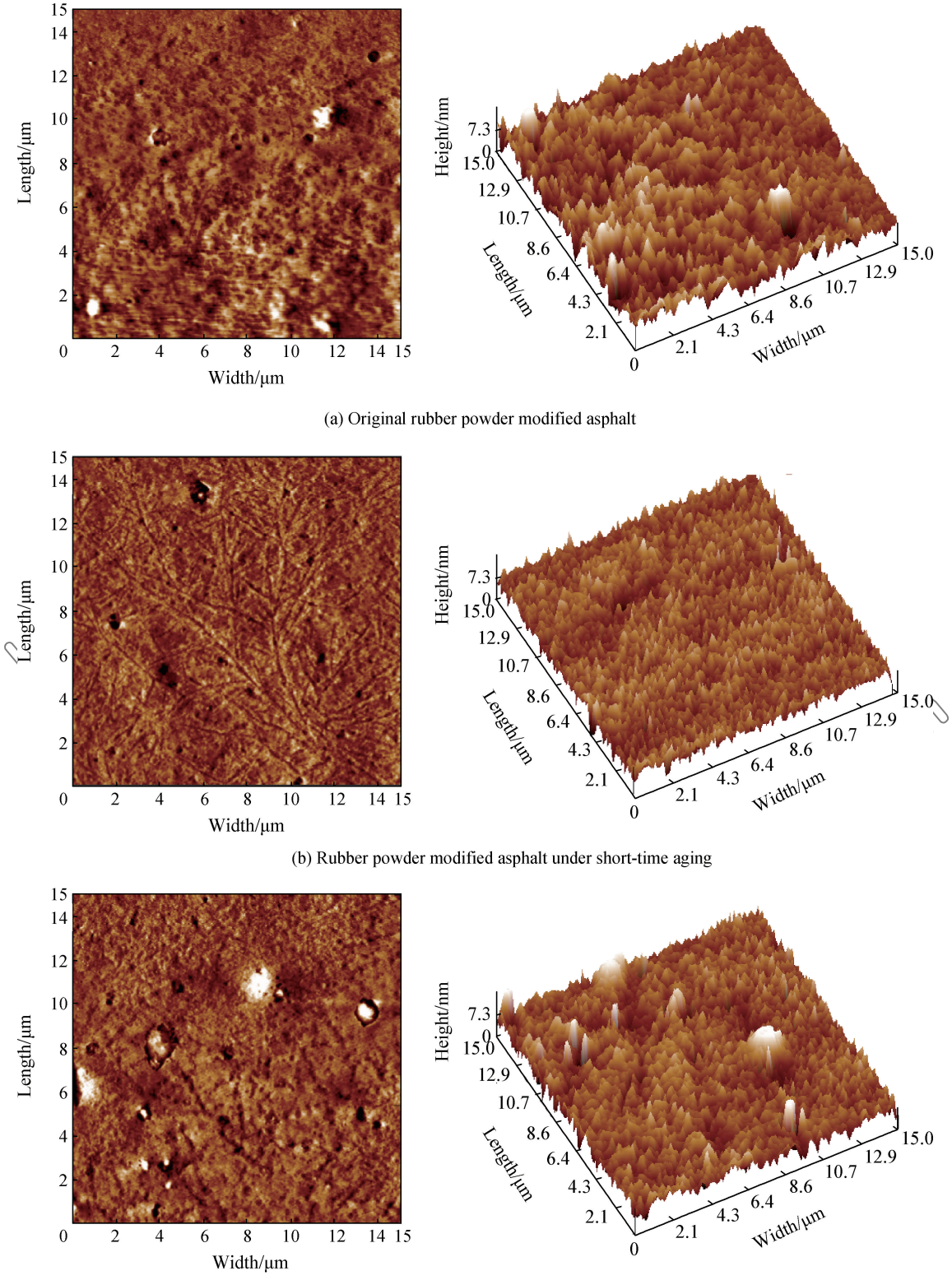


图 6　SBS 改性沥青及其老化后的 AFM 图像

Fig. 6　AFM images of SBS modified asphalts before and after aging



(a) Original rubber powder modified asphalt

(b) Rubber powder modified asphalt under short-time aging

(c) Rubber powder modified asphalt under long-time aging

图 7　胶粉改性沥青及其老化后的 AFM 图像

Fig. 7　AFM images of rubber powder modified asphalts before and after aging

由图 6 和表 3 可以看出，SBS 改性沥青的 AFM 形貌图上出现了明暗相间的“蜂型结构”。杨军等[17-20]认为，强极性的沥青质和高分子微晶蜡缔合了部分胶质及少许油分分散在油相中，若沥青

质-蜡结构在某一层的生长过程中产生缺陷，形成新边缘，其他蜡分子将在此连接而产生螺旋状生长，最终形成“蜂型结构”。经过短期和长期老化后，SBS改性沥青的“蜂型结构”体积增大，这是由于沥青老化程度加深，沥青质和胶质与高分子微晶蜡的相对比例发生变化，蜡的结晶点变少，单个蜡晶体的尺寸会增大，从而“蜂型结构”的体积也会增大[17]。部分“蜂型结构”长度增加(即黑白条纹数增加)，个别“蜂型结构”还出现交叉接触，团聚现象比较严重[20-21]。随着老化程度的增加，SBS改性沥青的最大“蜂型结构”面积逐渐增大，最小“蜂型结构”面积也有明显的增大趋势，但“蜂型结构”总数逐渐减少，单个“蜂型结构”有变大趋势，说明微观“蜂型结构”有可能随着老化有“合并”现象[17]。胶粉改性沥青是基质沥青中掺入胶粉颗粒后，在高温状态下通过共混共融作用下形成的沥青，当胶粉颗粒进入沥青后会吸收分子量较小的饱和分和芳香分而发生溶胀，从而有效地降低沥青中的游离蜡含量[22]，胶粉颗粒溶胀后会释放由大分子沥青质组成的胶粉分子碎片，随着时间的增长，胶粉颗粒在脱硫或降解的反应中会消耗沥青质[23]，这一系列的反应会导致沥青中沥青质和高分子微晶蜡含量发生改变，影响了“蜂型结构”的形成过程，最终无法形成“蜂型结构”。由图7和表4可以看出，原样胶粉改性沥青中有少量的凸起，推测胶粉改性沥青的凸起是降温过程中适量的胶质和沥青质被吸附在蜡晶表面形成的沥青质-蜡结构[19]。短期老化过程温度较高，沥青质与高分子蜡等大分子物质能够较好地均匀分散在沥青中，不易出现聚集，沥青表面比较平滑，短期老化后沥青的微观结构上出现了一些沟壑纵横的条纹，沟壑的出现是由于沥青表面部分油分(饱和分、芳香分)的反应和挥发所造成的。经过长期老化后，沥青表面的轻组分进一步充分的反应和挥发，沥青的微观结构会出现少量沥青质与高分子蜡聚集的现象，沥青表面变得粗糙。

表3　SBS改性沥青“蜂型结构”参数

Table 3　Bee type structure parameters of SBS modified asphalt

SBS modified asphalt	Quantity	Surface roughness/nm	Surface height/nm	Maximum area of the single/μm^2	Minimum area of the single/μm^2	Area/μm^2	Area ratio/%
Original	15	1.23	4.86	1.62	0.199	14.53	6.46
Short-term aging	12	2.18	7.43	7.08	0.238	37.39	16.67
long-term aging	10	2.59	14.7	7.62	0.370	21.68	9.67

表4　胶粉改性沥青微观结构参数

Table 4　Microstructure parameters of rubber powder modified asphalt

Rubber powder modified asphalt	Original	Short-time aging	Long-time aging
Surface roughness/nm	1.60	1.42	1.58
Surface height/nm	7.46	7.43	7.52

由图6～图7及表3～表4可以看出，随着老化程度的加深，老化后SBS改性沥青“蜂型结构”的体积和总面积增大，虽然长期老化后“蜂型结构”的面积略有下降，但沥青表面形貌平均粗糙度和“蜂型结构”的高度在逐渐增加，粗糙度从未老化时的1.23/nm增长到长期老化后的2.59/nm，增幅为110.6%；高度从未老化时的4.86/nm增长到长期老化后的14.7/nm，增幅为202.5%；沥青质含量随老化程度加深而增加，结合宏细观结论说明了老化后沥青的弹性成分增加、黏性成分减少，沥青硬度增加，从而SBS改性沥青的高温性能得到改善，疲劳性能和低温性能降低。经过高温老化后的胶粉改性沥青的表面形貌平均粗糙度和高度变化不大，粗糙度从未老化时的1.6/nm下降到长期老化后的1.58/nm，降幅为1.25%；高度从未老化时的7.46/nm增加到长期老化后的7.52/nm，增幅为0.80%；胶粉改性沥青的微观结构粗糙度和高度变化幅度明显小于SBS改性沥青，结合宏细观结论说明了胶粉改性沥青有着较好的抗老化性能和高温性能[25]。

3　结　论

(1) 沥青的针入度、延度和软化点测试结果表明，随老化程度的加深，苯乙烯-丁二烯-苯乙烯三嵌段共聚物(SBS)和胶粉两种改性沥青的针入度和延度逐渐减小，针入度指数和软化点增大，说明随老化程度的加深，沥青的稠度和硬度增加，高温性

http://fhclxb.buaa.edu.cn

能得到改善，温度敏感性变低，低温抗裂性能变差。综合分析针入度比、延度比和软化点比 3 种沥青抗老化性能评价指标得出胶粉改性沥青的抗老化性能优于 SBS 改性沥青。

（2）动态剪切流变（DSR）试验结果表明，随温度降低、作用频率增大和老化程度加深，两种改性沥青的抗疲劳性能变差，但老化前后的胶粉改性沥青的抗疲劳性能都优于 SBS 改性沥青。

（3）AFM 结果表明，SBS 改性沥青具有“蜂型结构”，老化后“蜂型结构”的体积增大、高度增加、数量减少；胶粉改性沥青没有“蜂型结构”，由于胶粉颗粒与沥青在共混共融过程中会发生溶胀、脱硫和降解等影响沥青中沥青质和高分子微晶蜡含量的行为，从而影响了胶粉改性沥青“蜂型结构”的形成；经过老化后的胶粉改性沥青表面形貌平均粗糙度和高度变化不大。

（4）根据上述试验结果表明，老化前后胶粉改性沥青疲劳因子较小、微观结构变化幅度不大、针入度指数大，说明胶粉改性沥青的抗疲劳、抗老化和高温性能好，感温性低。

参考文献：

[1] 曹青霞，何兆益，李庆. SBS 改性沥青老化研究现状综述[J]. 石油沥青，2013，27(4)：1-5.
CAO Qingxia，HE Zhaoyi，LI Qing. Overview of SBS modified asphalt aging research[J]. Petroleum Asphalt，2013，27(4)：1-5 (in Chinese).

[2] 刘丽. 基于热、光耦合条件下 SBS 改性沥青老化机理研究[D]. 重庆：重庆交通大学，2015.
LIU Li. Study on the aging mechanism of SBS modified asphalt in the coupling condition of thermal and ultraviolet[D]. Chongqing：Chongqing Jiaotong University，2015 (in Chinese).

[3] 王强，袁野，欧阳春发，等. 废旧橡胶改性沥青的老化研究现状[J]. 高分子通报，2015(6)：19-28.
WANG Qiang，YUAN Ye，OU YANG Chunfa，et al. Research status of waste rubber powder modified asphalt under aging[J]. Polymer Bulletin，2015(6)：19-28 (in Chinese).

[4] ABBAS A R，MANNAN U A，DESSOUKY S. Effect of recycled asphalt shingles on physical and chemical properties of virgin asphah binders[J]. Construction and Building Materials，2013，45：162-172.

[5] 张金喜，姜凡，王超，等. 室内外老化沥青混合料动态模量评价研究[J]. 建筑材料学报，2017(6)：1-9.
ZHANG Jinxi，JIANG Fan，WANG Chao，et al. Study on dynamic modulus evaluation of indoor and outdoor aging asphalt mixture[J]. Journal of Building Materials，2017(6)：1-9 (in Chinese).

[6] 王岚，王宇，邢永明，等. 短期老化对橡胶粉改性沥青流变性能的影响[J]. 材料工程，2016，44(1)：54-59.
WAND Lan，WANG Yu，XING Yongming，et al. Effect of short term aging on rheological properties of rubber powder modified asphalt[J]. Journal of Materials Engineering，2016，44(1)：54-59 (in Chinese).

[7] 姜晥. 沥青胶浆自愈合能力研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2011：8-32.
JIANG Wan. Research on the self-healing capacity of bitumen mastics[D]. Wuhan：Wuhan University of Technology，2011：8-32 (in Chinese).

[8] LEE S J，AMIRKHANIAN S N，SHATANAWI K，et al. Short term aging characterization of asphalt binders using gel pemeation chromatography and selected superpave binder tests[J]. Construction & Building Materials，2008，22(11)：2220-2227.

[9] 穆红运. 短期老化对聚合物改性沥青流变学特性的影响[J]. 公路工程，2015，40(1)：261-265，269.
MU Hongyun. Effect of short-term aging on rheological properties of polymer modified asphalt[J]. Highway Engineering，2015，40(1)：261-265，269 (in Chinese).

[10] 高诗龙，洪盛祥. 基于 Superpave 设计方法的橡胶沥青混合料老化特征研究[J]. 中外公路，2016(6)：260-263.
GAO Shilong，HONG Shengxiang. Study on aging characteristics of rubber asphalt mixture based on superpave design method[J]. Journal of China & Foreign Highway，2016(6)：260-263 (in Chinese).

[11] HUANG W. Aging performance of SBS modified asphalt[J]. Petroleum Science and Technology，2013，26(17)：2108-2114.

[12] FANG C Q，WU C X，YU R E. Aging properties and mechanism of the modified asphalt by packaging waste polyethylene and waste rubber powder[J]. Polymers for Advanced Technologies，2013，24(1)：51-55.

[13] XIAO X Y，YANG Z Q. Properties of organic montmorillonite/crumb rubber compound modified asphalt[J]. Journal of South China University of Technology，2013，41(6)：116-120.

[14] 王岚，陈刚，邢永明，等. 老化对胶粉和 SBS 改性沥青流变性能的影响[J]. 建筑材料学报，2015，18(3)：499-504.
WANG Lan，CHEN Gang，XING Yongming，et al. Effect of aging on rheological properties of crumb rubber and sbs modified asphalt[J]. Journal of Building Materials，2015，18(3)：499-504 (in Chinese).

[15] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程：JTG E20—2011[S]. 北京：人民交通出版社，2011.
Ministry of Transport of the People's Republic of China.

http://fhclxb.buaa.edu.cn

Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG E20—2011[S]. Beijing: China Communications Press, 2011 (in Chinese).

[16] 李宁利，张彩利，肖庆一，等. 沥青抗老化性能评价指标[J]. 河北工业大学学报，2013，42(2)：80-83.
LI Ningli, Zhang Caili, Xiao Qingyi, et al. Evaluation index of the performance of aging resistance of asphalt[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2013, 42(2): 80-83 (in Chinese).

[17] 杨军，龚明辉，PAULI Troy，等. 基于原子力显微镜的沥青微观结构研究[J]. 石油学报(石油加工)，2015，31(4)：959-965.
YANG Jun, GONG Minhui, PAULI Troy, et al. Study on Micro-structures of asphalt by using atomic force microscopy [J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2015, 31(4): 959-965 (in Chinese).

[18] 杨军，王潇婷，龚明辉，等. 沥青原子力显微镜微观图像的特征分析[J]. 石油学报(石油加工)，2015，31(5)：1110-1115.
YANG Jun, WANG Xiaoting, GONG Minhui, et al. Analysis of the microscopic images of asphalt getting from atomic force microscopy[J]. Acta Petrolei Sinica(Petroleum Processing Section), 2015, 31(5): 1110-1115 (in Chinese).

[19] 王媞. 南阳原油石蜡结晶微观特性研究[D]. 北京：中国石油大学，2009.
WANG Ti. Study on the wax crystals' microscopic characteristic of Nan Yang crude oil[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2009 (in Chinese).

[20] 代震，沈菊男，石鹏程. 基于沥青微观形貌与流变性研究SBS改性对其老化的影响[J]. 石油学报(石油加工)，2017，33(3)：578-587.
DAI Zhen, SHEN Ju'nan, SHI Pengcheng. Influence of SBS modification on the asphalt aging based on nano-sized topography and rheological properties[J]. Acta Petrolei Sinica(Petroleum Processing Section), 2017, 33(3): 578-587 (in Chinese).

[21] LOEBER L, SUTTON O, MOREL J, et al. New direct observations of asphalts and asphalt binders by scanning electron microsopy and atomic force microscopy[J]. Journal of Microscopy, 1996, 182(1): 32-39.

[22] 许爱华，郭朝阳，卢伟. 废胎胶粉橡胶沥青改性机理研究[J]. 交通科技，2010(3)：87-89.
XU Aihua, GUO Caoyang, LU Wei. Study of the modified mechanism of ground tire asphalt rubber[J]. Transportation Science & Technology, 2010(3): 87-89 (in Chinese).

[23] ZHANG Xiaoying, XU Chuanjie. The mechanism of asphalt modification by crumb rubber[J]. China Petroleum Processing & Petrochemical Technology, 2012, 14(3): 39-43.

[24] 马翔，崔宇超，梁长哲，等. 两种改性剂对沥青表面形貌的影响[J]. 建筑材料学报，2017，20(4)：569-574.
MA Xiang, CUI Yuchao, LIANG Changzhe, et al. Effects of two kinds of modifier on surface morphology of asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(4): 569-574 (in Chinese).

http://fhclxb.buaa.edu.cn