

长期立贮固体发动机药柱变形预估方法研究

彭湃^{1,2,3}, 陈家兴⁴, 樊自建^{2,3*}, 邓旷威^{2,3}

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 长沙 410015; 2.国防科技大学 空天科学学院, 长沙 410073;
3.空天任务智能规划与仿真湖南省重点实验室, 长沙 410073;
4.内蒙动力机械研究所, 呼和浩特 010010)

摘要: **目的** 研究老化与颠簸影响下长期立式贮存固体发动机药柱的蠕变特性, 基于广义 Kelvin 模型, 构建一种考虑老化和损伤因素的蠕变本构模型。**方法** 通过开展温度与应力加速蠕变试验、高温加速老化试验以及往复拉伸损伤试验, 获得老化与损伤对蠕变的影响规律, 建立蠕变预测模型, 获取模型参数, 并将其嵌入有限元软件。**结果** 利用所得蠕变本构模型计算了某型发动机立式贮存 15 a 后药柱蠕变的应力应变, 结果表明, 考虑老化因素后, 发动机药柱的最大等效应力增大了 96.84%, 最大等效应变减小了 4.07%, 在同时考虑老化与损伤因素后, 最大等效应力增加了 82.77%, 最大等效应变减小了 3.62%。**结论** 对比不同条件下的仿真结果, 老化和损伤对发动机蠕变状态的影响较大。使用该模型能够较好地体现出固体发动机药柱的老化硬化和损伤软化。

关键词: 固体发动机; 立式贮存; 时间-温度-应力等效原理; 蠕变预测模型; 有限元

中图分类号: V435 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9242(2024)04-0024-11

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.04.004

Deformation Prediction Method of Engine Grain under Long-term Vertical Storage

PENG Pai^{1,2,3}, CHEN Jiaying⁴, FAN Zijian^{2,3*}, DENG Kuangwei^{2,3}

(1. College of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410015, China; 2. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 3. Hunan Key Laboratory of Intelligent Planning and Simulation for Aerospace Missions, Changsha 410073, China; 4. Inner Mongolia Power Machinery Research Institute, Hohhot 010010, China)

ABSTRACT: The work aims to study the creep characteristics of long-term vertically stored solid engine grain under the influence of aging and knocking, and establish a creep constitutive model considering aging and damage factors based on the generalized Kelvin model. The creep test accelerated by temperature and stress, high temperature accelerated aging test and reciprocating tensile damage test were carried out to obtain the influence law of aging and damage on creep. The creep prediction model was established, the model parameters were obtained and embedded into the finite element software. The stress and strain of the engine grain creep after 15 years of vertical storage were calculated by the obtained creep constitutive model. The simula-

收稿日期: 2024-02-26; 修订日期: 2024-04-07

Received: 2024-02-26; Revised: 2024-04-07

基金项目: 湖南省研究生科研创新项目 (CX20230059)

Fund: Research Innovation Project of Hunan Province (CX20230059)

引文格式: 彭湃, 陈家兴, 樊自建, 等. 长期立贮固体发动机药柱变形预估方法研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(4): 24-34.

PENG Pai, CHEN Jiaying, FAN Zijian, et al. Deformation Prediction Method of engine grain under Long-term Vertical Storage[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(4): 24-34.

*通信作者 (Corresponding author)

tion results showed that the maximum effective stress of the engine grain increased by 96.84% and the maximum effective strain decreased by 4.07% after considering the aging factor. After considering both the aging and damage factors, the maximum effective stress increased by 82.77% and the maximum effective strain decreased by 3.62%. Compared with the simulation results under different conditions, aging and damage have great influence on the creep state of the engine. The use of this model can better reflect the aging hardening and damage softening of solid engine grain. The established model and the method used can provide reference for the structural integrity analysis of long-term vertically stored engines.

KEY WORDS: solid engine; vertical storage; time-temperature-stress equivalence principle; creep prediction model; finite element analysis

固体发动机具有战勤简单、可靠性高、成本低等优点, 其可靠性一直是各行各业研究和关注的重点。对于固体发动机而言, 其全寿命周期荷载较为复杂, 而贮存时间又占据着全寿命周期的绝大部分, 因此服役过程中的老化和变形问题严重影响着发动机的可靠性^[1-3]。立式贮存工况是固体发动机的一种特殊使用工况, 其需承受特有的立式自重荷载。复合固体推进剂作为典型的黏弹性材料, 立式贮存过程中药柱星孔在重力荷载作用下会发生蠕变变形, 而药柱星孔的形状直接影响发动机的内弹道性能, 因此准确预估长期立式贮存发动机药柱变形状态关系到固体发动机的安全可靠评估^[4-7]。

目前, 我国对立式贮存固体发动机药柱的蠕变特性研究主要采用试验与仿真相结合的方式^[8]。罗一智等^[9]针对某 HTPB 推进剂开展了不同应力水平下的蠕变试验, 对幂律模型、指数模型、有理式模型等 12 种蠕变模型开展了研究, 确定了适用于 HTPB 推进剂的蠕变本构方程。陈科等^[10]在蠕变试验与蠕变模型研究的基础上, 对发动机进行了数值计算, 获得了药柱蠕变状态仿真计算方法。以上研究成果仅适用于不考虑老化和其他外界损伤因素的短期立式贮存的发动机。肖旭等^[11]对 HTPB 推进剂的老化性能也进行了相关研究, 发现在长期贮存的过程中, 老化现象会使推进剂硬化脆化, 导致推进剂模量增加和伸长率降低, 同时影响其蠕变性能。王鑫等^[12]在数值计算的过程中考虑了老化因素, 通过试验和数值计算结果对比, 进一步校验了发动机在立式贮存条件下的结构响应特性, 为发动机长期贮存药柱变形状态评估提供了指导。然而在长期贮存的过程中, 发动机药柱除了受到老化的影响外^[13-16], 对于舰载固体发动机, 船体的振动也会对固体发动机药柱造成额外的损伤^[17]。王贵军等^[18]从细观的角度分析了外力作用时固体推进剂损伤发生的原因, 以及损伤在宏观上的表现。结果表明, 发动机药柱的老化和外界振动等因素带来的损伤均会影响其蠕变力学性能。因此, 构建考虑老化和损伤影响的蠕变状态预测模型, 对舰载长期立贮固体发动机蠕变状态精确评估方法的研究具有重要价值。

综合来看, 目前国内对于固体发动机药柱同时考虑老化和损伤影响的蠕变模型相关研究较少。鉴于

此, 本文首先根据时间-温度-应力等效原理, 利用短期蠕变试验获得推进剂药柱长期蠕变本构模型, 通过高温加速老化试验得到推进剂药柱老化模型, 再通过模拟颠簸试验得到颠簸损伤模型。最终结合以上模型, 得到考虑老化与损伤影响的蠕变本构模型, 并将该模型应用到数值计算当中, 形成一种考虑老化与损伤影响的发动机药柱长期立贮蠕变变形预测方法。

1 推进剂老化损伤蠕变模型分析

1.1 推进剂蠕变本构模型

黏弹性材料在定应力 σ_0 的作用下, 模型的应变响应是时间的函数, 它反映了材料受简单荷载时的黏弹性力学行为, 此时的应变响应可表示为:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 J(t) \tag{1}$$

式中: $J(t)$ 为蠕变柔量。

固体推进剂为一种典型黏弹性材料, 本文选择广义 Kelvin 模型对其蠕变行为进行描述, 该模型能够很好地表征推进剂的弹性和黏性特征。广义 Kelvin 模型蠕变柔量表达式:

$$J_1(t) = \frac{1}{E_0} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) \tag{2}$$

式中: E_i 为弹簧弹性模量; η_i 为黏度系数; τ_i 为 Kelvin 模型的松弛时间, $\tau_i = \frac{\eta_i}{E_i}$ 。

蠕变柔量的定义如图 1 所示。

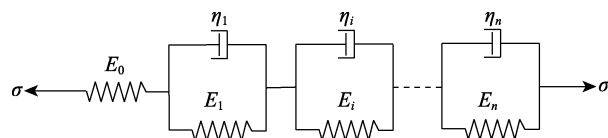


图 1 广义 Kelvin 模型
Fig.1 General Kelvin model

1.2 加速蠕变模型

现有推进剂蠕变本构模型主要是通过通过在一定时期内对试样蠕变状态进行观测得到, 然而发动机贮存时间往往是以年为单位, 通过短期蠕变试验数据得到

的推进剂蠕变本构模型去对发动机的长期蠕变行为进行预测存在一定的误差。研究表明,高聚物黏弹性材料的蠕变符合时间-温度-应力等效原理^[19-20],利用此原理可以通过不同条件下的短时间蠕变试验结果,推导出长时间蠕变状态。因此,本文根据该原理设计蠕变试验,利用短期蠕变数据得到长期蠕变数据^[21]。

首先根据时间-温度等效原理可以得到蠕变柔量与温度有关的表达式:

$$J(T, t) = J\left(T_0, \frac{t}{\varphi_T}\right) \quad (3)$$

式中: T_0 为平移参考温度; T 为试验温度; φ_T 为温度位移因子; t 为蠕变时间。

研究表明,应力对材料的蠕变行为存在与温度类似的影响^[22],可以构造类似的应力相关蠕变柔量表达式:

$$J(\sigma, t) = J\left(\sigma_0, \frac{t}{\varphi_\sigma}\right) \quad (4)$$

式中: σ 为试验应力; σ_0 为参考应力; φ_σ 为应力位移因子。

定义恒温下的应力移位因子 ϕ_σ^T 、恒应力下的温度移位因子 ϕ_T^σ 以及联合移位因子 $\phi_{T\sigma}$,三者之间有如下关系:

$$\lg \phi_{T\sigma} = \lg \phi_T^{\sigma_0} + \lg \phi_\sigma^T = \lg \phi_\sigma^T + \lg \phi_T^{\sigma_0} \quad (5)$$

根据式(5)可以对定温度不同应力下的蠕变曲线进行平移,得到一条蠕变柔量主曲线。通过改变定温度可以得到多条主曲线,再对不同温度下的蠕变柔量主曲线进行平移,最终得到参考温度和参考应力下的蠕变柔量主曲线以及各项联合移位因子,实现通过短期蠕变行为对长期蠕变行为预测的目的。

1.3 老化损伤蠕变本构模型构建

根据 QJ 2328A—2005《复合固体推进剂高温加速老化试验方法》,开展推进剂热老化试验^[23-24]时,常选取线性、对数和指数模型,本次采用指数模型进行分析:

$$P = P_0 e^{-Kt} \quad (6)$$

式中: P 为待研究的推进剂任一材料性能,本文选择蠕变柔量作为研究对象; P_0 为性能初始值(常数); K 为与温度有关的性能变化速度常数; t 为老化时间, d 。

模型中的性能变化速度常数 K 可通过 Arrhenius 方程求得:

$$K = Z e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (7)$$

式中: Z 为频率因子; E_a 为表观活化能, J/mol ; R 为摩尔气体常数,这里取 $8.314 J/(K \cdot mol)$, T 为热力学温度, K 。

此时蠕变柔量表达式为:

$$J_2(t) = \left[\frac{1}{E_0} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) \right] \cdot e^{-Kt} \quad (8)$$

由于颠簸损伤的周期性和长期性,其对材料带来动态破坏是一个随时间发展的量。根据断裂力学损伤理论以及推进剂发生损伤前后力学性能的变化^[25],假设单次振动引起的损伤是恒定的,且总损伤随着振动次数的增加积累并引起材料的软化,可以把振动损伤与时间的关系简化为线性。计算总贮存时间 t_0 内材料受到的总损伤 D_0 ,把损伤模型写为与时间相关的表达式:

$$D(t) = D_0 \frac{t}{t_0} \quad (9)$$

在 Kelvin 本构模型的基础上,考虑老化和损伤的影响,结合式(4)、(8)、(9)可以得到推进剂考虑老化和损伤影响的蠕变本构模型:

$$J(t) = \left[\frac{1}{E_0} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) \right] \cdot e^{-Kt} \cdot \left(1 + D_0 \frac{t}{t_0} \right) \quad (10)$$

2 试验

2.1 材料及设备

本文所使用的试样为某 HTPB 推进剂 B 型哑铃试样,该推进剂的配方:铝粉的质量分数为 18%,黑索金的质量分数为 16%,过氯酸铵的质量分数为 53%,其他黏合剂和其他小组分的质量分数为 13%。试样在使用前放置在 $50^\circ C$ 温箱内加热 24 h,以消除加工过程中的残余应力以及吸湿带来的影响。试验用到的设备主要有电子式万能试验机、机械式蠕变装置、高低温温箱以及高分辨率相机。通过 3 种试验得到考虑老化损伤的蠕变本构模型,并应用到仿真软件中,对发动机模型进行仿真计算,具体流程图 2 所示。

2.2 温度与应力加速试验

对推进剂开展不同温度和不同应力水平下的蠕变试验,温度水平为 $25^\circ C$ 、 $50^\circ C$ 、 $70^\circ C$,应力水平为 0.03 、 0.09 、 $0.12 MPa$,共 9 组。其中, $25^\circ C$ 为参考温度,也是环境温度, $50^\circ C$ 、 $70^\circ C$ 为高温加速蠕变时的试验温度,参考应力为 $0.03 MPa$,蠕变时长为 24 d。通过图像测量的方法记录蠕变期间推进剂观测范围内的变形,最终使用 DIC 方法计算变形数据,根据式(1)计算得到蠕变柔量数据。在得到短期蠕变数据后,根据时间-温度-应力等效原理获得长期蠕变数据,对数据进行拟合,最终得到蠕变模型参数,试验装置如图 3 所示。

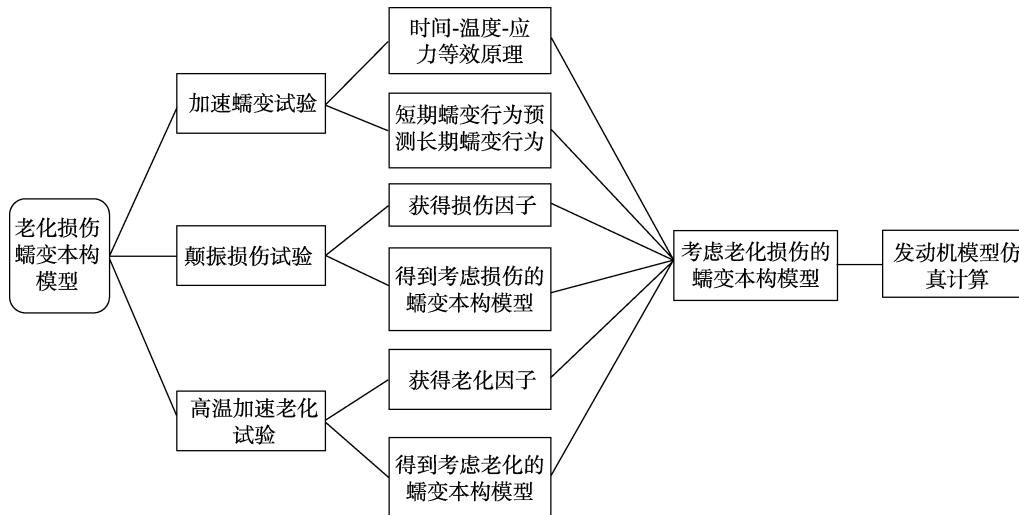


图 2 发动机药柱变形预估方法流程

Fig.2 Flow chart of deformation prediction method for engine grain

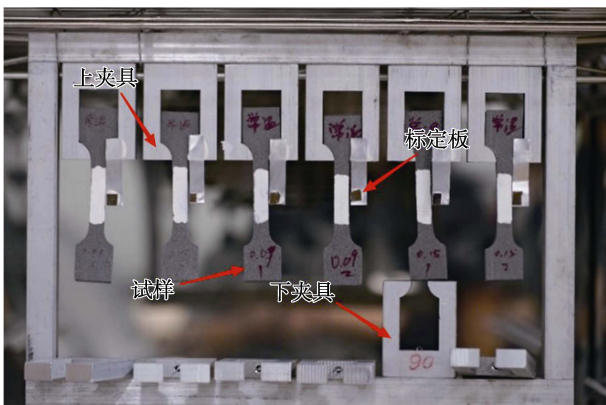


图 3 试验装置
Fig.3 Testing device

0.03、0.09、0.12 MPa 应力水平下不同温度的蠕变柔量曲线如图 4 所示。可以发现, 随着温度的升高, 推进剂的蠕变柔量也逐渐增大, 并且这种增大规律不是线性的, 温度越高, 对蠕变柔量的影响程度也越大。

25、50、70 °C 不同应力水平下的短期蠕变试验结果如图 5 所示。可以发现, 随着应力的增大, 蠕变柔量也会增大, 表明在所考虑的应力水平范围内, 推进剂的蠕变行为同样是非线性的。在 70 °C、0.12 MPa

条件下, 试样因蠕变过大, 在较短的时间即发生断裂, 因此试验未能获得该工况下的蠕变数据, 使用该方法时需要合理设计工况的组合。

推进剂的基体作为一种高分子材料, 具有明显的黏弹性特征。根据高分子物理和黏弹性理论相关研究可知, 温度的升高加快了分子链及其链段的运动, 以及热运动的振幅增大, 基体材料的自由体积将逐步增大。因此, 在高温条件下, 蠕变速度更加迅速, 应力在推进剂的蠕变过程中起到与温度相似的作用, 温度和荷载对推进剂蠕变性能的影响规律是加速蠕变方法的应用基础。

根据短期蠕变试验结果获得联合位移因子以及蠕变柔量主曲线的途径有 2 种: 一是以温度位移因子构建蠕变柔量主曲线, 再对不同应力水平下的主曲线进行平移, 得到参考应力水平下的蠕变柔量主曲线; 二是以应力位移因子构建蠕变柔量主曲线, 再对不同温度下的主曲线进行平移, 得到参考温度下的蠕变柔量主曲线。途径的选择不影响最终的结果, 本次研究采用第 2 种。以 25 °C 的蠕变曲线为例, 对蠕变柔量曲线的时间坐标取对数, 再对得到的对数时间-蠕变柔量曲线进行线性拟合, 得到图 6a。取蠕变时间前中后段 3 个时间节点, 代入拟合得到的各直线方程

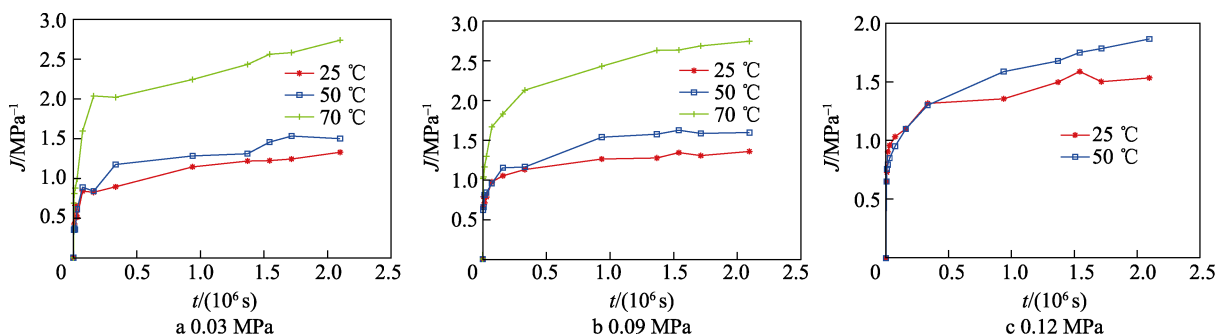


图 4 相同应力水平不同温度下的蠕变试验结果

Fig.4 Creep test results at different temperature with the same stress level

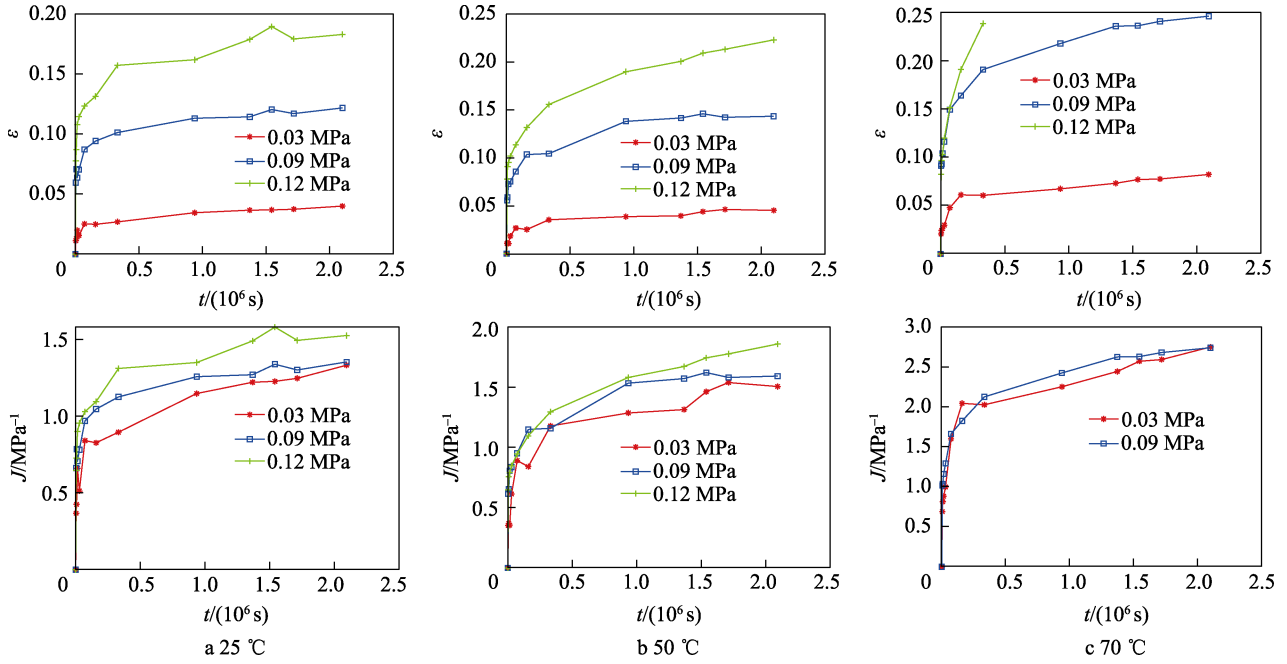


图5 24 d蠕变试验结果
Fig.5 24 d creep test results

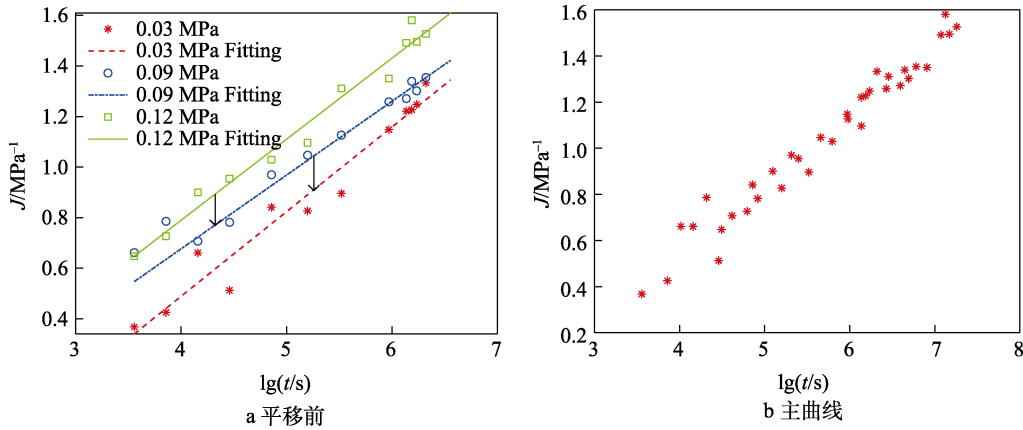


图6 25 °C下短期蠕变柔量平移曲线
Fig.6 Translated curve of short-term creep compliance at 25 °C: a) before translate; b) main curve

中, 求得其纵坐标值大小, 把该曲线与临近直线的纵坐标值进行比较, 求得每组3个坐标差值的平均值, 这个值就是应力位移因子。把高应力曲线向参考应力曲线平移, 最终得到主曲线图6b, 一致性较好。

对不同温度下的蠕变柔量曲线向参考应力 0.03 MPa 进行同样的平移操作, 得到各温度参考应力下的蠕变柔量主曲线, 如图7所示。同时得到不同温度下的应力位移因子, 见表1。

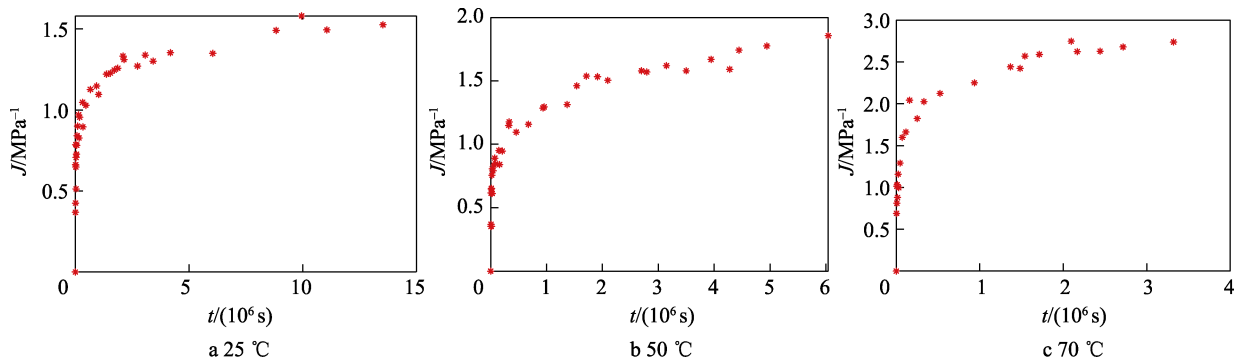


图7 各温度平移后的蠕变柔量曲线
Fig.7 Translated curve of compliance after translation at different temperature

表 1 不同温度下应力位移因子

Tab.1 Stress displacement factor at different temperature

应力水平/MPa	$\lg \phi_{\sigma}^{25^{\circ}\text{C}}$	$\lg \phi_{\sigma}^{50^{\circ}\text{C}}$	$\lg \phi_{\sigma}^{70^{\circ}\text{C}}$
0.03	0	0	0
0.09	0.30	0.31	0.14
0.12	0.81	0.45	/

在经过平移后, 曲线时间坐标轴值明显增大, 即应力对蠕变起到了明显的加速作用, 通过该方法可以通过高应力短期蠕变行为对低应力长期蠕变行为进行预测。在得到各温度参考应力下的蠕变柔量主曲线后, 对不同温度下的蠕变柔量主曲线向参考温度下的主曲线进行同样的平移操作, 得到图 8 所示的总蠕变柔量主曲线, 以及表 2 所示的参考应力下温度位移因子。根据式 (5) 计算得到联合位移因子, 如表 3 所示。

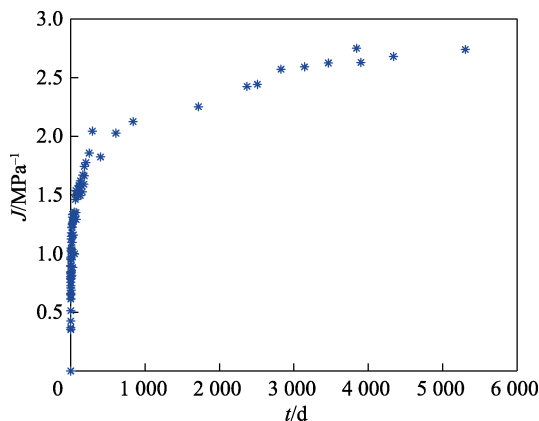


图 8 蠕变柔量主曲线

Fig.8 Main curve of creep compliance

表 2 温度位移因子

Tab.2 Temperature displacement factor

$\lg \phi_{25^{\circ}\text{C}}^{0.03\text{MPa}}$	$\lg \phi_{50^{\circ}\text{C}}^{0.03\text{MPa}}$	$\lg \phi_{70^{\circ}\text{C}}^{0.03\text{MPa}}$
0	0.55	2.2

表 3 联合位移因子

Tab.3 Joint displacement factor

温度/ $^{\circ}\text{C}$	0.03 MPa	0.09 MPa	0.12 MPa
25	0	0.30	0.81
50	0.55	0.86	1.01
70	2.20	2.34	

从图 8 中可以看出, 该主曲线时间坐标最大值达到了 14.5 a, 即对于该推进剂, 通过温度-应力加速蠕变试验, 可以在不考虑贮存过程中推进剂力学性能变化的情况下, 根据不同温度下 24 d 的短期蠕变行为预测环境温度下 (25 $^{\circ}\text{C}$) 14.5 a 的长期蠕变行为。70 $^{\circ}\text{C}$ 、0.09 MPa 的联合位移因子为 2.34, 温度-应力联合最大加速倍率为 218.8 倍。

2.3 高温加速老化试验

通过油浴温箱对推进剂开展高温加速老化试验, 参考温度以及后续力学性能测试时的环境温度为 25 $^{\circ}\text{C}$, 高温加速老化试验温度为 50、60、70 $^{\circ}\text{C}$, 老化时间取样节点为 0、15、30、40、50、60 d, 并在取样完成后的 2 d 内完成下一步试验。利用电子式万能试验机对老化前后的试样开展常温 0.1 MPa 下 10 000 s 短期蠕变试验, 得到蠕变变形数据后, 利用式 (1) 得到蠕变柔量变化曲线, 以 10 000 s 时刻的蠕变柔量作为参考物理量, 其中未老化试样为 P_0 。根据 Arrhenius 方程计算得到推进剂的老化模型, 试验结果如图 9 和图 10 所示。

从图 9 中可以看出, 存在老化更长时间推进剂蠕变柔量反而变小的情况, 并且在 3 种老化温度下均出现了这种情况。在高温加速老化的前期过程中, 推进剂蠕变柔量呈现出先增后减的趋势。从图 10 中可以看出, 在任意老化时间节点下, 70 $^{\circ}\text{C}$ 老化后, 推进剂的蠕变柔量最小。在老化前期, 存在相同老化时间下, 50 $^{\circ}\text{C}$ 老化后推进剂蠕变柔量大于 60 $^{\circ}\text{C}$ 的现象, 并且随着老化时间的增加, 这种现象逐渐消失, 推进剂表现出蠕变柔量随着老化温度的增大而减小的趋势。

上述情况说明, 老化温度和老化时间对推进剂老化进程的影响不是单调的, 高温加速老化作用对于推进剂蠕变性能的影响存在一个时间上的转折点, 并且老化温度越高, 转折点越靠前。这是因为在推进剂老化的过程中, 氧化交联反应和分子链的断裂都会影响推进剂的力学性能, 其中氧化交联使得推进剂模量增加, 而分子链的断裂又使得推进剂模量下降, 二者在老化过程中的占比决定了推进剂的模量增加还是减小。在老化前期, 分子链断裂占主导, 后期氧化交联作用占主导, 并且温度越高, 氧化交联作用越明显, 老化对推进剂造成的影响与温度和时间有关。

2.4 颠簸损伤试验

固体发动机在舰载的过程中, 由于海浪的波动会受到颠簸影响, 假设一次海浪造成的颠簸对发动机药柱的损伤时固定的, 参考相关研究以及工程实例, 舰载 15 a 内发动机共受到约 3 600 次颠簸影响, 且只有在推进剂的变形超过“脱湿点”时才会产生明显的损伤, 一般认为 HTPB 推进剂的“脱湿点”应变为 10%~15%。因此, 可以采用万能试验机对试样进行往复拉伸的方式来模拟药柱在贮存的过程中受到的颠簸损伤, 对试样施加频率为 1 Hz、振幅为 10% 应变的往复拉伸, 拉伸次数为 3 600 次, 模拟舰船立贮 15 a 内产生的振动对药柱的影响。由于推进剂具有黏弹性的特性, 在卸载后变形不会立刻恢复, 为了减小试样变形对试验结果的影响, 拉伸完成后试样

静置恢复 24 h, 随后在环境温度 (25 °C) 下进行 0.1 MPa 的蠕变试验, 并与常规试样的蠕变试验结果进行

对比, 得到损伤模型参数, 损伤试验的结果如图 11 所示。

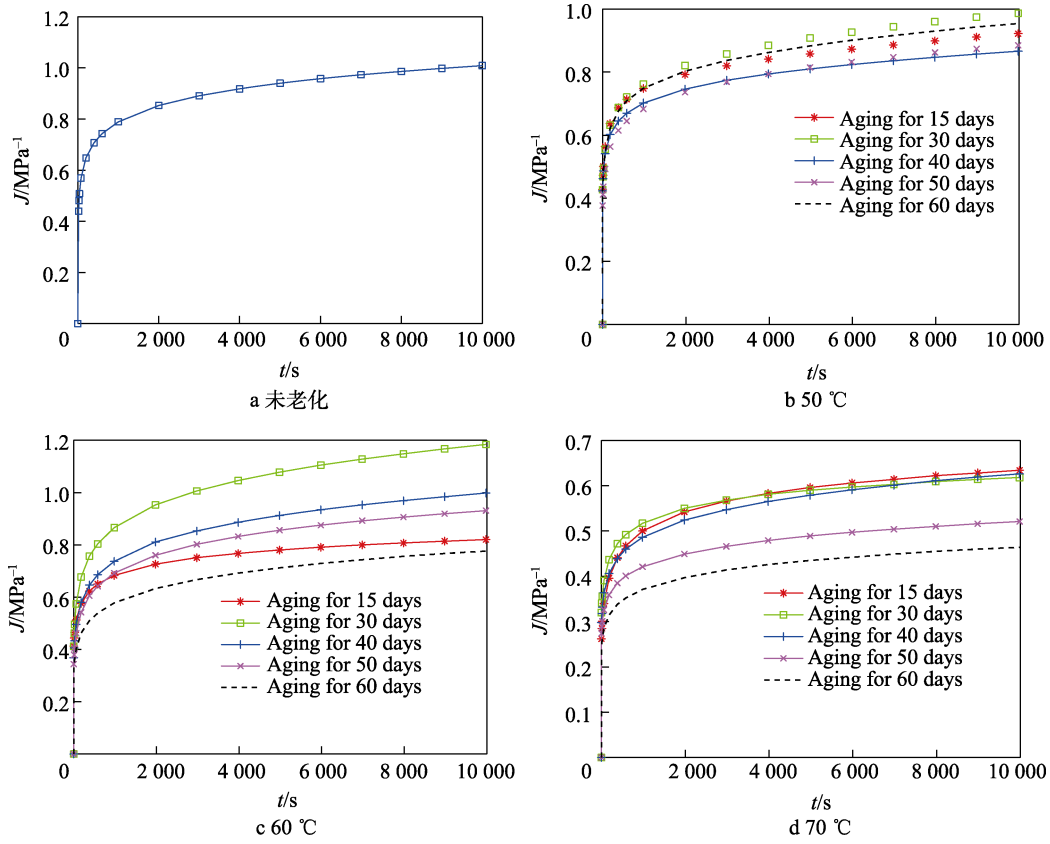


图 9 不同老化时间试样 10 000 s 蠕变试验结果

Fig.9 10 000 s creep test results of different aging times: a) unaged; b) 50 °C; c) 60 °C; d) 70 °C

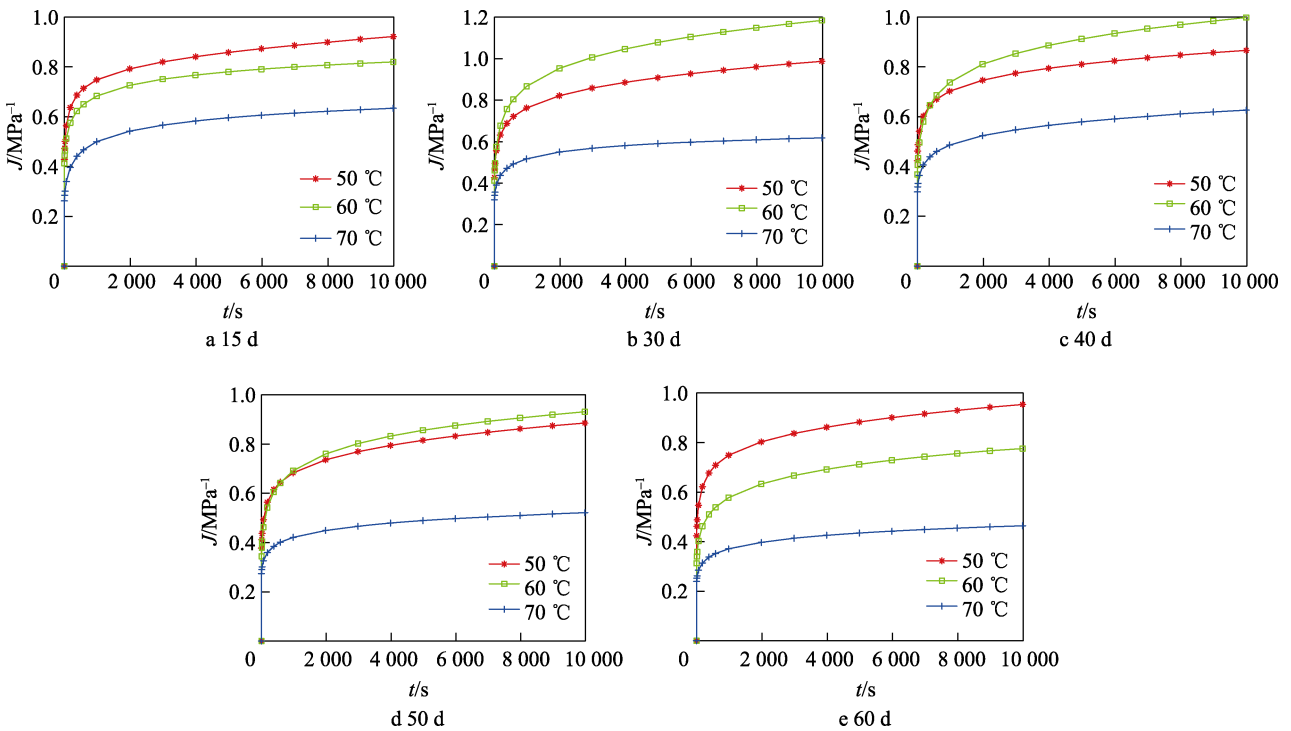


图 10 不同老化温度试样 10 000 s 蠕变试验结果

Fig.10 10 000 s creep test results of different aging temperature

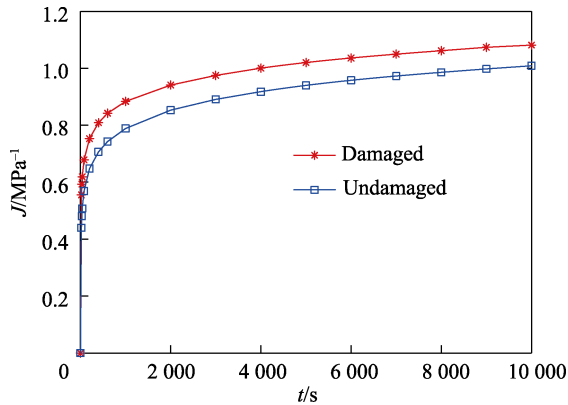


图 11 损伤前后试样 10 000 s 蠕变试验结果
Fig.11 10 000 s creep test results of damaged and undamaged sample

不考虑损伤的试样进行蠕变试验时, 第 10 000 s 的蠕变柔量为 1.009 MPa^{-1} , 受到颠簸损伤后的蠕变柔量为 1.0816 MPa^{-1} 。损伤使得推进剂的蠕变柔量增大, 模量减小, 从而导致蠕变变形增大, 现出了材料的软化。对比图 11 中损伤前后试样的蠕变柔量曲线可以发现, 损伤后, 试样在蠕变的过程中瞬时蠕变变形增大, 初始模量减小, 蠕变柔量曲线变化趋势与损伤前试样一致, 说明颠簸作用对推进剂的初始性能造成了较为明显的影响, 对后续蠕变性能的影响较小。

3 模型参数获取与仿真计算

3.1 模型参数获取与模型构建

1) 蠕变本构模型参数。在 2.2 节中得出了 0.03 MPa 、 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 下的长期蠕变行为预测曲线, 根据式 (2) 对平移得到的长期蠕变柔量数据使用最小二乘法进行拟合, 得到广义 Kelvin 模型中的各参数, 拟合主曲线如图 12 所示。为满足精度要求, 取 $i=7$ 。其拟合相关系数 R 为 0.9714 , 相关性较好。参数如表 4 所示。

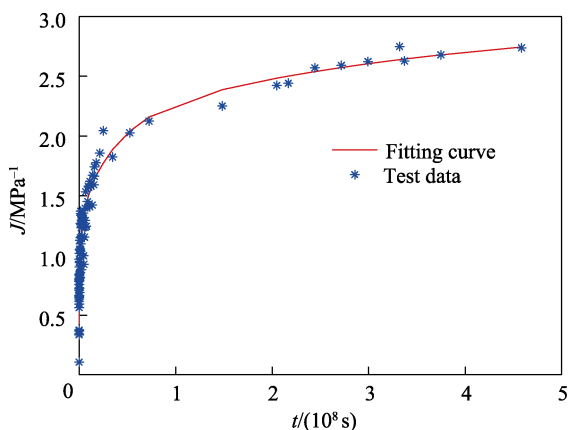


图 12 蠕变模型拟合曲线
Fig.12 Fit curve of creep model

表 4 Kelvin 模型参数
Tab.4 Parameters of Kelvin model

模型阶数	E_i/MPa	θ_i/s
0	3.5338	
1	10.488 0	8 423.727 6
2	7.579 0	5 920.452 6
3	10.572 2	3 519.266 1
4	12.758 9	359 846.435 2
5	10.723 8	359 846.434 9
6	14.816 5	3 597 176.200 0
7	0.502 2	36 000 256.630 0

2) 老化模型参数。根据高温加速老化试验结果, 取 10 000 s 时刻的蠕变柔量作为参考性能, 得到表 5。

表 5 10 000 s 时刻蠕变柔量
Tab.5 Creep compliance at 10 000 s

老化时间 /d	50 $^\circ\text{C}$ 下的蠕变柔量/ MPa^{-1}	60 $^\circ\text{C}$ 下的蠕变柔量/ MPa^{-1}	70 $^\circ\text{C}$ 下的蠕变柔量/ MPa^{-1}
15	0.922	0.820	0.634
30	0.987	1.184	0.618
40	0.866	0.998	0.626
50	0.885	0.931	0.521
60	0.954	0.776	0.464

对表 5 的数据采用最小二乘法拟合, 求出性能变化常数 K , 如表 6 所示。

表 6 不同温度下的 K 值
Tab.6 K value at different temperature

老化温度/ $^\circ\text{C}$	性能变化常数
50	0.002
60	0.001 5
70	0.014 3

再次使用最小二乘法拟合求出 Arrhenius 方程中的参数, 得 $Z = e^{26.6692}$, $E_a = 8.9482 \times 10^4 \text{ J/mol}$ 。考虑其贮存温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$, 得到考虑老化的蠕变本构方程 (老化时间 t 的单位换算成秒):

$$J_2(t) = \left[\frac{1}{E_0} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) \right] \times e^{\frac{-8.0467 \times 10^{-5} t}{473\,040\,000}} \quad (11)$$

3) 损伤模型参数。对试样进行往复拉伸, 模拟 15 a 累计的颠簸损伤。根据损伤试验的结果, 损伤后的试样第 10 000 s 时刻蠕变柔量较不施加人为损伤试样增加了 7.2%, 得到总贮存时间为 473 040 000 s (15 a) 时对应的损伤因子 D_0 为 0.072。把损伤因子代入式 (9) 中, 得到贮存 15 a 的损伤模型:

$$D(t) = 0.072 \frac{t}{473\,040\,000} \quad (12)$$

根据式 (10) 和试验结果, 综合得到贮存 15 a 药柱材料考虑老化和损伤的蠕变本构方程:

$$J(t) = \left[\frac{1}{E_0} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) \right] \times e^{\frac{-8.0467 \times 10^{-5} t}{473040000}} \times \left(1 + \frac{0.072t}{473040000} \right) \quad (13)$$

3.2 仿真计算结果分析

本文以某 HTPB 推进剂发动机为研究对象, 建立发动机三维有限元模型。发动机由推进剂药柱、壳体、绝热层、人工脱黏层组成, 该发动机装药结构采取两段式星孔结构, 药柱前段为圆柱形管状装药, 后端为 6 个槽的星孔装药结构。为了方便观察, 采取 1/2 模型展示, 如图 13 所示。发动机模型长 1.7 m, 最大直径为 0.2 m, 单元数量为 95 148 个, 单元类型为六面体单元。

通过子程序二次开发的方式实现自定义蠕变本构模型在仿真计算中的应用, 使用考虑不同因素的本构模型对固化完成后立式贮存发动机进行数值计算, 使用式 (13) 作为药柱的计算模型。药柱按照黏弹性材料计算, 壳体和绝热层使用弹性模型计算,

材料参数如表 7 所示。为了模拟立式贮存工况, 在发动机底端施加竖向位移约束, 同时设置竖直向下的重力加速度为 9.8 m/s², 贮存时间为 15 a, 计算结果如图 14 所示。

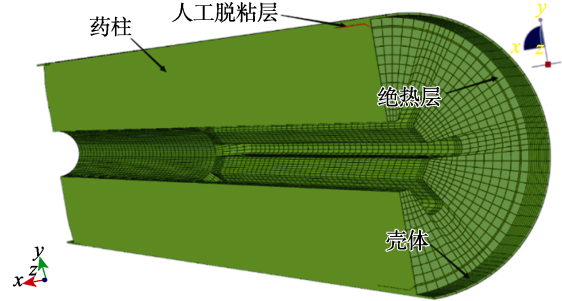


图 13 发动机结构
Fig.13 Sketch map of SRM

表 7 材料参数
Tab.7 Material parameters

部件名称	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模量/ MPa	泊松比	膨胀系数/ (10 ⁻⁵ °C ⁻¹)
壳体	7.81	186 000	0.3	1.1
绝热层	1.76	60	0.493	2.2
药柱	1.76	/	0.498	8.6

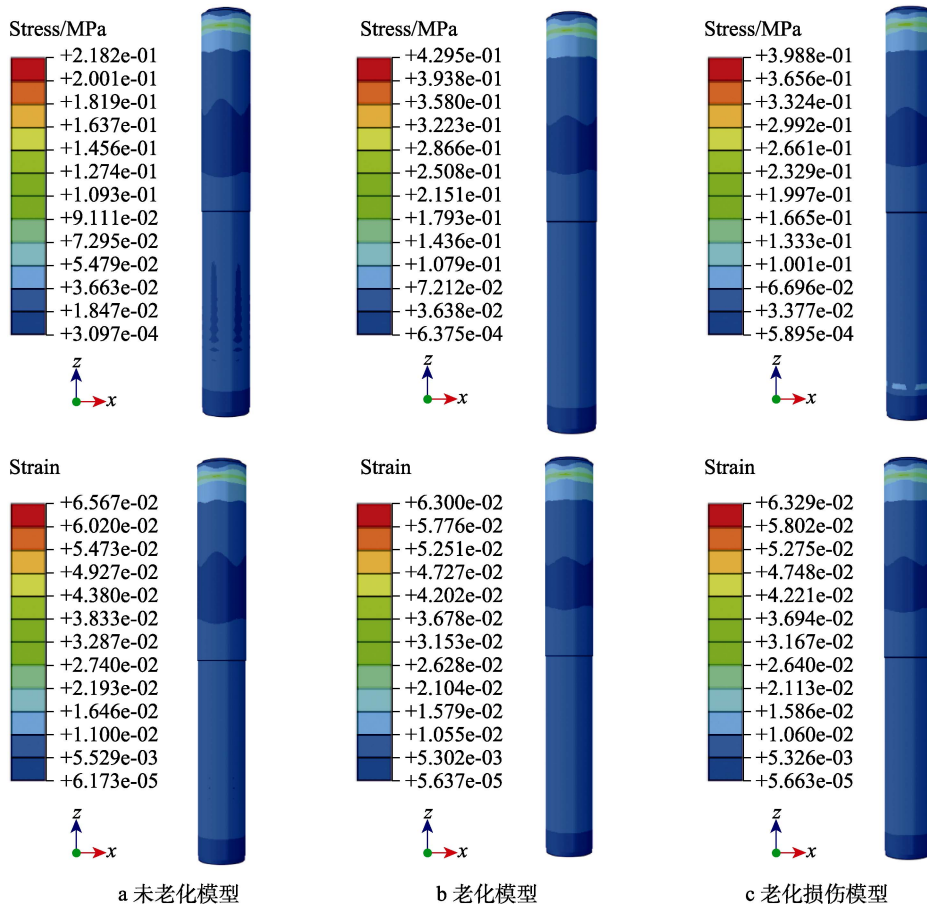


图 14 重力荷载作用下立贮 15 a 药柱仿真计算应力应变云图

Fig.14 Simulations stress and strain diagrams of 15-year vertical storage under the action of gravity: a) unaged model; b) aged model; c) aging damage model

表 8 不同情况下最大等效应力应变
Tab.8 Maximum equivalent strain and stress of
different models

模型	最大等效应力/MPa	最大等效应变/%
未老化	0.218 2	6.567
考虑老化	0.429 5	6.300
考虑老化损伤	0.398 8	6.329

从图 14 和表 8 中可以看出, 考虑老化因素后, 发动机药柱的最大等效应力增大了 96.84%, 最大等效应变减小了 4.07%。在同时考虑老化与损伤因素的情况下, 最大等效应力增加了 82.77%, 最大等效应变减小了 3.62%。从计算结果可以看出, 老化使得推进剂硬化, 导致应力增大, 应变减小, 而损伤使得推进剂软化, 应力减小, 应变增大, 并且老化和损伤对药柱应力的影响大于应变, 但对药柱整体应力应变分布规律的影响较小。

4 结论

1) HTPB 推进剂的蠕变行为受到温度和应力的影响, 二者的增加均能加快推进剂的蠕变进程。根据时间-温度-应力等效原理, 在不考虑贮存过程中推进剂力学性能变化的情况下, 通过短时间的蠕变行为可以预测较长时间的蠕变行为, 提供了一种获得长期蠕变数据的方法, 减少了试验成本。

2) 高温加速老化过程中, 推进剂蠕变柔量先增后减, 氧化交联作用和分子链断裂在老化过程中的占比决定了推进剂老化后的力学性能。前期分子链断裂占主导, 后期氧化交联作用占主导, 且温度越高, 氧化交联作用越明显。颠簸损伤使得推进剂蠕变柔量增加, 初始模量减小, 蠕变变形增大, 并且损伤前后试样蠕变柔量曲线斜率较为接近。颠簸作用主要影响推进剂蠕变的瞬时变形, 对后续过程的影响较小。

3) 对长期立贮发动机的仿真计算结果表明, 在发动机长期贮存的过程中, 老化和损伤因素对药柱的影响不可忽略。该方法在计算过程中充分体现了材料的老硬化和损伤软化, 能够模拟更加贴合实际情况的工况。

参考文献:

[1] 田俊良, 朱祖念, 杜建科, 等. 复合材料壳体发动机推进剂药柱立式贮存应力分析[J]. 固体火箭技术, 2003, 26(4): 34-37.
TIAN J L, ZHU Z N, DU J K, et al. Stress Analysis of Propellant Grain Loaded in Composite Case Motor under Vertical Storage[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2003, 26(4): 34-37.

[2] 王鑫, 赵汝岩, 高鸣, 等. 立式贮存固体火箭发动机装药可靠性及影响因素研究[J]. 推进技术, 2020, 41(8):

1823-1830.

WANG X, ZHAO R Y, GAO M, et al. Reliability and Influencing Factors of Solid Rocket Motor Grain under Vertical Storage[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(8): 1823-1830.

- [3] 雷宁, 闫心怡. 国外大型固体火箭发动机立式贮存老化研究状况[J]. 固体火箭技术, 2019, 42(3): 419-426.
LEI N, YAN X Y. Research on Aging of Large Solid Rocket Motor under Vertical Storage Condition[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2019, 42(3): 419-426.
- [4] 强洪夫, 冯帅星, 杨正伟, 等. 复合固体推进剂蠕变分析研究进展[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(4): 1-5.
QIANG H F, FENG S X, YANG Z W, et al. Research Progress in Creep Properties of Composite Solid Propellant[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(4): 1-5.
- [5] NAMAZIFARD A, HJELMSTAD K, SOFRONIS P, et al. Simulations of Propellant Slumping in the Titan IV SRMU Using Constitutive Models with Damage Evolution[C]// Proceedings of the 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Reston: AIAA, 2005.
- [6] EDMUND F J, WILLIAM L H. Handbook for the Engineering Structural Analysis of Solid Propellants[K]. America: Utah Univ Salt Lake City Coll of Engineering, 1971.
- [7] FIEDLER R, NAMAZIFARD A, CAMPBELL M, et al. Detailed Simulations of Propellant Slumping in the TitanIV SRMU PQM-1[C]// Proceedings of the 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Reston: AIAA, 2006.
- [8] 张旭, 刘向阳, 王士欣, 等. 改性双基推进剂非线性本构模型及其数值实现[J]. 固体火箭技术, 2023, 46(4): 557-564.
ZHANG X, LIU X Y, WANG S X, et al. Nonlinear Constitutive Model and Numerical Implementation of Modified Double-Base Propellant[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2023, 46(4): 557-564.
- [9] 罗一智, 沙宝林, 侯晓. HTPB 推进剂蠕变本构方程研究[J]. 固体火箭技术, 2020, 43(6): 799-807.
LUO Y Z, SHA B L, HOU X. Investigation on Constitutive Equations of HTPB-Based Solid Propellant Grain Creeping[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2020, 43(6): 799-807.
- [10] 陈科, 任全彬, 程吉明, 等. HTPB 推进剂装药发动机立式贮存结构响应分析[J]. 西北工业大学学报, 2022, 40(1): 56-61.
CHEN K, REN Q B, CHENG J M, et al. Structural Response Analysis of a Solid Rocket Motor with HTPB Propellant Grain under Vertical Storage Condition[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2022, 40(1): 56-61.
- [11] 肖旭, 彭松, 李军, 等. HTPE 推进剂的老化性能研究[J]. 固体火箭技术, 2019, 42(3): 414-418.

- XIAO X, PENG S, LI J, et al. Ageing Properties of HTPE Propellant[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2019, 42(3): 414-418.
- [12] 王鑫, 赵汝岩, 卢洪义, 等. 基于加速老化和实测载荷的立式贮存固体发动机药柱寿命评估[J]. *兵工学报*, 2019, 40(11): 2212-2219.
- WANG X, ZHAO R Y, LU H Y, et al. Service Life Prediction of Solid Motor during Vertical Storage Based on Accelerated Aging and Actual Loadings[J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(11): 2212-2219.
- [13] 邢耀国, 马银民, 董可海, 等. 用长期贮存定期检测法预测药柱使用寿命[J]. *推进技术*, 1999, 20(5): 39-43.
- XING Y G, MA Y M, DONG K H, et al. Prediction of Service Life of Storage Grain Using Periodical Check Method[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1999, 20(5): 39-43.
- [14] 吴勋, 任宁莉, 冯翔, 等. 固体发动机典型环境载荷分析[J]. *装备环境工程*, 2010, 7(6): 103-105.
- WU X, REN N L, FENG X, et al. Analysis of Typical Environmental Load of Solid Rocket Motor[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2010, 7(6): 103-105.
- [15] 李松年, 刘勇, 王罗新, 等. HTPB 推进剂储存老化性能试验研究[J]. *推进技术*, 2006, 27(5): 473-476.
- LI S N, LIU Y, WANG L X, et al. Test Study on Storage Aging Properties of HTPB Propellants[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2006, 27(5): 473-476.
- [16] 郭子涵. HTPB 固体推进剂的老化性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- GUO Z H. Study on Aging Properties of HTPB Solid Propellant[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [17] 王永帅, 董可海, 张波, 等. 舰载导弹发动机药柱蠕变损伤研究[J]. *兵工自动化*, 2017, 36(6): 80-84.
- WANG Y S, DONG K H, ZHANG B, et al. A Study on Creep Damage of a Shipborne Missile Motor Grain[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2017, 36(6): 80-84.
- [18] 王贵军, 吴艳青, 侯晓, 等. 基于细观结构的复合固体推进剂含损伤黏弹性本构模型[J]. *兵工学报*, 2023, 44(12): 3696-3706.
- WANG G J, WU Y Q, HOU X, et al. Research on the Viscoelastic Constitutive Model of Composite Solid Propellant Containing Damage Based on Mesosstructure[J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(12): 3696-3706.
- [19] 罗文波, 杨挺青, 安群力. 非线性粘弹体的时间-温度-应力等效原理及其应用[J]. *固体力学学报*, 2001, 22(3): 219-224.
- LUO W B, YANG T Q, AN Q L. time-Temperature-Stress Equivalence and Its Application to Nonlinear Viscoelastic Materials[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2001, 22(3): 219-224.
- [20] 曹翌军, 黄卫东, 李金飞. HTPB 推进剂非线性粘弹特性的时温等效研究[J]. *推进技术*, 2018, 39(7): 1643-1649.
- CAO Y J, HUANG W D, LI J F. Time-Temperature Equivalent Research of Nonlinear Viscoelastic Properties of HTPB Propellant[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(7): 1643-1649.
- [21] 王初红. PMMA 的物理老化与长期蠕变性能加速表征[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2017.
- WANG C H. Accelerated Characterization of Physical Aging and Long-Term Creep Properties of PMMA[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2017.
- [22] 马燕, 刘秀, 罗利, 等. 双轴拉伸下高聚物的时间-应力等效原理试验研究[J]. *材料导报*, 2019, 33(24): 4188-4192.
- MA Y, LIU X, LUO L, et al. Time-Stress Superposition Principle of Polymers under Biaxial Tension: Experimental Study[J]. *Materials Reports*, 2019, 33(24): 4188-4192.
- [23] 曲国庆, 江劲勇, 路桂娥, 等. 某固体推进剂热加速老化试验与贮存寿命预估[J]. *化工新型材料*, 2018, 46(11): 249-251.
- QU G Q, JIANG J Y, LU G E, et al. Thermal Accelerated Aging and Storage Life Prediction of a Solid Propellant[J]. *New Chemical Materials*, 2018, 46(11): 249-251.
- [24] 池旭辉, 彭松, 赵程远, 等. 复合固体推进剂高温加速试验理论与方法(1)——Arrhenius 方程的适用性[J]. *含能材料*, 2022, 30(8): 853-860.
- CHI X H, PENG S, ZHAO C Y, et al. Theories and Methodology of High Temperature Accelerated Test for Composite Solid Propellants(I): The Applicability of Arrhenius Equation[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2022, 30(8): 853-860.
- [25] 吴轩, 郑健, 许进升, 等. HTPB 固体推进剂蠕变损伤模型研究[J]. *火炸药学报*, 2023, 46(3): 260-265.
- WU X, ZHENG J, XU J S, et al. Research on Creep Damage Model of HTPB Solid Propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2023, 46(3): 260-265.