

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20230707001

文章编号:1674-599X(2026)02-0115-09

引用格式:田小革,陆劲州,张志军,等.沥青胶浆蠕变性能的影响因素研究[J].交通科学与工程,2026,42(2):115-123.

Citation: TIAN Xiaoge, LU Jinzhou, ZHANG Zhijun, et al. Influence factors of creep properties of asphalt mortar [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2026, 42(2): 115-123.

沥青胶浆蠕变性能的影响因素研究

田小革¹,陆劲州¹,张志军¹,窦文利²,昝慧芹³,李慧珍⁴

(1.长沙理工大学 交通学院,湖南 长沙 410114;2.河北省高速公路京雄筹建处,河北 保定 071700;3.承德市交通局交通规划设计院,河北 承德 067000;4.河北高速公路集团有限公司,河北 石家庄 050031)

摘要:【目的】研究粉胶比、温度及应力水平对沥青胶浆蠕变性能的影响。【方法】采用弯曲梁流变仪(BBR)对不同粉胶比的沥青胶浆小梁成型试件,分别开展不同温度、不同应力水平下的蠕变试验;基于试验结果,构建耦合粉胶比、温度与应力水平的沥青胶浆蠕变柔量模型。【结果】沥青胶浆的蠕变柔量随温度降低呈持续减小趋势,且不同粉胶比沥青胶浆的蠕变柔量随温度降低的减小幅度存在显著差异;在相同温度与应力水平下,沥青胶浆的蠕变柔量随粉胶比的增大而降低;不同粉胶比沥青胶浆的蠕变柔量均随应力水平的提高而显著增大,其中低粉胶比沥青胶浆的蠕变柔量,随应力水平提高的增大幅度更为明显。【结论】该沥青胶浆蠕变柔量模型可为沥青胶浆的配比设计及抗蠕变性能优化提供理论依据与试验支撑。

关键词:沥青胶浆;粉胶比;温度;应力水平;蠕变柔量

中图分类号:U414

文献标志码:A

Influence factors of creep properties of asphalt mortar

TIAN Xiaoge¹, LU Jinzhou¹, ZHANG Zhijun¹, DOU Wenli², CHANG Huiqin³, LI Huizhen⁴

(1. School of Transportation, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Hebei Province Expressway Jingxiong Preparation Office, Baoding 071700, China; 3. Traffic Planning and Design Institute of Chengde Transportation Bureau, Chengde 067000, China; 4. Hebei Expressway Group Limited, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: [Purposes] This paper aims to investigate the influence of the powder binder ratio, temperature, and stress level on the creep properties of asphalt mortar. [Methods] Creep tests were conducted on asphalt mortar beam specimens with different powder binder ratios using bending beam rheometer (BBR) at different stresses and temperatures. The creep compliance model of asphalt mortar coupling powder binder ratio, temperature, and stress level was built according to the test results. [Findings] The creep compliance of asphalt mortar decreases with decreasing temperature, and the reduction varies significantly among asphalt mortars with different powder binder ratios. Under the same temperature and stress conditions, the creep compliance decreases as the powder binder ratio increases. The creep compliance of asphalt mortar with different powder binder ratios increases with increasing stress level. Especially in the case of low powder binder ratios, the creep compliance of

收稿日期:2023-07-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51978086,52278438)

通信作者:田小革(1970—),男,教授,主要从事道路工程材料、路基路面设计及耐久性路面结构设计等方面的研究。

E-mail:tianxiaoge@126.com

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

asphalt mortar increases greatly with the increase in stress level. [Conclusions] The proposed creep compliance model can provide theoretical and experimental support for the proportion design of asphalt mortar and the optimization of its creep resistance.

Key words: asphalt mortar; powder binder ratio; temperature; stress level; creep compliance

沥青混合料作为典型的黏弹性材料,其物理及力学性能与应力水平、环境温度等外部条件密切相关;在高温大变形区间表现为黏塑性体,而在低温小变形区间则近似为线弹性体。沥青混合料主要由沥青、粗集料、细集料及矿粉组成,其中粗集料与细集料均可视为弹性体,其黏弹性特性本质上由沥青与矿粉所构成的沥青胶浆的黏弹性能决定。因此,为更准确地表征沥青混合料的黏弹性特性,本文摒弃粗集料、细集料及其级配对混合料性能的影响,仅针对沥青胶浆的非线性黏弹性问题展开研究^[1]。沥青胶浆的蠕变性能具有复杂性,其变形规律与应力水平、温度、粉胶比等多种因素相关。

目前,针对沥青胶浆性能的研究,主要集中于采用动态剪切流变仪对其高温、低温流变特性进行测试与分析。杨永明等^[2]、刘克非^[3]研究了纤维和矿粉对沥青胶浆性能的影响;林梅等^[4]对矿粉粒径影响沥青胶浆性能的微观机理进行了分析;许新权等^[5]、王树杰等^[6]等通过试验研究了粉胶比对沥青胶浆性能的影响;刘丽等^[7]等采用锥入度试验、动态剪切流变试验和旋转黏度试验分析了填料类型与粉胶比对沥青胶浆性能的影响,并开展了沥青胶浆高温性能评价指标的相关研究;何子胤^[8]研究了不同粒径的细集料对沥青砂浆性能的影响;袁迎捷^[9]基于 Superpave 技术对沥青胶浆高温、低温流变特性开展了试验研究;郭平^[10]、VANDENBERGH 等^[11]研究了沥青老化对沥青胶浆流变特性的影响规律;RUTHERFORD 等^[12]研究了水泥乳化沥青砂浆的力学性能,并分析得出其与普通沥青砂浆的强度差异成因;TAN 等^[13]、WANG 等^[14]研究了乳化剂对水泥乳化砂浆性能的影响;XIE 等^[15]利用分离式霍普金森压杆(SHPB)装置开展沥青砂浆的压缩应力应变试验,获得了其动态力学性能;黄乾晋等^[16]通过试验研究了不同紫外光照时长对沥青胶浆流变特性的影响;禚炜安等^[17]探究了粉胶比、水泥替代率及养护时间对乳化沥青胶浆黏度特性的影响。

综上所述,国内外学者已针对沥青胶浆开展了大量研究。关于沥青胶浆性能的影响因素,目前的研究重点与优化方向多集中于填料类型、纤维种类、掺量、粉胶比、温度和老化程度等方面。沥青胶

浆作为热黏弹性材料,其力学特性受加载温度与加载时间的显著影响,仅在少数工况下表现为小变形区间的线弹性变形。而实际工程中,交通量增长、温度波动等因素均会对沥青胶浆性能产生显著影响,使其产生较大的物理变形,远超出线性黏弹性理论中关于小变形的假设范畴。基于沥青胶浆的这一力学特性,本文的研究重点为不同应力水平与温度对沥青胶浆蠕变柔量的影响。

基于此,本文通过配制不同粉胶比的沥青胶浆,在不同应力水平与温度条件下分别探究沥青胶浆蠕变柔量与温度、应力水平的关系;并采用分数阶指数模型进行拟合,建立了同时考虑粉胶比、温度及应力水平的沥青胶浆蠕变柔量计算模型。

1 试验材料

1.1 沥青

本文采用东莞泰和沥青产品有限公司生产的埃索(Esso)70#道路石油沥青,依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG 3432—2024)(后文简称《规范》)对其主要性能指标进行检测,沥青主要性能指标检测结果见表1。

表1 沥青主要性能指标

Table 1 Main performance indicators of asphalt

指标	单位	试验结果	规范要求
针入度(25 °C, 5 s, 100 g)	10 ⁻¹ mm	66	60 ~ 80
针入度指数		-1.2	-1.5 ~ 1.0
软化点	°C	48.5	≥46
延度(15 °C)	cm	115	≥100
旋转薄膜烘箱试验(PTFOT)后	质量变化	%	≤±0.8
	残留针入度比(25 °C, 5 s, 100 g)	%	≥63
	残留延度(5 °C, 5 cm/min)	cm	≥6

1.2 矿粉

本文选用的填料为石灰石矿粉,其性能指标依据《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2020)相关要求进行检测,矿粉基本技术性能检测结果见表2。

表2 矿粉性能检测结果

Table 2 Performance test results of mineral powder

试验项目	实测值	技术要求
表观密度/(g·cm ⁻³)	2.757	≥2.6
含水量/%	0.4	≤1
不同粒径 通过率/%	0.15~<0.6 mm	100
	0.075~<0.15 mm	96.7
	<0.075 mm	88.3
亲水系数	0.78	<1
塑性指数	3.8	≤4
外观	无团粒结块	无团粒结块

1.3 沥青胶浆试件的制备

本文以埃索(Esso)70#道路石油沥青与石灰石矿粉为原料,分别制备粉胶比为0.6、0.8、1.0、1.2、1.4的沥青胶浆。该胶浆采用高速剪切仪与玻璃棒人工搅拌相结合的方式制备,制备过程严格遵循《规范》中的相关要求。沥青胶浆的具体制备过程如下:将石灰石矿粉置于(105±5)℃烘箱中烘干不少于4 h,以保证矿粉干燥度,避免其含有的水分对沥青胶浆性能产生不利影响;沥青采用电炉加热(图1),加热过程中为使热源均匀分布,需在电炉火源与沥青容器之间加垫石棉网;在用电炉加热基质沥青的过程中,持续用玻璃棒搅拌,待沥青温度升至150℃时,用电子秤称取所需矿粉,分批次加入沥青中;最后在(140±5)℃条件下,采用高速剪切仪(3 000 r/min)持续搅拌至胶浆混合均匀。



图1 电炉加热沥青

Fig. 1 Electric furnace heating asphalt

本次蠕变试验中,为探究不同温度对沥青胶浆蠕变性能的影响,设置温度梯度为6℃,选取-6、-12、-18、-24、-30℃五个试验温度;采用铝制模具

浇筑成型梁式试件,试件长(127±2.0) mm、厚(6.35±0.05) mm、宽(12.70±0.05) mm。

试件具体制备过程如下:将沥青胶浆置于预热至135℃的烘箱中加热至熔融流动状态,再将其倒入备好的模具内;试件脱模前,先置于冷却室中冷却约5 min,待模具内的胶浆试件达到脱模条件后,完成脱模操作,至此沥青胶浆梁式试件制备完成。不同粉胶比沥青胶浆梁式试件如图2所示。



图2 沥青胶浆梁式试件

Fig. 2 Asphalt mortar beam specimen

2 试验方法与流程

2.1 沥青胶浆蠕变试验方法

蠕变是多数固体材料普遍存在的力学特性,它是指材料在恒定应力作用下,应变随时间推移持续增大的变形行为。为顺利开展沥青胶浆蠕变试验,需先设定一个应力:

$$\sigma(t) = \sigma_0 H(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \sigma_0, & t \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: t 为加载时刻; $\sigma(t)$ 为 t 时刻的蠕变应力; σ_0 为初始应力; $H(t)$ 为单位阶跃函数, $H(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases}$ 。

蠕变试验初期,若对试件施加的荷载过小,所得蠕变劲度会偏小且试验数据波动显著;若荷载过大,则多数试件易发生断裂导致试验失败。据此,本文试验将荷载施加范围设定为800~1 800 mN,按200 mN的梯度进行设置,选取1 000、1 200、1 400、1 600、1 800 mN五个试验荷载。

沥青弯曲蠕变劲度模量试验采用《规范》中的方法进行,试验中使用的弯曲梁流变仪(BBR)如图3所示。



图3 弯曲梁流变仪

Fig. 3 Bending beam rheometer

2.2 沥青胶浆蠕变试验流程

蠕变试验操作流程如图4所示。自动试验系统加载过程如图5所示。

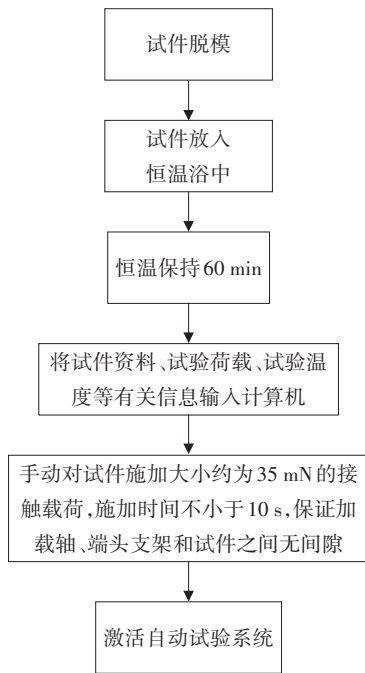


图4 试验操作流程

Fig. 4 Experimental procedure

在荷载恒定作用下,计算机每0.1 s采集一次试件的温度、荷载等测试数据。整个蠕变试验的加载时间为240 s。

3 试验结果与分析

3.1 温度对沥青胶浆蠕变性能的影响

选取不同应力水平(0.372 0、0.446 4、0.520 8、0.595 2、0.669 6 MPa)、不同温度(-6、-12、-18、-24、-30 °C)及不同粉胶比(0.6、0.8、1.0、1.2、1.4)下沥青

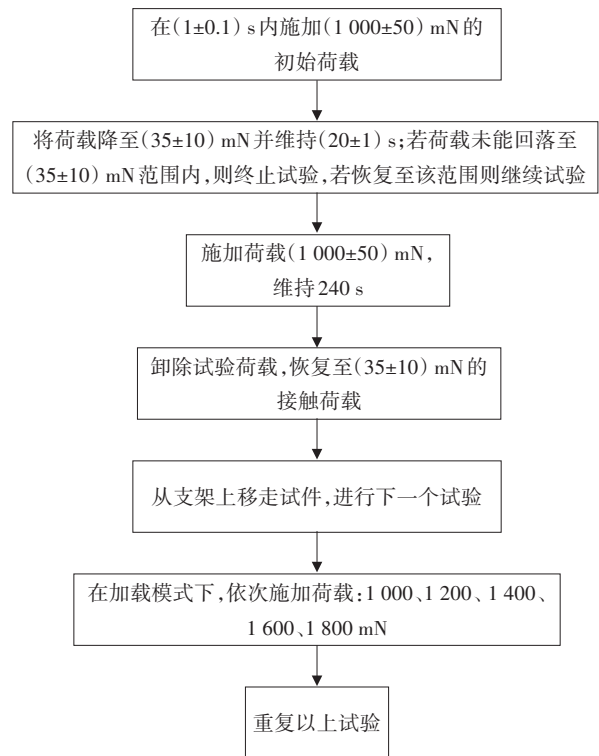
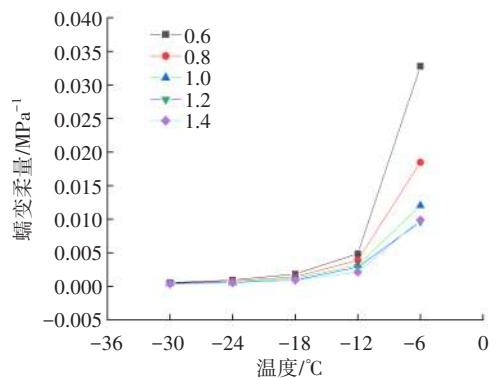


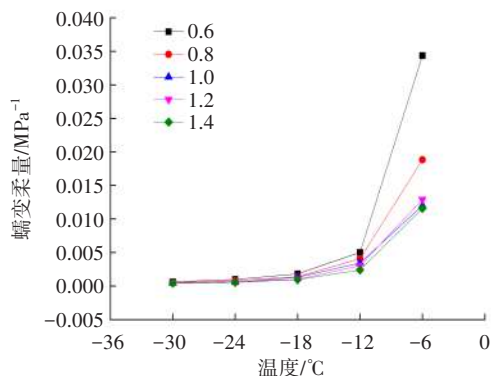
图5 自动试验系统加载过程

Fig. 5 Loading procedure of automatic test system

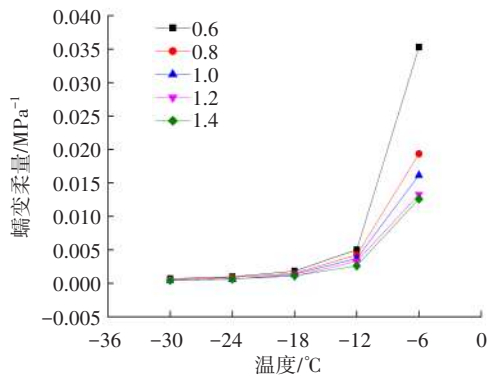
胶浆试件的蠕变柔量数据进行整理并绘图,以温度为横坐标、蠕变柔量为纵坐标,结果如图6所示。



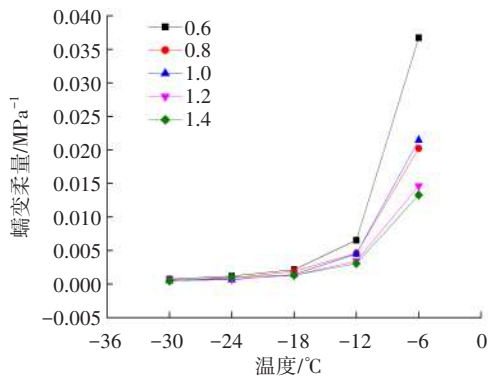
(a) 应力 $\sigma=0.372\ 0$ MPa



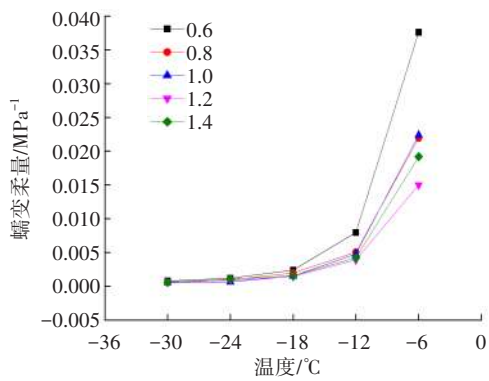
(b) 应力 $\sigma=0.446\ 4$ MPa



(c) 应力 $\sigma=0.5208$ MPa



(d) 应力 $\sigma=0.5952$ MPa



(e) 应力 $\sigma=0.6696$ MPa

图6 温度变化对沥青胶浆蠕变柔量的影响

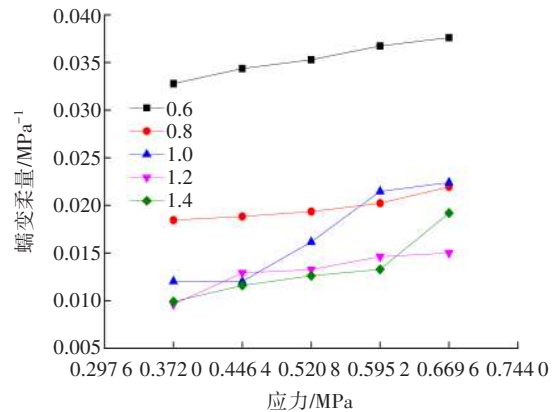
Fig. 6 Influence of temperature on creep compliance of asphalt mortar

由图6可知,在所有应力水平下,不同粉胶比沥青胶浆的蠕变柔量均随温度降低呈递减趋势,且在温度较低的情况下,蠕变柔量随温度降低的衰减幅度更小。不同粉胶比沥青胶浆的蠕变柔量随温度降低的衰减幅度存在显著差异:在-30~-18 °C区间,不同粉胶比沥青胶浆蠕变柔量随温度降低的衰减幅度相差较小;而在-12~-6 °C区间,低粉胶比沥青胶浆的蠕变柔量随温度降低的衰减幅度更大。在相同应力与温度条件下,沥青胶浆的蠕变柔量随粉胶比的增大呈降低趋势。机理分析表明,温度对

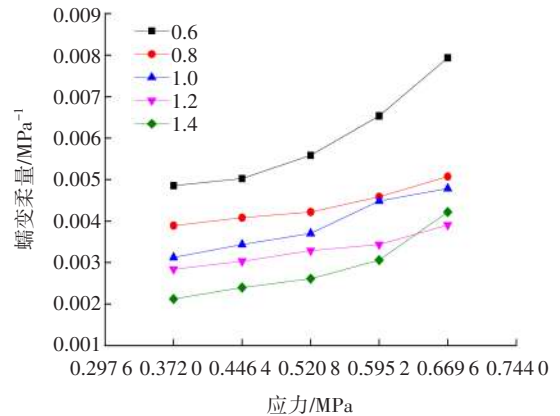
沥青胶浆蠕变性能的影响主要通过改变其分子运动特性实现。温度变化会影响沥青胶浆内部的分子运动状态,随着温度升高,分子热运动的动能增大,从而提升了胶浆的蠕变速率。

3.2 应力水平对沥青胶浆蠕变性能的影响

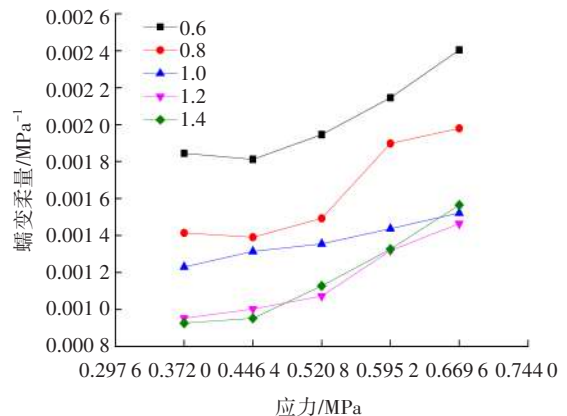
选取不同温度(-6、-12、-18、-24、-30 °C)、不同应力水平(0.372 0、0.446 4、0.520 8、0.595 2、0.669 6 MPa)及不同粉胶比(0.6、0.8、1.0、1.2、1.4)下沥青胶浆试件的蠕变柔量数据,整理并绘图,得到的沥青胶浆蠕变柔量变化如图7所示。



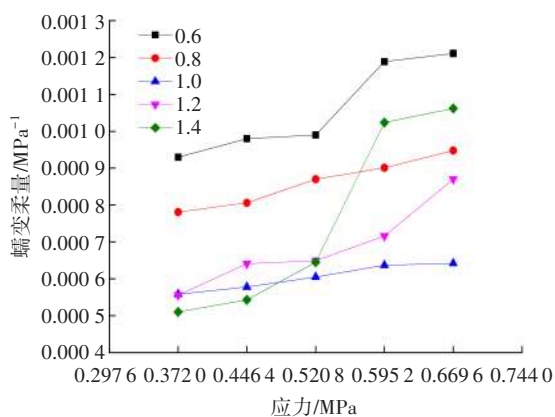
(a) 温度 $T=-6$ °C



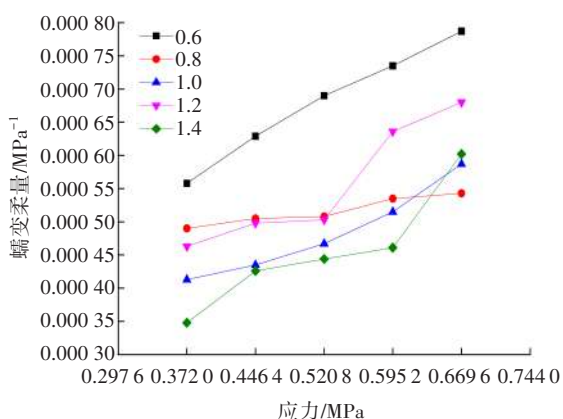
(b) 温度 $T=-12$ °C



(c) 温度 $T=-18$ °C



(d) 温度 $T = -24\text{ }^{\circ}\text{C}$



(e) 温度 $T = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$

图7 应力水平变化对沥青胶浆蠕变柔量的影响

Fig. 7 Influence of stress levels on creep compliance of asphalt mortar

由图7可知,在所有温度条件下,不同粉胶比沥青胶浆的蠕变柔量均随应力的提高呈递增趋势,低粉胶比情况下沥青胶浆的蠕变柔量随应力提高的增幅尤为显著,可见应力水平对沥青胶浆蠕变柔量的影响不可忽视。机理分析表明,应力水平对沥青胶浆蠕变性能的影响主要通过改变其内部胶体颗粒的存在状态实现。低应力水平下,沥青胶浆中的胶体颗粒呈松散分布状态;随着应力提高,胶体颗粒发生定向排列并形成更致密的结构,提升了胶浆的蠕变变形能力。

4 沥青胶浆的蠕变柔量模型

4.1 分数阶指数模型验证

目前, Rabotnov 模型与标准线性体模型常被用作黏弹性材料的本构模型,但二者均存在明显缺陷: Rabotnov 模型收敛速度慢,计算效率偏低;标准线性体模型与实际情况的吻合度较差,采用该模型拟合数据时,其蠕变柔量表达式难以与试验结果实

现良好拟合,这一问题在蠕变初始阶段表现得尤为显著。为此,张淳源等^[18]提出了一种分数阶指数模型,该模型兼具收敛速度快、与时间相关规律吻合度高的优点,模型表达式为:

$$D(t) = D_0 \left\{ 1 + \left(\frac{D_\infty}{D_0} - 1 \right) \left[1 - e^{-\beta(\gamma t + \alpha t)^{1-\alpha}} \right] \right\} \quad (2)$$

式中: $D(t)$ 为 t 时刻的蠕变柔量; D_0 为初始蠕变柔量; D_∞ 为平衡蠕变柔量; α, β, γ 为材料参数, $\alpha < 1, \beta > 0, \gamma > 0$ 。

为验证分数阶指数模型对本试验的适用性,以粉胶比 1.0、温度 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的沥青胶浆试验数据为实例(图8),将应力 0.372 0、0.446 4、0.520 8、0.669 6 MPa 下的蠕变柔量向参考应力 0.520 8 MPa 下的蠕变柔量平移,平移要求为使各应力下曲线的特征点与参考应力下曲线的对应点重合。

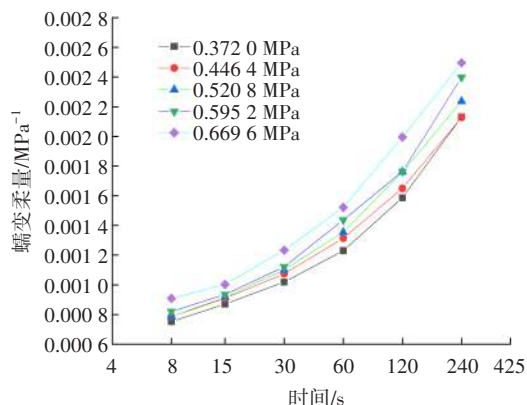


图8 沥青胶浆(粉胶比1.0)在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的蠕变柔量

Fig. 8 Creep compliance of asphalt mortar (powder binder ratio of 1.0) at $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$

本文采用分数阶指数模型对试验数据进行识别,并确定模型参数,该分数阶指数模型可简化为:

$$D(t) = D_\infty + (D_0 - D_\infty) e^{-\beta(\gamma t + \alpha t)^{1-\alpha}} \quad (3)$$

模型参数可通过非线性拟合得到,拟合结果如图9所示,其中决定系数为 0.984 24。具体拟合参数见表3。

4.2 建立沥青胶浆蠕变柔量模型

采用相同方法,对不同温度、应力及粉胶比下的沥青胶浆蠕变柔量,依据式(3)逐一开展非线性拟合,得到各工况下的模型参数。受篇幅所限,本文仅以粉胶比 0.6 的沥青胶浆的蠕变柔量为例,给出其在不同温度、应力条件下对应的分数阶指数模型参数(表4)。

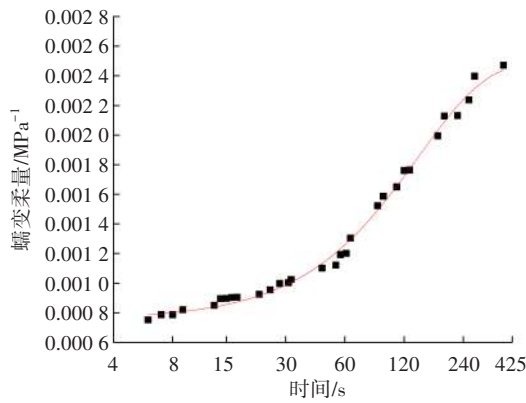


图9 模型拟合结果

Fig. 9 Model fitting results

表3 模型参数

Table 3 Model parameters

D_0/MPa^{-1}	D_∞/MPa^{-1}	α	β	γ
0.000 752	0.002 496	-0.395 650	1.034 670	0.403 360

表4 不同温度和应力水平下沥青胶浆(粉胶比0.6)蠕变柔量的分数阶指数模型参数

Table 4 Parameters of fractional exponential model for asphalt mortar at different temperatures and stresses (powder binder ratio of 0.6)

温度/°C	应力/MPa	分数阶指数模型参数				
		D_0/MPa^{-1}	D_∞/MPa^{-1}	α	β	γ
-6	0.372 0	0.011 628	0.074 958	-0.338 580	64.797 500	0.338 960
	0.446 4	0.012 225	0.075 188	-0.315 690	50.734 900	0.316 130
	0.520 8	0.013 772	0.076 256	-0.370 710	29.916 300	0.371 420
	0.595 2	0.014 819	0.076 823	-0.357 020	33.676 400	0.357 670
	0.669 6	0.015 382	0.077 761	-0.367 190	20.164 300	0.368 160
-12	0.372 0	0.002 404	0.009 174	-0.397 650	2.416 370	0.401 900
	0.446 4	0.002 762	0.008 772	-0.397 480	2.293 890	0.402 010
	0.520 8	0.002 924	0.010 299	-0.397 630	2.411 840	0.401 910
	0.595 2	0.003 584	0.011 038	-0.397 970	3.568 830	0.401 430
	0.669 6	0.004 878	0.012 771	-0.398 090	3.731 520	0.401 350
-18	0.372 0	0.001 224	0.002 874	-0.294 850	12.328 500	0.296 110
	0.446 4	0.001 217	0.002 940	-0.334 990	12.576 700	0.336 290
	0.520 8	0.001 215	0.003 226	-0.304 570	13.495 100	0.305 790
	0.595 2	0.001 408	0.003 322	-0.285 550	13.591 100	0.286 790
	0.669 6	0.001 770	0.003 356	-0.253 230	10.406 000	0.311 490
-24	0.372 0	0.000 677	0.001 285	-0.332 940	17.752 030	0.335 050
	0.446 4	0.000 719	0.001 422	-0.312 990	12.380 200	0.314 340
	0.520 8	0.000 752	0.001 335	-0.391 360	18.205 700	0.397 900
	0.595 2	0.000 870	0.001 592	-0.389 740	13.775 600	0.398 180
	0.669 6	0.000 954	0.001 671	-0.279 520	16.224 100	0.280 550
-30	0.372 0	0.000 488	0.000 730	-0.397 950	4.178 830	0.401 310
	0.446 4	0.000 503	0.000 826	-0.318 620	1.975 480	0.324 100
	0.520 8	0.000 568	0.000 909	-0.398 180	4.040 610	0.401 300
	0.595 2	0.000 599	0.000 961	-0.346 970	1.953 100	0.348 440
	0.669 6	0.000 645	0.000 971	-0.388 340	1.317 600	0.396 750

基于所得数据,通过回归分析得到分数阶指数模型参数与粉胶比 R 、应力 σ 及温度 T 的关系式,见式(4)~(8)。

$$D_0 = 0.006R^2 - 0.006\sigma^2 + 2.079 \times 10^{-5}T^2 - 0.015R + 0.011\sigma + 0.001T + 0.015 226 \quad (4)$$

$$D_\infty = 0.023R^2 - 0.051\sigma^2 - 0.058R + 0.068\sigma + 0.007T + 0.134 146 \quad (5)$$

$$\alpha = -0.007R^2 - 0.117\sigma^2 + 0.052R + 0.160\sigma - 0.009T + 2.049 047 \quad (6)$$

$$\beta = -11.932R^2 - 220.416\sigma^2 - 0.016T^2 + 26.006R + 230.536\sigma + 0.421T - 57.585 174 \quad (7)$$

$$\gamma = 0.034R^2 + 0.098\sigma^2 - 0.091R - 0.132\sigma + 0.007T - 0.087 145 \quad (8)$$

将 D_0 、 D_∞ 、 α 、 β 、 γ 五个参数代入式(3),即可得到

同时考虑粉胶比、温度与应力的沥青胶浆蠕变柔量模型。

5 结论

1) 在所有应力水平下,不同粉胶比沥青胶浆的蠕变柔量均随温度降低呈递减趋势,且在低温区间,蠕变柔量随温度降低的衰减幅度更小。

2) 不同粉胶比沥青胶浆的蠕变柔量,其随温度降低的衰减幅度存在显著差异;在 $-30\sim-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间,不同粉胶比沥青胶浆蠕变柔量随温度降低的衰减幅度相差较小;而在 $-12\sim-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间,低粉胶比沥青胶浆的蠕变柔量随温度降低的衰减幅度更大。

3) 在相同应力与温度条件下,沥青胶浆的蠕变柔量随粉胶比的增大而降低。

4) 不同粉胶比沥青胶浆的蠕变柔量均随应力的提高而增大,低粉胶比条件下,沥青胶浆蠕变柔量随应力提高的增大幅度尤为显著。

参考文献(References):

- [1] MONISMITH C L, HARVEY J T, GUADA I M, et al. Asphalt mix evaluations: case study at San Francisco international airport [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2000, 1723(1): 133-140. DOI:10.3141/1723-17.
- [2] 杨永明,赵品学,张研,等.玄武岩纤维表面改性处理对沥青胶浆性能的影响[J].公路交通科技,2023,40(4):9-15,25.
YANG Yongming, ZHAO Pinxue, ZHANG Xing, et al. Influence of surface treatment for basalt fiber on performance of asphalt mortar[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40(4): 9-15, 25.
- [3] 刘克非.纤维沥青胶浆及沥青混合料路用性能研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2011,30(3):407-410,484.
LIU Kefei. Study on pavement performance of fiber asphalt mortar and its mixtures [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2011, 30(3): 407-410, 484.
- [4] 林梅,李萍,念腾飞,等.矿粉对沥青胶浆流变性能影响及微观分析[J].功能材料,2020,51(6):150-157. DOI:10.3969/j.issn.1001-9731.2020.06.025.
LIN Mei, LI Ping, NIAN Tengfei, et al. Effect of mineral powder on rheological properties of asphalt mastic and microscopic analysis [J]. Journal of Functional Materials, 2020, 51(6): 150-157. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9731.2020.06.025.
- [5] 许新权,唐胜刚,杨军.粉胶比对沥青胶浆高低温性能的影响[J].长安大学学报(自然科学版),2020,40(4):14-26. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2020.04.002.
XU Xinquan, TANG Shenggang, YANG Jun. Influence of filler-asphalt ratio on high-and-low-temperature performance of asphalt mortar [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2020, 40(4): 14-26. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2020.04.002.
- [6] 王树杰,郝冠军.粉胶比对沥青胶浆流变性能的影响[J].公路,2015,60(6):15-18.
WANG Shujie, HAO Guanjun. Influence of filler-bitumen ratio on rheological properties of asphalt combined binder[J]. Highway, 2015, 60(6): 15-18.
- [7] 刘丽,郝培文,肖庆一,等.沥青胶浆高温性能及评价方法[J].长安大学学报(自然科学版),2007,27(5):30-34. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2007.05.007.
LIU Li, HAO Peiwen, XIAO Qingyi, et al. High temperature properties and evaluation method of asphalt mortar [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2007, 27(5): 30-34. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2007.05.007.
- [8] 何子胤.不同粒径细集料对沥青砂浆强度特性及蠕变特性影响研究[D].西安:长安大学,2018.
HE Ziyin. Influence of different size particle aggregates on strength properties and creep properties of asphalt mortar[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [9] 袁迎捷.基于Superpave的沥青胶浆流变特性与级配优化研究[D].西安:长安大学,2004.
YUAN Yingjie. Research on rheological characteristics of asphalt mortar and gradation optimization based on Superpave[D]. Xi'an: Chang'an University, 2004.
- [10] 郭平.多因素影响纤维沥青胶浆流变性能研究[J].广西大学学报(自然科学版),2010,35(1):105-109. DOI: 10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2010.01.013.
GUO Ping. Multifactor influence on rheological property of fiber asphalt mortar [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2010, 35(1): 105-109. DOI: 10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2010.01.013.
- [11] VANDENBERGH W, VANDEVEN M F C. The influence of ageing on the fatigue and healing properties of bituminous mortars [J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2012, 53:256-265. DOI:10.1016/j.sbspro.2012.09.878.
- [12] RUTHERFORD T, WANG Z J, SHU X, et al. Laboratory investigation into mechanical properties of cement emulsified asphalt mortar [J]. Construction and Building Materials, 2014, 65: 76-83. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.113.
- [13] TAN Y Q, OUYANG J, LYU J F, et al. Effect of emulsifier on cement hydration in cement asphalt mortar [J]. Construction and Building Materials, 2013, 47:

- 159-164. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.04.044.
- [14] WANG Z J, SHU X, RUTHERFORD T, et al. Effects of asphalt emulsion on properties of fresh cement emulsified asphalt mortar[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 75: 25-30. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.11.013.
- [15] XIE Y J, FU Q, ZHENG K R, et al. Dynamic mechanical properties of cement and asphalt mortar based on SHPB test [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 70: 217-225. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.092.
- [16] 黄乾晋, 钱国平, 金大中, 等. 不同紫外光照时长对沥青胶浆流变性能的影响[J]. *公路与汽运*, 2019, 35(3): 57-59, 79. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2019.03.014.
- HUANG Qianjin, QIAN Guoping, JIN Dazhong, et al. Effect of different ultraviolet irradiation time on rheological properties of asphalt mortar[J]. *Highways & Automotive Applications*, 2019, 35(3): 57-59, 79. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2019.03.014.
- [17] 禚炜安, 熊剑平, 张仰鹏, 等. 改性乳化沥青混合料胶浆特性及强度分析[J]. *交通科学与工程*, 2023, 39(4): 32 - 38. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2023060223081988.
- XUAN Weian, XIONG Jianping, ZHANG Yangpeng, et al. Analysis of mortar characteristics and strength of modified emulsified asphalt mixture [J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2023, 39(4): 32-38. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2023060223081988.
- [18] 张淳源, 张为民. 求解一类非线性黏弹性问题的弹性回复对应原理[J]. *工程力学*, 2002, 19(1): 139-146.
- ZHANG Chunyuan, ZHANG Weimin. Elasticity recovery correspondence principle for solving a class of nonlinear viscoelastic problems [J]. *Engineering Mechanics*, 2002, 19(1): 139-146.

(责任编辑:熊怡;校对:薛仪)