

# 基于温度-压力双应力加速试验的 NEPE 推进剂寿命预估研究

华栋, 丁黎, 祝艳龙, 安静, 常海

(西安近代化学研究所, 西安 710065)

**摘要:** **目的** 探索实际贮存状态 NEPE 推进剂自重产生的诱发压力对其贮存寿命的影响, 开展温度-压力双应力作用下 NEPE 推进剂的寿命预估研究。**方法** 对比分析 NEPE 推进剂在加速老化试验过程中的失效机理, 确定其老化失效模式以及老化失效参量, 采用加速老化试验及力学性能测试, 分析 NEPE 推进剂加速老化过程中力学性能的变化规律。基于不同温度-压力应力条件下 NEPE 推进剂老化特性的变化规律, 构建温度-压力双应力作用的贮存寿命预估模型, 对 25 °C 和 2 MPa 下 NEPE 推进剂的寿命进行评估。**结果** 温度、预紧压力升高均会促进 NEPE 推进剂力学性能的衰减。**结论** 相比于单温度应力下的加速老化特性, 温度-压力双应力作用会提高 NEPE 推进剂试片力学性能的衰减速度, 考虑推进剂的自重影响因素, 采用温度-压力双应力条件下的 NEPE 推进剂寿命预估模型, 可以更准确地预测 NEPE 推进剂的贮存寿命。

**关键词:** NEPE 推进剂; 温度-应力双环境应力加速试验; 加速模型; 寿命预估

**中图分类号:** V512; TJ089      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-9242(2022)02-0051-08

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2022.02.009

## Research on Storage Life Prediction of NEPE Propellant Based on Temperature-Pressure Dual Stress Accelerating Test

HUA Dong, DING Li, ZHU Yan-long, AN Jing, CHANG Hai

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

**ABSTRACT:** In order to explore the influence of the induced pressure loaded by the self-weight of NEPE propellant on its storage life, a study on life prediction of NEPE propellant under different temperature-pressure conditions was carried out. By analyzing the failure mechanism of NEPE propellant in accelerated aging test, its storage failure mode and parameters were determined. The accelerated aging test and mechanical property test were used to analyze the mechanical properties of NEPE propellant during accelerated aging. Based on changing of aging characteristics of NEPE propellant under different temperature-pressure conditions, a storage life prediction model under effect of temperature-pressure dual stress was constructed. The storage life of NEPE propellant was evaluated under 25 °C and load pressure of 2 MPa. The results show that, increases of tem-

收稿日期: 2022-01-26; 修订日期: 2022-02-06

Received: 2022-01-26; Revised: 2022-02-06

作者简介: 华栋 (1988—), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为火炸药的安全和贮存性能。

**Biography:** HUA Dong (1988—), Male, Doctor, Assistant researcher, Research focus: safety and storage performance of explosives.

通讯作者: 丁黎 (1970—), 女, 硕士, 研究员, 主要研究方向为火炸药的安全和贮存性能。

**Corresponding author:** DING Li (1970—), Female, Master, Researcher, Research focus: safety and storage performance of explosives.

引文格式: 华栋, 丁黎, 祝艳龙, 等. 基于温度-压力双应力加速试验的 NEPE 推进剂寿命预估研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(2): 051-058.

HUA Dong, DING Li, ZHU Yan-long, et al. Research on Storage Life Prediction of NEPE Propellant Based on Temperature-Pressure Dual Stress Accelerating Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(2): 051-058.

perature and preload pressure can promote the attenuation of the mechanical properties of NEPE propellant. Compared with accelerating aging characteristics under single temperature stress, the mechanical properties of NEPE propellant specimens decay faster under dual stress of temperature and pressure. Taking the influence of propellant's self-weight into account, storage life prediction model under dual stress of temperature and pressure can be used to predict the storage life of NEPE propellant more accurately.

**KEY WORDS:** NEPE propellant; temperature-stress dual stress accelerating test; accelerating model; life prediction

硝酸酯增塑的聚醚 (Nitrate Ester Plasticized Polyether, NEPE) 推进剂是 20 世纪 70 年代末、80 年代初, 美国在复合和改性双基推进剂基础上开发的新一代固体推进剂。它结合了双基推进剂及复合推进剂的优点, 其主要特点是能量高、力学性能好, 而且弹道性能、工艺性能和安全性能都能满足要求, 是最具有发展潜力的一类固体推进剂, 也代表了高能固体推进剂发展的方向<sup>[1-3]</sup>。NEPE 推进剂配方中含有大量的硝酸酯类增塑剂和炸药类氧化剂, 在长期贮存过程中会发生缓慢的物理、化学变化, 导致能量、力学、燃烧等性能发生变化, 影响固体火箭发动机的安全性、可靠性及贮存寿命<sup>[4-6]</sup>。

目前, 战略导弹使用的 NEPE 推进剂多为大尺寸装药, 装药总质量超过 1 t。在长期贮存过程中, 位于底部的推进剂装药承受极大的自重载荷, 这种自重载荷会导致装药力学性能下降、药柱破裂, 同时使分解产生的气体不易逸出, 自催化分解加剧, 严重影响大尺寸 NEPE 推进剂的安全使用和贮存寿命<sup>[5]</sup>。在其他类型的推进剂贮存寿命研究中, 双基推进剂采用安定剂含量降至 50% 作为安全贮存寿命阈值, 复合推进剂以力学性能失效为关键参量, 已分别建立了加速寿命试验方法<sup>[7-9]</sup>。NEPE 推进剂的加速寿命试验进行了单温度应力<sup>[10-15]</sup>和温湿度耦合应力的寿命预估研究<sup>[16-19]</sup>, 尚未考虑自重产生的诱发应力对 NEPE 推进剂贮存寿命的影响。因此, 在大尺寸 NEPE 推进剂贮存过程中, 本文在考虑自重载荷的情况下, 建立 NEPE 推进剂寿命评估方法, 为推进剂的设计、贮存和使用时的可靠性和安全性提供理论依据。

## 1 NEPE 推进剂失效机理分析

大尺寸 NEPE 推进剂在长期贮存过程中, 位于底部的装药承受极大的压力。在长贮过程中, 一方面这部分装药中的高聚物缓慢降解, 引起力学性能降低; 另一方面, 在其自重载荷作用下, 分解产生的气体不易逸出, 自催化分解加剧<sup>[4-6]</sup>, 同时发生力学松弛, 力学性能降低。由于 NEPE 推进剂装药配方中功能组分不同, 老化机理不同, 因此表现出的影响规律不同, 失效模式也有不同。

目前, NEPE 推进剂的寿命评估普遍采用高温加速老化试验, 通过监测老化过程中试样特征参量的变

化, 以建立加速老化温度与贮存时间之间的等效关系, 评估 NEPE 推进剂的贮存寿命。在加速老化过程中, 主要从燃烧特性、能量性能、力学特性、特征气体含量、质量损失等方面选取合适的失效参量<sup>[20-26]</sup>, 确定 NEPE 推进剂的失效模式, 评估寿命。

NEPE 推进剂老化过程中的力学性能研究较多<sup>[18-19, 21-26]</sup>。笔者课题组<sup>[27]</sup>前期对压力作用下 NEPE 推进剂加速老化过程中的失效模式展开了研究, 通过对恒定温度 (75 °C)、恒定压力 (1 MPa) 载荷下 NEPE 推进剂加速老化过程中的能量性能、燃烧性能、安全性能、力学性能等特性进行了监测。实验结果表明, 随加速老化时间的延长, NEPE 推进剂能量性能 (爆热)、燃烧性能 (燃速)、安全性能 (安定剂含量)、热爆炸临界温度 ( $T_b$ ) 等特性基本保持不变, 但是表征力学性能的最大抗拉强度 ( $\sigma_m$ ) 与最大伸长率 ( $\epsilon_m$ ) 则随着老化时间的延长而显著下降 (如图 1 所示)。加速老化试验前后,  $\sigma_m$ 、 $\epsilon_m$  的变化率分别为 41.7%、42.4%, 表明加速老化过程中 NEPE 推进剂的力学性能衰退显著, 其主要失效模式模式为力学性能退化。 $\sigma_m$  与  $\epsilon_m$  均为推进剂力学性能的代表参量, 在静态力学试验中, 试验片厚度对  $\epsilon_m$  测量结果的影响较大, 所以确定  $\sigma_m$  作为为其力学性能的失效参量。结合大尺寸 NEPE 推进剂贮存过程, 以  $\sigma_m$  作为力学老化特征参量, 评定装药质量超过 300 kg 的大尺寸 NEPE 推进剂装药贮存期限的方法。该方法根据力学性能老化及反应动力学规律, 以  $\sigma_m$  为特征参量, 设计不同温度/压力双环境应力加速试验, 用以评定大

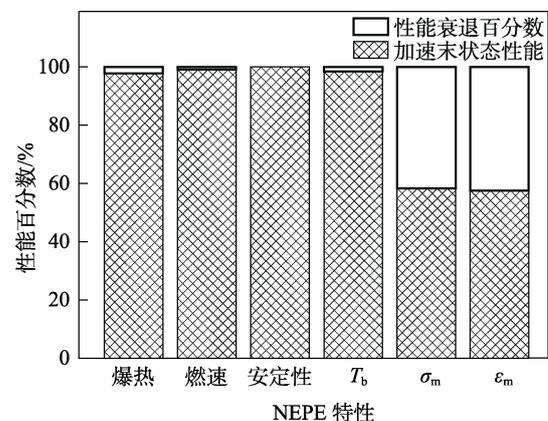


图 1 NEPE 推进剂老化前后不同特性的变化率<sup>[27]</sup>

Fig.1 Change rates of different characteristics of NEPE propellant before and after aging<sup>[27]</sup>

尺寸 NEPE 推进剂装药的贮存寿命。

## 2 试验

### 2.1 样品

NEPE 推进剂组成成分为硝酸酯及硝胺、AP、Al 粉、粘合剂与安定剂。方坯药样品由北京理工大学材料学院提供，按照 GJB 770B—2005 方法 413.1 中力学性能测试要求，试片尺寸为 120 mm×25 mm×70 mm 或 120 mm×25 mm×10 mm。西安近代化学研究所开展了加速老化试验及性能测试试验。

### 2.2 试验设计及试验设备

采用自制压力加载装置为 NEPE 推进剂试片施加压力，压力加载装置如图 2 所示。该装置由支撑单元、压力加载单元与样品盒单元组成。压力加载单元由加压圆柱及弹簧组成，根据弹簧的弹性系数及模拟载荷质量，计算弹簧的形变量，压缩弹簧，获得指定压力。将预制试件置于压力加载单元圆柱下端面，通过弹簧压缩，使加压圆柱下端面对样品盒盖板施加压力，压力传导作用于 NEPE 推进剂试样。待达到预定压力后，停止加压，并且通过卡扣紧固样品盒底板及盖板，制成加速老化试验件。加速试验中，基于文献 [28] 中推进剂密度及尺寸参数，计算得到推进剂长期贮存过程中受到的压力载荷为 0.5~2.0 MPa，故设置试验件预紧压力为 0.5、1、1.5 MPa。

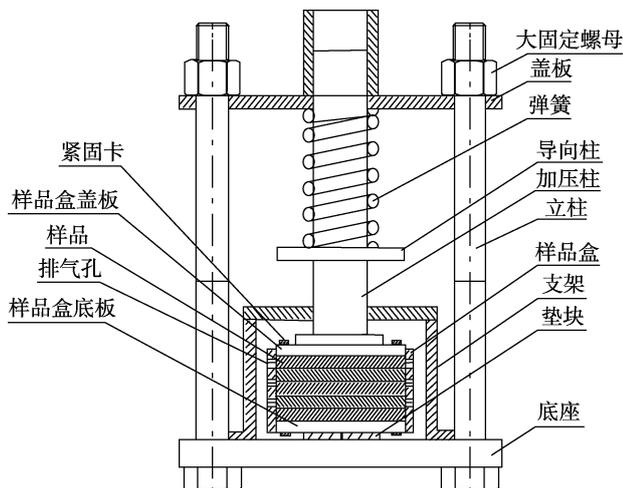


图 2 压力加载装置

Fig.2 Schematic diagram of pressure loading device

将装有 NEPE 推进剂试验件的样品盒置于单温度恒温水浴烘箱中加速老化，按相同时间间隔取出试验件，自然冷却至室温后，取出样品盒中的试样，开展相关力学性能测试。实验采用 AHX-824 安全型恒温水浴烘箱，控温精度为  $\pm 1$  °C。NEPE 推进剂试验件的加速老化温度为 55、65、75 °C。

双因素试验的设计方案见表 1。 $l$  和  $k$  分别是温度和压力的加速应力水平数，设定正常应力水平组合为 (0, 0)，第  $i$  个温度水平与第  $j$  个压力水平组合为加速应力水平组合 ( $i, j$ )，温度和压力的双应力水平组合共有  $l \times k$  个。根据实验设计及数据分析原则，在  $l \times k$  个水平组合下各安排一个寿命试验，或者仅对部分应力水平组合各安排一个寿命试验，但是应不少于 5 组<sup>[29]</sup>。根据 NEPE 推进剂退化性能<sup>[10]</sup>，设计的温度-压力加速试验方案见表 2。

表 1 双因素试验设计  
Tab.1 Table of double factor test design

$i$	$j$			
	1	2	3	4
1			△	
2			△	
3	△	△	△	△
4			△	
5			△	

表 2 温度-压力加速试验方案  
Tab.2 Test design under temperature-pressure conditions

温度/°C	压力/MPa		
	0.5	1.0	1.5
75	△	△	△
65		△	
55		△	

按照 GJB 770B—2005 中方法 413.1 “最大抗拉强度、断裂强度、最大伸长率和断裂伸长率单向拉伸法”要求，将加速老化后的 NEPE 推进剂试片制成厚 10 mm 的哑铃型试样，进行拉伸强度测试，测量其最大拉伸强度和最大伸长率。静态极限力学性能测试采用美国 INSTRON 公司的 4505 型万能试验机，测试的环境温度为 20 °C，拉伸速率为 100 mm/min，试验中异常值的判断及处理按照测试方法标准中相应要求处理。

## 3 结果分析

按照表 2 的试验方案，对 NEPE 推进剂试片在 55、65、75 °C 以及 0.5、1、1.5 MPa 预紧压力作用下，开展加速老化试验，跟踪测量加速老化过程中试片的最大抗拉强度特性，试验结果见表 3。对上述试验结果进行处理，取加速老化过程中最大抗拉强度与初始阶段最大抗拉强度比值，见表 4。未加预紧压力载荷时，测量不同温度下加速老化过程中 NEPE 推进剂试片的最大抗拉强度特性，见表 5<sup>[26]</sup>。

由表 5 可知，未加预紧压力载荷时，不同试验温度下，随老化时间的增加，NEPE 推进剂的最大抗

表3 不同温度-压力条件下最大抗拉强度试验结果

Tab.3 Test results of maximum tensile strength under different temperature-pressure conditions

75 °C/1.5 MPa		75 °C/1.0 MPa		75 °C/0.5 MPa		65 °C/1.0 MPa		55 °C/1.0 MPa	
t/d	$\sigma_m$ /MPa								
0	0.698	0	0.612	0	0.665	0	0.640	0	0.668
4	0.645	5	0.619	7	0.649	10	0.612	20	0.650
8	0.607	10	0.586	14	0.635	20	0.601	40	0.644
12	0.590	15	0.538	21	0.596	40	0.585	60	0.637
16	0.545	20	0.528	28	0.547	60	0.519	80	0.618
20	0.521	25	0.506	35	0.478	80	0.501	100	0.585
24	0.491	30	0.511	42	0.464	90	0.471	120	0.562
28	0.490	35	0.389	49	0.418	—	—	140	0.541
32	0.401	42	0.357	—	—	—	—	—	—

表4 不同温度-压力条件下最大抗拉强度比值

Tab.4 Specific ratio of maximum tensile strength under different temperature-pressure conditions

75 °C/1.5 MPa		75 °C/1.0 MPa		75 °C/0.5 MPa		65 °C/1.0 MPa		55 °C/1.0 MPa	
t/d	$\sigma_m/\sigma_0$								
0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
4	0.924	5	1.011	7	0.976	10	0.956	20	0.973
8	0.870	10	0.958	14	0.956	20	0.939	40	0.964
12	0.845	15	0.879	21	0.896	40	0.914	60	0.954
16	0.781	20	0.863	28	0.823	60	0.811	80	0.925
20	0.746	25	0.827	35	0.719	80	0.783	100	0.876
24	0.703	30	0.835	42	0.698	90	0.736	120	0.841
28	0.703	35	0.636	49	0.629	—	—	140	0.810
32	0.574	42	0.583	—	—	—	—	—	—

表5 常压不同温度条件下最大抗拉强度试验结果<sup>[26]</sup>Tab.5 Test results of maximum tensile strength under different temperature conditions<sup>[26]</sup>

75 °C		65 °C		55 °C	
t/d	$\sigma_m$	t/d	$\sigma_m$	t/d	$\sigma_m$
0	0.77	0	0.77	0	0.77
8	0.62	20	0.69	60	0.70
12	0.60	30	0.67	90	0.66
16	0.58	40	0.66	120	0.65
20	0.55	50	0.64	150	0.64
24	0.49	60	0.62	180	0.64
28	0.45	70	0.55	240	0.54
32	0.37	80	0.54	—	—
48	0.33	—	—	—	—

拉强度显著降低, 加速老化试验温度越高, 其力学性能下降越快。

### 3.1 不同温度下 NEPE 推进剂的加速老化特性

按照 GJB 770B—2005 方法 413.1 “最大抗拉强度、断裂强度、最大伸长率和断裂伸长率单向拉伸法”, 测量 NEPE 推进剂试片的最大抗拉强度, 测量

过程中应力随应变的变化如图 3 所示。由图 3 可知, 测试过程中, NEPE 推进剂呈现出弹性段、弹塑性段以及蠕变段的力学特性。最大抗拉强度  $\sigma_m$  为试验片承受的最大拉力与截面积之比。

当预紧压力载荷为 1 MPa 时, 在 55、65、75 °C 温度条件下, NEPE 推进剂的力学性能也随老化时间的增加而显著下降, 如图 4 所示。55 °C 温度下, 加速试验 140 d 时, NEPE 试样的  $\sigma_m$  由初始状态的

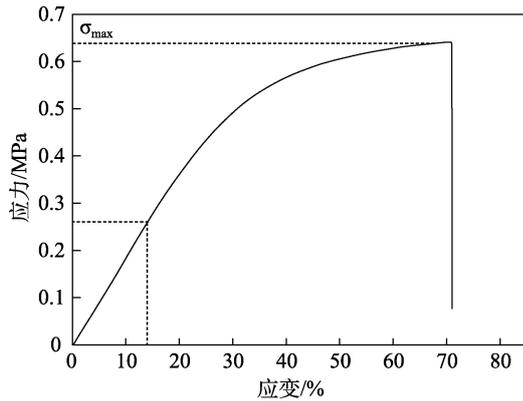


图 3 NEPE 推进剂力学性能测量

Fig.3 Mechanical measurements of NEPE propellant

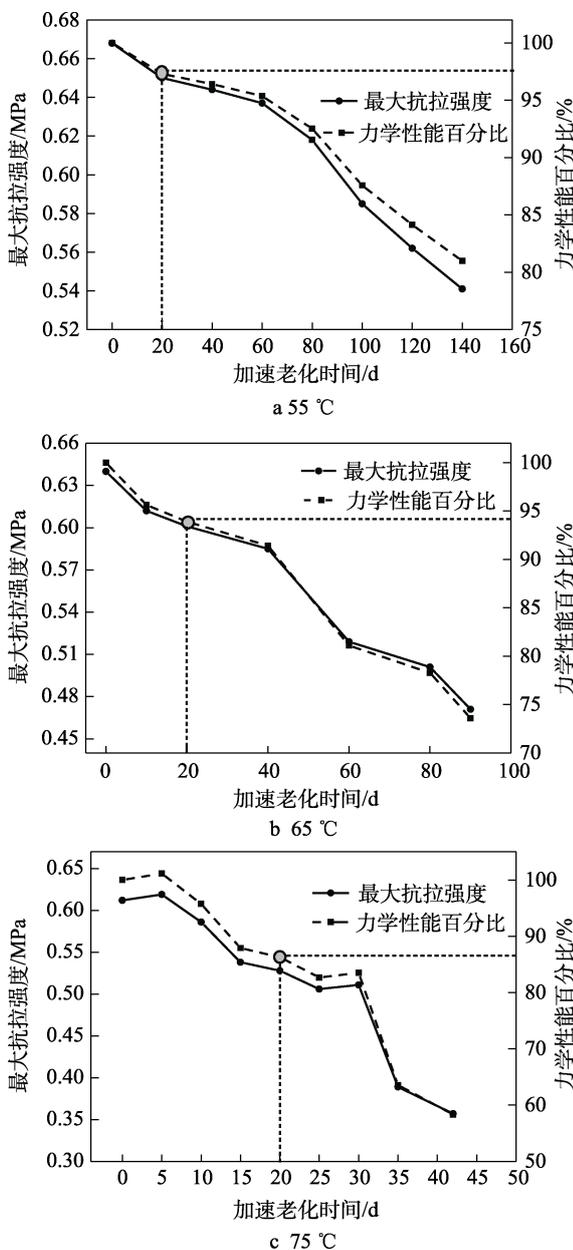


图 4 不同温度下 NEPE 推进剂力学性能的老化特性

Fig.4 Mechanical properties of NEPE propellant at different temperatures

0.668 MPa 下降至 0.541 MPa，性能减小至初始状态的 81.0%；65 °C 温度下，加速试验 90 d 时， $\sigma_m$  则从最初的 0.640 MPa 下降至 0.471 MPa，性能减小至初始状态的 73.6%；75 °C 温度下，加速试验 49 d 时， $\sigma_m$  由最初状态的 0.612 MPa 下降至 0.418 MPa，性能降至初始状态的 62.9%。

在 1 MPa 预紧压力载荷作用下，对 NEPE 推进剂的加速老化试验中，75 °C 温度条件下加速 20 d，其性能降低至 86.3%；65 °C 温度条件下加速 20 d，推进剂试样性能降低至 93.9%；55 °C 温度条件下加速 20 d 时，NEPE 推进剂性能下降至 97.3%。据此计算可知，1 MPa 压力作用下，加速老化温度每降低 10 °C，反应时间延长为原反应时间的 2.25 倍，即此时温度系数为 2.25。由硝酸酯火药安全评估及模型计算可知，单温度应力条件下，热分解放热反应速率的温度系数取 3<sup>[30-31]</sup>。因此，在温度-压力双应力作用下，NEPE 推进剂加速老化过程中，热分解放热反应速率的温度系数也会发生变化。

综上所述，1 MPa 预紧压力载荷不同温度条件下的加速老化试验中，NEPE 推进剂的力学性能均随老化时间的增加而下降，但是与常压单温度条件下的加速老化特性相比，其热分解放热反应速率的温度系数不同。因此，需对温度-压力双应力作用下的加速老化特性展开研究，获得更加准确的加速老化寿命评价模型，计算不同预紧压力载荷下的 NEPE 推进剂贮存寿命。

### 3.2 不同压力下 NEPE 推进剂的加速老化特性

在温度为 75 °C 下，施加 0.5、1、1.5 MPa 预紧压力时，NEPE 推进剂的最大抗拉强度随加速老化时间的变化规律如图 5 所示。由图 5 可知，相同加速老化温度下，施加不同预紧压力载荷时，随加速老化时间的增加，NEPE 推进剂试样的抗拉强度呈现出显著降低的变化趋势。

在不同预紧压力下，分析 NEPE 推进剂力学性能下降至 85% 时所需老化加速时间。在 0.5 MPa 预紧压力下，加速老化时间为 24.20 d；1 MPa 预紧压力下，加速老化时间为 20.96 d；当预紧压力增大至 1.5 MPa 时，加速老化时间为 11.45 d。由此可知，相同温度条件下加速老化，力学性能下降至相同程度时，推进剂试样受到的预紧压力载荷越大，其力学性能衰退越快。同时，当预紧压力较大（1.5 MPa）时，由于受到温度-压力双应力作用，加速老化 32 d 后，推进剂试样逐渐发生蠕变，难以开展后续试验。

### 3.3 NEPE 推进剂加速老化模型构建

对不同压力、各温度条件下的加速老化过程中，NEPE 推进剂试片的最大抗拉强度变化百分比（见表

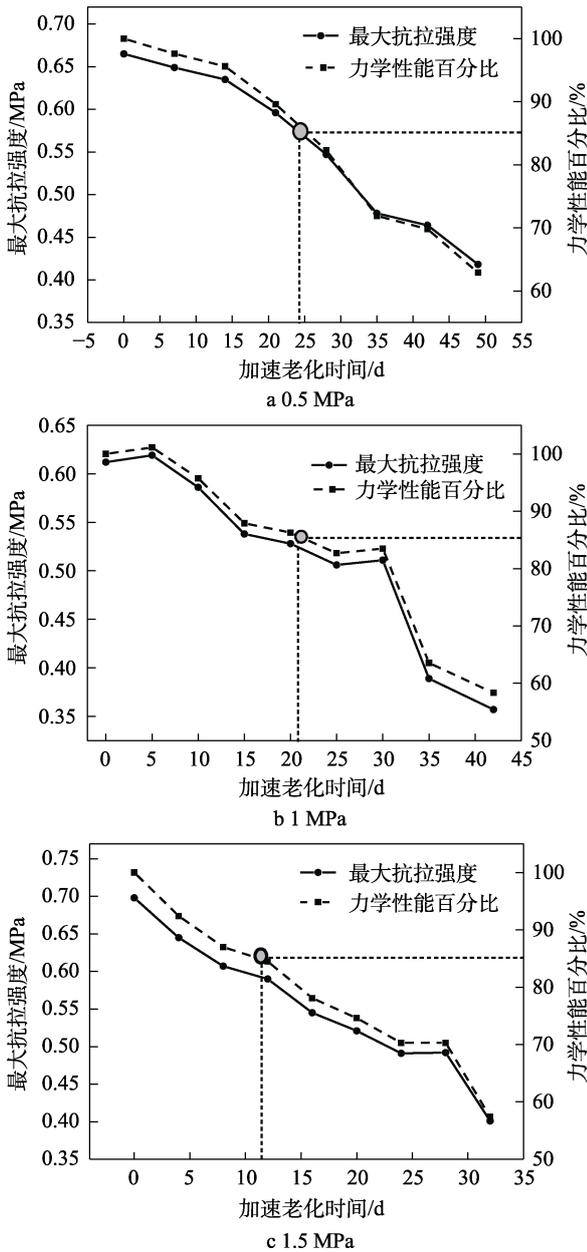


图5 不同压力下 NEPE 推进剂力学性能老化特性  
Fig.5 Mechanical properties of NEPE propellant under different pressure

4) 进行分析, 将最大抗拉强度下降至原始值的 85% 作为 NEPE 推进剂力学性能失效的技术指标, 获得各温度-压力组合条件下 NEPE 推进剂的安全贮存期  $L(T,P)$ , 见表 6。

表 6 不同温度-压力条件下安全贮存期  
Tab.6 Safety storage time under different temperature-pressure conditions

温度/°C	0.5 MPa	1.0 MPa	1.5 MPa
75	24.20	20.96	11.45
65		51.17	
55		116.76	

本文采用温度和压力作为加速应力, 采用广义艾琳模型<sup>[32]</sup>作为 NEPE 推进剂寿命预估的加速模型, 见式 (1)。

$$\ln L(T,P) = a + \frac{b}{T} + c \ln P + \frac{d}{T} \ln P \quad (1)$$

式中:  $L(T,P)$  为 NEPE 推进剂安全贮存期, d;  $P$  为推进剂所受压力, Pa;  $T$  为老化加速试验温度, K;  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  为模型待定系数。

将表 6 中的安全贮存期数据代入广义艾琳模型方程进行数据回归处理, 获得安全贮存期与加速温度-压力模型方程中的未知系数:  $a=-26.84$ ,  $b=12\ 408$ ,  $c=-0.443$ ,  $d=0$ 。由该模型外推 30 °C 常压下 NEPE 推进剂的贮存寿命为 21.8 a, 与文献[26]中 30 °C 下贮存寿命预估结果相比, 误差为 6.86%, 表明构建的模型可以用于预估温度-压力双应力条件下 NEPE 推进剂的贮存寿命。

NEPE 推进剂的寿命预估普遍采用高温加速老化试验的方法。当预紧压力过大时, 加速老化试验过程中试验片会产生蠕变, 难以开展寿命预估分析。本文构建的温度-压力双应力条件下的贮存寿命预估模型, 可用于评估不同载荷压力下 NEPE 推进剂的贮存寿命。根据拟合得到的回归方程, NEPE 推进剂在 25 °C、2 MPa 的预紧压力下, 预估其安全贮存寿命  $L=11.82$  a。

## 4 结论

本文对温度-压力双应力作用下的 NEPE 推进剂的老化特性展开研究, 得到如下结论:

1) 对 NEPE 推进剂试片在温度-压力双应力条件下进行加速老化试验, 预紧压力为 1 MPa 时, 55、65、75 °C 温度下加速 20 d, 其力学性能分别下降至 86.3%、93.9%、97.3%, 即加载预紧压力时, NEPE 的力学性能随老化时间的增加而降低, 而且温度越高, 性能降低越显著。

2) 老化加速温度为 75 °C 时, 预紧压力为 0.5、1、1.5 MPa 条件下, NEPE 推进剂的力学性能随老化时间的增加而降低。当试片力学性能下降至 85% 时, 所需加速老化时间分别为 24.20、20.96、11.45 d, 即预紧压力越大, 力学性能降低越显著。

3) 根据温度-压力双应力条件下的加速老化试验结果, 基于广义艾琳模型方程, 构建了温度-压力双应力作用下 NEPE 推进剂加速老化寿命的预估模型, 并且通过力学性能评估计算得到 25 °C、2 MPa 预紧压力下 NEPE 推进剂的安全贮存寿命。

## 参考文献:

[1] 谭惠民. 高能推进剂的发展方向——NEPE 推进剂[J]. 北京理工大学学报, 1992, 12(S1): 1-7.

- TAN Hui-min. Nitrate Ester Plasticized Polyether Propellant—A Novel Development in Solid Propellant[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1992, 12(S1): 1-7.
- [2] 郑剑, 侯林法, 杨仲雄. 高能固体推进剂技术回顾与展望[J]. 固体火箭技术, 2001, 24(1): 28-34.  
ZHENG Jian, HOU Lin-fa, YANG Zhong-xiong. The Progress and Prospects of High Energy Propellants[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2001, 24(1): 28-34.
- [3] 周集义. NEPE 推进剂[J]. 化学推进剂与高分子材料, 1999(5): 1-4.  
ZHOU Ji-yi. NEPE Propellant[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 1999(5): 1-4.
- [4] 赵凤起, 李上文, 汪渊, 等. NEPE 推进剂的热分解 ( I ) 粘合剂的热分解[J]. 推进技术, 2002, 23(3): 249-251.  
ZHAO Feng-qi, LI Shang-wen, WANG Yuan, et al. Study on the Thermal Decomposition of NEPE Propellant ( I ) Thermal Decomposition of Binder[J]. Journal of Propulsion Technology, 2002, 23(3): 249-251.
- [5] 秦沛文, 赵孝彬, 李军, 等. NEPE 推进剂热安全性的尺寸效应[J]. 火炸药学报, 2016, 39(1): 84-88.  
QIN Pei-wen, ZHAO Xiao-bin, LI Jun, et al. Size Effects of Thermal Safety of NEPE Propellant[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2016, 39(1): 84-88.
- [6] 罗善国, 陈福泰, 谭惠民, 等. NEPE 推进剂中聚氨酯的热分解行为[J]. 火炸药学报, 1999, 22(1): 22-26.  
LUO Shan-guo, CHEN Fu-tai, TAN Hui-min, et al. Thermal Decomposition of Polyurethane Bonded Propellants[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 1999, 22(1): 22-26.
- [7] 张翠梅, 周激, 徐峥. 恒 pH 滴定法测定二苯胺中苯胺的含量[J]. 火炸药学报, 2005, 28(4): 83-85.  
ZHANG Cui-mei, ZHOU Ji, XU Zheng. The Determination of Aniline in P-Diphenylamine with Constant Value of pH Titrate Method[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2005, 28(4): 83-85.
- [8] 顾妍, 张冬梅, 张林军, 等. 某三基发射药贮存寿命的预估方法[J]. 火炸药学报, 2017, 40(1): 91-96.  
GU Yan, ZHANG Dong-mei, ZHANG Lin-jun, et al. Method of Predicting the Storage Life of a Tri-Base Gun Propellant[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2017, 40(1): 91-96.
- [9] 周静, 丁黎, 祝艳龙, 等. 微量量热法预估硝酸酯火药的安全贮存寿命[J]. 火炸药学报, 2020, 43(4): 437-441.  
ZHOU Jing, DING Li, ZHU Yan-long, et al. Evaluation of Safe Storage Life of Nitrate Propellant with Microcalorimetry[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2020, 43(4): 437-441.
- [10] 祝艳龙, 丁黎, 安静, 等. 交联密度为特征参量的 NEPE 推进剂贮存寿命评估方法研究[J/OL]. 固体火箭技术, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1176.V.20210607.1350.003.html>.  
ZHU Yan-long, DING Li, AN Jing, et al. Study on Storage Life Evaluation Method of NEPE Propellant with Crosslinking Density as Characteristic Parameter[J/OL]. Journal of Solid Rocket Technology, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1176.V.20210607.1350.003.html>.
- [11] 张昊, 彭松, 庞爱民, 等. NEPE 推进剂老化过程中结构与力学性能的关系[J]. 火炸药学报, 2007, 30(1): 13-16.  
ZHANG Hao, PENG Song, PANG Ai-min, et al. Relationship of Structure and Mechanical Properties in the Aging Process of NEPE Propellant[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2007, 30(1): 13-16.
- [12] 莫文宾, 李进贤. 基于遗传神经网络的 NEPE 推进剂寿命预估[J]. 火炸药学报, 2009, 32(5): 58-61.  
MO Wen-bin, LI Jin-xian. Life Prediction of NEPE Propellant Base on GA-BP Neural Network[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2009, 32(5): 58-61.
- [13] 张腊莹, 刘子如, 衡淑云, 等. NEPE 类推进剂的寿命预估[J]. 推进技术, 2006, 27(6): 572-576.  
ZHANG La-ying, LIU Zi-ru, HENG Shu-yun, et al. Estimation of Life Span for NEPE Propellant[J]. Journal of Propulsion Technology, 2006, 27(6): 572-576.
- [14] 赵永俊, 张伟, 张兴高, 等. NEPE 推进剂贮存老化性能研究[J]. 含能材料, 2007, 15(4): 332-335.  
ZHAO Yong-jun, ZHANG Wei, ZHANG Xing-gao, et al. Aging Properties of NEPE Propellant[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2007, 15(4): 332-335.
- [15] 孔令泽, 董可海, 唐岩辉, 等. NEPE 推进剂无损型贮存寿命预估[J]. 含能材料, 2022, 30(2): 163-170.  
KONG Ling-ze, DONG Ke-hai, TANG Yan-hui, et al. Non-Destructive Storage Life Prediction of NEPE Propellant[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2022, 30(2): 163-170.
- [16] 池旭辉, 彭松, 庞爱民, 等. NEPE 推进剂湿老化特性研究[J]. 含能材料, 2009, 17(2): 236-240.  
CHI Xu-hui, PENG Song, PANG Ai-min, et al. Humidity Aging Behaviors of NEPE Propellant[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2009, 17(2): 236-240.
- [17] 池旭辉, 彭松, 庞爱民, 等. NEPE 推进剂湿热双应力老化特性[J]. 含能材料, 2010, 18(3): 309-315.  
CHI Xu-hui, PENG Song, PANG Ai-min, et al. Humidity-Heat Combination Stress Aging Behavior of NEPE Propellants[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2010, 18(3): 309-315.
- [18] 常新龙, 余堰峰, 张有宏, 等. 基于湿热老化试验的 NEPE 推进剂贮存寿命预估[J]. 上海航天, 2010, 27(6): 57-60.  
CHANG Xin-long, YU Yan-feng, ZHANG You-hong, et al. Storage Life Prediction of NEPE Propellant Based on Hygrothermal Aging Experiment[J]. Aerospace Shanghai, 2010, 27(6): 57-60.
- [19] 李红霞, 强洪夫, 王广, 等. 温湿度变化对 NEPE 推进剂力学性能的影响分析[J]. 战术导弹技术, 2010(1): 78-80.  
LI Hong-xia, QIANG Hong-fu, WANG Guang, et al. Effect Analysis of Heat and Humidity Change on Mechanical Properties of NEPE Propellant[J]. Tactical Missile Technology, 2010(1): 78-80.

- nology, 2010(1): 78-80.
- [20] 董可海, 裴立冠, 孔令泽, 等. 定应变下 NEPE 推进剂的贮存老化性能[J]. 固体火箭技术, 2019, 42(3): 403-408.  
DONG Ke-hai, PEI Li-guan, KONG Ling-ze, et al. Storage Aging Performance of NEPE Propellant under Constant Strain[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2019, 42(3): 403-408.
- [21] 张昊, 彭松, 庞爱民, 等. NEPE 推进剂力学性能与化学安定性关联老化行为及机理[J]. 推进技术, 2007, 28(3): 327-332.  
ZHANG Hao, PENG Song, PANG Ai-min, et al. Coupling Aging Behaviors and Mechanism between Mechanical Properties and Chemical Stability of NEPE Propellant[J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(3): 327-332.
- [22] 张哲, 辛苗, 张正金, 等. 固体推进剂储存老化力学性能双因素方差分析[J]. 爆破器材, 2022(1): 29-34.  
ZHANG Zhe, XIN Miao, ZHANG Zheng-jin, et al. Double-Factor Variance Analysis on Mechanical Behaviors of a Solid Propellant during Aging[J]. Explosive Materials, 2022(1): 29-34.
- [23] 范夕萍, 刘子如, 孙莉霞, 等. NEPE-5 复合固体推进剂物理老化寿命的预估[J]. 火炸药学报, 2003, 26(1): 43-46.  
FAN Xi-ping, LIU Zi-ru, SUN Li-xia, et al. A Prediction on the Physical Aging Life of NEPE-5 Propellant[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2003, 26(1): 43-46.
- [24] 张昊, 庞爱民, 彭松. 固体推进剂贮存寿命非破坏性评估方法( I )——老化特征参数监测法[J]. 固体火箭技术, 2005, 28(4): 271-275.  
ZHANG Hao, PANG Ai-min, PENG Song. Nondestructive Assessment Approaches to Storage Life of Solid Propellants( I )—Aging Characteristic Parameter Surveillance Method[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2005, 28(4): 271-275.
- [25] 杨根, 彭松, 池旭辉, 等. NEPE 推进剂“两段式”老化的动力学研究[J]. 固体火箭技术, 2009, 32(6): 650-653.  
YANG Gen, PENG Song, CHI Xu-hui, et al. Investigation on NEPE Propellants “Two-Stage-Style” Ageing Kinetics[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2009, 32(6): 650-653.
- [26] 刘文亮, 衡淑云, 岳璞, 等. NEPE 推进剂贮存寿命预估方法的比较[J]. 化学分析计量, 2011, 20(S1): 77-80.  
LIU Wen-liang, HENG Shu-yun, YUE Pu, et al. Comparison of the Storage Life Estimating Method for NEPE Propellant[J]. Chemical Analysis and Meterage, 2011, 20(S1): 77-80.
- [27] 安静, 丁黎, 梁忆, 等. 温度和压力载荷作用下 NEPE 推进剂的老化性能[J]. 火炸药学报, 2019, 42(4): 375-379.  
AN Jing, DING Li, LIANG Yi, et al. Aging Properties of NEPE Propellant under Temperature and Pressure Loading Action[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2019, 42(4): 375-379.
- [28] 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 Jun-liang, ZHU Zu-nian, DU Jian-ke, 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.
- [29] 刘振学, 王力. 实验设计与数据处理[M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2015.  
LIU Zhen-xue, WANG Li. Experimental Design and Data Processing[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015.
- [30] 刘子如, 邵颖惠, 任晓宁, 等. 预估火炸药寿命的数学模型及其计算[J]. 火炸药学报, 2016, 39(2): 1-7.  
LIU Zi-ru, SHAO Ying-hui, REN Xiao-ning, et al. Mathematical Models and Its Calculations for Predicting the Life of Explosives and Propellants[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2016, 39(2): 1-7.
- [31] 衡淑云, 韩芳, 张林军, 等. 硝酸酯火药安全贮存寿命的预估方法和结果[J]. 火炸药学报, 2006, 29(4): 71-76.  
HENG Shu-yun, HAN Fang, ZHANG Lin-jun, et al. Estimation Method and Results of Safe Storage Life for Nitrate Ester Propellants[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2006, 29(4): 71-76.
- [32] 李贵杰, 胡鹏, 谢朝阳, 等. 基于力-热双应力加速试验的橡胶减振结构寿命预测研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(12): 25-30.  
LI Gui-jie, HU Peng, XIE Chao-yang, et al. Research on Life Prediction of Rubber Vibration Damping Structure Based on Mechanical-Thermal Double Stress Accelerated Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(12): 25-30.