

文章编号:1007-9629(2023)05-0499-09

# 基于 MSCR 的再生沥青高温本构模型建立与评价

殷鹏, 潘宝峰\*

(大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024)

**摘要:**通过多重应力蠕变恢复(MSCR)试验计算了不同再生剂掺量下再生沥青的高温黏弹性特征参数,然后采用3种黏弹性本构模型分别构建了再生沥青高温本构模型,并结合主成分分析(PCA)模型评价了适用于再生沥青高温性能研究的本构模型.结果表明:Burgers模型和三参数固体模型在评价再生沥青高温性能时,特征参数呈现显著的交替波动性,而四参数固体模型具有较好的稳定性;PCA模型发现四参数固体模型比Burgers模型和三参数固体模型具有更显著的评价效果,验证了采用四参数固体模型评价再生沥青高温性能的可靠性.

**关键词:**再生沥青;高温性能;多重应力蠕变恢复试验;本构模型;主成分分析模型

中图分类号:U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.05.007

## Establishment and Evaluation of Constitutive Model of Recycled Asphalt at High Temperature Based on MSCR

YIN Peng, PAN Baofeng\*

(Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** The high temperature viscoelastic characteristic parameters of recycled asphalts with different rejuvenator dosages were determined by multiple stress creep recovery(MSCR) test. And three types of constitutive models were used to construct the constitutive model for high temperature performance of recycled asphalt. Then combined with principal component analysis(PCA) model the constitutive model for high temperature performance studies of recycled asphalt was evaluated. The results show that the Burgers model and three-parameter solid model exhibit significant alternating fluctuations in the characteristic parameters when evaluating the high temperature performance of recycled asphalt, while four-parameter solid model has good stability. PCA model shows that four-parameter solid model has more significant evaluation effect compared with Burgers model and three-parameter solid model, which verifies the reliability of using four-parameter solid model to evaluate the high temperature performance of recycled asphalt.

**Key words:** recycled asphalt; high temperature performance; multiple stress creep recovery (MSCR) test; constitutive model; principal component analysis(PCA) model

高温性能对再生沥青的应用具有重要影响,当再生效果不佳时会对沥青在高温下的服役性能造成不利影响,进而影响车辆在再生沥青路面下行驶的安全性<sup>[1-2]</sup>. 鉴于此,学者们结合流变学及热力学等方法对再生沥青的高温性能展开了大量研究. 李晓民等<sup>[3]</sup>通过动态剪切流变(DSR)试验发现再生剂能够增强老化沥青的低温抗开裂能力,但同时会降低再

生沥青的高温抗车辙能力;唐伯明等<sup>[4]</sup>结合 DSR 试验发现生物油再生沥青老化后,沥青的延迟弹性变小且相比于基质沥青具有更好的高温性能,但其施工和易性略差于基质沥青;冉龙飞等<sup>[5]</sup>通过差示扫描量热(DSC)等试验分析了自制再生剂的路用性能,发现老化沥青再生后具有良好的低温及流变性能,但其高温性能略低于原样沥青;Ji等<sup>[6]</sup>通过 DSR 等试

收稿日期:2022-04-30; 修订日期:2022-07-13

第一作者:殷鹏(1999—),男,江苏淮安人,大连理工大学博士生.E-mail: yp2021@mail.dlut.edu.cn

通讯作者:潘宝峰(1967—),男,内蒙古赤峰人,大连理工大学教授,博士生导师,博士.E-mail: panbf@dlut.edu.cn

验发现植物油再生剂可以有效恢复老化沥青的低温性能和疲劳性能,但是考虑到高温下的抗车辙性,再生剂应限制其最大掺量。

目前对于沥青本构关系的研究多采用 Burgers 模型,但对于高温条件下 Burgers 模型的适用性研究仍较为少见,且目前沥青高温性能的评价主要通过常规性能试验或流变学试验来进行表征,尤其是 DSR 试验被广泛应用于评价沥青的高温性能<sup>[7-8]</sup>。但由于再生沥青的延迟弹性恢复能力有别于普通沥青且 DSR 试验的加载模式与路面实际荷载作用的响应模式存在差异性,仅通过流变学试验来评价再生沥青的高温性能具有一定的局限性,再生沥青高温性能下的本构关系研究亟待进一步开展<sup>[9-10]</sup>。为此,本研究通过 MSCR 试验表征了再生沥青的高温黏弹性特征参数,并分别采用 Burgers 模型、三参数固体模型和四参数固体模型构建再生沥青的本构模型,然后结合 PCA 模型评价了适用于再生沥青高温性能研究的本构模型,以期对再生沥青高温下的分析与应用

提供一些参考。

## 1 试验

### 1.1 沥青

原样沥青(VA)采用 I-D 类 SBS 改性沥青,老化沥青(AA)来自于某高速公路服役 5 a 以上的 SBS 改性沥青混凝土表面层路面铣刨料。各沥青的常规性能指标均符合 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》的要求,如表 1 所示。

### 1.2 再生剂

本研究通过响应曲面设计法自主开发了一款再生剂(YZSJ-I),并将其应用于再生沥青的性能研究。再生剂的配方为 70% (质量分数,文中涉及的掺量等均为质量分数)基础油分与 30% 增塑剂相互混合,并在此基础上依次掺入 0.438% 的抗氧化剂、0.308% 的紫外线吸收剂及 1.711% 的高黏度改性剂,然后在 160 °C 下以 5 000 r/min 剪切 40 min,即可制得 YZSJ-I,其性能指标如表 2 所示。

表 1 沥青的常规性能指标

Table 1 Conventional performance indexes of asphalts

Asphalt	Penetration at 25 °C/(0.1 mm)	Ductility at 5 °C/cm	Softening point/°C
AA	37.2	21	75.4
VA	55.9	37.2	75.8
VA after RTFOT aging	40.4	23	75.4
Technical specification of VA	40-60	≥20	≥60
Asphalt requirement index after RTFOT or TFOT aging	Penetration ratio ≥65%	≥15	

表 2 YZSJ-I 的性能指标

Table 2 Performance index of YZSJ-I

Property	Testing purpose	Performance index value	Suggested value
Kinematic viscosity at 60 °C/(m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	Flow performance and dispersion performance	655	200-800
Flash point/°C	Construction safety performance	242	≥220
Viscosity ratio before and after RTFOT/60°C	Control the aging resistance of the rejuvenator	2.42	≤3
Mass loss rate before and after RTFOT/%	High temperature resistance to volatility	-1.4	-4-4
Density/(g·cm <sup>-3</sup> )	Density calculation	0.998	

### 1.3 再生剂的最佳掺量

先称取 200 g 老化沥青,再称取不同掺量(2%、4%、5%、6%、8%)的再生剂并将其掺入老化沥青中手动搅拌均匀,得到改性沥青(分别记作 RA-2、RA-4、RA-5、RA-6、RA-8),然后通过常规性能试验来确定 YZSJ-I 的最佳掺量,试验结果如图 1 所示。由图 1 可知,掺入 YZSJ-I 后再生沥青的针入度和延度逐渐提高,软化点略有降低,但软化点的变化程度并不显著,说明 YZSJ-I 的掺入对沥青在高温条件下的性能并没有显著的影响,再生剂的最佳掺量更应从沥青在低温条件下性能的改善程度进行考虑。评价

沥青低温性能的改善效果时,应综合考虑针入度和延度的改善结果,但更应重视延度的改善效果,这是因为 YZSJ-I 的主要成分是轻质油,当掺入老化沥青时,油分使沥青软化,因此针入度的变化效果非常显著。但沥青的低温性能更多地体现在延度上,因为延度表征沥青在低温下发生脆断的难易程度。图 1 表明随着 YZSJ-I 的掺入,延度逐渐增加,但延度并不是越高越好,而是以接近新沥青水平为宜。因此根据几个指标的变化程度,建议 YZSJ-I 的最佳掺量为 5%。

### 1.4 试验方法

本研究主要是在 MSCR 试验的基础上展开再生

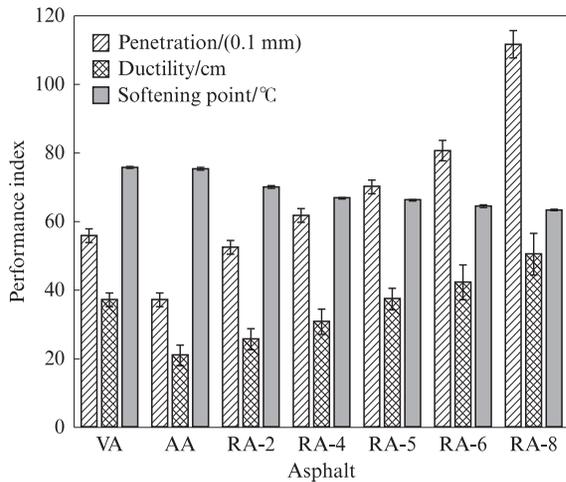
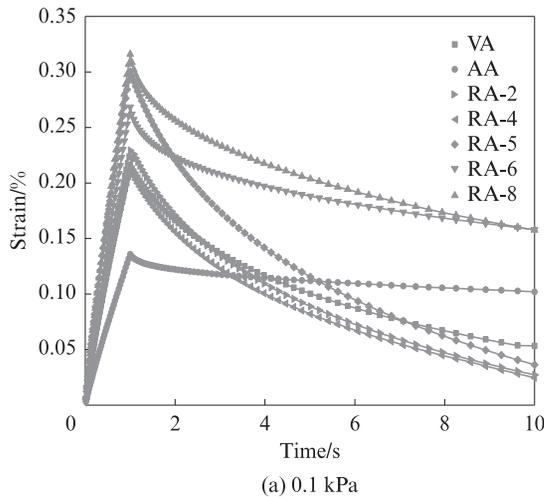
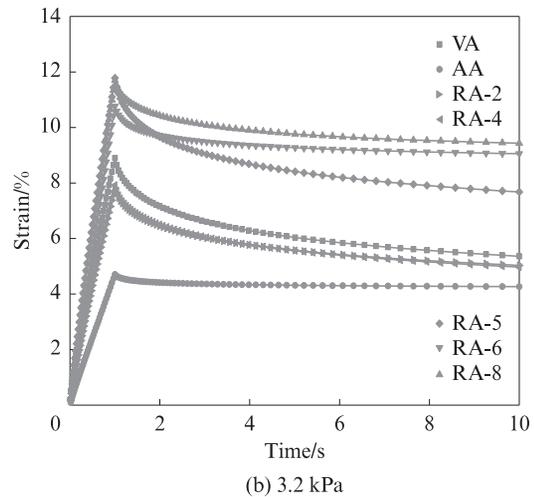


图1 各沥青的常规性能指标

Fig. 1 Performance index of asphalts



(a) 0.1 kPa



(b) 3.2 kPa

图2 各沥青的MSCR试验结果

Fig. 2 MSCR test results of asphalts

为了进一步对MSCR试验结果进行分析,对各沥青在不同应力作用下的蠕变恢复率( $R$ )和不可恢复蠕变柔量( $J_{nr}$ )进行计算,结果如图3所示。

由图3可知:随着再生剂掺量的增加,再生沥青的 $R$ 值逐渐增加,而 $J_{nr}$ 值逐渐减小,说明再生剂的掺入对老化沥青的黏弹性起到了改善效果;此外,当应力为0.1 kPa时,再生沥青的 $R$ 值显著高于3.2 kPa下的试验结果, $J_{nr}$ 值显著低于3.2 kPa下的试验结果。 $R$ 值越大,说明材料抵抗弹性变形的能力越强,即在高温下抵抗变形的能力越强,由此可知再生沥青在低应力作用下具备更优越的黏弹性能。但是再生沥青的 $R$ 值并不是越大越好,而是以接近原样沥青的水平为宜。通过对比发现,当再生剂的掺量为5%时,再生沥青的 $R$ 值与 $J_{nr}$ 值十分接近原样沥青,这与常规性能试验结果相吻合。采用0.1、3.2 kPa应力作用下的不可恢复蠕变柔量 $J_{nr0.1}$ 和 $J_{nr3.2}$ 之间的差值 $J_{nr\Delta}$ 来表征沥青的应力敏感性, $J_{nr\Delta} = (J_{nr3.2} - J_{nr0.1}) / J_{nr0.1} \times 100\%$ 。由

沥青高温性能的定量分析,MSCR不仅可以得到改性沥青在间歇应力作用下的蠕变恢复和应力效应,还可以表征再生沥青的弹性响应和疲劳性能<sup>[11-12]</sup>。试验采用动态剪切流变仪,在60℃,应力分别为0.1、3.2 kPa下加载1 s,测试沥青的蠕变性能,然后卸载9 s,此为1次循环,共计循环10次,最后通过计算蠕变恢复速率和不可恢复蠕变柔量来表征沥青的高温流变特性。

## 2 结果与分析

### 2.1 MSCR试验结果

本研究分别对原样沥青、老化沥青以及5种再生剂掺量下的再生沥青进行MSCR试验,并对第1次循环下的试验结果进行分析,结果如图2所示。

图3(c)可见,随着再生剂掺量的增加,沥青的应力敏感性呈增长趋势,表明再生沥青的应力敏感性随着再生剂掺量的增加而得到改善,再生剂的使用有利于恢复老化沥青的应力敏感性,从而有利于再生沥青的高温性能评价。

### 2.2 再生沥青黏弹性本构模型

沥青是一种典型的黏弹性材料,因此在流变学黏弹性理论的基础上,可以通过将弹性和黏性的力学元件连接来表征黏弹性材料的力学特性<sup>[13-14]</sup>,本研究采用黏弹性本构模型来对再生沥青的高温性能进行研究,并选取Burgers模型、三参数固体模型及四参数固体模型这3种典型的黏弹性本构模型来进行计算分析。

在沥青的流变性研究中,Burgers模型常被用来对一定温度范围内的变形行为进行评估,Burgers模型又称为四参数流体模型,由Maxwell模型和Kelvin模型联结而成,并通过模型中力学参数计算结果来表征材料的本构关系<sup>[15-16]</sup>,进而对材料的应力与应变关

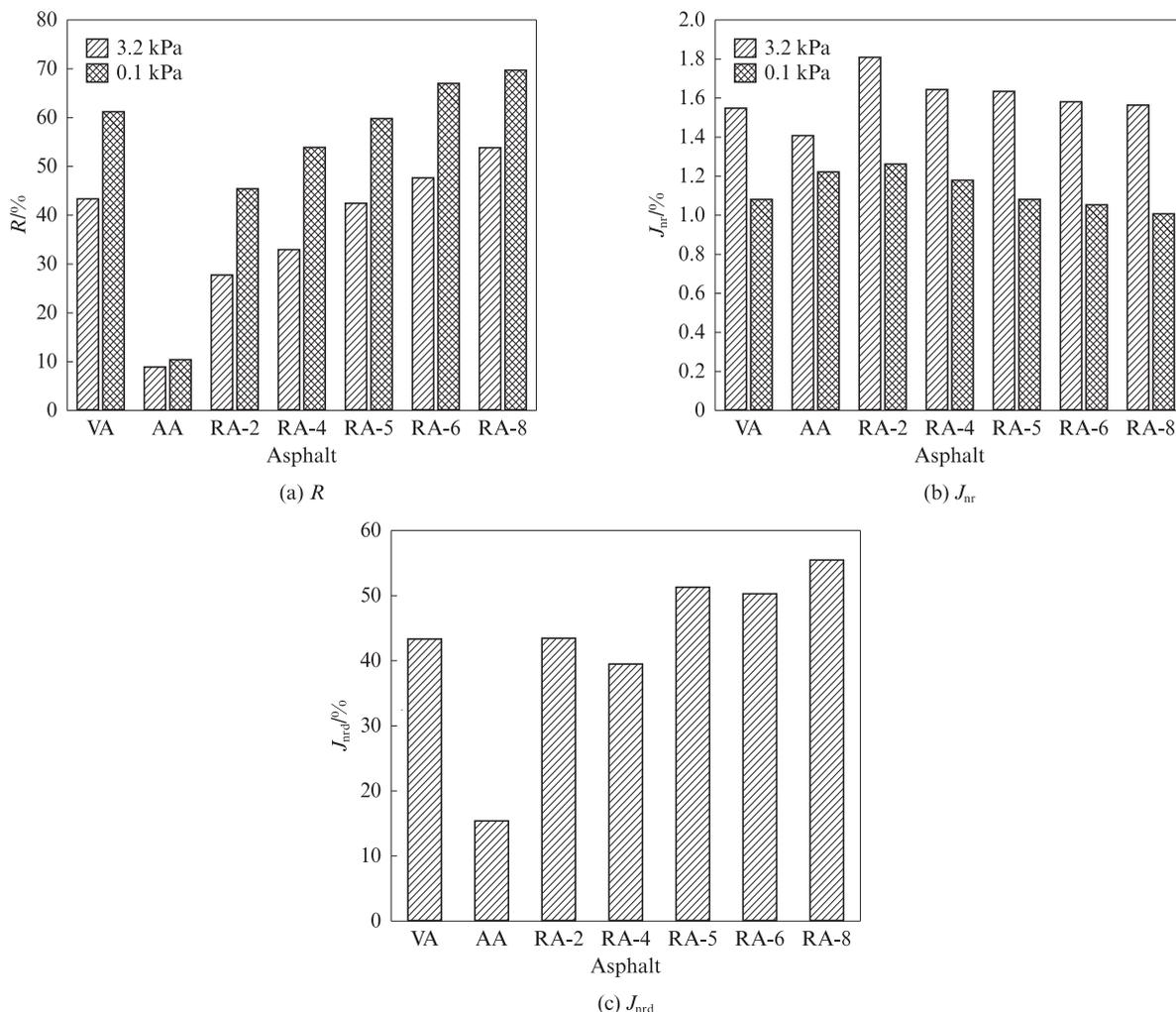


图 3 各沥青的蠕变参数计算结果  
 Fig. 3 Calculation results of creep parameters for asphalts

系进行预测. Burgers模型方程一般分为恒定应力下的蠕变加载模式以及恒定应变下的应力松弛模式, 本研究采用蠕变加载模式, 模型的本构方程如式(1)所示.

$$\frac{\varepsilon(t)}{\sigma} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{\eta_1} t + \frac{1}{E_2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2} t\right) \right] \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon(t)$  为  $t$  时刻的应变;  $\sigma$  为加载应力;  $t$  为时间;  $E_1$ 、 $E_2$  为模型的弹性参数;  $\eta_1$ 、 $\eta_2$  为模型的黏性参数.

根据 Burgers 模型方程对 MSCR 试验蠕变加载阶段的曲线进行计算, 结果如图 4 和表 3 所示.

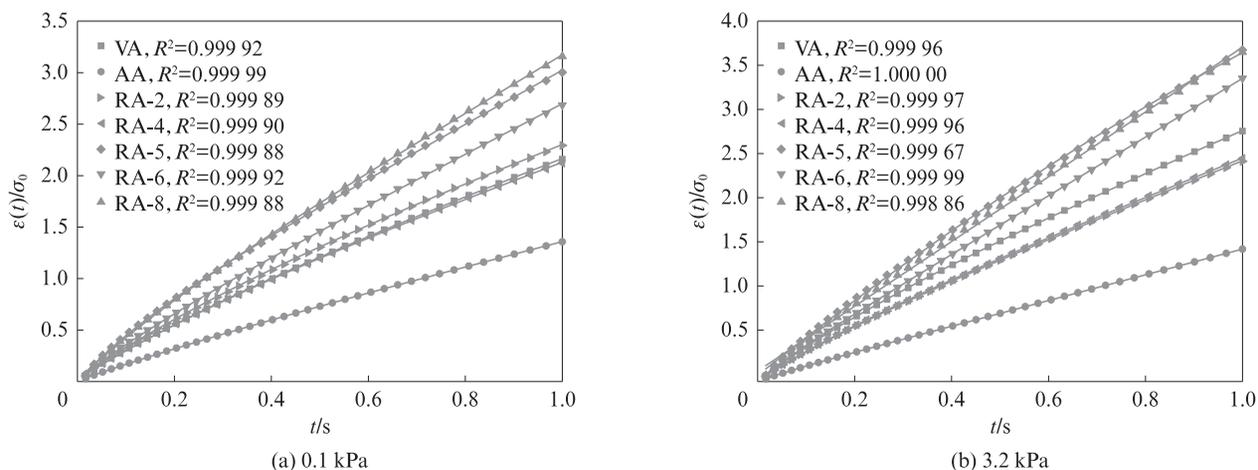


图 4 蠕变加载阶段的 Burgers 模型曲线  
 Fig. 4 Burgers model curves for creep stage

表3 各沥青的 Burgers 模型参数  
Table 3 Parameters of asphalts in Burgers model

Asphalt	0.1 kPa				3.2 kPa			
	$E_1/\text{MPa}$	$\eta_1/(\text{MPa}\cdot\text{s})$	$E_2/\text{MPa}$	$\eta_2/(\text{MPa}\cdot\text{s})$	$E_1/\text{MPa}$	$\eta_1/(\text{MPa}\cdot\text{s})$	$E_2/\text{MPa}$	$\eta_2/(\text{MPa}\cdot\text{s})$
VA	44.066 6	0.557 3	2.733 5	0.883 1	55.496 7	0.430 2	2.184 9	0.624 2
AA	137.832 2	0.836 9	5.986 7	2.151 3	3 051.885 5	0.700 5	23.544 6	2.173 5
RA-2	33.465 9	0.557 8	1.948 5	0.717 4	69.167 2	0.470 0	3.168 4	0.835 8
RA-4	38.566 8	0.581 6	2.457 5	0.846 9	60.996 4	0.464 8	3.132 2	0.810 1
RA-5	141.096 5	0.381 7	2.504 7	0.433 9	14.834 2	0.035 9	0.003	-0.042 4
RA-6	48.937 8	0.408 8	4.268 4	0.856 8	$2.029 3 \times 10^{20}$	0.307 1	9.164 9	0.821 6
RA-8	63.555 2	0.353 8	2.987 4	0.619 5	8.599 1	0.278 2	$-5.324 6 \times 10^{21}$	$-3.981 1 \times 10^{21}$

由图4可知,各沥青的 Burgers 模型拟合回归系数( $R^2$ )均大于0.99,说明 Burgers 模型拟合的精度较高,在蠕变加载阶段具有良好的拟合效果.分析各拟合方程模型参数的变化规律(见表3)发现:在0.1 kPa 应力作用下,随着再生剂的掺入,再生沥青的弹性参数先急剧减小后逐渐增大,而黏性参数整体呈现减小趋势,但是这种趋势的波动性较大,规律并不显著;在3.2 kPa 应力作用下,随着再生剂掺入,再生沥青的弹性参数和黏性参数整体呈现逐渐减小趋势,但是仍然具有较大的波动性,Burgers 模型虽然对于再生沥青的变形试验结果拟合精度极高,但是其表

征的再生沥青黏弹性变化规律并不显著.

三参数固体模型又称为标准线性固体模型,该模型是由 Kelvin 模型和弹簧元件联结而成,可以通过模型的瞬时弹性和稳态渐进性来表征材料的特性<sup>[17-18]</sup>.模型的本构方程表达式如下:

$$\frac{\epsilon(t)}{\sigma_0} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_d}\right) \right] \quad (2)$$

式中: $\tau_d$ 为模型的黏性参数.

根据式(2)对MSCR 试验蠕变加载阶段曲线进行三参数固体模型的拟合计算,结果如图5和表4所示.

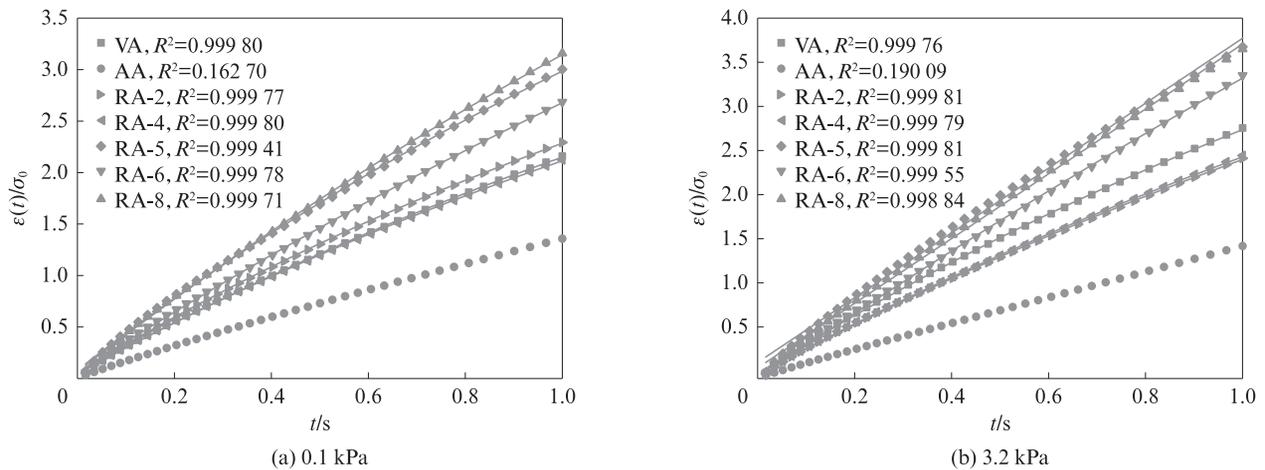


图5 蠕变加载阶段的三参数固体模型曲线

Fig. 5 Three-parameter solid model curves for creep stage

表4 各沥青的三参数固体模型参数

Table 4 Parameters of asphalts in three-parameter solid model

Asphalt	0.1 kPa			3.2 kPa		
	$E_1/\text{MPa}$	$E_2/\text{MPa}$	$\tau_d/(\text{MPa}\cdot\text{s})$	$E_1/\text{MPa}$	$E_2/\text{MPa}$	$\tau_d/(\text{MPa}\cdot\text{s})$
VA	22.045 8	0.166 7	2.314 6	18.422 7	0.136 5	2.167 9
AA	1.526 8	$-3.932 7 \times 10^9$	$5.547 3 \times 10^9$	1.454 5	$-2.540 2 \times 10^{15}$	$6.014 5 \times 10^{15}$
RA-2	18.913 0	0.179 5	1.954 2	22.466 4	0.132 2	2.637 2
RA-4	21.020 1	0.179 7	2.155 0	20.884 0	0.132 2	2.602 5
RA-5	12.191 6	0.130 9	2.092 1	5.603 7	-0.001 1	-250.153 9
RA-6	17.683 6	0.097 7	3.381 8	$5.244 5 \times 10^{21}$	0.055 2	4.918 7
RA-8	15.573 8	0.097 0	2.817 5	8.469 8	-0.001 7	-161.804 9

由图5可知,原样沥青和再生沥青在2种应力作用下的拟合曲线回归系数均大于0.99,说明三参数固体模型对于原样沥青和再生沥青的蠕变加载曲线有着良好的拟合精度,但是并不适用于老化沥青,这是因为三参数固体模型曲线对于老化沥青的拟合精度过低.由表4可见:随着再生剂的掺入,0.1 kPa应力下再生沥青的三参数整体呈减小趋势,变化规律较为显著;3.2 kPa应力下三参数虽然总体表现为下降趋势,但是参数呈交替波动性,变化规律并不显著.

四参数固体模型是将2个Kelvin模型结合在一起,对复杂材料的特性进行表征,进而对材料的黏弹性能进行阐述<sup>[19]</sup>.模型的本构方程表达式如下:

$$\frac{\epsilon(t)}{\sigma_0} = \frac{1}{E_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E_1 t}{\eta_1}\right) \right] + \frac{1}{E_2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E_2 t}{\eta_2}\right) \right] \quad (3)$$

根据式(3)对MSCR试验蠕变加载阶段曲线进行四参数固体模型拟合计算,结果如图6和表5所示.

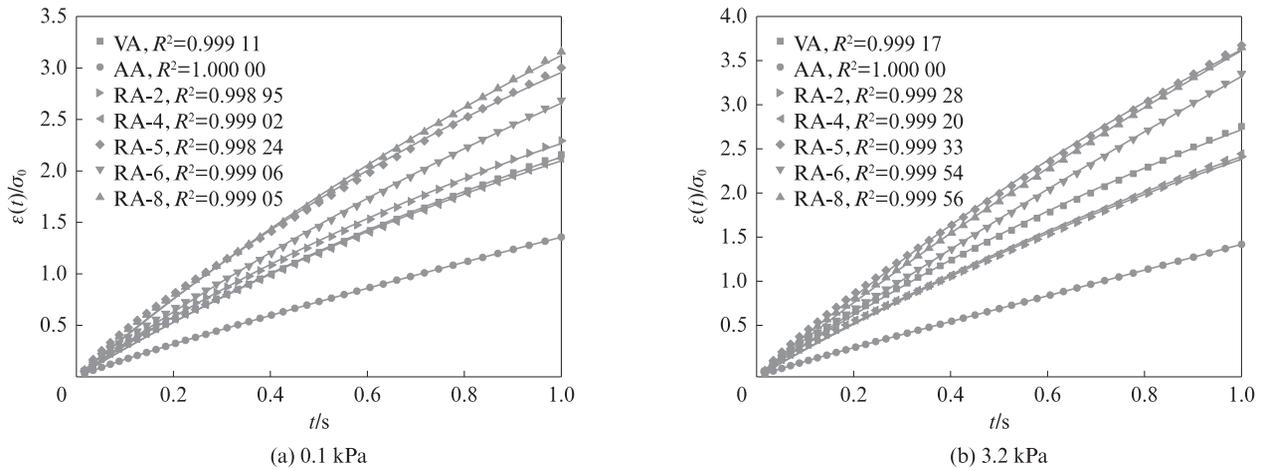


图6 蠕变加载阶段的四参数固体模型曲线

Fig. 6 Four-parameter solid model curves for creep stage

表5 各沥青的四参数固体模型参数

Table 5 Parameters of asphalts in four-parameter solid model

Asphalt	0.1 kPa				3.2 kPa			
	$E_1/\text{MPa}$	$\eta_1/(\text{MPa}\cdot\text{s})$	$E_2/\text{MPa}$	$\eta_2/(\text{MPa}\cdot\text{s})$	$E_1/\text{MPa}$	$\eta_1/(\text{MPa}\cdot\text{s})$	$E_2/\text{MPa}$	$\eta_2/(\text{MPa}\cdot\text{s})$
VA	0.411 62	0.711 46	0.411 62	0.711 46	0.327 90	0.548 79	0.327 90	0.548 79
AA	0.140 65	0.683 91	28.673 09	2.386 50	24.822 53	2.116 81	0.005 82	0.696 54
RA-2	0.431 57	0.642 58	0.431 57	0.642 58	0.329 16	0.649 52	0.329 16	0.649 52
RA-4	0.440 55	0.710 49	0.440 55	0.710 49	0.331 81	0.638 18	0.331 81	0.638 18
RA-5	0.330 34	0.493 05	0.330 34	0.493 05	0.223 67	0.429 13	0.223 67	0.429 13
RA-6	0.269 79	0.607 63	0.269 79	0.607 63	0.110 35	0.542 77	0.110 35	0.542 77
RA-8	0.251 11	0.504 57	0.251 11	0.504 57	0.155 61	0.470 22	0.155 61	0.470 22

由图6可知,2种应力作用下各沥青的拟合曲线回归系数均大于0.99,说明四参数固体模型对于各沥青的蠕变曲线有着良好的拟合效果.由表5可见:在0.1、3.2 kPa的应力作用下,随着再生剂的掺入,再生沥青的四参数整体呈现逐渐减小的趋势,参数交替波动性极小,黏弹性能的变化规律显著,说明四参数固体模型对于再生沥青高温性能的评价效果相对稳定.然而这种减小的趋势并非越小越好,虽然黏性参数的减小表明沥青的不可恢复变形减小,但是同时也会引起弹性参数的减小.这是因为再生剂对老化起到一定的软化作用,再生剂虽然改善了老化沥青的黏弹性能,但是过高的再生剂掺量会使得沥青变

得过软,进而对黏弹性能起到负作用.

### 2.3 基于本构模型的高温性能评价

通过对Burgers模型、三参数固体模型及四参数固体模型的计算分析,发现对于再生沥青高温性能的评价而言,四参数固体模型表征的黏弹性能变化规律对再生沥青的高温性能评价效果更为显著,但这仅是从参数的变化规律来进行分析,本构模型评价效果的显著性更应从预测值与实测值的对比结果来进行分析,以MSCR试验蠕变加载阶段的终值为基准,对各沥青的本构模型方程进行计算,并对比分析试验实测的变形值,对几种本构模型的相对误差进行分析,结果如图7所示.

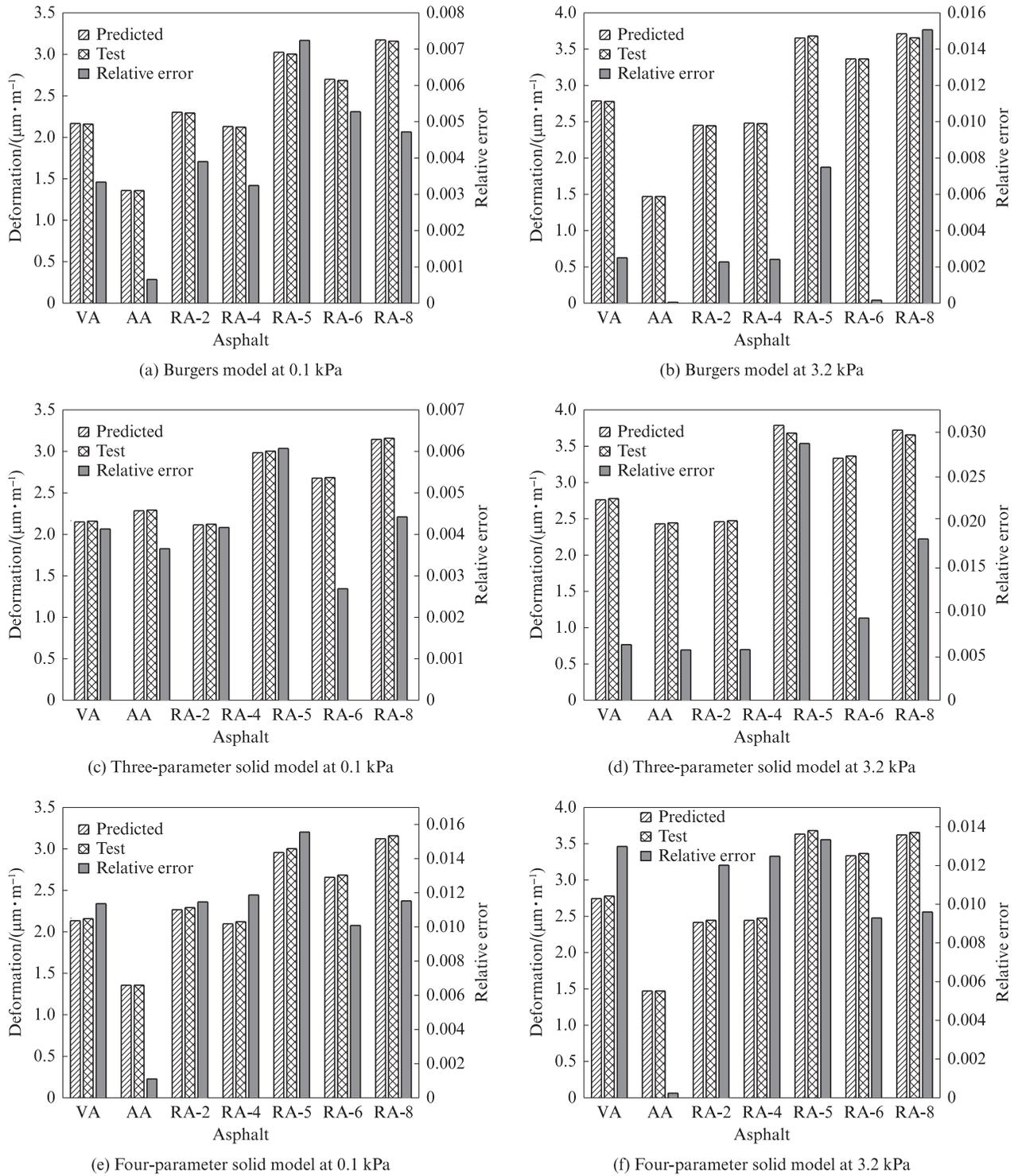


图7 不同应力下3种本构模型的误差分析

Fig. 7 Error analysis of three constitutive models under different stresses

由图7可知:在0.1、3.2 kPa应力作用下,随着再生剂的掺入,Burgers模型和三参数固体模型的相对误差呈现交替波动性,且不同再生剂掺量的再生沥青之间相对误差的差值较大,表明模型的预测效果并不稳定;而四参数固体模型对于再生沥青误差值的计算并未表现出明显的波动性,再生沥青之间相对误差的差值较低,说明四参数固体模型对于再生沥青高温性

能的预测效果相对稳定.为了进一步分析最适用于再生沥青高温性能的本构模型,采用SPSS软件建立PCA模型<sup>[20]</sup>.PCA模型是一种将多个指标化为少数几个综合指标的多元统计分析方法,通常把转化生成的综合指标称之为“主成分”,并以主成分来表征样本全部指标的变化.本研究以3种本构模型在2种应力作用下的相对误差作为指标(记作 $x_1 \sim x_6$ ,其中 $x_1$ 与 $x_2$ 为

Burgers模型在0.1、3.2 kPa下的相对误差,  $x_3$ 与 $x_4$ 为三参数固体模型在0.1、3.2 kPa下的相对误差,  $x_5$ 与 $x_6$ 为四参数固体模型在0.1、3.2 kPa下的相对误差), 对各再生剂掺量下的指标值进行分析, 根据计算结果(表6)确定主因子数及主成分个数.

由表6可知, 指标 $x_1$ 和 $x_2$ 的累积贡献率达到

89.027%, 符合PCA模型累积贡献率不小于85%的要求, 说明这2个指标可以对本构模型的评价效果进行较为全面的评估. 因此将 $x_1$ 和 $x_2$ 作为主成分对本构模型进行评价, 然后对这2种主成分的载荷因子矩阵进行计算, 结果如表7所示.

表6 PCA模型的计算结果  
Table 6 Calculation results of PCA model

Indicator	Initial eigenvalue			Extraction of square sum of load		
	Characteristic root	Contribution rate/%	Cumulative contribution rate/%	Characteristic root	Contribution rate/%	Cumulative contribution rate/%
$x_1$	3.358	55.974	55.974	3.358	55.974	55.974
$x_2$	1.983	33.054	89.027	1.983	33.054	89.027
$x_3$	0.394	6.561	95.589			
$x_4$	0.260	4.331	99.920			
$x_5$	0.005	0.080	100.000			
$x_6$	$5.92 \times 10^{-16}$	$9.87 \times 10^{-15}$	100.000			

表7 载荷因子矩阵  
Table 7 Loading factor matrix

Indicator	Principal component 1	Principal component 2	Component score coefficient 1	Component score coefficient 2	Weight coefficient
$x_1$	0.911	-0.109	0.271	-0.055	0.283 827 928
$x_2$	0.851	-0.315	0.253	-0.159	0.208 928 215
$x_3$	-0.190	0.965	-0.057	0.486	0.189 240 423
$x_4$	0.143	0.911	0.042	0.460	0.289 256 123
$x_5$	0.977	0.169	0.291	0.085	0.379 769 632
$x_6$	0.891	0.287	0.265	0.145	0.381 374 434

由表7可知, 2个主成分的得分系数 $F_1$ 、 $F_2$ 分别为 $F_1=0.271x_1+0.253x_2-0.057x_3+0.042x_4+0.291x_5+0.265x_6$ ,  $F_2=-0.055x_1-0.159x_2+0.486x_3+0.460x_4+0.085x_5+0.145x_6$ , PCA综合模型的得分系数 $F$ 可根据每个主成分模型及其对应的贡献率计算得出, 即 $F=0.5597F_1+0.3305F_2=0.1335x_1+0.0891x_2+0.1287x_3+0.1755x_4+0.1910x_5+0.1962x_6$ , 由模型函数可以看出0.1、3.2 kPa应力作用下的四参数固体模型所占的得分系数最大, 说明四参数固体模型对于再生沥青的高温性能评估效果最佳. 此外, 对初始因子载荷矩阵进行计算后得到权重系数, 结果也列于表7. 由表7可见, 0.1、3.2 kPa应力作用下的四参数固体模型的权重系数最大, 说明无论在何种应力下, 四参数固体模型对于再生沥青的高温性能都具有良好的评价效果.

### 3 结论

(1) 随着再生剂掺量的增加, 再生沥青的蠕变恢复率逐渐增加, 而不可恢复蠕变柔量逐渐减小, 再生

剂的掺入对于老化沥青的黏弹性能起到改善效果, 且再生剂在低应力下对老化沥青的黏弹性能具备更显著的改善效果; 此外, 再生沥青的应力敏感性随着再生剂掺量的增加而得到改善, 说明再生剂的使用有利于恢复老化沥青的应力敏感性及高温性能.

(2) Burgers模型虽然对再生沥青的变形试验结果拟合精度极高, 但其表征的再生沥青黏弹性变化规律并不显著, 模型参数呈现出显著的交替波动性; 三参数固体模型虽然在0.1 kPa下表现出明显的变化规律, 但是在3.2 kPa下的参数呈交替波动性, 变化规律并不显著; 四参数固体模型在各应力下黏弹性能的变化规律显著, 参数交替波动性极小, 但再生沥青中的再生剂应注意掺量问题, 过量的再生剂会对高温性能造成不利影响.

(3) PCA模型的计算结果表明相较于Burgers模型和三参数固体模型, 四参数固体模型更适用于对再生沥青的高温性能进行评价, 可以为再生沥青高温性能的定量分析提供参考.

## 参考文献:

- [1] 陈龙,陈宏斌,李朋,等.高掺RAP沥青界面融合行为的量化评价[J].建筑材料学报,2021,24(4):811-819.  
CHEN Long, CHEN Hongbin, LI Peng, et al. Quantitative evaluation on interfacial diffusion behavior of asphalt with high percentage of RAP[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(4):811-819. (in Chinese)
- [2] 崔亚楠,崔树宇,郭立典.废机油再生SBS改性沥青的性能及机理[J].建筑材料学报,2022,25(2):164-170.  
CUI Yanan, CUI Shuyu, GUO Lidian. Performance and mechanism of waste oil recycled SBS modified asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(2):164-170. (in Chinese)
- [3] 李晓民,魏定邦,姚志杰,等.再生剂对老化沥青流变性能和微观结构的影响[J].建筑材料学报,2018,21(6):992-999.  
LI Xiaomin, WEI Dingbang, YAO Zhijie, et al. Effects of rejuvenators on rheological properties and microstructures of aged asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(6):992-999. (in Chinese)
- [4] 唐伯明,曹蕊蕊,朱洪洲,等.生物油再生沥青胶结路用性能分析[J].中国公路学报(自然科学版),2019,32(4):207-214.  
TANG Boming, CAO Xinxin, ZHU Hongzhou, et al. Pavement properties of bio-oil rejuvenated asphalt binder[J]. China Journal of Highway and Transport(Natural Science), 2019, 32(4):207-214. (in Chinese)
- [5] 冉龙飞,何兆益,曹青霞.SBS改性沥青再生剂性能研究[J].建筑材料学报,2015,18(4):578-583,595.  
RAN Longfei, HE Zhaoyi, CAO Qingxia. Performance research of regenerative agent based on SBS-modified asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(4):578-583,595. (in Chinese)
- [6] JI J, YAO H, SUO Z, et al. Effectiveness of vegetable oils as rejuvenators for aged asphalt binders[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(3):D4016003.
- [7] REN S S, LIU X Y, WANG H P, et al. Evaluation of rheological behaviors and anti-aging properties of recycled asphalts using low-viscosity asphalt and polymers [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 253:120048.
- [8] CHEN T, MA T, HUANG X M, et al. The performance of hot-recycling asphalt binder containing crumb rubber modified asphalt based on physiochemical and rheological measurements [J]. Construction and Building Materials, 2019, 226, 83-93.
- [9] 李晋,于淼章,崔新壮,等.废机油残留物再生沥青的抗老化性能[J].建筑材料学报,2021,24(1):224-230.  
LI Jin, YU Miaozhang, CUI Xinzhuang, et al. Anti-aging performance of recycled engine oil bottom rejuvenated asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(1):224-230. (in Chinese)
- [10] 高新文,刘朝晖.生物油再生沥青自愈机理分析[J].中国公路学报,2019,32(4):235-242.  
GAO Xinwen, LIU Zhaohui. Self-healing mechanism of bio-oil recycled asphalt[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(4):235-242. (in Chinese)
- [11] 雷俊安,郑南翔,许新权,等.温拌沥青高温流变性能研究[J].建筑材料学报,2020,23(4):904-911.  
LEI Jun'an, ZHENG Nanxiang, XU Xinquan, et al. High temperature rheological properties of warm mixed asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(4):904-911. (in Chinese)
- [12] 郭咏梅,许丽,吴亮,等.基于MSCR试验的改性沥青高温性能评价[J].建筑材料学报,2018,21(1):154-158.  
GUO Yongmei, XU Li, WU Liang, et al. High-temperature performance evaluation of modified asphalts based on multiple stress creep recovery test[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(1):154-158. (in Chinese)
- [13] 李锐铎,乐金朝,冯师蓉,等.沥青胶砂改进分数阶导数幂函数经验蠕变本构模型[J].建筑材料学报,2015,18(2):237-242.  
LI Ruiduo, YUE Jinchao, FENG Shirong, et al. Improved fractional order derivative empirical power function model for describing the creep of asphalt mortar[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(2):237-242. (in Chinese)
- [14] 郑健龙,钱国平,应荣华.沥青混合料热粘弹性本构关系试验测定及其力学应用[J].工程力学,2008,25(1):34-41.  
ZHENG Jianlong, QIAN Guoping, YING Ronghua. Testing thermalviscoelastic constitutive relation of asphalt mixtures and its mechanical applications[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(1):34-41. (in Chinese)
- [15] 杨丽娟,龙念泉,王岚,等.基于Burgers模型的温拌胶粉沥青胶浆低温流变特性[J].建筑材料学报,2022,25(12):1313-1320.  
YANG Lijuan, LONG Nianquan, WANG Lan, et al. Low-temperature rheological properties of warm-mixed crumb rubber asphalt mortar based on Burgers model[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(12):1313-1320. (in Chinese)
- [16] 李波,张喜军,李剑新,等.基于Burgers模型的硬质沥青低温性能评价[J].建筑材料学报,2021,24(5):1110-1116.  
LI Bo, ZHANG Xijun, LI Jianxin, et al. Evaluation on low temperature characterization of hard petroleum asphalt base on the burgers model[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(5):1110-1116. (in Chinese)
- [17] 叶永,杨新华,陈传尧.不同应力水平下沥青砂蠕变模型实验对比[J].华中科技大学学报(自然科学版),2009,37(3):116-118.  
YE Yong, YANG Xinhua, CHEN Chuanyao. Experimental comparison of creep models for asphalts and at different levels of stresses [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science), 2009, 37(3):116-118. (in Chinese)
- [18] 李峰,黄颂昌.沥青路面裂缝密封胶的低温应力松弛评价指标[J].同济大学学报(自然科学版),2012,40(8):1185-1188.  
LI Feng, HUANG Songchang. Low-temperature stress relaxation evaluation index of asphalt pavement crack sealants[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2012, 40(8):1185-1188. (in Chinese)
- [19] 徐家伟,叶永,谢旋.再生沥青混凝土黏弹性实验研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2022,44(2):38-42.  
XU Jiawei, YE Yong, XIE Xuan. Experimental study on viscoelastic properties of recycled asphalt concrete[J]. Journal of China Three Gorges University(Natural Science), 2022, 44(2):38-42. (in Chinese)
- [20] YIN P, PAN B F. Effect of RAP content on fatigue performance of hot-mixed recycled asphalt mixture [J]. Construction and Building Materials, 2022, 328:127077.