

文章编号:1671-8879(2018)05-0018-07

## 再生沥青中新旧沥青扩散特性

刘朝晖<sup>1</sup>, 高新文<sup>1,2</sup>, 翟 龙<sup>1</sup>, 李 平<sup>1</sup>, 李欧婧<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 山西省交通运输厅, 山西 太原 030001)

**摘 要:**为掌握再生沥青中新旧沥青扩散特性,以提高再生沥青混合料性能和旧沥青的再生程度,采用老化沥青和新沥青制备双层沥青试样,保温使新旧沥青扩散,在此基础上,建立基于针入度和动态剪切流变(DSR)试验的新旧沥青扩散程度评价方法和指标,进而研究高温和中温条件下扫描保温时间、保温温度、老化沥青类型及老化程度对旧沥青扩散程度影响,设计正交试验,并使用极差分析和方差分析方法研究各因素影响程度。结果表明:高温条件下新旧沥青扩散程度随保温时间的增加先增加后不变,随老化程度的增加基质沥青扩散程度逐渐增加,SBS 改性沥青则基本不变,且老化程度较低时 SBS 改性沥青扩散程度优于基质沥青,但老化程度严重时正好相反;老化时间、保温温度和保温时间对旧沥青扩散程度的影响程度依次降低,其中老化时间和保温温度对其有显著影响,而保温时间无显著影响;中温扫描时,新旧沥青扩散程度随扫描时间的增加而增加,随老化程度增加而减小,且基质沥青扩散程度优于 SBS 改性沥青;高温和中温条件下新旧沥青扩散程度均随温度的增加而增加,且基质沥青的最佳增长温度范围高于 SBS 改性沥青。故如需提高再生沥青混合料中新旧沥青扩散程度时应主要关注沥青老化程度及适宜的旧沥青温度。

**关键词:**道路工程;再生沥青;扩散特性;DSR

**中图分类号:**U416.217 **文献标志码:**A

## Diffusion characteristics of aged and virgin asphalt in reclaimed asphalt

LIU Zhao-hui<sup>1</sup>, GAO Xin-wen<sup>1,2</sup>, ZHAI Long<sup>1</sup>, LI Ping<sup>1</sup>, LI Ou-jing<sup>1</sup>

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, Hunan, China; 2. Transport Department of Shanxi Province, Taiyuan 030001, Shanxi, China)

**Abstract:** To evaluate the diffusion characteristics of new and old asphalt in recycled asphalt, and to improve the performance of recycled asphalt mixture, two-layer asphalt samples were prepared using aged asphalt and virgin asphalt, and thermal insulation was used for the diffusion of virgin asphalt and old asphalt. Based on this, an evaluation method and index for the diffusion degree of virgin asphalt and old asphalts based on penetration and dynamic shear rheology (DSR) tests were established. Next, the influence of scanning insulation time, insulation temperature, type of aged asphalt, and aging degree on the diffusion degree of new and old asphalt was investigated. Orthogonal test using range analysis and variance analysis method was designed to study the degree and significance of the influence degree of each factor. The results show that under the condition of high temperature storage, the diffusion of new and old asphalt first increases with the insulation time and then becomes constant. The diffusion of asphalt increases with the aging

收稿日期:2018-03-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51878075);广西科技计划项目(桂科 AC16380111);广西交通科技项目(桂交科 2013-100-28)

作者简介:刘朝晖(1968-),男,湖南邵阳人,教授,博士研究生导师,E-mail:723772885@qq.com。

degree. the SBS modified asphalt remains constant. The diffusion of SBS modified asphalt is better than that of asphalt when the aging degree is low, however, the opposite occurs when the aging degree is high. The influence of aging time, holding temperature, and holding time on the diffusion degree of new and old asphalt decreases. The aging time and holding temperature significantly influence the asphalt, but the holding time does not. Under the condition of middle temperature scanning, the diffusion degree increases with the increase of the scanning time and decreases with the increase of the aging degree. Further, the diffusion degree of asphalt is better than that of SBS modified asphalt. Under the condition of new and old asphalt the diffusion degree increases with the increase of temperature, and the optimum increase temperature range of asphalt is higher than that of SBS modified asphalt. Therefore, to improve the diffusion characteristics of asphalt in recycled asphalt mixture, the asphalt aging degree and the asphalt temperature must be considered. 3 tabs, 5 figs, 21 refs.

**Key words:** road engineering; reclaimed asphalt; diffusion characteristics; DSR

## 0 引言

20世纪90年代以来,中国高速公路通车里程不断增长。在公路建设取得飞速发展的同时,不断增长的交通量和日趋严重的超载现象造成路面发生明显车辙、裂缝及表面松散等病害现象。目前,中国早期修建的高速公路已逐渐进入大、中修期,其过程会产生大量旧沥青路面材料(RAP),若将其废弃一方面会造成严重的环境污染,另一方面也会造成资源浪费。近年来中国公路发展理念逐渐向低碳、环保与可持续转变,因此沥青路面再生技术逐渐引起关注<sup>[1-2]</sup>。沥青再生过程中,在一定温度和搅拌条件下,新沥青和再生剂与RAP表面旧沥青混合,然后由外到内扩散与其混溶,使其性能得到恢复<sup>[3-7]</sup>。但研究发现,这一过程作用深度有限,裹附于RAP内部的旧沥青未参与再生<sup>[8-12]</sup>,因此新旧沥青扩散特性对老化沥青再生效果有重要影响。

目前,关于扩散特性研究的方法主要有:一是物理化学分析方法,如分子动力学模拟法、凝胶色谱分析、染色法、沥青胶体结构的电导率评价法等,其从微观角度分析扩散特性,试验方法难度较大,且仪器昂贵;二是基于扩散模型和传质模型,根据老化沥青的针入度、黏度和质量变化等来评价其扩散程度<sup>[13-14]</sup>。上述方法一般关注再生剂在旧沥青中的扩散研究,如Oliver使用氚元素对再生剂进行标记,然后将其喷于沥青圆柱体上,并隔一定时间对沥青试样进行切片分析其放射性,以确定再生剂扩散深度,研究发现扩散与温度具有Arrhenius关系,且分子形状对扩散过程的影响程度比分子量更大<sup>[15]</sup>。李立寒等研究了再生剂和旧沥青扩散程度的影响因

素,发现再生剂黏度较高或旧沥青老化程度严重时不利于再生剂扩散,而环境温度和扩散时间增加时扩散程度明显提高<sup>[16]</sup>。沈凡等研究了再生剂扩散深度与其作用效果关系,发现两者成反比<sup>[17]</sup>。耿九光基于动态剪切流变(DSR)试验对再生剂在不同类型沥青中的扩散规律进行了研究,发现基质沥青中的扩散系数大于改性沥青,原因是前者的黏度较低<sup>[18]</sup>。许劭对再生剂与旧沥青的扩散机理进行了分析,发现扩散的驱动力来源于范德华力和电场力,其随着两者势能的稳定而结束<sup>[19]</sup>。Karlsson等采用傅里叶变换红外光谱衰减全反射技术(FTIR-ATR)研究了再生剂在沥青中的扩散特性,发现其扩散过程可用Fick模型描述,即旧沥青对再生剂的摄取量与时间的1/2次方成正比<sup>[20]</sup>。徐萌研究了扩散剂分子极性和尺寸对其在沥青中扩散程度的影响,发现极性较大、尺寸较小的分子容易发生扩散<sup>[21]</sup>。

现有研究涵盖了再生剂在沥青中的扩散特性分析方法、扩散机理、扩散模型、材料性质和环境因素对扩散程度的影响,但对新旧沥青的扩散行为鲜有报道。实际应用中沥青再生是新旧沥青相互作用,且新沥青与再生剂性能存在较大差别,因而研究新旧沥青的扩散特性十分重要。为此,本文首先建立基于针入度和DSR试验的新旧沥青扩散程度评价方法,然后研究高温和中温条件下扫描保温时间、保温温度、老化沥青类型及老化程度对新旧沥青扩散程度影响,并分析其影响程度排序,对进一步掌握旧沥青再生程度,以及提高再生沥青混合料性能有重要意义。

# 1 原材料与试验方法

## 1.1 沥青

旧沥青采用壳牌 70# 基质沥青和昆仑金鹿牌 SBS I-C 改性沥青经旋转薄膜烘箱老化(RTFOT)后获得,新沥青采用壳牌 90# 基质沥青。《公路沥青路面再生技术规范》(JTG F41—2008)中规定进行热再生的旧沥青针入度(25 °C, 100 g, 5 s)应大于 20(0.1 mm),故本文对 70# 基质沥青和 SBS 改性沥青进行了不同 RTFOT 时间下的针入度试验,最终确定老化时间最大值为 360 min。

## 1.2 新旧沥青扩散程度评价方法

### 1.2.1 针入度试验

新旧沥青接触时会发生相互扩散。根据此原理,本文首先将 50 g 旧沥青加热至 130 °C 浇入针入度试模,冷却后用同样方法在其表面继续浇入 17 g 新沥青,放入烘箱中保温以加速新旧沥青扩散,规定时间后取出试模冷却,测试 25 °C 针入度(上海昌吉产 SYD-2801 针入度仪)。同时以保温时间为 0 h 的针入度作为未发生扩散的基准值,然后根据式(1)计算针入度试验下新旧沥青扩散程度  $\Delta P$

$$\Delta P = |P_1 - P_0| \quad (1)$$

式中: $P_0$  为保温一定时间后的针入度值; $P_1$  为保温时间为 0 h 的针入度值。

未发生扩散时试模上层主要为低黏度的新沥青,针入度值较高,随着扩散的发生,新旧沥青互相融合,针入度值逐渐降低,因此,其值越大表明扩散程度越明显。

### 1.2.2 DSR 试验

为更精确评价新旧沥青扩散过程,将新、旧沥青分别浇筑成直径 25 mm、高 0.5 mm 的试件,见图 1(a),进而叠合形双层沥青试样,见图 1(b),并利用 DSR 进行测试,见图 1(c)。

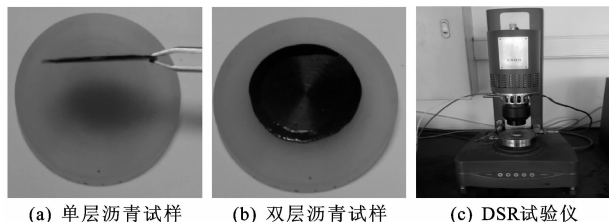


图 1 DSR 沥青试样制备

Fig. 1 Preparation of DSR asphalt specimens

采用美国 TA 公司产 AR-1500 型 DSR 试验仪对双层沥青试样进行时间扫描(10 000 s)试验,测试复数模量  $G_1^*$  随时间的变化。将新旧沥青加热充分

搅拌后浇筑试件测试复数模量  $G_2^*$  作为新旧沥青完全扩散的基准值,然后根据式(2)计算 DSR 试验下新旧沥青扩散程度  $s$ ,即

$$s = \frac{G_1^*}{G_2^*} \quad (2)$$

## 2 针入度分析

### 2.1 保温时间对扩散程度 $\Delta P$ 影响

为分析保温时间对不同类型老化沥青扩散程度影响,分别对 70# 基质沥青和 SBS 改性沥青进行 RTFOT 老化 180、270、360 min。按上文提出方法制备新旧沥青双层试模,放入 130 °C 烘箱中分别储存 0、2、4、8、12 h 后进行针入度测试,然后根据式(1)计算其扩散程度  $\Delta P$ ,结果如图 2 所示。

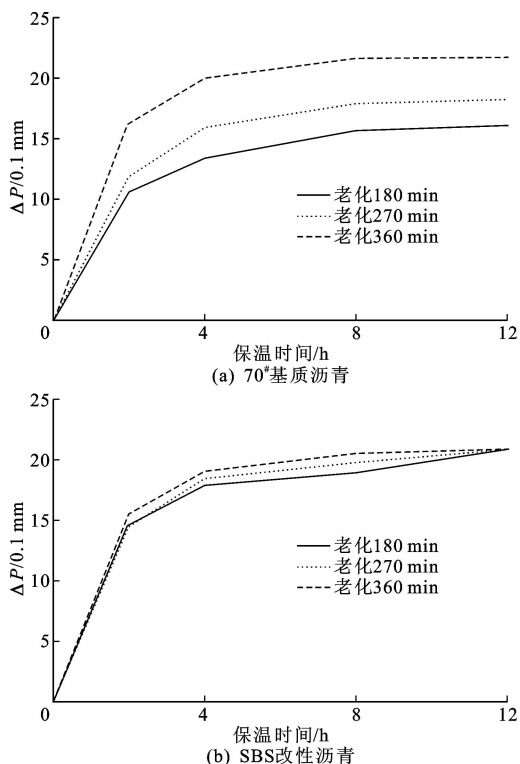


图 2 保温时间对新旧沥青扩散程度影响

Fig. 2 Effects of insulation time on diffusion degree of aged and virgin asphalt

由图 2 可得如下结论。

(1)新旧沥青扩散程度随保温时间增加呈先增加后基本不变趋势,且前 2 h 增加效果明显。保温时间由 0 h 增加至 2 h 时,2 种类型沥青扩散曲线斜率明显较大,超过 8 h 后斜率则基本趋近于 0,这是由于扩散开始时新旧沥青界面物质浓度差大,此时新沥青中饱和分和芳香分等小分子组分迅速向旧沥青扩散,两者浓度差逐渐变小,扩散速率减慢。

(2)旧基质沥青老化程度严重时,其与新沥青扩

散程度明显提高,老化时间超过 270 min 时效果更为明显,且基本不受保温时间影响,而 SBS 改性沥青老化时间对其扩散程度影响较小。对于基质沥青,其老化时间增加时扩散曲线近似以平行方式向上移动,其中时间由 180 min 增加至 270 min 时,4 个保温时间下的扩散程度平均值增加 14.7%,而由 270 min 增加至 360 min 时则增加 24.8%;对于 SBS 改性沥青老化时间由 180 min 增加至 360 min 时,其 4 个保温时间下的扩散程度平均值仅增加 5.8%。这是由于基质沥青中组分稳定性较差,受热时轻质组分容易转化为重质组分,因而随着老化时间延长,其老化程度越严重,此时其与新沥青界面的浓度差也增大,故扩散程度增加;SBS 改性沥青由于抗老化性能相对较好,老化时间超过 180 min 后其老化程度仍增加较慢,对扩散程度影响较小。

(3)老化时间较短时,旧 SBS 改性沥青与新沥青的扩散程度优于基质沥青,但老化时间较长时正好相反。RTFOT 老化时间为 180、270、360 min 时,SBS 改性沥青 4 个保温时间下的扩散程度平均值较基质沥青分别高出 29.6%和 15.6%,但老化时间增加到 360 min 时,其平均值反而比基质沥青降低 4.5%。

### 2.2 保温温度对扩散程度 $\Delta P$ 影响

为分析保温温度对不同类型老化沥青扩散程度影响,分别对 70# 基质沥青和 SBS 改性沥青进行 RTFOT 老化 180、270、360 min,制备新旧沥青双层试模分别放入 60℃、100℃、130℃、160℃烘箱中储存 8 h 后进行针入度测试,根据式(1)计算其针入度试验下扩散程度,结果如图 3 所示。

由图 3 可得如下结论。

(1)增加保温温度能有效提高新旧沥青扩散程度。保温温度为 60℃时,2 种类型沥青扩散程度均较低,3 个老化时间下的平均值分别为 2.6 和 0.4 (0.1 mm),而保温温度提高到 160℃时,两者平均值分别提高 12.3 倍和 65.5 倍。分析其原因:一方面新旧沥青之间的扩散属于布朗运动,而布朗运动本质属于分子间的热运动,故温度升高时分子间运动程度加剧,进而使得扩散程度加强;另一方面,沥青是一种黏弹性材料,温度较低时黏度较大,其对新沥青扩散造成较大阻力,而当温度升高后,沥青向流体转变,黏度迅速减小,此时沥青分子间的作用力也逐渐变小,有利于新沥青的扩散。

(2)2 种类型老化沥青扩散程度对温度敏感性存在差异,温度超过 130℃时基质沥青扩散曲线斜

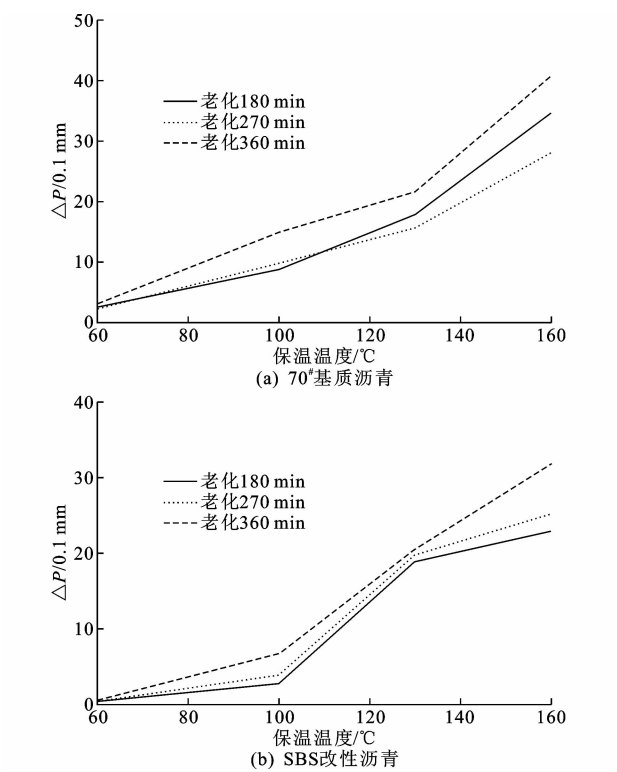


图 3 保温温度对新旧沥青扩散程度影响  
Fig. 3 Effects of insulation temperatures on diffusion degree of aged and virgin asphalt

率较大,而 SBS 改性沥青斜率最大的温度范围则是 100℃~130℃。

(3)旧沥青老化程度严重时,增加保温温度对提高其与新沥青扩散程度更为有效。老化时间由 180 min 增加至 360 min 时,2 种类型沥青扩散曲线的斜率均呈逐渐增大趋势。

### 2.3 各因素对扩散程度 $\Delta P$ 影响程度的分析

保温温度、保温时间及老化时间对新旧沥青扩散程度均有影响,为分析三者影响程度,本文选择 3 因素 4 水平,如表 1 所示,设计  $L_{16}(4^3)$  正交试验,进而测定其针入度,结果如表 2 所示。

#### 2.3.1 极差分析

为分析保温温度、保温时间及老化时间对新旧沥青扩散程度的影响程度,对表 1 中试验结果进行极差分析,结果如表 3 所示。

由表 3 可知,老化时间、保温温度和保温时间对

表 1 正交因素设计表

Tab. 1 Orthogonal design of factors

水平	保温温度/℃	保温时间/h	老化时间/min
水平 1	60	2	0
水平 2	100	4	180
水平 3	130	8	270
水平 4	160	12	360

表 2 正交试验结果  
Tab. 2 Results of orthogonal test

试验号	因素			针入度(25℃, 100 g, 5 s)/0.1 mm
	保温温度/℃	保温时间/h	老化时间/min	
1	60	2	0	74.9
2	100	4	0	71.0
3	130	8	0	69.5
4	160	12	0	66.0
5	60	4	180	59.0
6	100	2	180	55.0
7	130	12	180	42.7
8	160	8	180	26.0
9	60	8	270	63.3
10	100	12	270	55.3
11	130	2	270	54.8
12	160	4	270	41.0
13	60	12	360	70.1
14	100	8	360	57.4
15	130	4	360	52.0
16	160	2	360	50.0

表 3 极差分析结果  
Tab. 3 Results of range analysis

各因素的 K 值	保温温度	保温时间	老化时间
$K_1$	66.8	58.6	70.3
$K_2$	59.6	55.7	45.6
$K_3$	54.7	54.1	53.6
$K_4$	45.7	58.5	57.3
极差	21.1	4.60	24.6

新旧沥青扩散程度的影响依次降低,但老化时间和保温温度的影响程度明显高于保温时间,其中老化时间和保温温度的极差值分别为保温时间的 5.3 倍和 4.6 倍;结合前述研究成果可知,需提高再生沥青混合料中新旧沥青扩散程度以改善其路用性能时,应主要控制旧沥青老化程度较小及适当提高新旧沥青保温温度。

2.3.2 方差分析

为分析保温温度、保温时间及老化时间对新旧沥青扩散程度影响显著性,使用 SPSS 软件对表 2 中试验结果进行方差分析,发现保温温度和老化时间对新旧沥青扩散程度有显著影响,而保温时间无显著影响。因此,对比前述保温时间对扩散程度影响试验结果可知,新旧沥青的扩散过程所耗时间小于本文试验用最小保温时间 2 h,室内试验和现场生产过程中保温时间不宜超过此值。同时,对于新旧沥青扩散过程所需最佳保温时间,后文中进行了深入研究。

3 DSR 分析

3.1 扫描温度对扩散程度  $s$  影响

分别对 70# 基质沥青和 SBS 改性沥青进行 RTFOT 老化 360 min,按上文提出方法制备双层沥青试样,分别进行 60℃、70℃、80℃ 的 DSR 时间扫描试验,然后根据式(2)计算其 DSR 试验下的扩散程度  $s$ ,结果如图 4 所示。

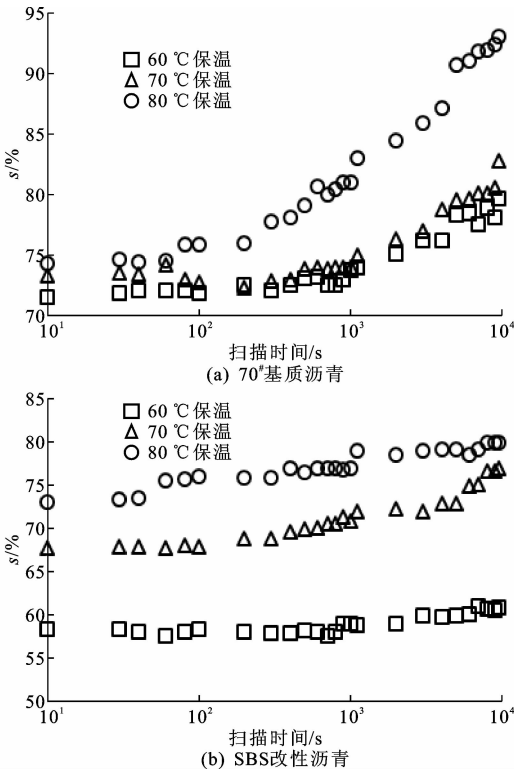


图 4 扫描温度对新旧沥青扩散程度  $s$  影响  
Fig. 4 Effects of scanning temperatures on diffusion degree of aged and virgin asphalt

由图 4 可得如下结论。

(1)新旧沥青扩散程度  $s$  随扫描温度的增加而增加,且 2 种沥青增加幅度最大的温度范围分别为 70℃~80℃ 和 60℃~70℃。扫描温度由 60℃ 增加至 70℃ 时,整个扫描周期内基质沥青和 SBS 改性沥青的扩散程度平均值分别增加 1.3% 和 12.3%,而温度由 70℃ 增加至 80℃ 时,两者分别增加 6.6% 和 6.0%。

(2)新旧沥青扩散程度随扫描时间的增加而增加,基质沥青表现较为明显。扫描时间增加时,基质沥青扩散程度逐渐提高,时间超过 1 000 s 后效果更明显,SBS 改性沥青则提高较小。

(3)老化基质沥青与新沥青的扩散程度优于老化 SBS 改性沥青,尤其当试验温度较低时表现更明

显。试验温度为 60℃、70℃、80℃ 时基质沥青 DSR 试验下的扩散程度  $s$  平均值较 SBS 改性沥青分别提高 15.4%、4.4%、5.0%，这可能是由于同一 RTFOT 老化时间条件下基质沥青老化更为严重，其与新沥青接触界面浓度差更大的缘故。

3.2 老化时间对扩散程度  $s$  影响

分别对 70# 基质沥青和 SBS 改性沥青进行 RTFOT 老化 180、270、360 min，按上文提出方法制备双层试样进行 60℃ 的 DSR 时间扫描试验，然后根据式(2)计算其扩散程度  $s$ ，结果如图 5 所示。

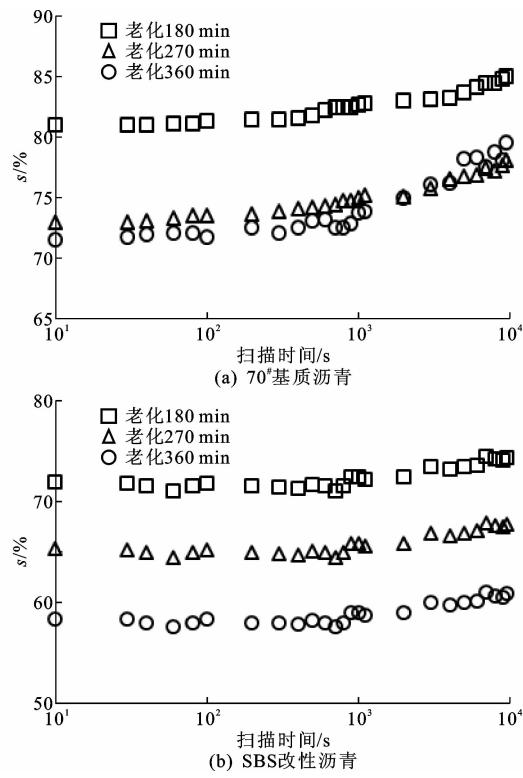


图 5 老化时间对新旧沥青扩散程度影响

Fig. 5 Effects of aging time on diffusion degree of aged and virgin asphalt

由图 5 可得如下结论。

(1) 新旧沥青在中温条件下进行扩散时，老化时间增加时其与新沥青 DSR 试验下的扩散程度  $s$  呈降低趋势，但对于基质沥青老化时间超过 270 min 后扩散程度变化较小。老化时间由 180 min 增加至 270 min 时，2 种沥青整个扫描周期内扩散程度平均值分别降低 7.6% 和 6.6%，而由 270 min 增加至 360 min 时，2 者分别降低 0.7% 和 6.9%。这与针入度试验结果正好相反，原因可能为两者保温温度存在较大差异所致。

(2) 各老化时间下基质沥青与新沥青的扩散程度  $s$  高于 SBS 改性沥青，且老化时间延长时 2 者差

值有增大趋势。老化时间为 180、270 min 时，整个扫描周期内基质沥青扩散程度平均值分别较 SBS 改性沥青高 10.2% 和 9.2%，而老化时间增加到 360 min 时则提高 15.4%。分析原因为基质沥青抗老化能力较差，老化时间超过 270 min 时，其老化程度变化已较小，故与新沥青扩散程度变化较小。

4 结 语

(1) 制备由新沥青和老化沥青组成的双层沥青试样模拟扩散过程，分别提出了基于针入度和 DSR 试验的新旧沥青扩散程度评价方法和指标。

(2) 高温下新旧沥青扩散程度随保温时间的增加先增加后不变，随老化程度的增加基质沥青扩散程度逐渐增加，SBS 改性沥青则基本不变，且老化程度较低时 SBS 改性沥青扩散程度优于基质沥青，但老化程度严重时，正好相反；中温下新旧沥青扩散程度随扫描时间的增加而增加，随老化程度增加而减小，且基质沥青扩散程度优于 SBS 改性沥青。高温和中温下新旧沥青扩散程度均随温度的增加而增加，且基质沥青的扩散程度最佳增长温度范围分别为 130℃~160℃ 和 70℃~80℃，SBS 改性沥青则分别为 100℃~130℃ 和 60℃~70℃。

(3) 老化时间、保温温度和保温时间对新旧沥青扩散程度的影响程度依次降低，其中老化时间和保温温度对其有显著影响，而保温时间无显著影响。故需提高再生沥青混合料中新旧沥青扩散程度以改善其路用性能时，应主要控制旧沥青老化程度较小，并适当提高新旧沥青保温温度。

(4) 本文试验结果建立于纯沥青的扩散基础上，后期还应结合新旧沥青在混合料中扩散特性进行分析。

参考文献：

References：

[1] 韦 琴,杨长辉,熊出华,等. 旧沥青路面再生利用技术概述[J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(3): 128-131.  
WEI Qin, YANG Chang-hui, XIONG Chu-hua, et al. Recycling technology of aged asphalt pavement[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2007, 29(3): 128-131.

[2] 黄煜镔,吕伟民,周小平. 沥青路面再生技术的原理与应用[J]. 重庆建筑大学学报, 2004, 26(6): 129-133.  
HUANG Yu-bin, LU Wei-min, ZHOU Xiao-ping. Principle and application of the asphalt pavement re-

- cycling technology[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2004, 26(6): 129-133.
- [3] 韦万峰, 郭鹏, 唐伯明. 再生沥青混合料新旧沥青扩散混合效率研究综述[J]. 材料导报, 2017, 31(11): 109-114.
- WEI Wan-feng, GUO Peng, TANG Bo-ming. Review of the research on diffusion efficiency of virgin-aged asphalt in recycled asphalt mixture[J]. Materials Review, 2017, 31(11): 109-114.
- [4] KRIZ P, GRANT D, GALE M, et al. Reclaimed asphalt pavement-virgin binder diffusion in asphalt mixes[C]//CTAA. Proceedings of the Fifty-Ninth Annual Conference of the Canadian Technical Asphalt Association (CTAA). Ottawa: Transportation Association of Canada, 2014: 375-400.
- [5] KRIZ P, GRANT D L, VELOZA B A, et al. Blending and diffusion of reclaimed asphalt pavement and virgin asphalt binders[J]. Road Materials and Pavement Design, 2014, 15(S1): 78-112.
- [6] XU M, YI J, FENG D, et al. Diffusion characteristics of asphalt rejuvenators based on molecular dynamics simulation[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2017, 18(3): 1-13.
- [7] SUN D, SUN G, ZHU X, et al. Identification of wetting and molecular diffusion stages during self-healing process of asphalt binder via fluorescence microscope[J]. Construction and Building Materials, 2017, 132: 230-239.
- [8] MCDANIEL R S, ANDERSON R M. Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the superpave mix design method[R]. Washington DC: Transportation Research Board, 2001.
- [9] KENNEDY T W, TAM W O, SOLAIMANIAN M. Optimizing use of reclaimed asphalt pavement with the superpave system[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1998, 67: 311-333.
- [10] BRESSI S, DUMONT A G, PITTET M. Cluster phenomenon and partial differential aging in RAP mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2015, 99: 288-297.
- [11] BRESSI S, PITTET M, DUMONT A G, et al. A framework for characterizing RAP clustering in asphalt concrete mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2016, 106: 564-574.
- [12] ZHAO S, HUANG B, SHU X, et al. Quantitative evaluation of blending and diffusion in high RAP and RAS mixtures[J]. Materials & Design, 2016, 89: 1161-1170.
- [13] 王凤楼, 王奕鹏, 张强, 等. 沥青再生剂的再生效果与扩散性能研究[J]. 石化技术与应用, 2012, 30(1): 13-18.
- WANG Feng-lou, WANG Yi-peng, ZHANG Qiang, et al. Study on regenerating effect and diffusion ability of asphalt recycling agents[J]. Petrochemical Technology and Application, 2012, 30(1): 13-18.
- [14] 赵斌. 沥青混合料热再生机理及技术性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- ZHAO Bin. Study on recycling mechanism and technical property of the plant hot asphalt mixture[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [15] OLIVER J W H. Diffusion of oils in asphalts[J]. Industrial & Engineering Chemistry Product Research & Development, 1974, 13(1): 65-70.
- [16] 李立寒, 张明杰, 祁文洋. 老化 SBS 改性沥青再生与机理分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2017, 37(3): 1-8.
- LI Li-han, ZHANG Ming-jie, QI Wen-yang. Regeneration of aged SBS modified asphalt and its mechanism analysis[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2017, 37(3): 1-8.
- [17] 沈凡, 赵明宇, 卢吉, 等. 改性再生剂在老化沥青中的扩散规律研究[J]. 功能材料, 2014, 45(21): 21064-21067.
- SHEN Fan, ZHAO Ming-yu, LU Ji, et al. Diffusion of modified rejuvenator on aged asphalt binder[J]. Journal of Functional Materials, 2014, 45(21): 21064-21067.
- [18] 耿九光. 沥青老化机理及再生技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- GENG Jiu-guang. Study on the aging mechanism and recycling technique of asphalt[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [19] 许勖. 基于分子动力学模拟的沥青再生剂扩散机理分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- XU Meng. Analysis of the diffusion of rejuvenator into asphalt based on the molecular dynamice simulation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [20] KARLSSON R, ISACSSON U. Application of FTIR-ATR to characterization of bitumen rejuvenator diffusion[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, 15(2): 157-165.
- [21] 徐萌. 再生剂在老化沥青中扩散的研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2010.
- XU Meng. Study of rejuvenators diffusion into aged asphalts[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2010.