

橡胶粉改性生物沥青的老化特性研究

周超

(四川工程职业技术学院,四川 德阳 618000)

摘要:为评价热氧老化对橡胶粉改性生物沥青的性能影响,采用流变性评价指标分析生物沥青和橡胶粉改性生物沥青的高温抗变形能力,并基于流变性评价指标建立不同老化温度及时间下的橡胶粉改性生物沥青老化动力学模型。试验表明:橡胶粉改性生物沥青的抗老化能力显著优于生物沥青,且橡胶颗粒越大,抗老化能力越强;随着老化时间的延长,橡胶粉改性生物沥青的高温抗变形能力非单调性增加。在此基础上以车辙因子、应变恢复率相对差异和不可恢复蠕变柔量相对差异3个流变性指标分别建立老化动力学方程,其中以车辙因子拟合建立的老化动力学模型计算值与试验测量值相关性最好,能够反映橡胶粉改性生物沥青老化的实际过程,可以快速评价其黏弹特性。

关键词:橡胶粉;生物沥青;车辙因子;多应力蠕变恢复试验;老化动力学方程

中图分类号: U414

文献标志码: A

道路石油沥青属于不可再生资源,随着交通行业的快速发展,对道路石油沥青的消耗量逐渐增加。近年来,越来越多的研究人员开始关注道路石油沥青枯竭的问题。已有研究表明:生物质热解制得的生物油具有良好的附着力和低温延展性,可作为石油基沥青的替代品^[1]。目前,由于生物油自身性质的限制,尚无法100%替代石油沥青,在道路工程中一般将其作为石油沥青稀释液和改性剂^[2]。因此,常见生物沥青主要还是由生物油与传统石油沥青混合而成,且一些研究已经证明了生物沥青在实际应用中的可行性。Ingrassia等^[3]研究表明:木屑制得生物沥青的抗永久变形能力和抗疲劳性一般与具有相似渗透等级的石油沥青性能相当;Dong等^[4]通过添加生物油来提高沥青与聚合物的相容性,其复合改性沥青的综合路用性能也得到改善;Rahman^[5]研究结果表明:以废食用生物油替代15%的石油沥青,其生物沥青的稳定性、流变性和抗车辙性能等技术指标并未降低,促进了柔性路面中可替代黏结材料的应用。

另一方面,现有研究表明生物沥青的抗老化能力相对较差。汪海年等^[6]指出,生物沥青老化后,生物沥青相对变硬,低温抗裂性能有所降低;Fini等^[7]研究了不同生物油改性沥青的性能,表明不同生物油改性沥青的物理化学特性及力学性能表现出很大的差异性,特别是对热氧老化的敏感性较大;Yang等^[8]将木材废料中制得生物油添加到石油沥青中,并通过红外光谱测试指标研究其老化性能,表明在石油沥青中加入生

物油会提高沥青的老化速率,这对沥青混合料的耐久性能是不利的。且在石油沥青中加入较高掺量的生物油,沥青质的聚集或组合会产生不良的硬化效应,降低沥青的弹性特性。

综上所述,生物沥青的耐久性及抗老化性能仍然存在一定的局限性。为优化生物沥青路用性能,已有研究表明,通过添加橡胶粉、废旧塑料、SBS改性剂等,可以改善生物沥青的抗老化能力^[9-10]。但目前的研究很少涉及橡胶粉改性生物沥青的耐老化性能及其老化动力学模拟评价研究,特别是热氧老化对橡胶粉改性生物沥青流变性能的影响。基于此,该文研究了不同目数橡胶粉改性生物沥青的流变特性随热氧老化时间变化情况,探索建立橡胶粉改性生物沥青老化动力学方程,以期废旧橡胶粉改性生物沥青的快速评价提供技术参考。

1 试验原材料与试验方法

1.1 试验原材料

试验采用克拉玛依70#沥青,主要性能指标见表1,其技术指标符合JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》要求。

试验采用常温粉碎加工而成的40目和60目废旧橡胶粉,其主要物理性能指标如表2所示。

研究中购买的生物油是从废弃木屑中提取出来

(表 3),颜色为黑褐色,室温下具有一定的可塑性,与石油沥青黏结剂具有良好的相容性。

表 1 克拉玛依 70# 沥青技术指标

技术指标	单位	测量值	规范要求	试验方法
25℃针入度	0.1 mm	68	60~80	T0604
软化点	℃	47	≥46	T0606
15℃延度	cm	>100	≥100	T0605

表 2 橡胶粉的物理性能检测结果

密度/(g·cm ⁻³)	水分/%	金属/%	纤维/%
1.15	0.30	0.007	0.06

表 3 木屑生产生物油的物理性能检测结果

总油分占 比/%	木质素含 量/%	密度/ (g·cm ⁻³)	60℃黏度/ (Pa·s)	pH 值
27	36	1.1	86	2.9

1.2 试验方法

根据前期的研究和试验经验,在制备生物沥青时,首先将基质沥青和生物油分别加热至 145℃和 120℃。然后以基质沥青 15%的掺量将生物油添加到基质沥青中,在 135℃条件下高速搅拌共混 20 min,接着将生物沥青加热至 185℃左右,再加入橡胶粉,掺量为基质沥青的 20%,并以 4 500 r/min 的速率高速剪切 1 h;最后再用机械搅拌机在 160℃条件下搅拌 1 h,以确保橡胶粉在生物沥青中充分膨胀,之后浇筑试样并进行性能测试。

对于沥青的热氧老化,不论是旋转薄膜烘箱老化 RTFOT 还是压力容器老化 PAV 试验,均已得到普遍认可。因此,橡胶粉改性生物沥青热氧老化选择 RTFOT 试验进行模拟,老化过程参照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,老化时间分别选择 0、1、2、3、4 h。

2 试验结果与分析

2.1 常规技术指标

对制备的生物改性沥青(BOA)、40 目橡胶粉改性生物沥青(40CRBOA)、60 目橡胶粉改性生物沥青(60CRBOA)进行常规性能测试,结果如表 4 所示。

表 4 不同改性沥青的技术指标

改性沥青	老化时间/h	针入度/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	5℃延 度/mm
BOA	0	112	44	120
	1	87	46	88
	2	73	50	38
	3	69	54	23
	4	62	59	18
40CRBOA	0	83	55	130
	1	68	65	124
	2	62	68	129
	3	57	69	121
	4	49	72	117
60CRBOA	0	91	51	142
	1	72	57	134
	2	64	62	122
	3	58	65	114
	4	47	70	107

由表 4 可知:随着老化时间的延长,针入度和延度随之降低,软化点随之升高。表明 3 种改性沥青老化后表现出“硬化”特性,可塑性减弱;其中生物改性沥青的变化幅度最大,抗老化能力差,尤其 5℃延度降低幅度达到 85%,表明生物沥青老化后其低温抗裂性能会显著下降;而橡胶粉改性生物沥青变化幅度相对较小,主要原因在于老化早期橡胶粉颗粒以溶胀为主,老化中期橡胶颗粒外围聚合物降解,将溶胀吸收的轻质组分进一步释放,从而延缓了生物沥青的老化。

2.2 温度扫描试验

温度扫描试验选用应变控制,试验温度 46~88℃,试验频率为 10 Hz,以分析不同老化时间下 3 种改性沥青的高温性能,而综合指标车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 能够很好地评价其高温抗变形能力,车辙因子越大,其高温流动性越小,抗车辙能力越强。车辙因子随温度的变化情况如图 1 所示。

由图 1 可知:随着温度的升高,3 种改性沥青的 $G^*/\sin\delta$ 随之下降,且后期变化幅度逐渐减小。在相同温度下,对比 3 种改性沥青的 $G^*/\sin\delta$ 可知:40CRBOA>60CRBOA>BOA。表明橡胶粉的加入可以显著提高生物沥青的高温抗变形能力,且 40 目橡胶粉改性生物沥青明显优于 60 目橡胶粉改性生物沥青的高温抗变形能力。

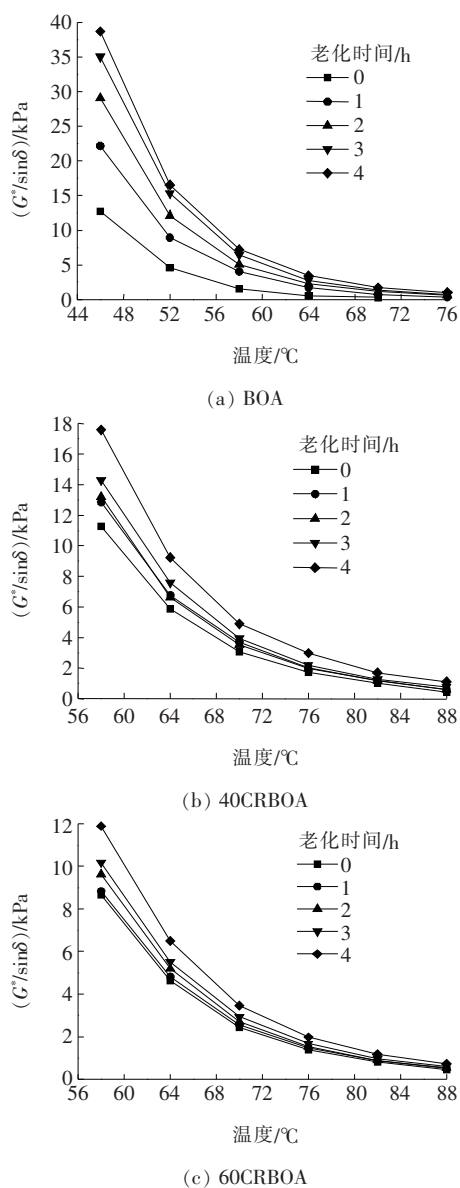


图1 不同老化时间下改性沥青车辙因子随温度变化曲线

随着老化时间的延长,3种改性沥青的 $G'/\sin\delta$ 随之增加。由图1(b)可知:40目橡胶粉改性生物沥青在老化时间为1~2 h时, $G'/\sin\delta$ 区分度较小,表明此阶段40目橡胶颗粒主要处于逐层降解剥落阶段,促使高聚物中的长分子链降解成更小、更短的分子链,且释放出部分轻质组分,从而弥补了基质沥青的老化作用,使其 $G'/\sin\delta$ 变化不明显;随着老化时间的延长,橡胶颗粒核心内部网络结构开始吸收生物沥青中轻质组分而溶胀,形成以高聚物主链为核心的胶团,从而使其具有较高的黏弹性,表现出较强的抗变形能力。对于60目橡胶粉改性生物沥青而言,老化时间为0~1 h时, $G'/\sin\delta$ 变化幅度不明显。主要是由于60目橡胶颗粒较小,比表面积大,表层降解剥落速度较快,其演

变历程相对于40目橡胶粉改性生物沥青会有所提前。综上所述,橡胶粉改性生物沥青的抗老化能力要远优于生物沥青,且随着老化时间的延长,高温抗变形能力逐渐增加。

2.3 多应力蠕变恢复试验

多应力蠕变恢复试验(Multiple Stress Creep Recover, MSCR)是通过动态剪切流变仪 DSR 对试样进行间歇式循环加载。首先加载 0.1 kPa 的应力,间歇循环加载 10 个周期,1 个周期中,前 1 s 为加载变形,后 9 s 为卸载恢复阶段;之后,再按同样的程序加载 3.2 kPa 的应力。最后通过恢复百分率 R 以及不可恢复蠕变柔量 J_{nr} 来评价改性沥青的延迟弹性恢复性能,通过应变恢复率相对差异 R_{diff} 和不可恢复蠕变柔量相对差异 $J_{nr-diff}$ 来评价改性沥青对应力的敏感程度。试验温度 64°C ,测试结果如图2~5所示。

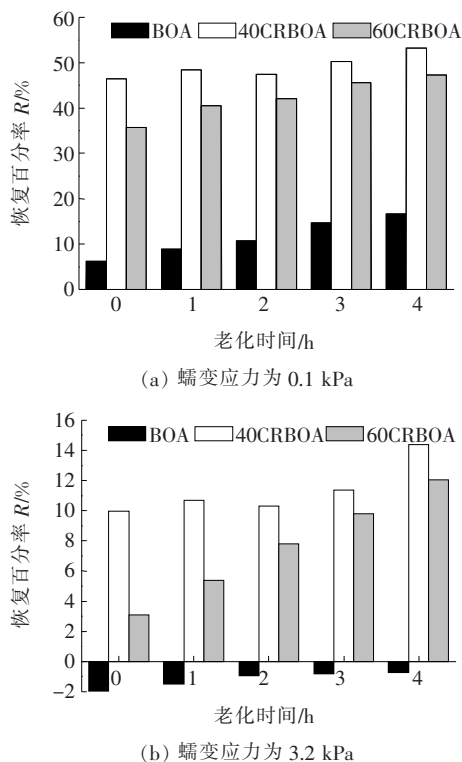


图2 不同老化时间下改性沥青的 R 值变化

改性沥青的性能恢复对于评价其高温抗变形能力尤为重要,由图2可知:在相同老化时间下,3种改性沥青的恢复百分率 R 大小排序为:40CEBOA > 60CEBOA > BOA,与车辙因子的变化规律相一致。说明橡胶粉的加入可以大幅度改善生物沥青的抗变形能力,且橡胶粉颗粒越大,抗变形能力越好;随着老化时间的延长,橡胶粉改性生物沥青的恢复百分率逐渐增加,抗变形能力得到提高。在低应力 0.1 kPa 作用

下,未老化生物沥青的恢复百分率仅为 6.2%,在高应力 3.2 kPa 作用下,生物沥青的恢复百分率为负值。说明在高应力加载条件下,应力卸载恢复期间,生物沥青并未产生性能恢复的趋势,而是发生了进一步的蠕变,表明生物沥青不适合应用于重轴载条件下的沥青路面。主要原因在于高温条件下,生物沥青处于黏塑性状态,在高应力加载条件下易产生应力损伤,即便应力卸载,在自身的惯性条件下,会进一步产生蠕变。因此,对于生物沥青的多应力蠕变恢复试验应选择合适的测试温度,使其处于黏弹性状态。

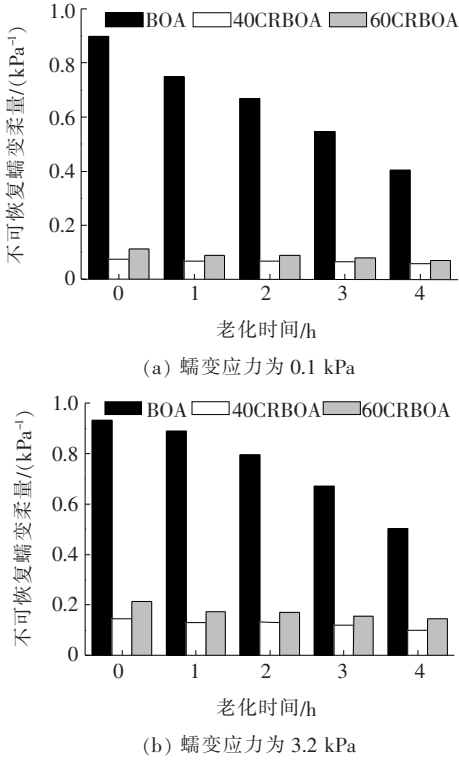


图 3 不同老化时间下改性沥青的 J_{nr} 值变化

不可恢复蠕变柔量主要评价改性沥青的黏塑性。由图 3 可知:生物沥青的不可恢复蠕变柔量最大,抗变形能力最差;随着老化时间的延长,不可恢复蠕变柔量降低,抗变形能力有所改善。主要是由于生物油容易受到高温影响,在高温条件下易老化。橡胶粉改性生物沥青的不可恢复蠕变柔量相对较小,且随着老化时间的延长,变化幅度不明显,说明其黏塑性状态比较稳定,抗老化能力强。

不可恢复蠕变柔量相对差异体现了改性沥青柔性成分对应力的敏感性。由图 4 可知:生物沥青的不可恢复蠕变柔量相对差异最小,仅为 3.86%,通过前面的分析可知,在高温 64℃ 条件下测试,生物沥青处于黏塑性状态,高低应力作用都会产生较大变形,使其产

生损伤,致使高低应力作用下生物沥青对应力敏感性的区分度较低,不能真实反映出生物沥青的蠕变性能。

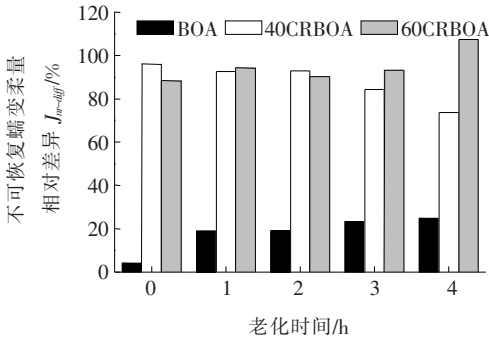


图 4 不同老化时间下改性沥青的 $J_{nr-diff}$ 值变化

橡胶粉的加入大幅度提高了改性生物沥青的不可恢复蠕变柔量相对差异,说明橡胶粉改性生物沥青的柔性部分对应力的变化比较敏感。两种橡胶粉改性生物沥青随着老化时间的延长,其不可恢复蠕变柔量相对差异变化规律相反。其原因主要在于:60 目橡胶粉的颗粒相对较小,比表面积大,随着老化时间的延长,橡胶颗粒会不断吸收沥青中的轻质组分而溶胀,造成橡胶颗粒外围聚合物降解剥落,弹性部分丧失严重,可塑性大幅度提高,且橡胶颗粒内部轻质组分进一步释放出来,促使生物沥青相对较软,而此作用可以消减生物沥青的老化影响,从而导致 60 目橡胶粉改性生物沥青对应力的敏感性增加。

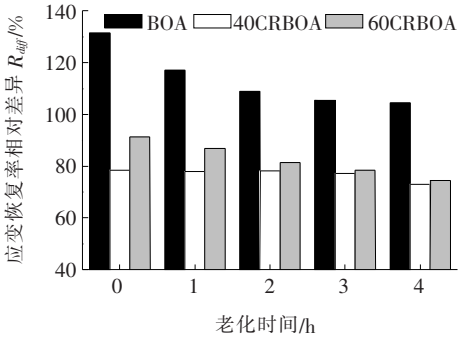


图 5 不同老化时间下改性沥青的 R_{diff} 值变化

应变恢复率相对差异主要体现了改性沥青中弹性成分对应力的敏感性。由图 5 可知:相同老化时间下 3 种改性沥青应变恢复率相对差异的变化趋势为:BOA>60CEBOA>40CEBOA。其中,橡胶粉的加入大幅度降低了应变恢复率相对差异,说明橡胶粉的加入改善了生物沥青对应力的敏感性。表明生物沥青中的轻质组分与橡胶粉具有良好的相容性,容易被橡胶颗粒吸收,使橡胶颗粒网络结构发育得更加完善。同时,随着老化时间的延长,40 目橡胶粉改性生物沥青

对应力敏感性变化不显著,而60目橡胶粉改性生物沥青具有明显下降的趋势,抗老化能力相对较弱。这主要在于60目橡胶颗粒较小,比表面积大,溶胀降解速度较快,弹性网络结构遭到破坏。

3 橡胶粉改性生物沥青老化动力学模型

3.1 基于时间参数的老化动力方程

为表征3种改性沥青随老化时间变化的行为特征,以改性沥青的流变性能指标建立老化动力学模型:
$$\ln(R/R_0)=kt \tag{1}$$
式中: t 为老化时间(h); R_0 为改性沥青的初始流变性能指标; R 为经过老化时间 t 的改性沥青流变性能指标; k 为总反应速率(h^{-1})。

综合考虑采用58℃的车辙因子、应变恢复率相对差异以及不可恢复蠕变柔量相对差异3个流变性能指标建立老化动力学方程。老化动力学方程回归曲线如图6~8所示,动力方程及相关系数如表5所示。

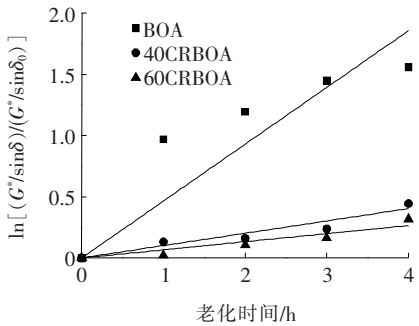


图6 $\ln[(G^*/\sin\delta)/(G^*/\sin\delta_0)]$ 与老化时间的关系曲线

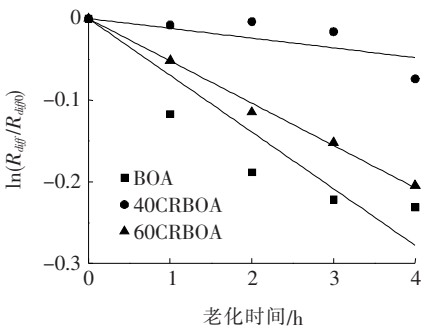


图7 $\ln(R_{diff}/R_{diff0})$ 与老化时间的关系曲线

由表5可知:老化动力学方程的斜率即为总反应速率 k ,则3种改性沥青的不同流变性能指标模拟所得的总反应速率 k 大小排序一致: $\text{BOA}>60\text{CRBOA}>40\text{CRBOA}$,而总反应速率 k 可以反映出改性沥青的抗老化程度, k 值越小,老化速率越慢,抗老化能力越强。

说明40目橡胶粉改性生物沥青的抗老化能力最强,生物改性沥青的抗老化能力最弱,这与前文的分析一致。

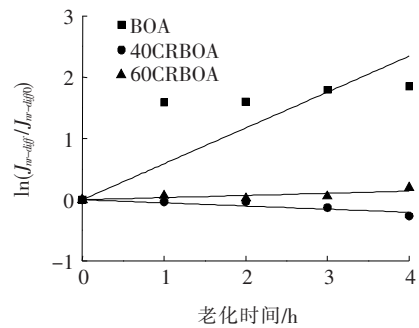


图8 $\ln(J_{nr-diff}/J_{nr-diff0})$ 与老化时间的关系曲线

表5 基于时间参数的老化动力学方程

改性沥青	拟合指标	老化动力学方程	相关系数
BOA	$G^*/\sin\delta$	$y=0.464\ 2t$	0.923\ 9
	R_{diff}	$y=-0.069\ 5t$	0.941\ 4
	$J_{nr-diff}$	$y=0.585\ 8t$	0.847\ 4
40CRBOA	$G^*/\sin\delta$	$y=0.100\ 7t$	0.964\ 2
	R_{diff}	$y=-0.011\ 9t$	0.675\ 9
	$J_{nr-diff}$	$y=-0.051\ 5t$	0.867\ 7
60CRBOA	$G^*/\sin\delta$	$y=0.066\ 2t$	0.937\ 4
	R_{diff}	$y=-0.051\ 8t$	0.997\ 8
	$J_{nr-diff}$	$y=0.035\ 0t$	0.759\ 8

由其相关系数可知:不同改性沥青应变恢复率相对差异和不可恢复蠕变柔量相对差异拟合方程的相关系数变化幅度比较大,40目橡胶粉改性生物沥青的应变恢复率相对差异拟合方程的相关系数仅为0.6759,60目橡胶粉改性生物沥青的不可恢复蠕变柔量相对差异拟合方程的相关系数为0.7598,相关性相对较低,其原因在于应变恢复率相对差异主要反映了改性沥青的弹性特性,而不可恢复蠕变柔量相对差异主要反映了改性沥青的黏性特性,不能综合评价橡胶粉改性沥青的黏弹特性,致使其相关系数变化幅度较大。而车辙因子能够合理评价改性沥青的黏弹性,可以看出车辙因子拟合方程的相关系数均在0.9以上。另一方面,从图6~8可知:未老化的生物沥青在拟合曲线中出现了明显的偏离,会影响到老化动力方程的相关系数。其偏离的原因在于,生物沥青中的生物油容易老化,即便短时间老化也会使其性能出现较大的变化。综上所述,基于时间参数的老化动力学方程与拟合指标车辙因子具有很高的相关性,能够很好地分析3种改性沥青在不同老化时间下的黏弹特性。

3.2 基于时间及温度参数的老化动力学方程

不同的老化温度会对改性沥青性能产生显著的差别,也是影响改性沥青老化性能的重要因素^[11-12]。因此,为提高老化动力学方程的适应性,试验又进一步增加了 175 ℃和 185 ℃温度下的老化试验,同时结合前述分析,仅选择老化时间为 1、2、3、4 h 条件下的 58 ℃车辙因子作为拟合指标,以提高老化动力学方程的可靠性。根据 Arrhenius 方程可知老化动力学方程:

$$\ln k = -E_a / (RT) + \ln A \tag{2}$$

式中: E_a 为反应活化能; T 为老化温度; R 为常数,取 8.314 J/(mol·K); A 为指前因子。

由式(2)可知:只要测出不同老化时间下的总反应速率,即可求出改性沥青中其他老化反应常数,由式(1)可求得不同温度下的总反应速率 k ,如表 6 所示。

表 6 不同老化温度下的总反应速率 k

改性沥青	老化温度/ ℃	总反应速率 k	相关系数
BOA	163	0.210 2	0.988 5
	175	0.220 3	0.993 8
	185	0.226 8	0.988 0
40CRBOA	163	0.062 4	0.949 4
	175	0.080 1	0.986 5
	185	0.089 1	0.994 7
60CRBOA	163	0.089 7	0.973 7
	175	0.102 7	0.983 5
	185	0.111 5	0.990 4

根据式(2)及表 6,以 $1/T$ 对 $-\ln k$ 作拟合曲线图,经线性回归得到拟合曲线如图 9 所示,相应回归曲线的动力学方程参数如表 7 所示。

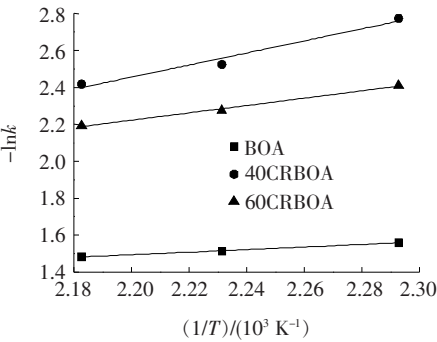


图 9 $1/T$ 与 $-\ln k$ 的关系曲线

由表 7 可知:3 种改性沥青回归曲线的相关系数均不小于 0.94。同时由式(2)可知,拟合直线的斜率表示 E_a/R ,拟合直线的截距表示 $\ln A$,则不同老化温

表 7 3 种改性沥青回归曲线的动力学方程参数

改性沥青	斜率	截距	相关系数
BOA	0.689 4	-0.022 2	0.991 4
40CRBOA	3.270 7	-4.739 9	0.948 2
60CRBOA	1.985 8	-2.145 7	0.989 2

度下改性沥青的车辙因子与老化时间的拟合方程分别为:

生物沥青:

$$\ln \left(\frac{G^*}{\sin \delta} \right)_{t,T} = 1.022(t-1)e^{\frac{-689.4}{T}} + 1.409 \tag{3}$$

40 目橡胶粉改性生物沥青:

$$\ln \left(\frac{G^*}{\sin \delta} \right)_{t,T} = 114.423(t-1)e^{\frac{-3\,270.9}{T}} + 2.551 \tag{4}$$

60 目橡胶粉改性生物沥青:

$$\ln \left(\frac{G^*}{\sin \delta} \right)_{t,T} = 8.548(t-1)e^{\frac{-1\,985.8}{T}} + 2.178 \tag{5}$$

公式中老化时间 t 应不小于 1 h,对 3 种改性沥青的老化动力学方程进行预估,结果如图 10 所示。

由图 10 可知:模型计算值与测量值的吻合性好,说明所建立的模型与 3 种改性沥青老化的实际过程相符。对老化动力学方程进行显著性检验,可靠度水平为 95%,结果见表 8。

由表 8 可知:检验 p 值远小于 0.05,所以,在显著性水平为 0.05 下,可认为老化动力学方程的曲线关系是显著的。因此, $G^*/\sin \delta$ 在有限的试验环境条件下,可通过 RTFOT 老化试验近似预测生物改性沥青和橡胶粉改性生物沥青的车辙因子,从而可以快速评价其黏弹特性。

4 结论

(1) 基于车辙因子、应变恢复率相对差异和不可恢复蠕变柔量相对差异等评价指标可知,橡胶粉改性生物沥青的抗老化能力及对应力的敏感性都要远优于生物沥青,且橡胶颗粒越大,抗老化能力越强,随着老化时间的延长,高温抗变形能力逐渐增加。

(2) 基于时间参数的老化动力学方程与拟合指标车辙因子具有显著的相关性,能够综合分析 3 种改性沥青在不同老化时间下的黏弹特性,且拟合方程中的总反应速率 k 可以综合评价改性沥青的抗老化能力。相对于生物沥青而言,40 目橡胶粉改性生物沥青的抗老化能力可以提高 78%。

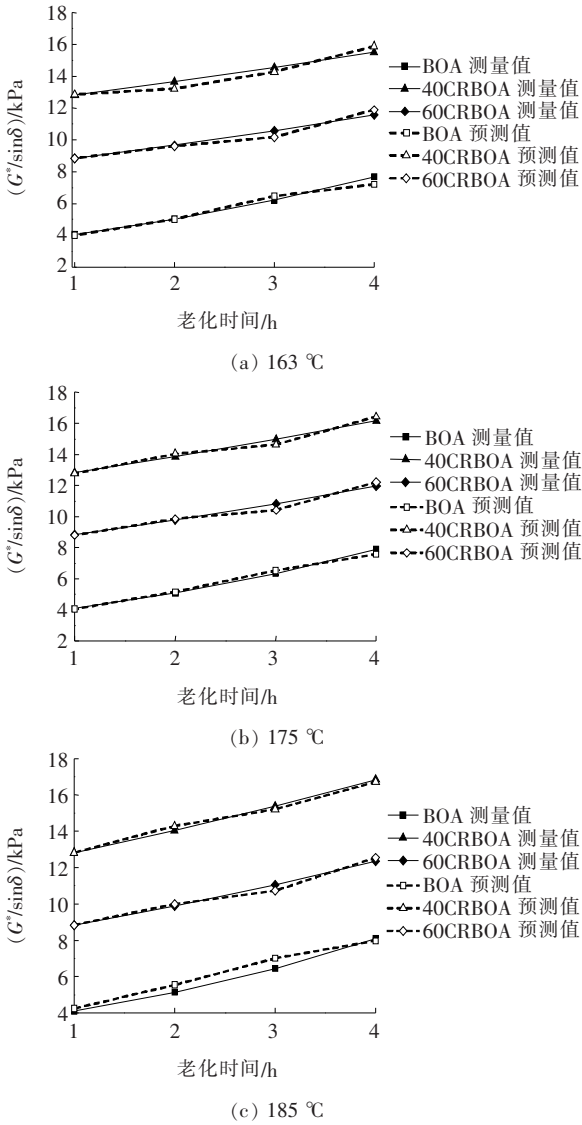


图 10 不同老化温度下车辙因子的测量值与预测值

表 8 老化动力学方程显著性检验

改性沥青	测量值与预测值的相关系数	<i>p</i> 值
BOA	0.958 7	$1.877\ 7\times10^{-8}$
40CRBOA	0.963 2	$1.051\ 3\times10^{-8}$
60CRBOA	0.963 7	$9.817\ 0\times10^{-9}$

(3) 以不同老化温度和时间下的橡胶粉改性生物沥青车辙因子为拟合指标,建立的老化动力学模型与橡胶粉改性生物沥青老化的实际过程相符,且模型计算值与试验测量值相关性好,说明橡胶粉改性生物沥青的老化遵循一级反应动力学方程。所建立的老化动

力学方程在有限的试验环境条件下,可以快速评价其黏弹特性。

参考文献:

[1] 曹雪娟,刘攀,唐伯明.生物沥青研究进展综述[J].材料导报,2015,29(17):99—104.

[2] 雷茂锦,朱耀庭,彭明.生物结合料的物理和化学特性研究[J].中外公路,2012,32(1):229—232.

[3] INGRASSIA L P, LU X, FERROTTI G, et al. Chemical and Rheological Investigation on the Short and Long-Term Aging Properties of Bio-Binders for Road Pavements[J]. Construction and Building Materials, 2019, 217: 518—529.

[4] DONG Z J, ZHOU T, LUAN H, et al. Composite Modification Mechanism of Blended Bio-Asphalt Combining Styrene-Butadiene-Styrene with Crumb Rubber: A Sustainable and Environmental-Friendly Solution for Wastes[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 214: 593—605.

[5] RAHMAN M T, HAININ M R, BAKAR W A W A. Use of Waste Cooking Oil, Tire Rubber Powder and Palm Oil Fuel Ash in Partial Replacement of Bitumen[J]. Construction and Building Materials, 2017, 150: 95—104.

[6] 汪海年,高俊锋,赵欣,等.基于DSR和RV的生物沥青结合料流变特性研究[J].湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(6): 26—33.

[7] FINI E H, HOSSEINNEZHAD S, OLDHAM D J, et al. Source Dependency of Rheological and Surface Characteristics of Bio-Modified Asphalts[J]. Road Materials and Pavement Design, 2017, 18(2): 408—424.

[8] YANG X, JULIAN Mills-Beale, YOU Z P. Chemical Characterization and Oxidative Aging of Bio-Asphalt and its Compatibility with Petroleum Asphalt[J]. Journal of cleaner production, 2017, 142: 1 837—1 847.

[9] 董泽蛟,周涛,栾海,等.SBS/橡胶粉复合改性SH型混合生物沥青工艺及机理[J].中国公路学报,2019,32(4): 215—225.

[10] 包建业,王静.生物改性橡胶沥青流变性能研究[J].中外公路,2018,38(6):250—253.

[11] 杨倡珍,张平.温度对沥青结合料老化性能的影响分析[J].公路工程,2012,37(3):195—199.

[12] 周志刚,陈功鸿,张红波,等.胶粉/高黏剂复合改性SBS沥青的性能与改性机理[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2020,17(2):1—9.