

文章编号:1001-4888(2020)02-276-11

# 老化作用下沥青集料界面力学行为研究<sup>\*</sup>

张树群, 汪忠明, 董满生, 董钢

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 为了探究老化对沥青混合料界面力学性能的影响, 将不同温度老化处理的沥青制成的三明治试件进行剪切试验以模拟实际路面发生的破坏情况。通过分析应力-剪切位移的关系与界面破坏情况, 研究在不同程度老化作用下沥青集料界面剪切破坏与沥青内部剪切破坏机理, 并根据本试验的情况在已有的模型基础上完善出相对符合本试验的理论模型。试验结果表明: 每组试验均产生单波峰与双波峰曲线, 通过开尔文模型可知, 之所以出现双波峰情况, 是沥青弹性与粘性的共同作用导致的。随着沥青老化程度的加深, 沥青流变性能降低, 沥青集料界面的粘附性呈下降趋势, 沥青的凝聚性呈先下降后上升趋势, 老化加深到一定程度时, 双波峰迅速减少, 单波峰迅速增加, 原因是随着老化程度的加深, 沥青凝聚性反向增强, 界面破坏只发生在沥青集料界面。

**关键词:** 老化; 沥青; 单波峰; 双波峰; 剪切试验; 粘附性; 凝聚性

**中图分类号:** U414      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.7520/1001-4888-18-181

## 0 引言

SBS 改性沥青作为一种粘-弹-塑性材料<sup>[1]</sup>广泛应用于道路工程之中, 但随着道路的运行时间加长, 由于其表面长时间经受暴晒、长时间暴露于大气之中, 表面的沥青会发生老化, 导致沥青的化学组成发生变化, 并且沥青的理化性质很大程度上取决于其化学组成<sup>[2]</sup>。沥青老化对其物理性能的影响包括粘弹性<sup>[3,4]</sup>、流变性能<sup>[5]</sup>等方面, 进而将对沥青道路的交通方面造成影响, 比如车辆在公路上行驶时的噪音<sup>[6-8]</sup>等。关于对沥青老化的影响因素多种多样, 例如文献<sup>[9]</sup>通过试验认为, 沥青老化程度与沥青内部总空隙量、有效空隙与渗透空隙有关, 并且随着这三个指标的增大, 老化程度增加。文献<sup>[10]</sup>认为车的荷载造成的压力可破坏沥青中的 C=C 键从而促进沥青发生氧化反应等等。公路出现结构不稳定的原因在于沥青与集料界面的粘附性与沥青内部的凝聚性发生变化, 从而不能抵抗沥青混合料在荷载等作用下产生的内部应力<sup>[11]</sup>。沥青的粘附性与抗剪能力呈正相关, 除了取决于集料的性质<sup>[12]</sup>、温度<sup>[13]</sup>、湿度<sup>[14]</sup>外, 也取决于沥青的老化情况<sup>[15]</sup>, 并且沥青内部的凝聚力主要受老化的影响。

本文通过剪切试验研究沥青老化后的粘附力与凝聚力的变化, 并且针对结果分别对单波峰与双波峰的试验曲线进行分析和总结, 剪切试验根据老化温度梯度分为五组, 其中一组为对照组。根据剪切曲线随老化温度的变化分析沥青-集料界面破坏与沥青内部剪切破坏时的力学特性。

## 1 沥青-集料界面剪切试验

沥青混合料矿料级配分级尺度为 4.75mm、9.5mm、13.2mm、16.0mm、19.0mm、26.5mm、

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2018-08-07; 修回日期: 2018-09-16

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2192016JZ2016HGBZ0998)

通讯作者: 汪忠明(1976-), 博士, 副教授, 硕士生导师。主要研究领域: 混凝土的断裂与损伤、微结构演化模拟。Email: 657901146@qq.com

31.5mm、37.5mm,本文试验选取常用的中粒式混合料的公称最大粒径19mm作为集料的直径尺寸,可以避免小尺寸集料的尺度效应,并且有较强的代表性。试验采用的试件如图1所示,整个剪切试验分为5组,每组试件中的沥青分别进行不同的温度老化处理4个小时,由于沥青混合料实际工程中拌合出料温度一般是介于140℃~190℃,为模拟短期老化,老化温度分别设置为148℃、163℃、178℃、193℃,另外设置一组对照组。

## 1.1 试验材料

### 1.1.1 沥青

本试验采用的沥青种类为SBS改性沥青,依据JTGE20-2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》检测的该出厂沥青的参数见表1。

表1 SBS改性沥青参数  
Tab.1 Parameters of SBS modified asphalt

试验项目	试验结果	技术指标
针入度(25℃100g 5s)/0.1mm	51	30~60
软化点(环球法)/℃	62	≥60
延度(5℃,5cm/min)/cm	38	≥20
密度(15℃)/g·cm <sup>-3</sup>	1.081	

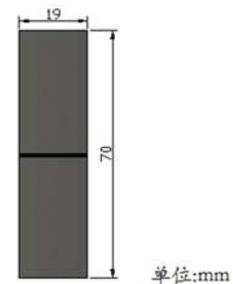


图1 三明治试件

Fig.1 Sandwiched specimen

### 1.1.2 集料

试验所采用的集料材料为石灰岩石块。根据JTGE42-2005《公路工程集料试验规程》对试验所采用的石灰岩材料进行检测,其结果见表2。

表2 集料参数表  
Tab.2 Parameters of aggregate

技术指标	洛杉矶磨耗值/%	石料压碎值/%	吸水率/%	表观相对密度
试验结果	11.9	12.1	0.84	2.473

## 1.2 试验试件制备

### 1.2.1 石柱的钻取与处理

(1) 石材的选取。从某工厂选取石灰岩质地均匀石材,并且切割成若干底面直径为19mm,高为35mm的圆柱体石块。

(2) 喷砂处理。在合肥某喷砂处理厂对以上切割好的石块底面进行喷砂处理。

(3) 表面处理。考虑到实际路面的集料粗糙度离散性很大,为避免样品制作表面粗糙度差异化对试验的影响,在不影响试验规律的情况下,对试样进行统一表面处理,这样可以排除集料的粗糙度差异对试验结果的影响。故在磨片实验室对已经喷砂处理过的石块进行打磨,规格为120级SIC颗粒。

(4) 试件石柱的获取。ZS-50型自动取芯机对处理过的石块钻取直径为19mm的石柱,钻取的时候保持金刚石钻头垂直于石块表面,以确保钻取的石柱的底面与侧面垂直,并且方便成型前的精确对中。在钻取完毕后,将获得的石柱进行清洗,然后放到烘箱里150℃加热1h进行干燥,最后将处理好的石柱放到干燥且无尘的塑料袋里密封以防止其受潮。

### 1.2.2 试验沥青的处理

将获取的沥青取适量平均分为4组分批次放置到烘箱(高低温试验箱),老化时间为4h,温度分别设置为148℃、163℃、178℃、193℃,每组做8次剪切试验。另取和上述4组等量的沥青放在室温环境下,作为对照组。

针对老化处理过的沥青对其做三大指标的测定,如图2所示,可知随着沥青老化程度的加深,导致沥青硬度随之加大,针入度降低,软化点升高,并且延度降低。三大指标的变化符合沥青老化的变化规

律,故随着沥青加热温度的升高,温度越高,沥青老化程度越高。

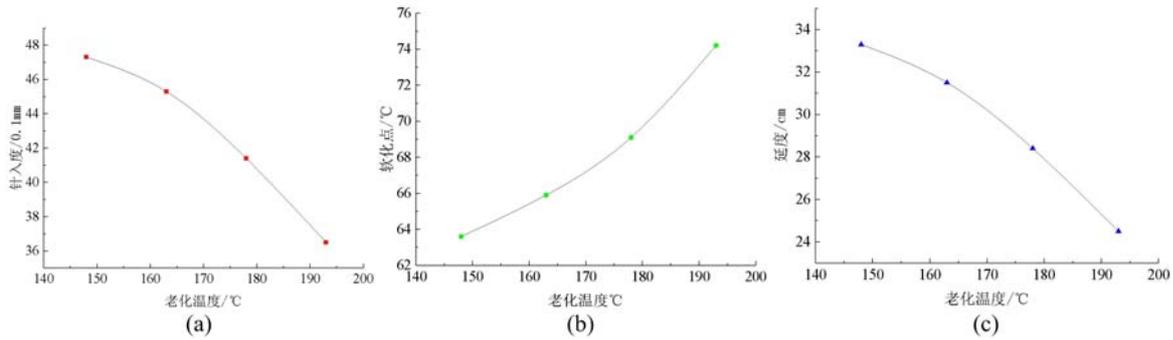


图2 老化处理后的沥青三大指标

Fig. 2 Three major indicators of aged asphalt

### 1.2.3 三明治试件制备

(1) 将处理过的石柱均匀蘸取刚从烘箱里取出的沥青,使处于流态的沥青均匀地分布在石柱处理过的底面上,对照组则将未老化处理的沥青在 90°C 的烘箱里加热 1.5h(老化程度很小)成流态,然后立刻用没有蘸取沥青的石柱与蘸取沥青的石柱精确对中,使两个圆柱底面完全重合,每组沥青做成 8 个试件。

(2) 实际路面集料之间的沥青膜厚度具有随机性,厚度并不固定,沥青膜厚度对试验结果有一定的影响,但在不影响问题的定性结论前提下,统一选取一个沥青膜厚度。本试验将对中后的 5 组三明治试件放到夹具的底盘的中央,然后放置托盘,加上相同质量的砝码,将它们置于温度设定为 85°C 的烘箱里,并开始加热,当烘箱温度达到 80°C 的时候开始计时,3min 后取出夹具与试件,将上述处理过的三明治放在室温环境下垂直放置 24h。此步骤通过对夹具上方的托盘加砝码荷载产生压强来控制沥青膜厚度,5 组试验均使用质量为 1.275kg 的砝码,计算得到沥青石柱界面压强为 44.07kPa,试验中每组试验所使用的砝码与加砝码的时间都保持相同,从而保证沥青膜厚度相同。

### 1.3 沥青—集料界面剪切试验方法

此试验所用到的仪器为上述介绍的 WDW-1 万能材料试验机,除此之外,类似的仪器<sup>[16]</sup>也曾被用来研究不同材料界面剪切的力学性能。此仪器与计算机连接,能够采集剪切过程中代表位移与剪切应力关系的点并且自动绘制关系曲线图。万能材料试验机剪切装置主要分为三部分:环境箱、压力杆与固定槽。试验过程发生在环境箱内,环境箱的温度区间设置为 -40°C ~ 120°C,误差控制在 ±0.5°C 以内。试验步骤为:首先将三明治试件一半固定在固定槽上,另一半悬空,通过竖直方向的压力杆对三明治试件的悬空部分进行下压,使之与固定在固定槽上的部分发生垂直剪切。针对试验温度的选定,在试验进行前,开展了其他条件相同,剪切温度为 10°C、25°C 与 50°C 的三个预试验。试验温度为 10°C 时,沥青集料界面主要呈现出粘附性失效;试验温度为 50°C 时,只呈现出流变性能,凝聚性失效;试验温度为



图3 不同温度剪切断面

Fig. 3 Cross-section of different temperature

25°C 时,呈现出明显的粘附失效与粘聚失效,如图 3 所示。25°C 具有代表性,是自然环境中常见温度,也是道路工程研究通常采取的一种温度,故试验环境温度选为 25°C。试验压力杆加载速度为 5mm/min,

其 5 组试验结果分别如图 4 所示(图中 R1、R2、……、R8 代表试验 1、试验 2、……、试验 8)。

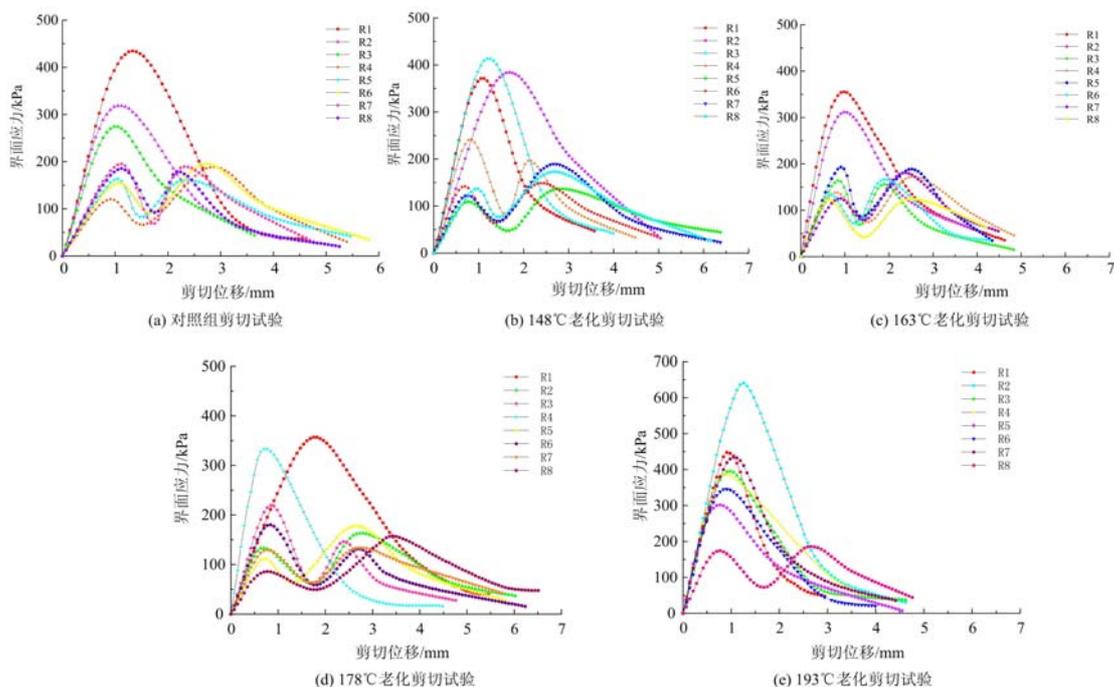


图 4 老化剪切试验结果  
Fig. 4 Results of shear experiments

## 2 试验结果与分析

试验过程中,压力杆在 5mm/min 的加载速度下,对三明治试件进行剪切,通过其连接的传感器可测出加载过程中力的大小,应力大小根据如下公式计算:

$$\tau = \frac{F}{A} \tag{1}$$

式中,  $\tau$  为界面平均应力;  $F$  为剪切试验过程中界面的剪切力;  $A$  为界面面积。

由图 4 可知,5 组试验每一组曲线均分为两种类型:单波峰与双波峰,并且每组试验结果均出现残余应力。影响界面应力值的因素有两个,第一个是沥青集料界面的粘附力或者沥青内部的凝聚力,第二个是界面剪切时的摩擦力。出现残余应力是因为随着剪切位移的加大,凝聚力或粘附力减小,界面主要受到摩擦力的影响。

重复多次试验表明:针对同一试验,单波峰与双波峰交替出现在其某种老化程度上是一种必然试验现象。对于此现象,也有类似的研究做过相应的分析<sup>[17]</sup>。需注意的是,剪切试验随着老化程度的加深,特别是在 193℃ 情况下,双波峰出现的比例迅速减小,双波峰只出现一次,试验结果主要是单波峰。

除此之外,根据每组试验曲线对比可知,绝大多数情况下,对于单波峰对应的横坐标  $x_0$  介于同组双波峰两个波峰所对应的横坐标  $x_1$  与  $x_2$  之间,即  $x_1 < x_0 < x_2$ ,如图 5 所示。

从同一老化条件下剪切试验得出的曲线可以看出,单波峰曲线与横坐标轴围成的面积要明显大于双波峰曲线与横坐标轴围成的面积,根据公式(2)可以得知在同一条件下,形成单波峰的曲线剪切试验需要的断裂能要大于双波峰曲线剪切试验需要的断裂能。

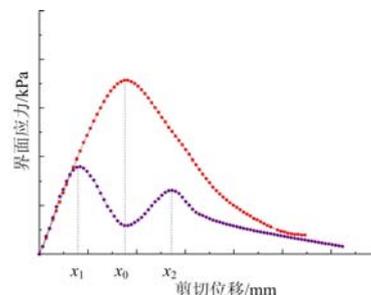


图 5 单双波峰位置关系图  
Fig. 5 Positions of peaks of single-peak and double-peak curves

$$W = \int \tau dx \cdot A = A_0 A \quad (2)$$

### 2.1 单波峰曲线

单波峰曲线的形成分为两个阶段,如 148℃ 老化剪切试验中的试验 1、2 和 3,第一个阶段是直线上升阶段,此阶段体现的是沥青弹性性能;第二阶段是下降阶段,原因是随着剪切位移的增加,剪切过程中沥青界面发生剪切破坏,致使应力值逐渐下降。剪切破坏界面随机发生在沥青—集料粘结界面与沥青内部,此试验现象与集料—沥青界面粘结的情况有关,原因是打磨过的石柱界面的粗糙度具有随机性,不同粘结程度的破坏需要不同的断裂能。断裂能和破坏所需要的应力有如下关系:

$$W = \int \tau \cdot A dx \quad (3)$$

式中,  $W$  为界面破坏所需的断裂能;  $\tau$  为界面应力;  $A$  为剪切界面的面积。

在剪切过程中,沥青内部横截面与沥青—集料的界面应力均相同。在相同应力情况下,任一界面是否发生剪切破坏取决于是否应力达到界面破坏所需应力的临界值  $\tau_c$ 。

当沥青—集料粘附性破坏所需要的应力值小于沥青内部发生剪切破坏所需要的临界应力值时,剪切破坏过程发生在沥青—集料界面;当沥青—集料粘附性破坏所需要的应力值大于破坏沥青内部剪切破坏所需要的应力值时,剪切破坏过程发生在沥青内部。两种情况分别在试验过程中显现出来。如图 6 所示,图中断面均取自 193℃ 老化剪切试验试验 1 的断面,此断面为单波峰断面,其剪切方向是自上而下,剪切破坏界面相对平整,残留在图 6(a) 界面上的沥青较多,在图 6(b) 中的断面残留的沥青比较少,可辨别集料打磨界面,原因是集料与沥青的粘结界面上的附着力要小于沥青内部的凝聚力,剪切破坏过程发生在集料与沥青粘结界面,属于粘附性破坏。

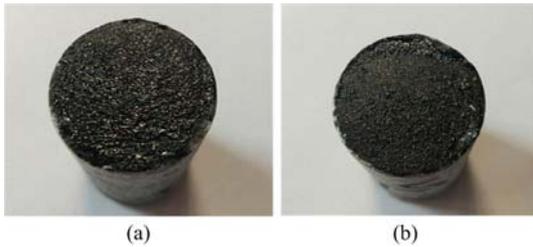


图 6 193℃ 试验 1 剪切断面图

Fig. 6 Cross-section of 193℃-R1 sheared specimen



图 7 193℃ 试验 5 剪切断面图

Fig. 7 Cross-section of 193℃-R5 sheared specimen

当集料与沥青粘结界面上的剪切破坏临界应力值大于沥青内部剪切破坏临界应力值时,剪切破坏发生在沥青内部,如图 7 所示,图中断面取自 193℃ 老化剪切试验试验 5 的两个断面,此曲线为单波峰曲线断面,图 7 中石柱界面上的沥青残留较多,界面相对粗糙,无法辨别集料打磨界面,可知剪切破坏过程发生在沥青内部,属于凝聚性破坏。

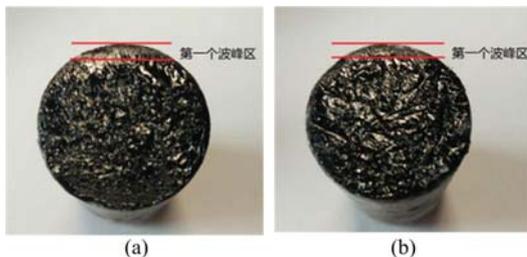


图 8 178℃ 试验 8 与对照组试验 7 断面图

Fig. 8 Cross-section of 178℃-R8 and R7 of the blank group

所示,(a)图取自老化温度为 178℃ 的第 8 组剪切试验后的断面,第一个波峰区的界面与图 5 的单波峰界面十分相似,测得其宽度约为 1.9mm,与图 4 中 178℃ 老化剪切试验第 8 组试验结果波谷对应的横坐标大小相同。图 8(b)取自对照组的第 7 组剪切试验后的断面,测得第一波峰区的宽度为 1.7mm,与试

### 2.2 双波峰曲线

双波峰曲线是一种复合曲线,包括沥青—集料界面剪切破坏与沥青内部剪切破坏两部分,一般而言,当出现双波峰时,第一个剪切破坏过程会发生在沥青—集料界面上,第二个剪切破坏过程发生在沥青内部,原因是沥青—集料粘结的界面破坏需要的临界应力通常要比沥青内部剪切破坏需要的临界应力要小<sup>[17]</sup>,选取一组双波峰曲线断面图如图 8

验结果中波谷对应的横坐标大小相同。

### 2.3 老化处理对剪切界面力学性能的影响

由试验可知,随着老化程度的增加,老化温度达到 193℃时,试验结果绝大部分为单波峰,原因是随着沥青老化的增加,沥青的软化点上升,针入度下降,延度降低,硬度增强,沥青内部发生剪切破坏的临界应力  $\tau_c$  增大。当老化温度为 193℃时,很明显界面剪切断裂能要大于其他老化温度下的沥青集料界面剪切断裂能,因为其曲线大部分为单波峰曲线,并且峰值整体高于其他老化温度试验结果中的单波峰峰值。断裂能对于在剪切破坏阶段的沥青的实质是沥青发生剪切时产生的沥青间的剪切力做的功,故有关系式(4)与(5):

$$\frac{dW_{\text{断}_2}}{dx} = \tau_2 \cdot A = F_{\text{剪}} \quad (4)$$

$$W_{\text{断}_2} = F_{\text{剪}} dx = \tau_2 \cdot A dx \quad (5)$$

式中,  $F_{\text{剪}}$  为界面的剪切力,如果沥青发生剪切破坏,就需要外界提供一定的剪切应力  $\tau_2$ ,当  $\tau_2$  大于沥青内部发生剪切破坏的临界应力  $\tau_c$  时,会发生沥青内部剪切破坏。 $\tau_c$  的值随着老化程度的增加而增大,当老化温度高于 193℃时,试验应力值基本小于  $\tau_c$ ,所以沥青界面没有发生断裂,试验结果主要为单波峰。对于老化温度低于 193℃处理过的沥青而言,在沥青集料发生剪切破坏过程中,界面应力值通常出现大于  $\tau_c$  的情况,会出现沥青内部剪切破坏,所以低于 193℃老化剪切试验的曲线主要为双波峰。

由于整个试验结果出现的双波峰曲线比较多,现对其特征参数在老化作用的影响下进行进一步讨论。

#### 2.3.1 双波峰曲线第一波峰横坐标值

试验曲线中第一个峰值所对应的横坐标代表着沥青可以保持界面弹性性能的最大剪切位移,如图 9 所示。根据每组双波峰的第一波峰横坐标平均值与老化温度的关系可以发现,随着沥青老化的加深,双波峰第一波峰对应的横坐标值呈逐渐降低的趋势。意味着随着老化程度的加深,沥青集料界面发生剪切时保持弹性性能区域的宽度逐渐减小,沥青集料界面的粘附性降低,并且由图 8 中曲线的斜率可知,这种变化随着老化程度的加深而加剧。

#### 2.3.2 双波峰第一波峰值

双波峰第一个波峰值代表着沥青集料界面剪切破坏过程中可达到的最大应力值,对比 148℃、163℃、178℃、193℃老化后剪切试验结果的平均值,如图 10 所示,其峰值变化分为两个阶段:第一个是下降阶段,沥青与集料的抗剪切破坏强度随着老化程度增加逐渐变小,说明随着沥青老化,沥青集料界面的粘附性能变差;第二阶段是当达到老化温度为 193℃时,第一波峰峰值突然变大,原因可能是温度达到 193℃时,沥青硬度变得比较大,虽然界面粘附性变小,流变性能降低,但是界面的沥青显示出其固体特性,剪切破坏界面摩擦系数变大,导致剪切过程中第一个峰值增大。这意味着,随着沥青老化程度加深,沥青混合料中的沥青—集料界面上的粘附性降低,更容易发生破坏。由图 10 可知,在接近 175℃的老化温度情况下,沥青—集料界面粘附性能与界面上的摩擦力综合作用为最小值,在此试验条件下,沥青集料界面更容易发生断裂破坏。

#### 2.3.3 双波峰第二波峰值

双波峰第二个波峰值反映的是沥青内部在剪切破坏过程中能够达到的最大应力值,经过计算每组试验双波峰第二个峰值的平均值变化情况如图 11 所示。由图 4 的试验结果可以得出第二波峰值变化随着沥青老化程度加深分为两个阶段:第一阶段是随着沥青老化程度的加深,峰值逐渐下降,说明沥青随着老化程度的加深,虽然其剪切破坏临界应力值在增加,但是其剪切破坏过程中出现的剪切应力最大值在减小;第二阶段是当老化温度达到 193℃时,第二波峰峰值突然上升,并且上升幅度比较大,可能是

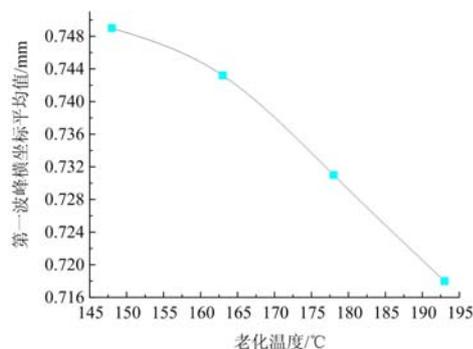


图9 第一波峰横坐标随老化变化的关系图

Fig. 9 X-coordinate of the first peak with respect to aging temperature

此老化条件下,沥青的改性剂发生降解作用<sup>[18]</sup>从而导致沥青出现高度硬化,沥青凝聚力增强,导致第二波峰峰值出现急剧增大的情况。由图 11 的变化曲线可知,在 175 °C 左右,峰值达到最低值,表示此种老化工况下,沥青的凝聚性与本身剪切界面上的摩擦力综合作用为最低,沥青最容易发生破坏。

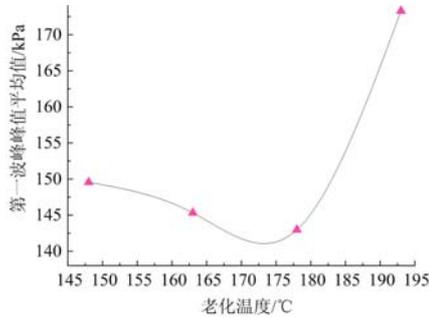


图 10 第一波峰峰值随老化温度的变化关系

Fig. 10 Value of the first peak with respect to aging temperature

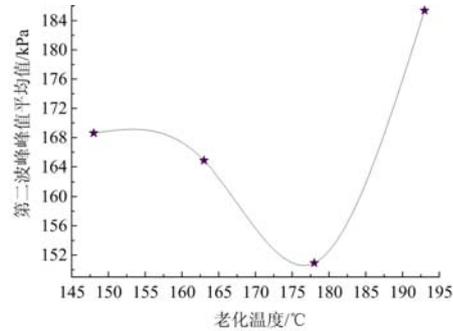


图 11 第二波峰峰值随老化温度的变化关系

Fig. 11 Value of the second peak with respect to aging temperature

### 2.3.4 单波峰与双波峰的表面能关系

比较两种界面的表面能的大小关系,合理的方式为取相同的面积为研究对象来进行比较。试验剪切过程中,对于双波峰而言,由于粘附性破坏界面的面积与凝聚性破坏的面积往往不同,故无法用此类曲线进行比较。但是单波峰曲线之间的比较是可行的,原因是两种模式的剪切是单独的,界面面积是相同的,比如本文中指出 193 °C 下的第 5 组单波峰曲线是凝聚性破坏,本组试验其他单波峰曲线均是粘附性破坏,且这些曲线基本包络第 5 组的试验曲线,说明凝聚性破坏需要的断裂能小于粘附性破坏的断裂能。

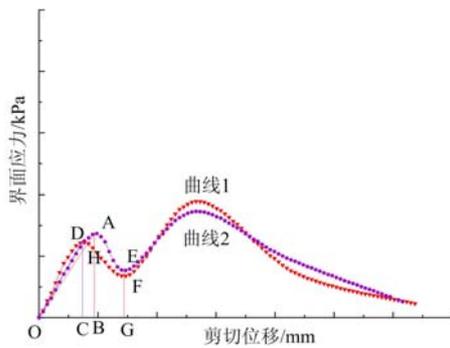


图 12 不同老化剪切试验断裂能关系图

Fig. 12 Fracture energy of specimens of different aging temperature

### 2.3.5 老化对沥青集料界面断裂能的影响

由 2.3.1 和 2.3.2 节可知,双波峰第一波峰值与其横坐标值随着老化程度的增加逐渐减小,如图 12 所示,图中的两条曲线代表不同老化程度的剪切试验曲线,曲线 1 的老化程度大于曲线 2 的老化程度,线段 AB、OB 分别大于线段 CD 与 OC,处在弹性阶段的沥青剪切试验曲线可看做为直线,可以得出  $S_{\triangle AOB} > S_{\triangle COD}$ ,并且由于波谷的位置随着老化程度的变化差异不大,所以可以得出梯形面积  $AEGB > \text{梯形面积 } HFGB$ ,将上面的大小关系进行合并,可以得出区域 OAEGB 的面积  $>$  区域 ODFGB 的面积,根据公式(2)可知,在沥青集料界面破坏所需要的断裂能  $W_{\text{曲线2}} > W_{\text{曲线1}}$ ,由此可知沥青集料

发生破坏需要的断裂能随着沥青的老化程度而降低。

## 3 双波峰理论模型架构

双波峰曲线相比单波峰曲线破坏机理较为复杂,故下文单独对双波峰曲线进行理论分析。

沥青集料在剪切过程中分别呈现了粘弹性、弹性与粘塑性特点,沥青属于一种粘弹性材料,故可用开尔文体对其进行表示<sup>[17]</sup>,开尔文体由牛顿体与胡克体并联而成,如图 13 所示。

$$\sigma_0 = \sigma_1 + \sigma_2 \tag{6}$$

式中,  $\sigma_1$  为胡克体的应力;  $\sigma_2$  为牛顿体的应力;  $\sigma_0$  为开尔文体总应力。

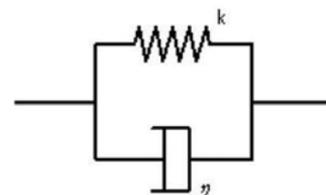


图 13 开尔文模型

Fig. 13 Kelvin model

$$\sigma_0 = k\varepsilon + \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \tag{7}$$

分离变量后积分,得

$$\frac{t}{\eta} = -\frac{1}{k} \ln(\sigma_0 - k\varepsilon) + C \tag{8}$$

式(8)为开尔文模型的本构模型。式中,  $\sigma_0$  为剪切应力;  $\varepsilon$  为剪切应变;  $\eta$  为粘性系数;  $k$  为剪切模量;  $C$  为积分常数。

拉普拉斯转换方程为:

$$\tilde{f}(s) = \int_0^\infty f(t) e^{-st} dt \tag{9}$$

令  $\sigma_0 = \tau_0 M(t)$ , 本构方程变为:

$$\tau_0 M(t) = k\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \tag{10}$$

经拉普拉斯转换后为:

$$\frac{\tau_0}{s} = k\varepsilon(s) + \eta s\varepsilon(s) \tag{11}$$

经变形,得到:

$$\varepsilon(s) = \frac{\tau_0}{s(k + \eta s)} \tag{12}$$

在此基础上进行拉普拉斯转换,得到蠕变方程:

$$\varepsilon(t) = \frac{\tau_0}{k} [1 - e^{-\frac{k}{\eta}t}] \tag{13}$$

并且

$$t_d = \frac{\eta}{k} \tag{14}$$

式中,  $t_d$  被定义为粘弹性材料的迟滞时间, 为开尔文模型物理系数, 在开尔文模型曲线中, 原点处的切线与水平线交点的横坐标即为  $t_d$ , 如图 14 所示。由图可知, 并联牛顿体的弹簧元件对于单独的弹簧元件在相同的外界应力情况下, 达到最终长度的时间会有所延迟。因此开尔文模型可作为时间-迟滞模型, 用来解释双波峰情况。

由于沥青属于粘弹性材料, 可用开尔文模型来表示, 而集料属于弹性材料, 符合胡克定律, 可以用弹簧元件来表示, 沥青-集料界面可以用 Burgers 模型表示<sup>[19]</sup>。Liu 等<sup>[19]</sup> 提出, 整个剪切过程可由一个刚度模型来表示, 即 Burgers 模型

与一个弹簧经一个摩擦系数为  $\mu$  的元件连接, 如图 15 所示。但是根据试验出现双波峰的情况来看, 对于本试验图 15 的模型并不完善, 因为沥青薄膜在剪切破坏过程最后阶段存在残余应力, 即沥青薄膜发生相对位移时, 产生了摩擦力, 并且应力值并非一直都呈增大的趋势。图 15 的模型可修改为将开尔文模型的牛顿体与胡克体分别连接一个具有一定摩擦系数的元件, 这样可以有效地描述沥青集料剪切破坏过程, 如图 16 为修正后的刚体模型。

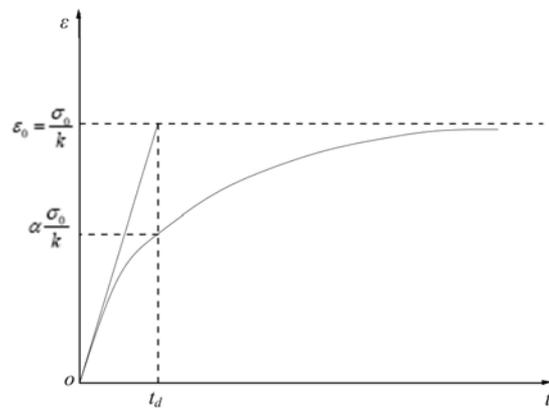


图 14 开尔文蠕变曲线  
Fig. 14 Kelvin creep curve

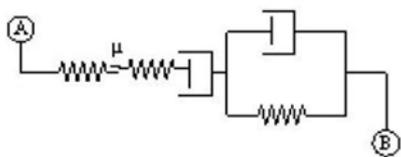


图 15 沥青集料本构模型  
Fig. 15 Constitutive model of  
asphalt-aggregate system

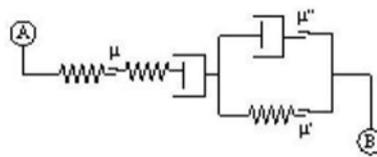


图 16 修正后的沥青集料本构模型  
Fig. 16 Modified constitutive model of  
asphalt-aggregate system

## 4 试验评估与误差分析

整个试验过程出现双波峰与单波峰既是偶然的也是必然的结果,对于经过相同温度老化处理过的沥青,在同种试验条件之所以会出现两种情况,其原因大致是:第一,可能由于试件成型过程中人为误差导致的;第二,成型过程中由于人为蘸取沥青导致初始的沥青膜厚度不完全一致导致的;第三,由于沥青与集料界面的粘结情况与力学性能有直接联系,集料界面的粗糙度具有一定的随机性,这种随机性也会导致试验的误差;第四,仔细观察双波峰试验剪切破坏后的断面会发现,即使同等老化条件下,剪切试验后的断面也不全然相同,也存在不同程度的粗糙性,这种剪切破坏断面的差异致使相同温度处理过的沥青发生内部界面剪切破坏时,应力变化情况不同,所以导致试验曲线不一致。

## 5 结论

通过沥青老化剪切试验研究可以得出以下结论:

(1) 从试验结果可以看出,该种试验方式可有助于理解路面沥青混合料出现失效时的力学特征,并且可以根据两种试验曲线分析沥青混合料发生破坏的机理。

(2) 随着沥青老化,双波峰第一个波峰对应横坐标平均值逐渐呈下降的趋势,沥青的脆性特征相应变得越来越明显,所以其抗破坏性能也逐渐降低,相应地在工程应用上,其稳定性越来越低。

(3) 根据图 9 所示,剪切试验的第一个波峰峰值随着沥青老化程度的加深起初会先变小,这意味着随着沥青老化,沥青集料界面抗剪切破坏能力越来越差,抵抗对于同样的车辆荷载、温度变化等引起的温度应力的能力降低,路面更容易发生裂痕,虽然在 193℃ 老化剪切试验时第一波峰值出现骤然变大的结果,但是在到达此老化程度前,沥青力学性能已经失去工程应用的意义。

(4) 通过试验后已经破坏的试件来看,破坏主要分为三种:第一种是粘附性破坏,第二种是凝聚性破坏,第三种是粘附性与凝聚性同时存在的复合式破坏。这三种破坏在同一种工况下具有随机性,但是沥青老化到一定的程度会使复合式破坏向粘附性破坏过渡。

(5) 对于单波峰曲线,同一剪切条件下,粘附性破坏所需要的断裂能大于粘聚性破坏所需要的断裂能,试验数据拟合出的曲线如果是双波峰,则可知道粘附性破坏与凝聚性破坏依次发生,其交界的位置为波谷,但是单从一条单波峰曲线的数据分析,还不足以判断是粘附性破坏还是凝聚性破坏,需要根据试验后试件的断面进行分析。

### 参考文献:

- [1] 王丰胜. 基于 Burgers 黏弹性模型的沥青路面蠕变变形规律三维有限元分析[J]. 工业建筑, 2014, 44(3):104-109 (WANG Fengsheng. A 3D FEM analysis of creep deformation law of asphalt pavement based on Burgers viscoelastic model[J]. Industrial Construction, 2014, 44(3):104-109 (in Chinese))
- [2] 罗斌, 杨平. 基于 IR 光谱法解析环氧树脂改性沥青老化机理[J]. 工业建筑, 2009, 39(7):79-82 (LUO Bin, YANG Ping. Analysis of ageing mechanism of epoxy resin-modified asphalt based on infrared spectrometry[J]. Industrial Construction, 2009, 39(7):79-82 (in Chinese))
- [3] Rahman A S M A, Faisal H M, Tarefder R A. Effect of progressive aging on the viscoelastic material functions of

- asphalt concrete and its binder[C]. ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2017;V014T11A047.
- [4] Daniel J, Kim Y R, Lee H J. Effects of aging on viscoelastic properties of asphalt-aggregate mixtures[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 1998, 1630(1):21-27.
- [5] 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, CHENG 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))
- [6] Reyff J A, Donovan P. Studies of the effect of aging of 'quiet' pavements on tire/pavement noise[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2005, 118(3):322-330.
- [7] Kneib G. Continuous road traffic noise monitoring and aging of asphalt surfaces [C]. Hamburg: German Acoustical Society (DEGA), 2016;5018-5029.
- [8] Mogrovejo D E, Flintsch G W, Eegar D, et al. Short-term effect of pavement surface aging on tire-pavement noise measured with onboard sound intensity methodology [J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2014, 2403(3):17-27.
- [9] Ahmad M, Faisal H M, Mannan U A, et al. Effects of pore structure on oxidative aging and related mechanical properties of asphalt concrete[J]. Construction & Building Materials, 2017, 151:636-641.
- [10] Wu S, Zhao Z, Xiao Y, et al. Evaluation of mechanical properties and aging index of 10-year field aged asphalt materials[J]. Construction & Building Materials, 2017, 155:1158-1167.
- [11] 李雪连, 陈宇亮, 张起森, 等. 现场实测结构温度对半刚性沥青路面性能的影响[J]. 实验力学, 2014, 29(4):453-459 (LI Xuelian, CHEN Yuliang, ZHANG Qisen, et al. Effect of on-site measured structure temperature on performance of semi-rigid asphalt pavement[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(4):453-459 (in Chinese))
- [12] 延西利, 梁春雨, 艾涛, 等. 基于沥青与石料界面剪切的黏塑性流变模型研究[J]. 土木工程学报, 2014(2):136-144 (YAN Xili, LIANG Chunyu, AI Tao, et al. Study on the visco-plastic model of the interfacial shear between bitumen and stone[J]. China Civil Engineering Journal, 2014(2):136-144 (in Chinese))
- [13] Wu S P, Xiao Y, Liu Q T, et al. Temperature sensitivity of asphalt-aggregate adhesion via dynamic mechanical analysis[J]. Key Engineering Materials, 2008, 385-387:473-476.
- [14] 张旭. 温度和湿度对沥青路面裂缝修补粘附力的影响研究[D]. 吉林大学, 2008 (ZHANG Xu. Research on the influence to asphalt pavements crack sealing adhesion by temperature and humidity[D]. Jilin University, 2008 (in Chinese))
- [15] 季野. 沥青老化行为对沥青-集料界面粘附性影响研究[D]. 广西大学, 2017 (JI Ye. Study on asphalt aging effects to adhesion of interface between asphalt and aggregate[D]. Guangxi University, 2017 (in Chinese))
- [16] Rahman A, Ai C, Song J, et al. Characterization of interface bonding in asphalt pavement layers based on direct shear tests with vertical loading[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(9):04017102.
- [17] Dong M, Hao Y, Zhang C, et al. Failure mechanism analysis of asphalt-aggregate systems subjected to direct shear loading[J]. Materials & Structures, 2017, 50(5):218.
- [18] 樊钊甫. 基于沥青老化的沥青微观特性基础理论研究[D]. 华南理工大学, 2016 (FAN Zhaofu. Basic research for asphalt characteristics on micro-scale based on asphalt aging[D]. South China University of Technology, 2016 (in Chinese))
- [19] Liu Y, Dai Q, You Z. Viscoelastic model for discrete element simulation of asphalt mixtures[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2009, 135(4):324-333.

## Research on mechanical behavior of asphalt-aggregate interface subjected to aging

ZHANG Shu-qun, WANG Zhong-ming, DONG Man-sheng, DONG Gang

(School of Civil & Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** In order to study the influence of aging on mechanical performance at the interface within asphalt-aggregate mixtures, shear experiments are carried out for sandwiched specimens composed of differently aged asphalt to simulate the practical interfacial failure on the road surface. By analyzing the stress-displacement relation and the interfacial failure, shear failure mechanism of asphalt-aggregate interface and asphalt itself is studied under different aging conditions. An improved theoretical model is proposed based on experimental results by consideration of previously-proposed models. Experimental results indicate that single-peak and double-peak curves occur inevitably for each test. According to the Kelvin model, double-peak curves can be attributed to the joint behavior of elasticity and viscosity of asphalt. As the asphalt is further aged, the rheology of asphalt is undermined, and the adhesion at the asphalt-aggregate interface will become weak while the cohesion of asphalt becomes weak initially and then becomes stronger with the aging degree. When the asphalt is aged to a certain degree, double-peak curves rapidly decrease and single-peak curves increase dramatically. The reason lies in that as the aging process goes further, the cohesion of asphalt is enhanced abruptly and the interfacial failure occurs only at the asphalt-aggregate interface under this condition.

**Keywords:** aging; asphalt; single-peak curves; double-peak curves; shear experiment; adhesion; cohesion