

HTPB 推进剂拉压不对称黏弹塑性本构模型

邓旷威^{1,2}, 李海阳^{1,2}, 申志彬^{1,2*}

(1. 国防科技大学 空天科学学院, 湖南 长沙 410073; 2. 空天任务智能规划与仿真湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要:为了研究 HTPB 推进剂拉伸、压缩蠕变变化规律,设计并分别开展了 1 000 s 拉伸、1 000 s 压缩与 28 d 拉伸蠕变试验;同时,引入圣维南体与拉压不对称因子,建立了考虑拉压不对称的推进剂黏弹塑性本构模型;通过拟合与分析本构方程中的参数,得到了该方程的适用范围。结果表明:推进剂蠕变变形行为受应力水平影响较大;同一应力水平下,拉伸蠕变的黏弹性变形大小约为压缩蠕变的 1.62 倍;压缩屈服应力为拉伸屈服应力的 3.82 倍。因此,拉压不对称黏弹塑性本构模型可以较好地表征低应力水平下推进剂蠕变的响应行为。所得结论和研究方法为固体发动机结构完整性分析与贮存寿命评估提供了参考依据。

关键词:HTPB 推进剂;蠕变;拉压不对称;本构模型;黏弹塑性

中图分类号:V435 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2025)01-051-08



Tension-compression asymmetric viscoelastic plastic constitutive model of HTPB propellant

DENG Kuangwei^{1,2}, LI Haiyang^{1,2}, SHEN Zhibin^{1,2*}

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Hunan Key Laboratory of Intelligent Planning and Simulation for Aerospace Missions, Changsha 410073, China)

Abstract: Tensile and compressive creep behavior of propellants in solid motors due to the influence of the gravity and long-term storage might affect the interior ballistics and structural integrity. In order to investigate the change trends of tensile and compressive creep for HTPB propellant, the 1 000 s tensile, 1 000 s compression and 28 d tensile creep tests were designed and carried out in this work. Meanwhile, the Saint-Venant body and the compressive-tensile asymmetry factor were introduced to establish a propellant viscoelastic plastic constitutive model that takes into account compressive-tensile asymmetry. The range of application of this equation was obtained by fitting and analyzing the parameters in the constitutive equation. The results indicate that the compressive creep process of propellant was mainly dependent on stress level. At the same stress level, viscoelastic deformation of tensile creep is about 1.62 times that of compressive creep, while compressive yield stress is 3.82 times that of tensile yield stress. The tension-compression asymmetric viscoelastic plastic constitutive model can well characterize the tensile-compression creep response of propellants at the lower stress levels. The conclusions and research method in this work can provide reference for structural integrity analysis and storage life evaluation of solid motor.

Keywords: HTPB propellant; creep; tension-compression asymmetric; constitutive model; viscoelastic plasticity

固体发动机在现代武器和航天运载领域具有广泛的应用^[1],其生命周期中绝大部分时间处于贮存状态^[2]。在重力作用下,长期蠕变将会对大型立式贮存固体发动机推进剂药柱造成累积损伤,产生不可恢复的塑性变形,严重影响固体发动机贮存寿命。

有限元计算方法因其成本低、计算速度快以及

在非线性问题求解方面的优势,已发展为固体发动机结构完整性分析的一种有效选择^[3-4],而本构模型是有限元计算的核心和关键。因此,研究推进剂长期蠕变特性,建立蠕变本构模型对长期贮存发动机装药结构完整性分析具有重要意义^[5]。

众多学者结合试验结果,建立了黏弹性材料的蠕变本构模型。徐卫亚等^[6]基于绿片岩三轴流变

收稿日期:2022-06-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11872372);湖南省杰出青年基金资助项目(2021JJ10046)

第一作者:邓旷威(1995—),男,四川资阳人,博士研究生,E-mail:kuangweideng@126.com

*通信作者:申志彬(1983—),男,河南鹤壁人,教授,博士,博士生导师,E-mail:zb_shen@yeah.net

引用格式:邓旷威,李海阳,申志彬. HTPB 推进剂拉压不对称黏弹塑性本构模型[J]. 国防科技大学学报, 2025, 47(1): 51-58.

Citation: DENG K W, LI H Y, SHEN Z B. Tension-compression asymmetric viscoelastic plastic constitutive model of HTPB propellant[J].

Journal of National University of Defense Technology, 2025, 47(1): 51-58.

试验,建立了岩石的非线性黏弹塑性流变模型。张亮亮等^[7]通过建立黏塑性体,描述了石灰岩的加载、卸载蠕变规律。Cui 等^[8]提出了适用于加压固化技术的时变分段式固体推进剂本构方程,并基于有限元软件 ABAQUS 用户子程序 UMAT 进行了软件二次开发。张继业等^[9]基于围压测试系统,获得了 N15 固体推进剂在不同围压下的力学性能,根据弹性-黏弹性对应原理,建立了考虑围压效应的 N15 推进剂本构模型。Lei 等^[10]基于黏弹性的遗传积分公式中的两个应力相关非线性函数,建立了一种非线性黏弹性本构模型以描述循环载荷作用下端羟基聚丁二烯(hydroxyl-terminated polybutadiene, HTPB)推进剂的力学行为。王鸿丽等^[11]推导出了改性双基推进剂黏弹-黏塑性本构模型,并利用不同应力水平、不同加载时间蠕变-回复试验,获得了模型的黏塑性参数。王鑫等^[12]开展了往复应力循环加载试验,验证了砝码加载可用于复合固体推进剂蠕变研究。

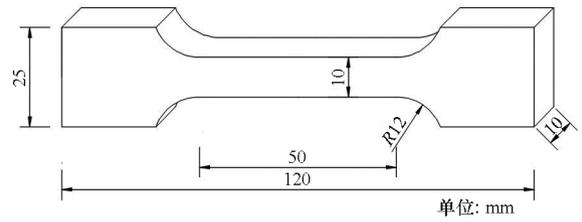
以上研究主要针对推进剂单向拉伸条件下的短期蠕变特性。由于固体发动机长期卧式贮存以及可能存在“翻转”,且存在重力作用,发动机推进剂将承受着拉-压循环荷载。Ren 等^[13]设计了推进剂压缩试件尺寸,开展了不同应变条件下推进剂拉伸、压缩对比试验,发现压缩模量明显大于拉伸模量。橡胶等黏弹性材料的拉压不对称性研究已取得较多成果^[14-15],但推进剂的拉压不对称蠕变本构方程还未见诸报道。

为了获取推进剂拉伸、压缩蠕变特性,本文基于万能试验机与自制机械式加载蠕变试验装置开展了推进剂拉伸、压缩蠕变试验,分析了推进剂蠕变曲线特征,用弹簧、黏壶与圣维南体组合出八元件黏弹塑性本构模型。结合试验结果,对本构模型进行了优化,拟合出了适合推进剂黏弹塑性本构模型的各个参数,定量地表征了推进剂拉伸-压缩蠕变特性。

1 推进剂蠕变试验

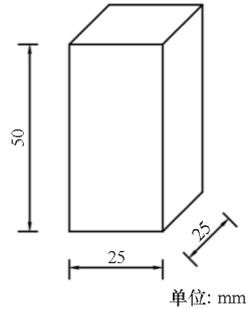
试验采用 HTPB 复合固体推进剂,其主要由氧化剂(高氯酸铵)、燃烧剂(铝粉)、黏合剂(HTPB)及添加剂组成。根据 GJB 770B—2005《火药试验方法》,将推进剂拉伸试样制成标准哑铃形。在 20 ℃ 室温、100 mm/min 拉伸速率下,该推进剂初始模量为 4.37 MPa、泊松比为 0.498、最大抗拉强度为 0.61 MPa、最大拉伸伸长率为 49.1%。考虑稳定性和圣维南效应,本次试验采用尺寸为 50 mm × 25 mm × 25 mm 的长方体试样。

推进剂试样具体示意图如图 1 所示。



(a) 拉伸试样示意图

(a) Schematic diagram of tensile test specimen



(b) 压缩试样示意图

(b) Schematic diagram of compression specimen

图 1 推进剂试样几何形状与尺寸

Fig. 1 Geometry and dimensions of propellant specimen

1.1 试验方案设计

为了研究推进剂的蠕变行为,于电子万能试验机上开展 1 000 s 拉伸、1 000 s 压缩蠕变试验;于自制机械式拉伸蠕变装置上开展 28 d 拉伸蠕变试验,于第 28 d 卸载。每组试验均采用近 3 组平行试样。

试验均在室温 20 ℃ 条件下开展。结合最大抗拉强度,考虑推进剂的拉压不对称性,确定了试验应力水平取值,详见表 1。

表 1 蠕变试验应力水平

Tab. 1 Creep testing stress level

试验类型	应力水平/MPa
1 000 s 拉伸	0.05, 0.10, 0.15
1 000 s 压缩	0.25, 0.40, 0.70
28 d 拉伸	0.05, 0.10

1.2 试验装置设计

在电子万能试验机上开展长时间试验,试验机传感和控制系统受环境因素影响较大,且单次试验样本量较少。因此,设计了机械式拉伸蠕变试验装置以开展推进剂 28 d 长期拉伸蠕变试验。该装置主要由上下夹具、砝码、观测系统组成,如图 2(a)所示。

试验采用砝码加载,由试样横截面积确定加载砝码重量。利用与推进剂初始模量接近的有机硅密封胶,将精度为 5×10^{-5} mm 的晶体网格板黏接于推进剂试样中部,作为参照物。

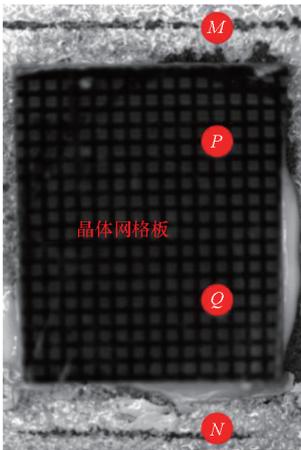
观测系统主要包括工业相机与图像处理软件。由工业相机拍摄照片,选定特征点,通过图像处理软件计算特征点之间的像素点个数,得到特征点之间的距离,进而获取试样的应变。

$$d_{MN} = 5 \times 10^{-5} \frac{n_{MN}}{n_{PQ}} N_{PQ} \quad (1)$$

式中: d_{MN} 为 MN 的距离, n_{MN} 为 MN 之间的像素点个数, n_{PQ} 为 PQ 之间的像素点个数, N_{PQ} 为 PQ 之间的网格数量。 M 、 N 、 P 、 Q 点的大致位置如图 2(b) 所示。



(a) 装置图
(a) Device diagram



(b) 观测区域
(b) Observation area

图 2 机械式拉伸蠕变试验装置

Fig. 2 Mechanical tensile creep test device

2 试验结果及分析

2.1 拉伸蠕变试验结果

三种应力水平下,1 000 s 拉伸蠕变应变 ε 随时间 t 的变化规律如图 3 所示。

由图 3 可见,在 0.05 MPa、0.10 MPa 与

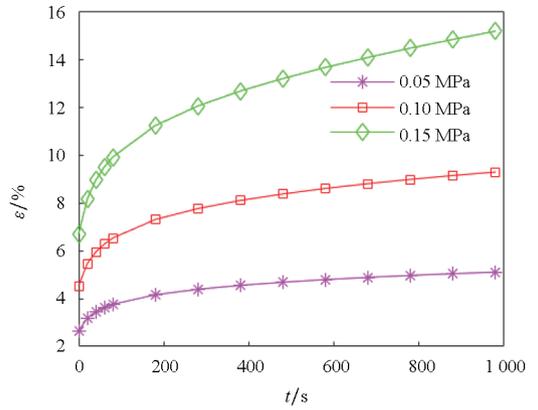


图 3 1 000 s 拉伸蠕变应变 - 时间图

Fig. 3 1 000 s tensile creep strain versus time diagram

0.15 MPa 应力水平下,应变 - 时间曲线变化趋势基本一致;且 0.05 MPa 与 0.10 MPa 曲线基本成比例,满足叠加原理,推进剂具有线黏弹性。0.15 MPa 曲线的初始应变与第 1 000 s 时的应变均为 0.05 MPa 曲线的 3 倍,推进剂发生了明显塑性变形。

应变曲线主要由两个阶段组成:0 s 时刻的瞬时弹性变形阶段,反映试样加载后的弹性响应;0 s 时刻后的衰减蠕变变形阶段,此阶段应变随时间增加,应变率随时间逐渐减小,反映试样加载后的黏弹性响应。

两种应力水平下,28 d 拉伸蠕变应变随时间的变化规律如图 4 所示。

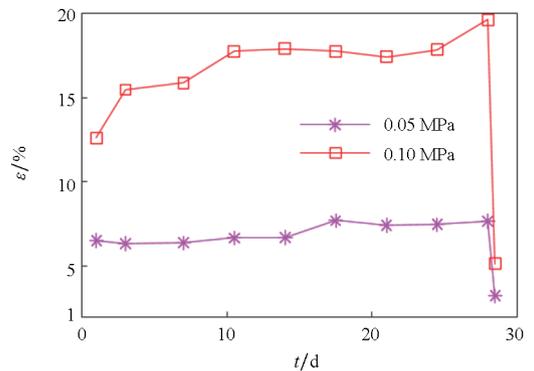


图 4 28 d 拉伸蠕变应变 - 时间图

Fig. 4 28 d tensile creep strain versus time diagram

由图 4 可见,在 0.05 MPa 与 0.10 MPa 应力水平下,长期蠕变的应变 - 时间变化曲线趋势存在一定的差异,应变曲线已不满足叠加原理。卸载后,存在明显的应变恢复现象。

0.05 MPa 应力水平下,试样应变增长趋势已趋于稳定,加载 28 d 期间,应变由 6.53% 增长至 7.68%。卸载 0.5 d 后,应变恢复至 3.23%,反映试样长时间蠕变后不可恢复的黏性变形。

0.10 MPa 应力水平下,第 1 至第 10.5 d 期

间,试样尚处于衰减蠕变变形阶段,应变增长明显,由 12.61% 增长至 17.76%;第 10.5 ~ 28 d 期间,应变稳定增长至 19.62%。第 28 d, 0.10 MPa 应力水平下应变为 0.05 MPa 应力水平下应变的 2.55 倍,蠕变变形与应力的相关性明显。

2.2 压缩蠕变试验结果

三种应力水平下,1 000 s 压缩蠕变应变随时间的变化规律如图 5 所示。

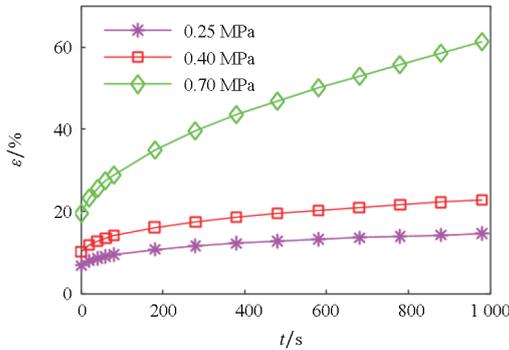


图 5 1 000 s 压缩蠕变应变 - 时间图
Fig. 5 1 000 s compression creep strain versus time diagram

由图 5 可见,在 0.25 MPa 与 0.40 MPa 应力水平下,应变 - 时间曲线变化趋势基本一致,推进剂具有线黏弹性。

在 0.70 MPa 应力水平下,0 s 时刻已产生较大的瞬时应变,为 19.61%;0 ~ 280 s 为衰减蠕变变形阶段,应变增加至 21.85%;280 s 后,进入稳态蠕变阶段,试样应变与时间关系接近线性函数,应变率稳定在 $3.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$,应变最终增加至 61.23%,其蠕变柔量明显大于其他两种应力水平。

压缩蠕变试验期间,推进剂受压后逐渐密实,颗粒间接触、挤压,抵抗变形能力增加,强度得到了一定的提升。当应力较大时,变形量增加迅速,应变率稳定于较大数值。试验期间,应变过大,试样横向变形严重,甚至出现扭曲;内部结构发生改变,推进剂出现不可逆损伤,抵抗变形能力下降,蠕变柔量上升,最终将导致宏观裂纹。

3 本构建模

按照应变与时间的相关性,将应变分为与时间无关的瞬时应变 ε^m 和与时间相关的黏性应变 ε^v ;其中,瞬时应变又可以分为瞬时弹性应变 ε^e 与瞬时塑性应变 ε^p ,即

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^v \quad (2)$$

根据 Boltzmann 叠加原理和基于元件组合的机械模型发展而来的单积分型本构模型,因其结构简单、物理意义明确、易于应用等优点,在推进剂装药结构完整性分析中得到了国内外研究者的广泛关注^[16]。采用弹簧元件、黏壶元件和塑性元件三种基础元件及其推广后的广义元件进行不同组合以构建推进剂黏弹塑性本构模型。

3.1 瞬时应变模型

瞬时弹性应变 ε^e 采用弹簧元件描述,其本构方程为:

$$\varepsilon^e = \frac{\sigma}{E^e} \quad (3)$$

式中, σ 为应力, E^e 为弹簧弹性模量。

瞬时塑性应变 ε^p 采用塑性元件与线弹簧并联的塑性弹簧模型描述。塑性元件采用圣维南体,它的流变模型是由一块底面为平面的重物 and 放置重物的平面组成的。当作用力 F 大于重物与平面之间的静摩擦力 μN 时,重物则以匀速运动。即当剪切应力作用于理想塑性固体时,剪切应力增大达到屈服应力后此固体产生塑性流动。其流变模型如图 6 所示。

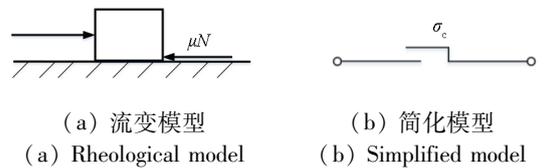


图 6 圣维南体模型图
Fig. 6 Saint Venant model diagram

其对应的流变函数为:

$$H(\sigma - \sigma_c) = \begin{cases} 0 & \sigma \leq \sigma_c \\ \sigma - \sigma_c & \sigma > \sigma_c \end{cases} \quad (4)$$

圣维南体多与其他流变模型进行串并联以描述材料塑性。塑性弹簧模型如图 7 所示。

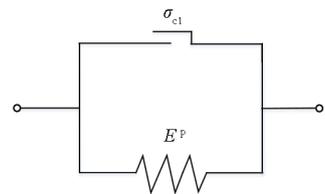


图 7 塑性弹簧模型

Fig. 7 Plastic spring model

可以得到塑性弹簧本构方程为:

$$\varepsilon^p = \frac{H(\sigma - \sigma_{cl})}{E^p} \quad (5)$$

式中, σ_{cl} 为屈服应力, E^p 为塑性弹簧模量。

3.2 黏性应变模型

黏性应变 ε^v 采用黏壶元件与 Kelvin 模型串联而成的三参量模型描述,如图 8 所示。

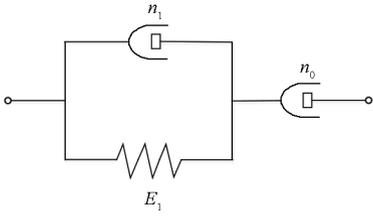


图 8 三参量模型

Fig. 8 Three-parameter model

其本构方程为:

$$\varepsilon^v = \frac{\sigma}{E_1} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + \frac{\sigma}{\eta_0} t \quad (6)$$

式中: η_0, η_1 为黏壶黏性系数; E_1 为塑性弹簧模量; τ 为 Kelvin 模型的松弛系数, 其值为 η_1/E_1 。

3.3 黏弹塑性模型

结合第 2 节分析结果, 可以发现, 推进剂蠕变过程有如下 3 个特征:

- 1) 在施加较小应力后, 推进剂产生可以线性叠加的瞬时变形; 其本构模型中应串联弹簧元件。
- 2) 当应力较大时 (详见图 4、图 5), 卸载后推进剂有不可恢复的永久变形, 且应力应变关系呈现明显非线性; 其本构模型中应串联塑性弹簧模型。

3) 推进剂定应力加载有蠕变现象。衰减蠕变阶段应变率随时间减小, 其本构模型中应串联

Kelvin 模型; 稳态蠕变阶段应变率基本稳定, 其本构模型中应串联黏壶元件。

朱-王-唐模型^[17]采用了两个 Maxwell 模型, 分别反映高、低两种应变率加载条件下的松弛响应; 推进剂在短期蠕变与长期蠕变过程中, 均存在衰减蠕变阶段。因此, 采用两个 Kelvin 模型, 分别反映短期、长期两种蠕变响应。

结合蠕变过程特征, 初步采用一个弹簧元件、一个塑性弹簧模型、一个黏壶元件与两个 Kelvin 模型串联而成的八元件八参数模型表征推进剂黏弹塑性, 其模型如图 9 所示。当加载应力小于屈服应力时, 该模型退化为广义 Kelvin 模型。

其本构方程为:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E^e} + \frac{H(\sigma - \sigma_{cl})}{E^p} + \frac{\sigma}{E_1} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) + \frac{\sigma}{E_2} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}) + \frac{\sigma}{\eta_0} t \quad (7)$$

加载 t_1 后卸载, 其弹性变形立即恢复, 部分黏性变形随时间增长恢复; 塑性变形与剩余部分黏性变形不可恢复。其卸载后应变为:

$$\varepsilon = \frac{H(\sigma - \sigma_{cl})}{E^p} + \frac{\sigma}{\eta_0} t_1 + \frac{\sigma}{E_1} (1 - e^{-\frac{t_1}{\tau_1}}) e^{-\frac{t-t_1}{\tau_1}} + \frac{\sigma}{E_2} (1 - e^{-\frac{t_1}{\tau_2}}) e^{-\frac{t-t_1}{\tau_2}} \quad (8)$$

式中, t_1 为卸载时间。

当 $t \rightarrow \infty$ 时, 其永久应变为:

$$\varepsilon(\infty) = \frac{H(\sigma - \sigma_{cl})}{E^p} + \frac{\sigma}{\eta_0} t_1 \quad (9)$$

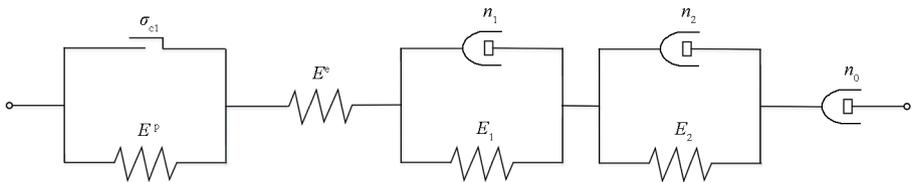


图 9 八元件模型

Fig. 9 Eight-component model

3.4 本构模型参数拟合

恒定应力加载与卸载工况下, 该本构模型的蠕变与蠕变恢复曲线如图 10 所示。

由图 10 分析可得到该本构模型的八个参数值。由卸载瞬间变形恢复量 CD , 可得到弹簧元件参数 E^e ; 在两种不同较大应力加载工况下, 对比分析加载瞬间的变形量 OA 可得到塑性弹簧模型

参数 σ_{cl} 与 E^p ; 由短期与长期不同工况下的 AC 段曲线, 可以拟合得到其余五个黏弹性参数。

结合第 2 节中拉伸、压缩蠕变试验结果图, 开展该本构模型的参数拟合。在短期蠕变期间, 由于长期蠕变黏壶黏性较大, 其变形趋近于零, 不考虑其变形。

采用 MATLAB 的曲线拟合工具, 自定义函数类型拟合函数。拟合得到短期本构方程:

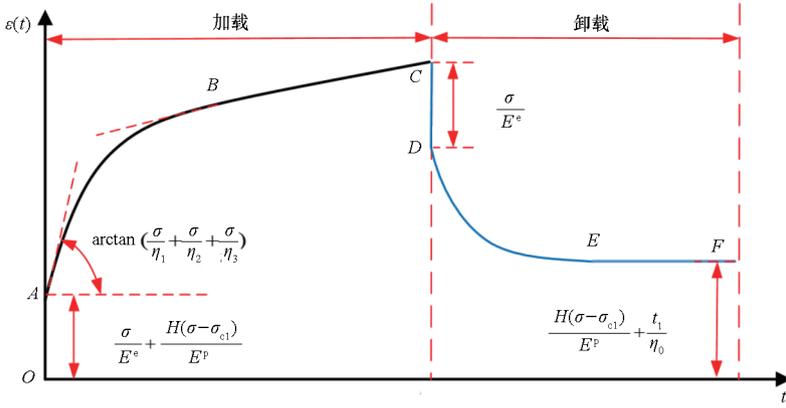


图 10 恒定应力加载与卸载蠕变变形图

Fig. 10 Creep deformation diagram of constant stress loading and unloading

$$\varepsilon_{\text{拉伸}} = \frac{\sigma}{2.41} + \frac{H(\sigma - 0.085)}{58.98} + \frac{\sigma}{3.19} (1 - e^{-\frac{t}{49}}) + \frac{\sigma}{3\ 881} t \quad (10)$$

$$\varepsilon_{\text{压缩}} = \frac{\sigma}{4.1} + \frac{H(\sigma - 0.325)}{14.91} + \frac{\sigma}{5.1} (1 - e^{-\frac{t}{683\ 000}}) + \frac{\sigma}{6\ 068} t \quad (11)$$

结合短期蠕变本构,拟合得到长期拉伸蠕变本构方程:

$$\varepsilon_{\text{拉伸}} = \frac{\sigma}{2.41} + \frac{H(\sigma - 0.085)}{58.98} + \frac{\sigma}{3.19} (1 - e^{-\frac{t}{49}}) + \frac{\sigma}{0.88} (1 - e^{-\frac{t}{6.83 \times 10^5}}) + \frac{\sigma}{7.20 \times 10^7} t \quad (12)$$

由拟合结果可见,推进剂蠕变呈明显拉压异性。黏弹性部分各个元件参数近似成比例,压缩工况下的弹性模量与黏性系数均约为拉伸工况下的 1.62 倍,可定义拉压不对称因子 α 以统一本构方程中黏弹性部分。

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{拉伸} \\ 0.617 & \text{压缩} \end{cases} \quad (13)$$

塑性部分压缩屈服应力为 0.325 MPa,远大于拉伸屈服应力 0.085 MPa。

长期蠕变与短期蠕变中串联黏壶黏性系数差距较大,该黏壶元件反映了推进剂变形随时间持续、稳定增长现象。若黏性系数不变,即使在很小的应力水平下,推进剂也将在长时间蠕变后被破坏,与实际情况不符。因此,将串联黏壶修改为广义黏壶,其黏性系数随时间增大,即

$$\eta(t) = \eta_0 + at^b \quad (14)$$

式中: a 、 b 、 η_0 为广义黏壶参数,拟合结果分别为 0.041 3 MPa、1.519、 3.1×10^3 MPa·s。

进而可以得到拉压统一的本构方程:

$$\varepsilon_{\text{拉伸}} = \alpha \left[\frac{\sigma}{3.19} (1 - e^{-\frac{t}{49}}) + \frac{\sigma}{0.88} (1 - e^{-\frac{t}{6.83 \times 10^5}}) + \frac{\sigma}{2.41} \right] +$$

$$\frac{\sigma}{3.1 \times 10^3 + 0.041\ 3t^{1.519}} + \varepsilon^p \quad (15)$$

$$\varepsilon^p = \begin{cases} \frac{H(\sigma - 0.085)}{58.98} & \text{拉伸} \\ \frac{H(\sigma - 0.325)}{14.91} & \text{压缩} \end{cases} \quad (16)$$

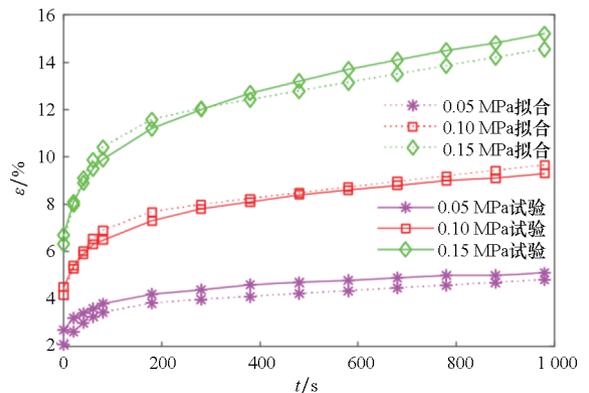
其参数拟合结果如表 2 所示。

表 2 本构参数拟合结果

Tab. 2 Results of constitutive parameter fitting

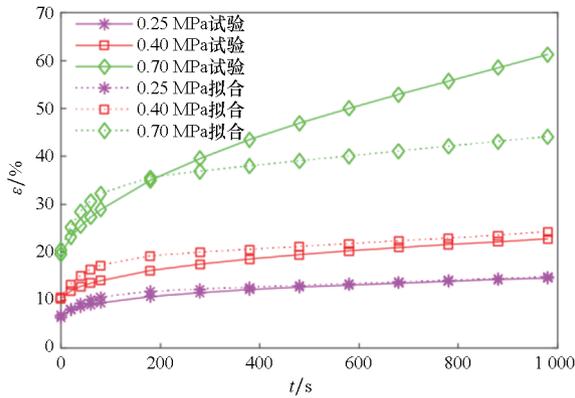
本构参数	拟合结果	本构参数	拟合结果
α	0.617	E^e /MPa	2.41
E^p (拉)/MPa	58.98	σ_{cl} (拉)/MPa	0.085
E^p (压)/MPa	14.91	σ_{cl} (压)/MPa	0.325
E_1 /MPa	3.19	τ_1 /s	49
E_2 /MPa	0.88	τ_2 /s	683 000
a /MPa	0.0413	b	1.519
η_0 /(MPa·s)	3 100		

将试验结果与拟合结果对比,如图 11 所示。



(a) 拉伸工况

(a) Tensile condition



(b) 压缩工况
(b) Compression condition

图 11 试验结果 - 拟合结果对比图

Fig. 11 Comparison diagram of test results and fitting results

由图 11 可以看出,拉压统一的本构方程可以较好地表征较低应力水平下的短期与长期蠕变响应。0.70 MPa 应力水平下,压缩蠕变应变过大,达到了 61.23%,推进剂出现了明显损伤,细观结构发生变化,导致蠕变特征与其他工况差距较大。后续研究可以引入损伤参数,以更精细化表征其蠕变规律。

4 结论

1) 蠕变的应力相关性明显。过大的应力会导致推进剂出现损伤,导致蠕变变形加剧,其蠕变规律发生变化;较小的应力下蠕变会趋于稳定。

2) 推进剂的抗压缩蠕变能力远大于抗拉伸蠕变能力。压缩蠕变使推进剂逐渐密实,颗粒间接触、挤压明显,模量逐渐提升,压缩屈服应力为拉伸屈服应力的 3.82 倍。

3) 采用圣维南体描述塑性变形,定义拉压不对称因子,引入广义黏壶,建立了拉压不对称的黏弹塑性本构模型。在较低应力水平下,该本构模型可以较好地表征推进剂蠕变响应。

参考文献 (References)

[1] 邢耀国,熊华,李高春. 固体火箭发动机健康监测技术的发展和应用[J]. 海军航空工程学院学报, 2008, 23(6): 601-605.
XING Y G, XIONG H, LI G C. Progress and application of the health monitoring technology for solid rocket motor[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2008, 23(6): 601-605. (in Chinese)

[2] WANG Z J, QIANG H F, WANG T J, et al. A thermovisco-hyperelastic constitutive model of HTPB propellant with

damage at intermediate strain rates[J]. Mechanics of Time-Dependent Materials, 2018, 22(3): 291-314.

[3] 唐国金,申志彬,田四朋,等. 固体火箭发动机药柱概率贮存寿命预估[J]. 兵工学报, 2012, 33(3): 301-306.
TANG G J, SHEN Z B, TIAN S P, et al. Probabilistic storage life prediction of solid rocket motor grain[J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(3): 301-306. (in Chinese)

[4] 龚建良,金秉宁,龚婉军,等. 点火载荷下翼柱型装药结构完整性数值分析[J]. 国防科技大学学报, 2022, 44(1): 108-113.
GONG J L, JIN B N, GONG W J, et al. Numerical analysis on structural integrity of finocyl grain under ignition loading[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2022, 44(1): 108-113. (in Chinese)

[5] 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. (in Chinese)

[6] 徐卫亚,杨圣奇,谢守益,等. 绿片岩三轴流变力学特性的研究(II): 模型分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(5): 693-698.
XU W Y, YANG S Q, XIE S Y, et al. Investigation on triaxial rheological mechanical properties of greenschist specimen (II): model analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(5): 693-698. (in Chinese)

[7] 张亮亮,王晓健. 考虑黏弹塑性应变分离的岩石复合蠕变模型研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(5): 1655-1665.
ZHANG L L, WANG X J. Study on composite creep model of rock considering viscoelastic plastic strain separation [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(5): 1655-1665. (in Chinese)

[8] CUI Z X, LI H Y, SHEN Z B, et al. A viscoelastic constitutive model of propellant with pressure cure [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2021, 46(7): 1036-1048.

[9] 张继业,许进升,韩峰,等. 考虑围压效应的 N15 固体推进剂本构模型[J]. 航空动力学报, 2021, 36(6): 1335-1344.
ZHANG J Y, XU J S, HAN F, et al. Constitutive model of N15 solid propellant considering confining pressure effect[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(6): 1335-1344. (in Chinese)

[10] LEI M, WANG J J, CHENG J M, et al. A constitutive model of the solid propellants considering the interface strength and dewetting[J]. Composites Science and Technology, 2020, 185: 107893.

[11] 王鸿丽,许进升,陈雄,等. 改性双基推进剂黏弹-黏塑性本构模型[J]. 航空学报, 2017, 38(4): 142-149.
WANG H L, XU J S, CHEN X, et al. Viscoelastic-

- viscoplastic constitutive model for modified double base propellant [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(4): 142–149. (in Chinese)
- [12] 王鑫, 高鸣, 陈思彤, 等. 艇载固体发动机药柱蠕变-疲劳损伤分析[J]. *推进技术*, 2019, 40(4): 921–928.
WANG X, GAO M, CHEN S T, et al. Creep-fatigue damage analysis of solid rocket motor grain on-board[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(4): 921–928. (in Chinese)
- [13] REN P, HOU X, HE G R, et al. Comparative research of tensile and compressive modulus of composite solid propellant for solid rocket motor [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(10): 2354–2359.
- [14] SPITZIG W A, RICHMOND O. Effect of hydrostatic pressure on the deformation behavior of polyethylene and polycarbonate in tension and in compression [J]. *Polymer Engineering and Science*, 1979, 19(16): 1129–1139.
- [15] O'CONNOR D G, FINDLEY W N. Influence of normal stress on creep in tension and compression of polyethylene and rigid polyvinyl chloride copolymer [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1962, 84(2): 237–246.
- [16] WAWRZYŃSKI W, ZIEJA M, TOMASZEWSKA J, et al. Reliability assessment of aircraft commutators [J]. *Energies*, 2021, 14(21): 7404.
- [17] 朱兆祥, 徐大本, 王礼立. 环氧树脂在高应变率下的热粘(黏)弹性本构方程和时温等效性[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 1988, 1(1): 58–68.
ZHU Z X, XU D B, WANG L L. Thermoviscoelastic constitutive equation and time-temperature equivalence of epoxy resin at high strain rates [J]. *Journal of Ningbo University(Natural Science & Engineering Edition)*, 1988, 1(1): 58–68. (in Chinese)