

文章编号:1671-8879(2017)05-0001-07

基于 Arrhenius 方程的老化沥青流变特性

栗培龙,马莉霞,冯振刚,李新军

(长安大学 道路结构与材料交通行业重点实验室,陕西 西安 710064)

摘要:为了研究沥青老化过程中的流变特性,选择 5 种沥青分别进行不同时间的旋转薄膜烘箱老化试验(RTFOT),分别采用 Brookfield 黏度计和低温弯曲梁流变仪(BBR),对不同老化状态的沥青样品进行旋转黏度和低温流变参数测定。根据不同温度下的黏度试验,提出采用 Arrhenius 方程计算沥青黏流活化能 E_{η} 的方法,讨论沥青老化过程中 E_{η} 的变化规律;并分析低温劲度模量及其随时间的变化率 m 与 RTFOT 老化时间的关系,讨论老化沥青的黏流活化能与 m 的关系。研究表明:通过 Arrhenius 方程可以计算得到不同老化状态沥青的黏流活化能 E_{η} ,用以表征沥青的流变性能和感温性;随着老化程度的加深, E_{η} 不断增大,即老化对沥青的流变行为有显著影响,沥青老化后分子结构变化引起流动能量增加,柔韧性减弱;虽然老化后沥青的黏度值和黏流活化能都不断增加,但二者大小没有必然联系,黏度随温度的变化才是沥青流变性能反映;不同沥青在 RTFOT 老化 0~85、85~180、180~360 min 不同阶段的黏流活化能增大速率存在较大差别,反映了其抗老化性能和老化机理的差异;沥青抵抗短期老化和长期老化的能力并不一致,SK(韩国 SK-110)和 ZHH(中海-90)具有优良的抗短期老化性能,而 ESSO(埃索-90)和 SK 抗长期老化性能最好;随着老化程度的加深,沥青样品的黏流活化能与低温蠕变劲度变化率呈较好的负相关性,即沥青的黏流特性与低温蠕变行为密切相关。

关键词:道路工程;流变特性;沥青老化;黏流活化能;低温蠕变

中图分类号:U416.217 **文献标志码:**A

Rheological properties of aged asphalt based on Arrhenius equation

LI Pei-long, MA Li-xia, FENG Zhen-gang, LI Xin-jun

(Key Laboratory of Highway Structure & Materials of Ministry of Transport, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: To analyze rheological properties of asphalt in the process of aging, a series of aging tests were conducted on five regular asphalt samples for different time by rolling thin film oven test (RTFOT) in the laboratory, and then Brookfield viscosimeter and low temperature bending beam rheometer (BBR) were carried out on asphalt samples with different aging states to measure rational viscosity and low temperature rheological parameters, respectively. The parameter visco-flow activation energy E_{η} of asphalt was calculated by using Arrhenius equation according to the viscosity values at different temperatures. The changing regularity of E_{η} during the aging process, the change of low-temperature stiffness modulus, the change rate of stiffness with time

收稿日期:2017-04-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51008031);交通运输部应用基础研究项目(2014319812151);

陕西省自然科学基金研究计划项目(2014JQ7242);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310821162010,310821163404)

作者简介:栗培龙(1980-),男,江苏邳州人,副教授,工学博士,E-mail:lpeilong@chd.edu.cn.

m and the RTFOT aging time were analyzed. And the relationship between the visco-flow activation energy E_η and m was discussed. The results show that the parameter visco-flow activation energy E_η for different aging state can be obtained by means of Arrhenius equation, which reflects the rheological properties and temperature sensibility of asphalt. With the deepening of aging, E_η of asphalt increases continuously. There is significant influence of aging on rheological behavior of asphalt. After aging of asphalt, the change of molecular structure leads to the increase of flow energy and the decrease of flexibility. There is no inevitable relationship between E_η and the viscosity value of asphalt although they both increase after aging. The viscosity changes with the actual reflection of rheological properties of asphalt. The increase rate of viscous-flow activation energy of different asphalt at different stages of RTFOT aging, such as 0 to 85, 85 to 180 and 180 to 360 min is different, which reflects the difference of aging resistance and aging mechanism. The resistance to short-term aging capacity is not same to long-term aging capacity, SK and ZHH asphalts have good resistance to short-term aging performance, but ESSO and SK asphalts have the best resistance to long-term aging performance. With the deepening of aging time, it shows a better negative correlation between E_η and the rate of low temperature creep stiffness, that is, the viscous flow characteristics are closely related to the low temperature creep behavior of asphalt. 3 tabs, 7 figs, 26 refs.

Key words: road engineering; rheological property; asphalt aging; visco-flow activation energy; low temperature creep

0 引言

在气候条件和车辆荷载的综合作用下,由于老化引起的沥青物理、化学性质衰变是导致沥青路面耐久性不足的主要原因,路面的耐久性与沥青的老化进程密切相关,因此沥青老化行为研究对沥青混合料再生及提高路面耐久性具有重要的指导意义^[1-3]。然而,由于环境温度、光照、降水等的影响,实际路面的沥青老化研究非常困难,室内模拟老化仍是研究沥青及混合料老化特性最有效的方法^[4]。Mollenhauer 等从不同角度提出了相应的评价方法和参数,分析了沥青在老化过程中的性能指标变化规律^[5-8];栗培龙等提出了模拟沥青野外热氧老化的 60 °C 通风烘箱老化试验方法^[9];Feng 等分析了紫外光老化对紫外光吸收剂改性沥青流变性能、化学性能以及形态的影响^[10];马峰等采用热分析质谱联用技术分析了沥青的老化机理^[11];Shenoy 等分析了老化沥青的高温流变特性^[12];王岚等讨论了老化对胶粉改性沥青和 SBS 改性沥青流变特性的影响^[13];Mills-Beale 等采用黏度、DSR、BBR 以及红外光谱等试验,分析了老化对生物改性沥青流变特性的影响^[14];李立寒等采用荧光显微镜、红外光谱和凝胶色谱等微观试验手段,分析了 SBS 改性沥青的

阶段性老化特征与机理^[15];刘红瑛等采用动态剪切流变试验和弯曲梁流变试验,分析了多聚磷酸复合 SBS 改性沥青的抗老化特性^[16];刘芳等提出了预测机场道面沥青抗老化性能的预估模型^[17];朱辉等采用动态剪切流变仪,分析了短期老化和长期老化对沥青高温流变性能的影响^[18]。然而作为一种黏弹性材料,沥青的性能与其流变特性密切相关^[19-20]。目前对沥青老化流变特性的研究主要采用复数剪切模量 G^* 、相位角 δ 等流变参数进行评价,对沥青黏流活化能的研究较少,难以反映沥青老化进程中的热力学流变特性。

为此,本文选择 5 种常用的沥青,通过室内旋转薄膜烘箱老化试验(RTFOT)测得不同老化状态的沥青样品黏度,基于 Arrhenius 方程得到黏流活化能 E_η ,从热力流变学的角度,分析老化对沥青流变特性的影响,并分析沥青老化进程中黏流活化能的变化规律及其与沥青低温流变指标之间的关系,以期更深入地认识沥青的老化行为及性能衰变规律。

1 试验材料

采用兰炼-90(LAL)、埃索-90(ESSO)、克拉玛依-70(KLM)、中海-90(ZHH)和韩国 SK-110(SK)这 5 种工程中常用的基质沥青进行相关老化试验,

考察沥青老化过程中性能的变化规律。5 种沥青基本指标如表 1 所示。

表 1 沥青基本性能

Tab. 1 Basic properties of asphalt samples

沥青种类	LAL	ESSO	KLM	ZHH	SK
软化点/℃	46.2	46.3	50.6	47.3	47.4
延度(5 cm·min ⁻¹ , 15℃)/cm	86.6	>150	>150	>150	>150
针入度(25℃, 100 g, 5 s)/0.1 mm	91	96	69	81	118
旋转黏度(135℃)/(Pa·s)	0.368	0.348	0.668	0.346	0.369

2 试验方法

2.1 沥青老化试验

对于沥青的热氧老化模拟试验而言,尽管老化条件存在差异,但其老化机理均是沥青与氧气发生氧化反应^[21]。RTFOT 是一种普遍采用的沥青老化模拟试验方法,在工程中常进行 85 min 的老化以评价沥青在混合料拌和及施工过程中的老化程度。Churchill 等认为进行不同温度的延时 RTFOT 试验可以评价沥青结合料的长期老化性能^[22]。研究表明,RTFOT 延时老化与实际路面老化效果之间有着较好的对应性,其中 180 min 老化相当于路面铺筑后实际使用 2~3 年的老化程度,360 min 的老化相当于实际路面使用 6 年的老化程度^[21]。本研究进行延时的 RTFOT 试验,老化温度(163±1)℃,老化时间分别为 0、85、180、360 min。参照试验规程^[23]中 T 0610—2011 沥青 RTFOT 试验方法,将准备好的沥青试样(35±1)g 装入盛样瓶,采用美国 JAMS COX & SONS 公司 2000 年生产的 CS 325-B 型旋转薄膜老化箱进行延时老化试验(图 1),收集老化后的残留沥青样品进行黏度试验及低温弯曲流变试验。



图 1 RTFOT 装置

Fig. 1 RTFOT installation

2.2 黏度试验

对老化前后的沥青样品,采用美国 Brookfield 公司 2001 年生产的 RVDV-II 型旋转黏度/流变仪。按照试验规程^[23]中 T 0625—2011 沥青旋转黏度试验方法,将加热至流动状态的 8 g 沥青样品注入盛样桶内,在试验温度下保温 30~60 min 后,采用 21 号转子,对老化前后的沥青样品采用美国 Brookfield DV-II 型旋转黏度/流变仪,按照 ASTM D4402 试验方法测定不同老化状态下沥青样品的黏度(图 2)。5 种沥青样品不同老化时间的黏度见下一页表 2。根据不同温度下沥青的黏度,采用 Arrhenius 方程计算对应老化状态下沥青的黏流活化能 E_η ,分析老化对沥青流变学指标的影响。



图 2 旋转黏度试验

Fig. 2 Rotary viscosity test

2.3 低温弯曲梁流变试验

按照试验规程^[23]中 T 0627—2011 沥青弯曲蠕变劲度试验方法,将老化后的沥青样品,采用专用模具制备成长(127±2.0)mm、厚(6.35±0.05)mm、宽(12.70±0.05)mm 的标准小梁试件。采用美国 CANNON 公司 2001 年生产的 TE-BBR-F 型弯曲梁流变仪 (beam bending rheometer, BBR)(下页图 3)进行低温变曲梁流变试验。将标准尺寸的沥青小梁试件放在支承架上进行蠕变加载,施加荷载恒定为(980±50)MN,整个试验持续 240 s,数据采集系统自动采集荷载、变形等数据信息,以 60 s 所对应的蠕变劲度 S 及其随时间的变化率 m 来评价沥青的低温流变性能。将 5 种沥青不同老化状态的样品进行 -12℃ 的 BBR 试验,分别测定其劲度模量和 m 值。

3 结果分析

3.1 Arrhenius 方程及沥青黏流活化能 E_η

高分子材料溶液的黏度是相对分子量的宏观反

表2 不同老化状态的沥青黏度

Tab.2 Viscosities of asphalt under different aging states

沥青种类	老化时间/min	不同温度(°C)下的旋转黏度/(Pa·s)				
		85	105	125	135	145
LAL	0	15.300	2.590	0.602	0.368	0.236
	85	24.400	4.080	0.897	0.523	0.319
	180	38.200	6.450	1.267	0.741	0.436
	360	98.000	12.140	2.285	1.188	0.671
ESSO	0	12.200	2.140	0.560	0.348	0.214
	85	16.500	2.890	0.741	0.438	0.272
	180	23.100	3.700	0.968	0.556	0.339
	360	57.400	7.130	1.520	0.845	0.498
KLM	0	23.600	4.500	1.177	0.668	0.415
	85	36.800	7.180	1.770	1.050	0.651
	180	61.500	10.300	2.473	1.447	0.883
	360	147.000	23.100	4.552	2.367	1.337
ZHH	0	14.600	2.490	0.567	0.346	0.222
	85	23.100	3.580	0.873	0.513	0.314
	180	36.400	5.390	1.254	0.733	0.425
	360	96.300	11.530	2.458	1.158	0.654
SK	0	14.600	2.440	0.595	0.369	0.230
	85	20.800	3.400	0.864	0.508	0.315
	180	30.700	4.710	1.188	0.677	0.408
	360	73.800	9.410	2.089	1.111	0.612



图3 BBR试验

Fig.3 BBR test

映。对同一种或同一类物质而言,分子量越大黏度越高。沥青老化实际上是发生了化学反应,其中伴随着化学键的断裂、重组以及聚合的过程,必然会引起黏度的变化。沥青黏度的变化反映沥青质在沥青中胶溶度的变化,Christensen等认为沥青质含量的增加是沥青黏度增加的主要原因^[24];Rukka认为沥青的黏度能反映出沥青中羟基化合物的质量分数^[25]。因此,黏度变化是沥青流变性能的反应。

温度是分子热运动激烈程度的反映。温度上升,分子热运动加剧,分子间距增大,较多的能量使

材料内部形成更多的“空穴”(自由体积),使链段更易于活动,分子间的相互作用减小,黏度下降。当温度远高于玻璃化温度 T_g 和熔点 T_m 时(温度 $T > T_g + 100$ °C),高分子熔体黏度与温度的关系可用 Arrhenius 方程描述^[26]

$$\eta(T) = K e^{\frac{E_\eta}{RT}} \quad (1)$$

式中: $\eta(T)$ 为温度 T 时的黏度(Pa·s); K 为材料常数; $R=8.314$ J/(mol·K),为普适气体常数。

对式(1)两边求对数,得

$$\lg(\eta(T)) = \lg(K) + \frac{E_\eta}{2.303RT} \quad (2)$$

因此,根据在不同温度下沥青的黏度 $\eta(T)$ 值,以 $\lg(\eta(T))$ 和 $1/T$ 作图,所得直线的斜率是 $1/T$ 的系数值,即式(2)中 $\frac{E_\eta}{2.303RT}$ 的值,进而可求得沥青样品的 E_η 。5种沥青不同老化状态的 $\lg(\eta(T))$ 与 $1/T$ 关系回归模型以及 E_η 计算结果见下页表3。

由表1~表3可知,尽管沥青的黏度随老化时间的延长非线性增加,但 x [黏度的对数值 $\lg(\eta(T))$] 和 y (温度的倒数 $1/T$) 呈线性关系,直线的斜率体现了黏度随温度变化的敏感性,其大小可以反映黏流活化能 E_η 的差异。对同种沥青而言,

表 3 沥青黏流活化能计算结果

Tab. 3 Calculation results of visco-flow activation energy

沥青种类	老化时间/min	$\lg(\eta(T))-1/T$ 关系回归模型	判定系数 R^2	$E_a/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$
LAL	0	$y=4\ 198.6x-10.712$	0.989	80.39
	85	$y=4\ 301.7x-10.815$	0.995	82.37
	180	$y=4\ 351.9x-10.794$	0.996	83.33
	360	$y=4\ 888.4x-11.893$	0.997	93.60
ESSO	0	$y=3\ 944.1x-10.125$	0.996	75.52
	85	$y=4\ 062.0x-10.305$	0.997	77.78
	180	$y=4\ 109.5x-10.318$	0.997	78.69
	360	$y=4\ 450.2x-10.971$	0.997	85.21
KLM	0	$y=3\ 543.7x-8.853\ 9$	0.999	67.85
	85	$y=3\ 629.2x-8.870\ 8$	0.999	69.49
	180	$y=3\ 934.7x-9.478\ 3$	0.999	75.34
	360	$y=4\ 395.4x-10.391$	0.999	84.16
ZHH	0	$y=3\ 492.1x-9.014\ 7$	0.999	66.86
	85	$y=3\ 652.6x-9.240\ 4$	0.999	69.94
	180	$y=3\ 841.1x-9.555\ 1$	1.000	73.55
	360	$y=4\ 391.3x-10.682$	0.997	84.08
SK	0	$y=4\ 058.0x-10.374$	0.993	77.70
	85	$y=4\ 091.7x-10.313$	0.996	78.34
	180	$y=4\ 206.3x-10.470$	0.998	80.54
	360	$y=4\ 685.1x-11.434$	0.999	89.71

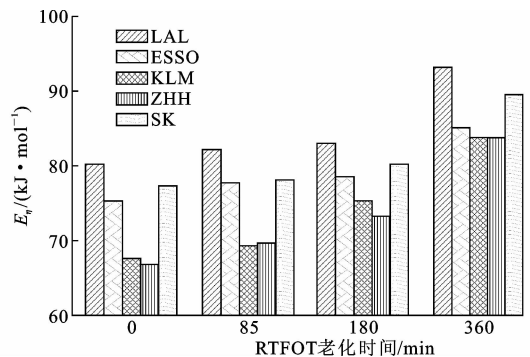
360 min 老化的沥青样品斜率显著大于 0~180 min 老化的样品,但 0~180 min 老化的样品之间斜率差异不大,说明 0~180 min 老化过程中,沥青的黏流活化能增大幅度相对较小。

3.2 老化对沥青黏流活化能的影响

黏流活化能是描述材料黏-温依赖性的参数,指高分子材料在流动过程中,流动单元(即分子链段)用于克服位垒,由原位置跃迁到附近“空穴”所需的最小能量。可见, E_a 既可以反映材料流动的难易程度,又能反映材料黏度随温度变化的敏感性。由于高分子材料的流动单元是链段,因此 E_a 的大小与分子链结构有关,而与总分子量关系不大。一般分子链刚性大、极性大,或含有较大侧基的高分子材料,黏流活化能较高,需要较高的温度才能流动;相反,柔性较好的线形分子链高分子材料 E_a 较低,在较低温度下即可发生流动。没有老化的原样沥青中,LAL 沥青的 E_a 最大,达到 80.39 kJ/mol,ZHH 沥青的 E_a 最小,为 66.86 kJ/mol,但与 KLM 沥青差别不大。即 LAL 沥青分子流动性最差,而 ZHH 和 KLM 沥青的柔性最好,发生流动跃迁的能量更低。

沥青老化后, E_a 增加幅度的不同反映其抗老化性能的差异。随着老化程度的加深,5 种沥青的 E_a

均不断增大,但增加的程度存在差异,如图 4 所示。通过不同老化阶段的 E_a 变化分析,可以考察不同沥青在不同老化阶段的抗老化性能差异。在 0~85 min 老化阶段,ZHH 沥青的 E_a 增加率最大,LAL、ESSO 及 KLM 较为接近,而 SK 则最为缓慢;在 85~180 min 老化阶段,LAL 和 ESSO 的 E_a 增加非常缓慢,KLM 沥青的 E_a 增加幅度最大;在 180~360 min 老化阶段,5 种沥青的 E_a 都急剧增加,其中以 ESSO 的增速最为缓和。可见,由于组分及化学组成的差异,不同沥青抗短期及长期老化的性能存在较大差异。整体而言,ESSO 的抗老化性能优于其他几种沥青。对于相同老化状态的沥青,KLM 的黏度最大,但黏流活化能不一定最高,可见黏流活化能是沥青流变性能指标,而与沥青的黏度大小并没有直接关系。

图 4 E_a 与 RTFOT 老化时间的关系Fig. 4 Relationships between E_a and RTFOT aging time

对同一种沥青而言,0~85 min 老化阶段的 E_a 增幅较大,85~180 min 阶段较缓,180~360 min 阶段 E_a 有大幅增加。这是因为 E_a 的变化直接体现了沥青分子结构的变化,老化开始时,热氧主要作用于沥青分子支链中的易氧化官能团,生成羰基,从而导致 E_a 增幅较大,柔韧性衰减速率较大;而随着老化时间的延长,沥青分子中的易氧化基团越来越少,老化主要体现为分子链的断键聚合过程,含氧极性官能团的增加速率趋缓,对沥青 E_a 的影响相对较小;但在长期老化作用后(如老化 360 min 后),在高温及氧原子的攻击下,沥青分子主链大量断裂并与氧生成羰基甚至羧基,使得沥青的感温性减弱, E_a 增加显著。

3.3 老化对沥青低温流变特性的影响

BBR 试验的劲度模量和 m 是表征沥青低温流变特性的重要参数。SHRP 规范要求采用长期老化后的沥青试样进行 BBR 试验,评价其低温流变性能。不同老化状态的沥青样品在 $-12\text{ }^\circ\text{C}$ 时的劲度

模量与 m 分别如图 5、图 6 所示。

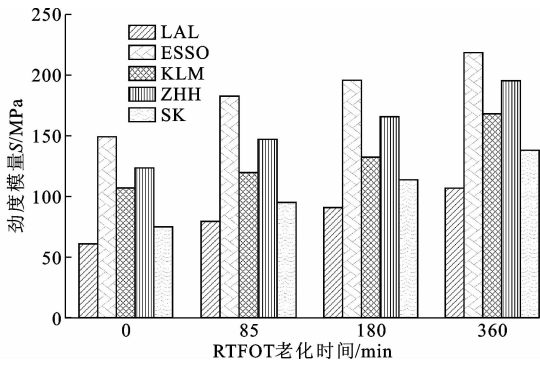


图 5 低温劲度模量随 RTFOT 老化时间变化

Fig. 5 Low temperature stiffness changes with RTFOT aging time

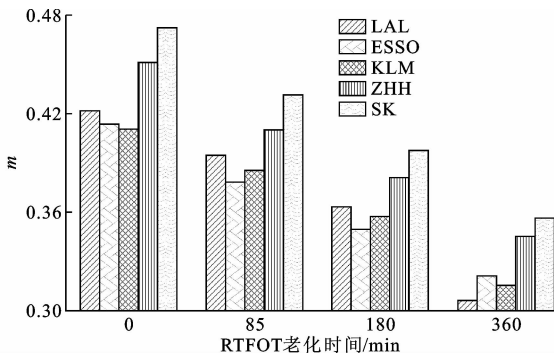


图 6 m 随 RTFOT 老化时间变化

Fig. 6 m changes with RTFOT aging time

由图 5 可知,随着老化时间的延长,5 种沥青的劲度模量均不断增大。在相同的老化条件下,不同沥青的劲度模量增加幅度差异显著,85 min 老化后的劲度增幅从小到大排序依次为 SK、ZHH、ESSO、KLM、LAL;180 min 老化后的劲度增幅从小到大排序为 SK、ESSO、ZHH、KLM、LAL;360 min 老化后的劲度增幅从小到大排序为 ESSO、SK、ZHH、LAL、KLM。由此可知,沥青抵抗短期老化和长期老化的能力并不一致,SK 和 ZHH 具有优良的抗短期老化性能,而 ESSO 和 SK 抗长期老化性能最好,但由于劲度初始值差别较大,仅从这个角度并不能说明沥青路面耐久性的差异。

从图 6 可以看出,随着老化时间的延长, m 不断衰减,即随着老化程度的加深,沥青的低温应力消散能力逐渐减弱。

为了分析沥青的低温应力消散能力与沥青分子的黏流特性之间的关系,将黏流活化能与 m 进行相关分析,见图 7。由图 7 可以看出,沥青样品的 E_{η} 与 m 呈较好的负相关性,即 E_{η} 越大, m 越小,沥青的应力消散能力越弱,低温性能越差。沥青老化的本质是沥青分子发生氧化反应生成醛、酮等极性官

能团,小分子的芳香类物质转化为稠环化合物,分子量增大,而且沥青分子链相互错位移动能力减弱,沥青黏度显著增加。

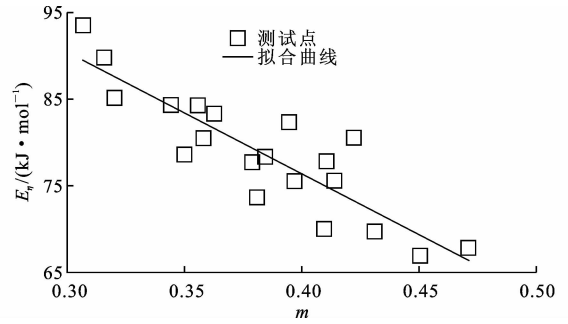


图 7 E_{η} 与 m 的关系

Fig. 7 Relationship between E_{η} and m

4 结 语

(1) 根据不同温度下的黏度,通过 Arrhenius 方程可以计算得到不同老化状态沥青的黏流活化能 E_{η} , E_{η} 可以有效地表征沥青的流变性能和感温性。随着沥青老化程度的加深,沥青感温性不断减小,黏流活化能不断增加,其增大速率反映了不同沥青抗老化性能的差异。

(2) 虽然老化后沥青的黏度值和黏流活化能都不断增加,但二者大小没有必然联系,黏度随温度的变化才是沥青流变性能的反映;由于短期老化和长期老化阶段的老化机理不同,故在不同老化阶段沥青的流变特性存在较大差异。

(3) 随着老化程度的加深,沥青样品的黏流活化能与低温蠕变劲度变化率 m 呈较好的负相关性,即沥青的黏流特性和低温蠕变行为密切相关。

(4) 本文主要分析了黏流活化能 E_{η} 与低温流变指标的相关性,下一步将开展 E_{η} 与 $G^* \sin(\delta)$ 、 δ 等动态剪切流变参数以及沥青组分、胶体不稳定指数等微观结构参数的相关性分析,深入研究沥青老化过程中的热力学流变行为。

参考文献:

References:

- [1] COLLOP A C, CHOI Y, AIREY G D. Effects of pressure and aging in SATS test[J]. Journal of Transportation Engineering, 2007, 133(11): 618-624.
- [2] APEAGYEI A K. Laboratory evaluation of antioxidants for asphalt binders[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(1): 47-53.
- [3] 栗培龙, 张争奇, 王秉纲. 非线性微分动力学模型的沥青老化行为[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(4):

- 55-59.
- LI Pei-long, ZHANG Zheng-qi, WANG Bing-gang. Aging behavior analysis of asphalt based on nonlinear differential dynamic model[J]. Journal of Civil, Architectural & Environment Engineering, 2009, 31(4): 55-59.
- [4] MOUILLET V, FARCAS F, BESSON S. Ageing by UV radiation of an elastomer modified bitumen[J]. Fuel, 2008, 87(12): 2408-2419.
- [5] MOLLENHAUER K, PIERARD N, TUSAR M, et al. Development and validation of a laboratory aging method for the accelerated simulation of reclaimed asphalt[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science Edition, 2010, 25(4): 631-636.
- [6] AIREY G D. State of the art report on ageing test methods for bituminous pavement materials[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2003, 4(3): 165-176.
- [7] AKBARNEJAD S, HOUBEN L J M, MOLENAAR A A A. Application of aging methods to evaluate the long-term performance of road bases containing blast furnace slag materials[J]. Road Materials and Pavement Design, 2014, 15(3): 488-506.
- [8] 张争奇, 梁晓莉, 李平. 沥青老化性能评价方法[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(1): 1-5.
- ZHANG Zheng-qi, LIANG Xiao-li, LI Ping. Evaluation method of asphalt aging properties[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(1): 1-5.
- [9] 栗培龙, 张争奇, 王秉纲, 等. 沥青野外热氧老化模拟试验研究[J]. 河北工业大学学报, 2008, 37(4): 90-95.
- LI Pei-long ZHANG Zheng-qi, WANG Bing-gang, et al. Experimental research on thermo-oxidative aging of asphalt for simulation in the field hot climate [J]. Journal of Hebei University of Technology, 2008, 37(4): 90-95.
- [10] FENG Z G, YU J Y, ZHANG H L, et al. Effect of ultraviolet aging on rheology, chemistry and morphology of ultraviolet absorber modified bitumen[J]. Materials and Structures, 2013, 46(7): 1123-1132.
- [11] 马峰, 傅珍, 沙爱民. 基于热分析质谱联用技术的沥青老化机理研究[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2014, 34(6): 7-12.
- MA Feng, FU Zhen, SHA Ai-min. Aging mechanism of asphalt based on thermal property and mass spectrum analysis [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2014, 34(6): 7-12.
- [12] SHENOY A. Prediction of high temperature rheological properties of aged asphalts from the flow data of the original unaged samples [J]. Construction and Building Materials, 2002, 16(8): 509-517.
- [13] 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 Yong-ming, 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.
- [14] MILLS-BEALE J, YOU Z P, FINI E, et al. Aging influence on rheology properties of petroleum-based asphalt modified with biobinder[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 26(2): 358-366.
- [15] 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.
- [16] 刘红瑛, 张铭铭, 黄凌辉, 等. 多聚磷酸复合 SBS 改性沥青流变性能及抗老化特性[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2016, 46(6): 1290-1295.
- LIU Hong-ying, ZHANG Ming-ming, HUANG Ling-hui, et al. Rheological and anti-aging properties of polyphosphoric acid composite styrene butadiene styrene modified asphalt [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2016, 46(6): 1290-1295.
- [17] 刘芳, 夏洪山, 艾军, 等. 基于 PG 值的机场道面沥青抗老化性能预估模型[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(1): 73-77.
- LIU Fang, XIA Hong-shan, AI Jun, et al. Prediction model of asphalt anti-aging performance in airport pavement based on PG value [J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(1): 73-77.
- [18] 朱辉, 樊亮, 裴金荣, 等. 两种沥青老化后的流变性能分析[J]. 石油沥青, 2014, 28(4): 21-24.
- ZHU Hui, FAN Liang, PEI Jin-rong, et al. Rheological properties of two kinds of aged asphalt [J]. Petroleum Asphalt, 2014, 28(4): 21-24.
- [19] 黄卫东, 孙立军, 游宏. SBS 改性沥青流变性质与显微结构的关系[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2003, 31(8): 916-920.