

加速老化 NEPE 推进剂药柱结构变形损伤分析

宁玉豪^{1,2} 李永华¹ 钱桂安² 刘晓晗³ 孙建军³ 吴国卿³ 孙经雨²

[1. 大连交通大学 詹天佑学院(中车学院), 大连 116028]

(2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

(3. 内蒙合成化工研究所, 呼和浩特 010010)

摘要:【目的】针对硝酸酯增塑的聚醚聚氨酯(Nitrate Ester Plasticized Polyether, NEPE)推进剂药柱在长期贮存及点火载荷作用下易受老化状态、温度环境和几何结构参数共同影响的问题,研究热加速老化及药柱几何结构对贮存与点火工况下 NEPE 推进剂药柱力学响应的影响规律。【方法】首先,采用恒温箱对 NEPE 推进剂开展 25 天热加速老化试验,并在-40、23、70 °C 下进行单轴拉伸试验;然后,基于 Wiechert 黏弹性本构模型对不同老化状态和温度条件下的材料参数进行标定,分析热老化对推进剂力学性能的影响。最后,开发典型药柱结构参数化建模插件,建立药柱有限元模型,开展老化前、后药柱在贮存及点火工况下的仿真计算,进一步分析星角数、星尖圆弧半径和角分数等几何参数对药柱应变分布的影响。【结果】试验结果表明,热老化会导致 NEPE 推进剂抗拉强度、弹性模量降低,应变率敏感性减弱。仿真结果表明,贮存工况下老化后药柱应变主要集中于顶部星尖圆弧区域,增加星角数可改善药柱应变分布;点火工况下,与未老化药柱相比,老化后药柱在-40、23、70 °C 下最大应变分别升高 20.33%、137.50%、162.13%。星尖圆弧半径由 2 mm 增加至 5 mm 时,不同老化状态药柱在各温度下的最大应变平均降低 31.53%、26.05%、24.57%;角分数由 0.70 增加至 0.95 时,不同老化状态药柱在各温度下的最大应变平均提高 36.21%、46.51%、48.05%,研究为 NEPE 推进剂药柱结构设计、贮存安全评估及点火工况变形损伤分析提供参考。

关键词: NEPE 推进剂; 热老化; 力学性能; 快速建模; 结构完整性**中图分类号:** V512 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2026.07.008

0 引言

固体发动机作为火箭技术的关键组成部分,具有结构紧凑、快速启动、高可靠性和维护简便等优点,在航天领域中占据着重要地位。固体推进剂作为火箭的动力来源,其力学性能是决定固体推进剂药柱可靠性的关键^[1-2]。推进剂内部含有大量的高能组分,贮存期间,在载荷环境谱作用下,推进剂的力学性能不仅随着贮存时间的增长而发生劣化^[3-6],还受发射地点环境温度的影响。因此,必须保证推进剂能够承受实时温度和应力-应变的耦合效应^[7],以保证其在实际应用中的可靠性和安全性。

国内外学者对此进行了大量的研究,王虎干等^[8]对某型固体推进剂分别进行高温加速老化试验和发动机自然贮存解剖试验,并采用低拉伸速率分别测试了固体推进剂在不同环境温度下的力学性能,对比了高温加速老化和发动机自然贮存老化之间的差异。张哲等^[9]测试了低温下 BAMO-THF 共聚醚(Polybutylene

Terephthalate, PBT)固体推进剂力学性能,给出了低温下抗拉强度、伸长率等性能与固化参数之间的变化规律。周东谟^[10]开展了定应变下的贮存老化试验,并将贮存温度扩展到常温和低温,全方位多角度地研究推进剂的老化性能,建立包含老化温度、老化时间和应力或应变的老化模型。Walid 等^[11]通过高温和室温下的长期老化试验,发现软化复合固体推进剂的力学性能随老化时间有显著变化而弹道性能保持稳定,指出老化过程中链断裂和水解是导致推进剂性能变化的主要因素,并通过指数函数模型和阿伦尼乌斯方程预测了推进剂的有效寿命。刘琪琪等^[12]对以聚叠氮缩水甘油醚为基体、高能固体颗粒为氧化剂的推进剂(High Energy Density Material, HEDM)进行应力松弛试验及单轴拉伸试验,获得非线性本构相关参数并构建了 HEDM 推进剂的非线性本构关系。Gottlieb 等^[13]研究了在老化过程中增塑剂变化对推进剂的力学性能的影响,认为影响显著,并且最终会影响发动机药柱的

收稿日期: 2024-10-13 修回日期: 2025-01-14

基金项目: 中国科学院力学研究所横向项目(典型载荷下推进剂及界面累积损伤行为机理仿真及本构模型建立研究)

作者简介: 宁玉豪,男,2000年生,辽宁建昌人,硕士;主要研究方向为固体火箭发动机装药结构完整性分析;E-mail: yuhaoning0907@163.com。

引用格式: 宁玉豪,李永华,钱桂安,等.加速老化 NEPE 推进剂药柱结构变形损伤分析[J].机械强度,2026,48(7):67-74.

Ning Yuhao, Li Yonghua, Qian Gui'an, et al. Analysis of structural deformation and damage in accelerated aging NEPE propellant grain [J]. Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(7): 67-74.



免费获取

结构完整性。以上许多学者对不同推进剂老化力学性能进行了研究,对药柱的完整性研究具有指导意义。但热老化前、后硝酸酯增塑的聚醚聚氨酯(Nitrate Ester Plasticized Polyether, NEPE)推进剂在不同环境温度下的力学性能研究和药柱结构完整性分析仍然较少。此外,随着固体推进剂有限元仿真技术的发展,由于其非线性应力响应复杂,对药柱的有限元仿真技术的要求也越来越高。不仅要符合相关尺寸要求,还要保证有限元网格的高质量划分及对药柱结构高质量表征,存在有限元建模耗时长、效率低、难以控制复杂操作过程产生的建模误差等问题,无法保持仿真结果的一致性。

本研究以某 NEPE 推进剂为对象,开展加速老化试验和不同温度、拉伸速率的单轴拉伸试验,分析热老化前、后推进剂的力学性能变化,同时开发药柱参数化建模技术,在考虑老化的同时,对贮存和点火工况进行仿真计算,分析典型几何参数对药柱力学性能的影响,为不同老化条件下的推进剂药柱结构完整性评估提供参考。

1 试验方法与试验

1.1 试验试样

试样材料采用某型号 NEPE 复合固体推进剂,参照标准 GJB 770B—2005,将推进剂方坯切割成标准哑铃形试样进行加速老化试验,如图 1 所示。试样标距段长 70 mm,标距段横截面积 100 mm²。

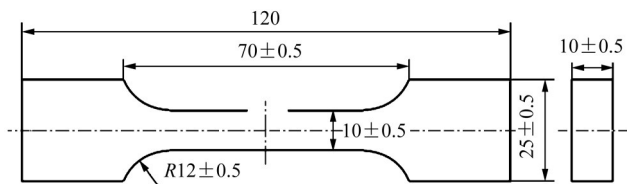


图1 哑铃型试样

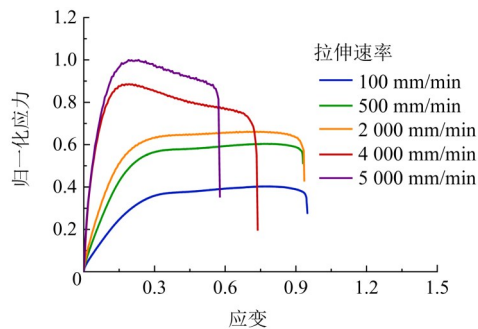
Fig. 1 Dumbbell specimen

高温加速老化试验参照 QJ 2328A—2005 标准进行^[14]112-118。取 15 个平行试验样品,用铝箔包裹后置于恒温箱中,温度设为 70 °C,进行为期 25 天的高温加速老化试验。

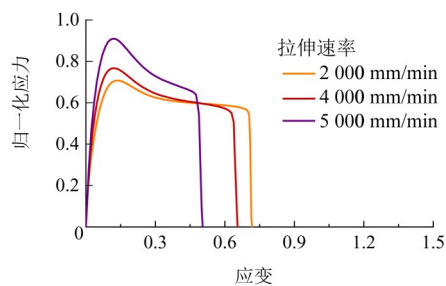
完成制备后将试样置于恒温箱中,试样在-40、23、70 °C条件下保温 1 h,其中-40 °C采用液氮低温处理,70 °C采用电子恒温鼓风干燥箱进行高温处理。处理完成后按 GJB 770B—2005 进行单轴拉伸测试,拉伸速率为 100、500、2 000、4 000、5 000 mm/min。并依据 GJB 770B—2005 中方法 413.1 测定试样的最大抗拉强度与断裂延伸率,采用方法 413.2 测定试样初始模量,对全部测试结果进行记录与统计^[15]356-360。

1.2 试验结果

测量老化前、后不同温度、拉伸速率下的单轴拉伸试验结果,如图 2~图 4 所示。取弹性段对初始模量进行拟合并将应力数据进行归一化处理,结果如表 1 与表 2 所示。表 1 和表 2 中, R_m 为最大拉伸应力(峰值应力), ε_b 为断裂延伸率(断裂应变); E 为弹性模量。



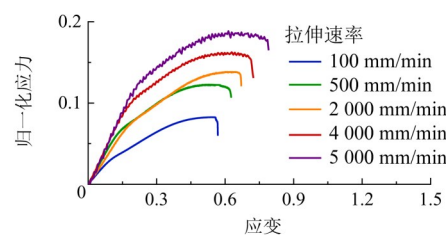
(a) 未老化



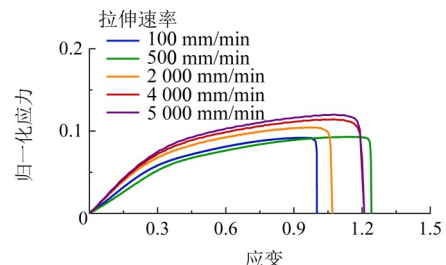
(b) 加速老化25天

图2 -40 °C下NEPE推进剂不同拉伸速率应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of NEPE propellant under different tensile rates at -40 °C



(a) 未老化



(b) 加速老化25天

图3 23 °C下NEPE推进剂不同拉伸速率应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of NEPE propellant under different stretching rates at 23 °C

试验表明,NEPE推进剂的应力-应变曲线表现出显著的黏弹性特征。在拉伸初始阶段,曲线为线性增长,在“脱湿”点后表现出非线性行为,存在少量的应

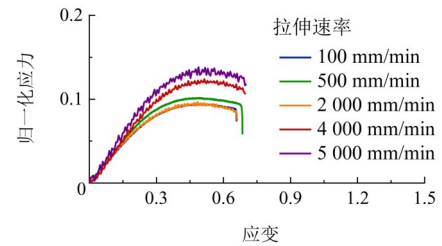
变强化过程直至最终断裂。

试样的抗拉强度与拉伸速率成正比,同时温度的升高则会导致抗拉强度降低。随着温度的升高,断裂应变有升高的趋势,但其随温度的变化并不单调。这一现象与温度对分子链的影响有关,在低温状态下,NEPE 推进剂的分子链处于玻璃态,高分子链段被冻结导致其活动受限,使得其力学性能更接近于刚性体。

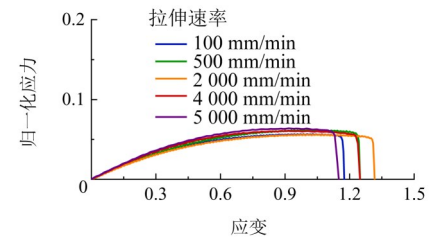
随着温度的升高,高分子链变得“软化”且活动性增强,这使得 NEPE 推进剂的抗拉强度和弹性模量降低,其力学性能更趋向于弹性体。此外,在所有测试温度下,推进剂的弹性模量随着拉伸速率的增加而升高,这表明 NEPE 推进剂的力学行为具有显著的应变率相关性,其初始弹性模量和拉伸强度随着加载速率的增大而增大。

分析老化前、后 NEPE 推进剂的单调拉伸对照试验,结果表明,随着老化时间的增长,推进剂发生劣化。在 -40 、 23 、 70 °C 这 3 种温度条件下,老化后的材料抗拉强度和弹性模量均有所下降。在 23 °C 和 70 °C 下,老化导致断裂应变明显增加,但 -40 °C 低温条件下,老化前、后的断裂应变并没有显著变化。低温下,分子运动减缓,老化对推进剂的影响较小,在常温和

高温下,分子运动更为活跃,老化促进了分子链的进一步运动,导致材料的强度和刚性下降,断裂应变随之增加,材料黏弹性特征减弱。



(a) 未老化



(b) 加速老化 25 天

图 4 70 °C 下 NEPE 推进剂不同拉伸速率应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of NEPE propellant under different stretching rates at 70 °C

表 1 未老化推进剂在不同温度、拉伸速率下单轴拉伸试验数据(归一化)

Tab. 1 Unidirectional tensile test data under different temperatures and tensile rates before aging(normalized)

拉伸速率/ (mm/min)	-40 °C			23 °C			70 °C		
	R_m	$\varepsilon_b/(mm/mm)$	E	R_m	$\varepsilon_b/(mm/mm)$	E	R_m	$\varepsilon_b/(mm/mm)$	E
100	0.404	0.900	1.06	0.124	0.610	0.520	0.094	0.690	0.330
500	0.604	0.880	2.908	0.139	0.650	0.426	0.102	0.670	0.360
2 000	0.662	0.880	4.803	0.163	0.700	0.610	0.097	0.620	0.375
4 000	0.887	0.710	11.946	0.188	0.790	0.647	0.124	0.700	0.402
5 000	1.000	0.540	12.489	0.202	0.790	0.655	0.136	0.690	0.432

表 2 加速老化 25 天推进剂在不同温度、拉伸速率下单轴拉伸试验数据(归一化)

Tab. 2 Unidirectional tensile test data under different temperatures and tensile rates after accelerated aging for 25 days(normalized)

拉伸速率/ (mm/min)	-40 °C			23 °C			70 °C		
	R_m	$\varepsilon_b/(mm/mm)$	E	R_m	$\varepsilon_b/(mm/mm)$	E	R_m	$\varepsilon_b/(mm/mm)$	E
100	—	—	—	0.091	1.110	0.221	0.057	1.800	0.129
500	—	—	—	0.094	1.280	0.181	0.061	1.480	0.142
2 000	0.709	0.830	9.771	0.105	1.130	0.256	0.057	1.260	0.139
4 000	0.767	0.680	11.362	0.114	1.160	0.269	0.060	1.170	0.126
5 000	0.910	0.580	11.707	0.120	1.150	0.281	0.064	1.210	0.132

2 推进剂黏弹性本构模型与材料参数拟合

2.1 黏弹性本构模型

结合上述试验结果,本文选用 Wiechert 黏弹性本构方程来对 NEPE 推进剂老化前、后和不同温度下的力学行为进行描述,如图 5 所示。该模型由 1 个弹簧部件和 n 阶广义 Maxwell 系统并联而成,以 E_∞ 表示弹簧部件,黏性部分本文采用 3 阶 Maxwell 模型。

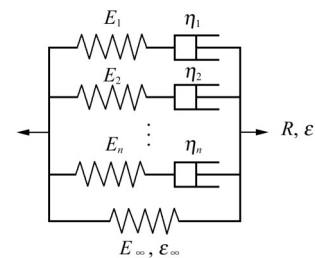


图 5 NEPE 推进剂黏弹性本构模型示意图(Wiechert 框架)

Fig. 5 Diagram of NEPE propellant viscoelastic constitutive model (Wiechert framework)

本构模型方程式为

$$\{\sigma(t_{n+1})\} = \mathbf{C}^E \{\varepsilon(t_n)\} + \sum_{i=1}^N e^{-\frac{\Delta t_{n+1}}{\tau_i}} h_i(t_n) + [1 + \sum_{i=1}^N \gamma_i \tau_i (1 - e^{-\frac{\Delta t_{n+1}}{\tau_i}})] \mathbf{C}^E \{\Delta \varepsilon(t_{n+1})\} \quad (1)$$

$$\tau_i = \eta_i / E_i \quad (2)$$

$$\gamma_i = E_i / E_\infty \quad (3)$$

$$h_i(t_n) = E_i \int_0^{t_n} e^{-\frac{t_n-t}{\tau_i}} \dot{\varepsilon}(t) dt \quad (4)$$

式中, $\mathbf{C}^E$ 为并联弹簧的弹性刚度矩阵; E_i 为弹簧元件的弹性模量; η_i 为黏壶元件的黏性系数; τ_i 为第 i 阶松弛时间; γ_i 为 Maxwell 弹簧元件与稳定弹簧部件的弹性模量比值; $h_i(t_n)$ 为 Maxwell 元件在当前计算时刻 t_n

内的松弛效应累积应力^{[14]112-118}; $\dot{\varepsilon}(t)$ 为应变率。

2.2 推进剂性能参数拟合与老化分析

根据上述本构方程编写材料用户材料子程序 (User Material Subroutine, UMAT), 选择合适的黏滞系数, 根据不同温度、拉伸速率下的单调拉伸试验数据, 选取线弹性阶段进行初始参数选取, 以当前工况信息、材料参数作为输入, 进行单轴拉伸试验的仿真计算。将模拟应力计算结果与试验结果进行对比, 由于固体推进剂在小变形条件下通常表现出近似不可压缩特性, 因此本文取泊松比 $\mu=0.499$, 用于表征材料的近似不可压缩行为, 并不断优化, 最终得到归一化推进剂线弹性部分拟合图, 如图 6~图 8 所示, NEPE 材料参数如表 3 所示。

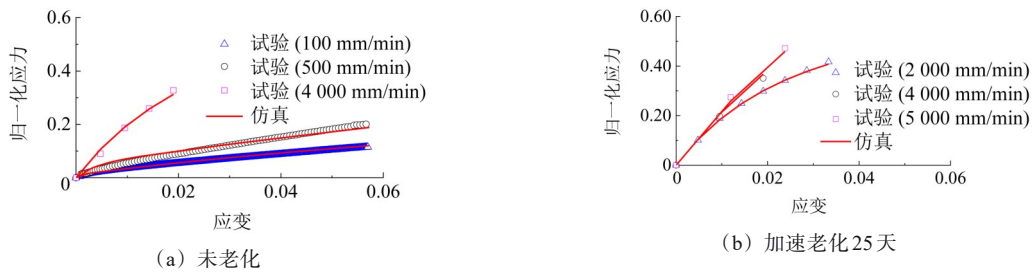


图 6 -40 °C 不同拉伸速率下推进剂参数拟合图

Fig. 6 Fitting diagram of propellant parameters at different tensile rates at -40 °C

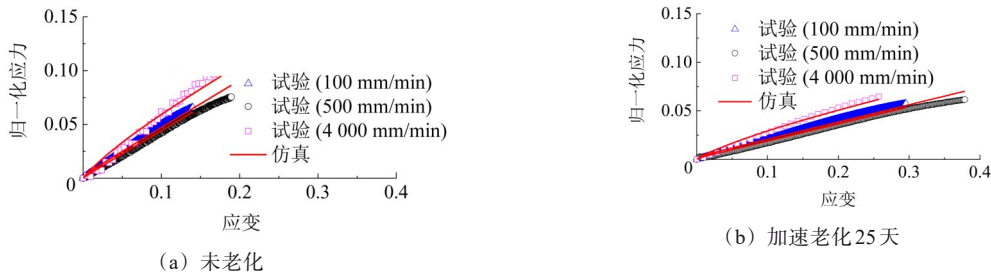


图 7 23 °C 不同拉伸速率下推进剂参数拟合图

Fig. 7 Fitting diagram of propellant parameters at different tensile rates at 23 °C

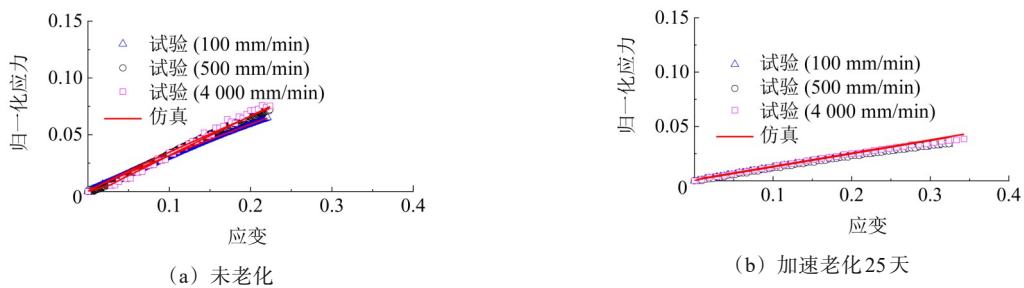


图 8 70 °C 不同拉伸速率下推进剂参数拟合图

Fig. 8 Fitting diagram of propellant parameters at different tensile rates at 70 °C

表 3 老化前、后不同温度下 NEPE 推进剂参数汇总

Tab. 3 Summary of NEPE propellant parameters at different temperatures before and after aging

老化时间/d	温度/°C	E_∞	E_1	E_2	E_3	τ_1	τ_2	τ_3	μ
0	-40	3	117.37	6.73	6.28	0.02	2	6.5	0.499
0	23	0.8	1.71	1.57	0.05	0.05	100	0.5	0.499
0	70	0.65	1.47	1.03	0.22	0.005	30	0.9	0.499
25	-40	3	115.19	6.25	1.59	0.02	2	6.5	0.499
25	23	0.8	0.86	0.15	0.01	0.05	100	0.5	0.499
25	70	0.65	0.000 2	0.000 2	0.000 2	0.005	30	0.9	0.499

在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温条件下,NEPE推进剂表现出较高的刚性,这表明低温环境会减缓材料内部的分子运动,进而提升推进剂整体刚度。随着温度升高,Wiechert模型中平衡弹簧弹性模量 E_{∞} 与三阶Maxwell支路弹簧模量 E_1 、 E_2 、 E_3 值均呈下降趋势,反映了推进剂在高温条件下的软化现象。在常温及高温环境下,推进剂在低应变速率下的应变率相关特性显著降低。对比老化前、后拟合参数可以看出,老化后推进剂刚性持续下降,这可能是由于老化导致材料内部结构的退化和分子间作用力的减弱,黏弹性特征下降,基本符合上述单轴拉伸试验结果。

3 药柱可视化与NEPE推进剂药柱结构变形损伤分析

3.1 快速建模方法

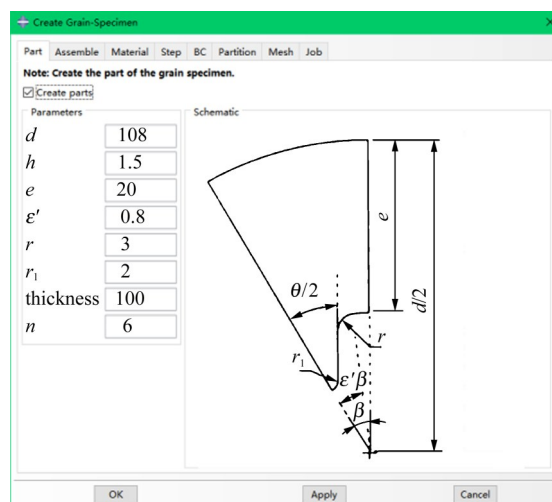
双基推进剂药柱普遍采用自由装填方式,即将药柱加工成特定几何形状后装入发动机燃烧室,并用支撑部件固定。这种方法使药柱与发动机分离,便于质量检查、运输、贮存及更换,但药柱的复杂几何尺寸对结构完整性和载荷分布有显著影响^{[15]356-360}[16]。

本文基于Abaqus有限元软件开发了药柱参数化建模插件,旨在通过量化关键尺寸和材料属性,简化固体推进剂药柱的建模流程,降低药柱有限元仿真的使用难度,实现推进剂药柱的高质量快速建模。选择自由装填方式的改性双基推进剂药柱作为研究对象,其内孔采用星孔药型设计。其关键参数尺寸包括包覆层厚度 h 、星根半角 $\theta/2$ 、柱外径 d 、星角数 n 、星孔半角 β 、肉厚(星孔药柱外壁到星孔内壁的径向最小实体厚度) e 、星尖圆弧半径 r 、星根圆弧半径 r_1 、角分数 ε' 等。利用自动化指令加速从草图绘制到网格划分、材料赋予、边界条件设置的整个建模过程^[17],如图9所示。该插件在多次建模下均有极高一致性,便于进行药柱多次仿真计算与结果导出。

在计算过程中,星孔几何尺寸设置为:肉厚 $e=20\text{ mm}$;星尖圆弧半径 $r=3\text{ mm}$;星根圆弧半径 $r_1=2\text{ mm}$;角分数 $\varepsilon'=0.8$,星角数分别设置为4、5、6;星根半角 $\theta/2$ 分别设置为 30° 、 36° 、 45° ;药柱材料密度 $\rho_1=1.97\text{ g/cm}^3$ ^[18]。包覆层选用钢材料:密度 $\rho_2=7.85\text{ g/cm}^3$;弹性模量 $E=200\text{ GPa}$,泊松比 $\mu=0.3$ 。最终的药柱有限元模型如图9(b)所示。

3.2 药柱无老化贮存仿真

本节研究重力作用下常温卧式贮存对未老化推进剂药柱变形的影响,分析不同星孔结构的药柱在贮存工况下的力学响应,贮存时间设置为10年。



(a) 参数化建模插件



(b) 药柱有限元模型

图9 药柱参数化建模插件与有限元模型

Fig. 9 Parametric modeling plug-in and finite element model of grains

图10所示为在 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下、星角数为4、5、6药柱贮存10年的仿真应变分布对比图。

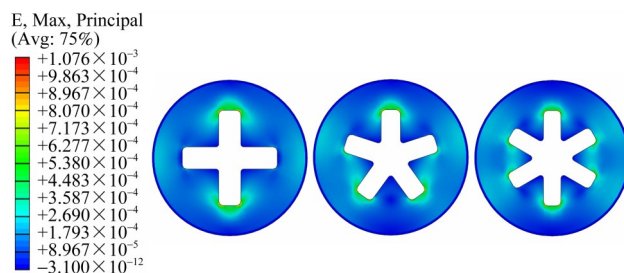


图10 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下贮存老化10年的药柱应变分布对比

Fig. 10 Comparison of strain distribution of grains aged for 10 years at $23\text{ }^{\circ}\text{C}$

由图10可知,在重力作用下,药柱随贮存时间增加逐渐软化发生变形,主要应变均集中在顶端和底端。其中,4星药柱最大应变位置出现在顶部星尖圆弧处,5、6星药柱最大应变位置出现在上方两侧星尖圆弧处,最大应变分别为 1.076×10^{-3} 、 9.692×10^{-4} 、 8.941×10^{-4} 。根据计算结果,如果在贮存期间不对药柱进行旋转,由于重力引起的蠕变变形将导致药柱结构发生偏心,增加失效风险。

3.3 老化对NEPE推进剂药柱点火工况的影响

本节研究老化对点火工况的影响,边界条件为内压从0上升至 8 MPa ,压力上升时间为 200 ms 。药柱

老化前、后作为2种材料处理,药柱温度分别设置为 -40 、 23 、 70 $^{\circ}\text{C}$ 。计算得到的应变分布如图11所示,由图11可知,应变均集中出现在星尖圆弧处。

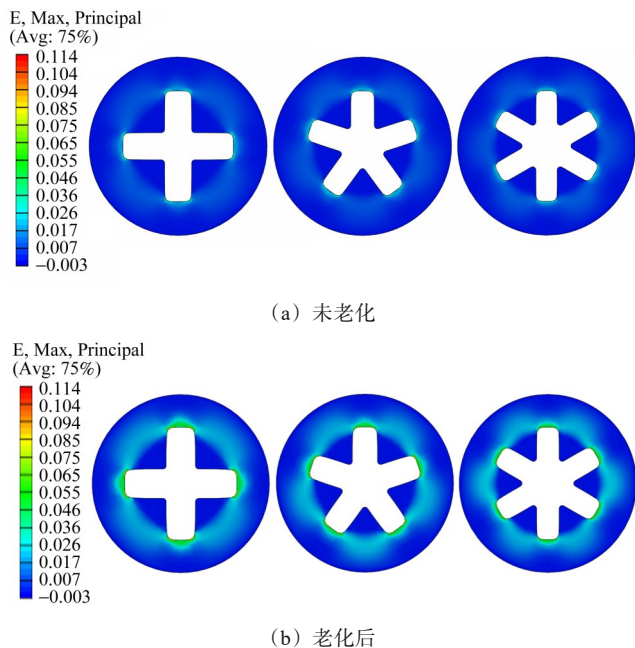


图11 23 $^{\circ}\text{C}$ 下不同星角数药柱未老化、老化后点火仿真应变分布对比

Fig. 11 Comparison of ignition simulation strain distribution before and after aging of different star angle grain at 23 $^{\circ}\text{C}$

表4所示为不同算例的星尖圆弧处Mises应力、应变。由表4可知,经过老化处理的药柱,在不同温度下的最大应变表现出显著差异。相比于未老化药柱, -40 、 23 、 70 $^{\circ}\text{C}$ 下老化后的药柱最大应变分别平均提升了21.41%、137.76%和162.13%,老化显著增加了药柱应力集中处的变形。

表4 NEPE推进剂药柱点火仿真应变汇总

Tab. 4 Summary of ignition simulation strain of NEPE propellant grain

老化时间/ d	温度/ $^{\circ}\text{C}$	应变		
		4星	6星	5星
0	-40	0.004 2	0.003 3	0.003 0
0	23	0.046 6	0.037 2	0.034 4
0	70	0.070 7	0.068 1	0.055 8
25	-40	0.004 9	0.004 1	0.003 7
25	23	0.113 5	0.088 1	0.080 1
25	70	0.206 9	0.154 4	0.149 0

此外,随着星角数的增加,药柱的最大应变呈下降的趋势,这是由于星角数的增加提高了药柱内部压力的对称性,使最终的应变场更加均匀,选取合适的星角数可以在一定程度上调节药柱的力学响应。

3.4 星孔几何参数对NEPE推进剂药柱结构完整性影响

本节研究星孔几何参数对点火工况下应变分布

的影响,通过第3.3节仿真计算可知,应力集中出现在星尖圆弧处,因此分别从影响星尖圆弧结构的星尖圆弧半径 r 、角分数 ε' 两个参数出发,对点火工况下老化前、后不同温度下NEPE推进剂药柱进行仿真分析。

将星角数固定为6,星尖圆弧半径 r 分别设置为2、3、4、5 mm,角分数 ε' 分别设置为0.7、0.8、0.9、0.95,边界条件为内压从0上升至8 MPa,压力上升时间为200 ms。星尖圆弧半径和角分数对最大应变的影响分别如图12、图13所示。

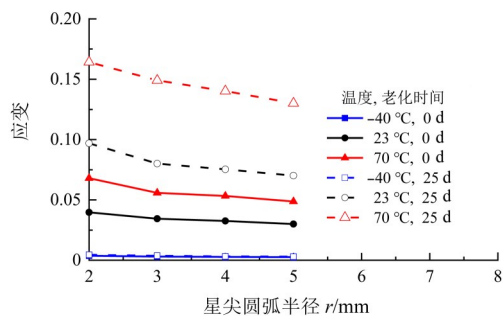


图12 不同星尖圆弧半径药柱未老化、老化后点火仿真应变对比
Fig. 12 Comparison of ignition simulation strain of different star tip arc radius grains before and after aging

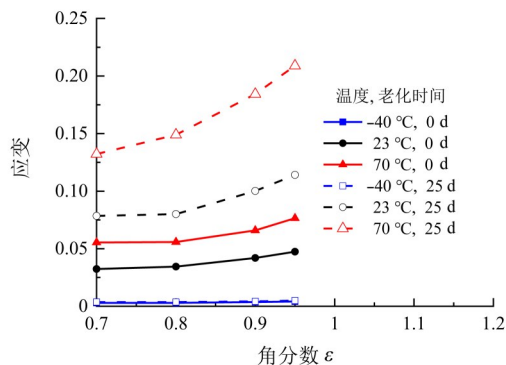


图13 不同角分数药柱未老化、老化后点火仿真应变对比
Fig. 13 Comparison of ignition simulation strain of different angular fraction grains before and after aging

由图12可知,随着星尖圆弧半径的增大,NEPE推进剂药柱的最大应变呈明显的下降趋势,星尖圆弧半径增加会减少局部的应力集中。

当星尖圆弧半径从2 mm增加至5 mm时,不同温度条件下的药柱最大应变均表现出递减的趋势。在 -40 $^{\circ}\text{C}$ 环境下,未老化、老化后的最大应变分别从0.003 7和0.004 5降至0.002 6和0.003,应变值平均降低了31.53%;在 23 $^{\circ}\text{C}$ 环境下,老化前、后的最大应变分别从0.039 7和0.096 9降至0.03和0.07;应变值平均降低了26.05%;在 70 $^{\circ}\text{C}$ 环境下,老化前、后的最大应变分别从0.068和0.164 2降至0.048 7和0.130 1,应变值平均降低了24.57%。

进一步分析老化对药柱变形的影响,在 -40 $^{\circ}\text{C}$ 、 23 $^{\circ}\text{C}$ 和 70 $^{\circ}\text{C}$ 环境下,未老化、老化后后的最大应变分别

平均提升19.71%、135.57%和159.67%。这表明老化会使不同温度条件下药柱的力学性能发生劣化,尤其是在高温环境下,老化极大加剧了药柱的变形和损伤风险。

由图13可知,老化对不同角分数下药柱的变形影响与前文基本相似,在-40、23、70℃下,应变分别平均提升了19.89%、139.17%、164.6%。

随着角分数的提升,NEPE推进剂药柱的最大应变呈明显的上升趋势,表明角分数增加对于药柱的力学性能也有显著影响。当角分数从0.70增加至0.95时,不同温度条件下的药柱最大应变均表现出递增趋势。在-40℃环境下,老化前、后的最大应变从0.003和0.0037分别提升至0.0042和0.0049;在23℃环境下,老化前、后的最大应变从0.0321和0.0785分别提升至0.0474和0.1141;在70℃环境下,老化前、后的最大应变从0.0554和0.1322分别提升至0.0765和0.2089。并且药柱对角分数的应变响应随温度的升高而升高,平均增幅分别为36.21%、46.51%、48.05%。

4 结论

对某型NEPE推进剂进行热加速老化,开展不同温度下的单轴拉伸试验,选取Wiechert黏弹性本构方程对推进剂材料参数进行标定。开发了基于Abaqus的药柱仿真参数化建模插件,对老化前、后贮存及点火工况下药柱结构完整性进行分析,得到以下结论:

1)利用Wiechert黏弹性本构方程对老化前、后推进剂材料参数进行标定,结果表明,热老化会导致NEPE推进剂抗拉强度、弹性模量和应变率相关性降低。

2)贮存工况下最大应变发生在药柱顶部星尖圆弧处,增加星角数可降低最大应变,老化10年后,4、5、6星的最大应变分别为 1.076×10^{-3} 、 9.692×10^{-4} 、 8.941×10^{-4} 。点火工况下,老化会使推进剂药柱力学性能劣化,在-40、23、70℃下,老化对不同尺寸药柱的应变平均增加约20.33%、137.50%、162.13%。

3)随着星尖圆弧半径从2mm增加至5mm,药柱最大应变逐渐下降,在-40、23、70℃下的应变平均降幅分别为31.53%、26.05%、24.57%。而在角分数从0.7提升至0.95时,药柱最大应变逐渐提升,增幅随温度的升高而增加,在-40、23、70℃下的应变平均增幅分别为36.21%、46.51%、48.05%。

参考文献(References)

[1] 池旭辉,彭松,张峰涛,等. NEPE推进剂力学性能的统计特性及贮存老化的影响[J]. 固体火箭技术,2019,42(3):396-402.

Chi Xuhui, Peng Song, Zhang Fengtao, et al. Effects of aging on

statistical mechanical properties distributions of NEPE propellant [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2019, 42(3): 396-402. (In Chinese)

[2] 李辉,范兴贵,许进升,等. 基于热力学理论的固体推进剂粘弹-粘损伤本构模型[J]. 推进技术,2022,43(10):445-455.

Li Hui, Fan Xinggui, Xu Jinsheng, et al. Thermodynamics-based viscoelastic-viscodamage constitutive model for solid propellant [J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(10): 445-455. (In Chinese)

[3] Wubuliaisai M, Wu Y Q, Hou X, et al. A viscoelastic constitutive model considering deformation and environmental-induced damages for solid propellants [J]. Aerospace Science and Technology, 2023, 132: 108055.

[4] Naseem H, Yerra J, Murthy H, et al. Ageing studies on AP/HTPB based composites solid propellants [J]. Energetic Materials Frontiers, 2021, 2(2): 111-124.

[5] Wang Z J, Qiang H F. Mechanical properties of thermal aged HTPB composite solid propellant under confining pressure [J]. Defence Technology, 2022, 18(4): 618-625.

[6] Zhou D M, Liu X Y, Sui X, et al. Effect of pre-strain during ageing on the maximum elongation of composite solid propellants and its modelling [J]. Polymer Testing, 2016, 50: 200-207.

[7] 杨庚,袁杰红,孙海涛,等. 温度循环载荷下药柱力学响应与累积损伤分析[J]. 推进技术,2024,45(11):177-184.

Yang Geng, Yuan Jiehong, Sun Haitao, et al. Mechanical response and cumulative damage analysis of grain under temperature cyclic loading [J]. Journal of Propulsion Technology, 2024, 45(11): 177-184. (In Chinese)

[8] 王虎干,职世君,曹付齐,等. 某固体发动机推进剂加速老化及自然贮存解剖试验研究[J]. 固体火箭技术,2021,44(3):350-356.

Wang Hupan, Zhi Shijun, Cao Fuqi, et al. Study on accelerated aging and natural storage dissection test results of a solid rocket motor propellant [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2021, 44(3): 350-356. (In Chinese)

[9] 张哲,曾国伟,张正金,等. PBT固体推进剂低温力学性能研究[J]. 推进技术,2022,43(9):384-390.

Zhang Zhe, Zeng Guowei, Zhang Zhengjin, et al. Low temperature mechanical properties of PBT solid propellant [J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(9): 384-390. (In Chinese)

[10] 周东谟. 定应变下HTPB推进剂老化机理及发动机寿命预估研究[D]. 北京:北京理工大学,2016:116-118.

Zhou Dongmo. Aging mechanism of HTPB propellant under constant strain and life prediction of solid rocket motors [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016: 116-118. (In Chinese)

[11] Walid M A, Liang G Z. Service life prediction of AP/Al/HTPB solid rocket propellant with consideration of softening aging behavior [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(2): 361-368.

[12] 刘琪琪,王春光,张恺宁,等. HEDM推进剂的非线性粘弹损伤本构及其细观损伤演化研究[J]. 固体火箭技术,2023,46(1):88-95.

Liu Qiqi, Wang Chunguang, Zhang Kaining, et al. Nonlinear viscoelastic constitutive model and meso-damage evolution of HEDM propellant [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2023,

- 46(1):88-95. (In Chinese)
- [13] Gottlieb L, Bar S. Migration of plasticizer between bonded propellant interfaces [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2003, 28(1):12-17.
- [14] 李瑞阳, 郑战光, 孙经雨, 等. 大变形下固体推进剂黏弹性本构参数的识别[J]. *机械工程材料*, 2024, 48(9):112-118.
Li Ruiyang, Zheng Zhanguang, Sun Jingyu, et al. Identification of viscoelastic constitutive parameters for solid propellant under large deformation [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2024, 48(9):112-118. (In Chinese)
- [15] 闫志鸿, 陶涛, 隋欣, 等. NEPE推进剂老化过程中抗拉强度的表征[J]. *火炸药学报*, 2021, 44(3):356-360.
Yan Zhihong, Tao Tao, Sui Xin, et al. Characterization of tensile strength of NEPE propellant in the aging process [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2021, 44(3):356-360. (In Chinese)
- [16] 陈雄, 许进升, 郑健. 固体推进剂黏弹性力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2016:249-253.
- Chen Xiong, Xu Jinsheng, Zheng Jian. *Viscoelastic mechanics of solid propellants* [M]. Beijing: Beijing Insititute of Technology Press, 2016:249-253. (In Chinese)
- [17] 王海生, 缪维跑, 李春, 等. 大型风力机新型弯扭耦合叶片结构特性分析[J]. *机械强度*, 2024, 46(3):668-674.
Wang Haisheng, Miao Weipao, Li Chun, et al. Structural characteristic analysis of new type bend-twist coupling blades of large wind turbine [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2024, 46(3):668-674. (In Chinese)
- [18] 陈国庆, 惠维维, 聂嘉良, 等. 考虑热-化学耦合的NEPE推进剂固化过程数值模拟[J]. *固体火箭技术*, 2024, 47(4):485-492.
Chen Guoqing, Hui Weiwei, Nie Jialiang, et al. Numerical simulation on curing process of NEPE propellant considering thermo-chemical coupling [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2024, 47(4):485-492. (In Chinese)

Analysis of structural deformation and damage in accelerated aging NEPE propellant grain

NING Yuhao^{1,2} LI Yonghua¹ QIAN Gui'an² LIU Xiaohan³ SUN Jianjun³ WU Guoqing³ SUN Jingyu²

[1. Zhan Tianyou College (CRRCC College), Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China]

[2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China]

[3. The Synthetic Chemical & Engineering Institute of Inner Mongolia, Hohhot 010010, China]

Abstract: [Objective] To investigate the effects of accelerated thermal aging and grain geometry on the mechanical response of nitrate ester plasticized polyether (NEPE) propellant grains under storage and ignition conditions, the influences of aging state, temperature, and structural parameters on the strain behavior of NEPE propellant grains were studied. [Methods] NEPE propellant was subjected to accelerated aging in a constant-temperature chamber for 25 days, and uniaxial tensile tests were conducted at -40 , 23 , and 70 °C. Based on the Wiechert viscoelastic constitutive model, material parameters under different aging states and temperature conditions were calibrated using experimental data, and the effects of thermal aging on the mechanical properties of NEPE propellant were analyzed. Furthermore, a parametric modeling plug-in for typical grain structures was developed, and finite element models of grains were established. Numerical simulations were performed for the grains before and after aging under storage and ignition conditions. The effects of the number of star points, star-tip fillet radius, and angle fraction on the strain distribution of the grains were investigated. [Results] The results show that thermal aging reduces the tensile strength and elastic modulus of NEPE propellant and weakens its strain-rate sensitivity. Under storage conditions, the strain of the aged grain is mainly concentrated in the top star-tip fillet region, and increasing the number of star points can improve the strain distribution. Under ignition conditions, compared with the unaged grain, the maximum strain of the aged grain increases by approximately 20.33%, 137.50%, and 162.13% at -40 , 23 , and 70 °C, respectively. When the star-tip fillet radius increases from 2 mm to 5 mm, the average maximum strain of grains with different aging states decreases by 31.53%, 26.05%, and 24.57%, respectively. When the angle fraction increases from 0.70 to 0.95, the corresponding average maximum strain increases by 36.21%, 46.51%, and 48.05%, respectively. The results provide a reference for structural design, storage safety assessment, and deformation-damage analysis of NEPE propellant grains under ignition conditions.

Key words: NEPE propellant; Thermal aging; Mechanical property; Fast modeling; Structural integrity

Corresponding author: NING Yuhao, E-mail: yuhaoning0907@163.com

Fund: Transverse Project of Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences (Research on Simulation of Cumulation of Cumulative Damage Behavior Mechanism of Propellant and Interface Under Typical Load and Establishment of Constitutive Model)

Received: 2024-10-13 Revised: 2025-01-14

(编辑: 刘欢欢)