

## NEPE 固体推进剂的低频疲劳特性

张文沁<sup>1,2</sup>, 张大鹏<sup>1,2\*</sup>, 雷勇军<sup>1,2,3</sup>, 申志彬<sup>1,2</sup>, 吴凡几<sup>1,2</sup>

(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;  
3. 火箭军工程大学, 陕西 西安 710025)

**摘要:**为研究低频疲劳加载下硝酸酯增塑聚醚(nitrate ester plasticized polyether, NEPE)固体推进剂的损伤演化过程,获得疲劳加载历史对NEPE固体推进剂拉伸力学性能的影响规律,基于电子万能试验机开展了NEPE固体推进剂低频疲劳试验和定应变率单轴拉伸试验,并结合疲劳加载后试件的细观形貌图与试验曲线,进一步分析微细观结构损伤对NEPE固体推进剂宏观力学行为的作用机理。结果表明,低频疲劳载荷会使NEPE固体推进剂基体出现微裂纹,使其基体/颗粒界面出现空穴,进而产生不可忽视的应力软化行为与残余应变;疲劳加载过程中及疲劳加载后,NEPE固体推进剂宏观力学性能的衰减均与最大加载应变呈指数函数关系;低频疲劳载荷所造成的部分微观损伤可恢复,其余疲劳损伤能提升分子链取向重排能力,使材料出现疲劳强化现象。

**关键词:**NEPE推进剂;低频疲劳试验;疲劳损伤演化;微细观损伤

中图分类号:V512 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2025)01-031-11



论文  
拓展

## Low-frequency fatigue characteristics of NEPE solid propellant

ZHANG Wenqin<sup>1,2</sup>, ZHANG Dapeng<sup>1,2\*</sup>, LEI Yongjun<sup>1,2,3</sup>, SHEN Zhibin<sup>1,2</sup>, WU Fanji<sup>1,2</sup>

(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 Mission, Changsha 410073, China;  
3. Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** To investigate the damage evolution process of low-frequency fatigue-loaded NEPE (nitrate ester plasticized polyether) solid propellant and get the influence law of fatigue loading history on tensile mechanical properties of NEPE solid propellant, the NEPE solid propellant low-frequency fatigue tests and uniaxial tensile tests with constant strain rate were conducted by the electronic universal testing machine. Based on the microscopic morphology and testing curves of test piece after fatigue loading, the influential mechanism of microscopic and mesoscopic damage on the NEPE solid propellant macroscopic mechanical behavior was further analyzed. Results indicate that the NEPE solid propellant matrix microcracks and voids at the matrix/particle interface are induced by low-frequency fatigue loads, leading to nonnegligible stress-softening behavior and residual strain. During and after fatigue loading, the attenuations of macroscopic mechanical properties of NEPE solid propellant are all exponentially related to the maximum loading strain. Part of microscopic damage by low-frequency fatigue load can recover, while the remaining fatigue damage may enhance the molecular chain orientation ability, and thus lead to the fatigue-strengthening phenomenon in materials.

**Keywords:** NEPE propellant; low-frequency fatigue tests; evolution of fatigue damage; microscopic and mesoscopic damage

以高能硝酸酯增塑聚醚(nitrate ester plasticized polyether, NEPE)推进剂为代表的固体推进剂具有能量高、力学性能好、燃烧性能稳定等优点<sup>[1-2]</sup>,是舰载导弹推进系统的重要动力来源<sup>[3]</sup>。在海态环境引起的长期低频疲劳载荷作

用下,固体推进剂的力学性能会受到严重影响<sup>[4-6]</sup>,进而威胁固体发动机装药的结构完整性及舰载导弹的使用效能。因此,有必要开展NEPE固体推进剂低频疲劳试验,研究NEPE固体推进剂的低频疲劳损伤机理及力学性能变化规

收稿日期:2024-04-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(12372203);湖南省杰出青年基金资助项目(2021JJ10046);国防科技大学自主创新科学基金资助项目(22-ZZCX-077);国防科技大学空天科学学院青年人才自主研究培育资助项目(KY0505072207)

第一作者:张文沁(2000—),女,上海人,博士研究生,E-mail:zhang253649@163.com

\*通信作者:张大鹏(1989—),男,河南新乡人,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:zhangdapeng@nudt.edu.cn

引用格式:张文沁,张大鹏,雷勇军,等. NEPE固体推进剂的低频疲劳特性[J]. 国防科技大学学报, 2025, 47(1): 31-41.

Citation: ZHANG W Q, ZHANG D P, LEI Y J, et al. Low-frequency fatigue characteristics of NEPE solid propellant[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2025, 47(1): 31-41.

律,为长期海上值班后的舰载固体发动机力学性能预示与结构完整性考核提供试验支撑。

为探究固体推进剂的疲劳损伤特性,相关学者已开展了大量试验研究工作。童心等<sup>[7]</sup>设计并开展了低温宽频范围内的高周疲劳试验,以动态模量为损伤变量,考察加载频率、加载应变幅值对疲劳损伤演化的影响规律,以及疲劳加载后高应变率拉伸力学性能的变化趋势。高艳宾等<sup>[8]</sup>基于刚度的衰减对疲劳损伤演化过程进行分析与理论建模,建立了反映疲劳损伤与应力松弛耦合作用的非线性疲劳损伤模型,并对 NEPE 固体推进剂在疲劳加载中的细观结构变化进行了显微观察。Hu 等<sup>[9]</sup>以黏弹性本构模型中材料参数的降低反映疲劳损伤,基于 NEPE 固体推进剂恒应力幅疲劳试验,建立了适用于不同应力比的疲劳损伤演化修正模型。Maimaitiusersun 等<sup>[10-11]</sup>开展固体推进剂循环加载试验,针对循环加载中固体推进剂表现出的应力软化行为,采用唯象法提出了指数型的循环加载函数,并从推进剂黏弹性恢复特性的角度解释了循环加载过程中推进剂的体积变化现象。郭坚等<sup>[12]</sup>基于滞后环曲线计算疲劳耗散能,通过疲劳寿命建立了耗散能稳定值与加载应变幅值之间的关系,并对疲劳加载中推进剂的“脱湿”过程作了显微分析。许进升等<sup>[13]</sup>考虑推进剂疲劳过程中非弹性效应导致的不可逆热力学现象,对疲劳试验中的试件表面温升作了监测,并从温度演化的角度分析了推进剂细观损伤演化过程。

现有研究主要针对疲劳加载中的宏观力学性能变化规律,建立能表征宏观力学性能衰减的损伤演化模型,进而为疲劳加载中及疲劳加载后的固体推进剂力学性能预示提供试验基础及理论支撑。在疲劳损伤机理研究中,受到研究手段的限制,目前的研究主要停留在细观层面的界面损伤及裂纹扩展方面,尚未对疲劳加载下的微观结构演化、基体与界面的相互影响机制作进一步分析。

以下针对 NEPE 固体推进剂低频疲劳损伤特性研究的不足,开展不同温度、不同应变幅下的低频疲劳试验以及疲劳后拉伸试验,重点探究 NEPE 固体推进剂的宏观力学性能演化过程并分析相应的微细观结构作用机理,揭示疲劳损伤对低应变率拉伸失效过程的影响机制,获得疲劳加载历史对 NEPE 固体推进剂拉伸力学性能的影响规律。研究结果可为考虑疲劳损伤的黏弹性本构理论建模、疲劳加载后的固体发动机力学性能预示提供数据支撑。

## 1 试验设计与方法

本节设计并开展 NEPE 固体推进剂的低频疲劳试验与疲劳后拉伸试验,以探究 NEPE 固体推进剂在低频疲劳下的动态力学性能变化规律、低频疲劳载荷对 NEPE 固体推进剂拉伸力学性能的影响规律及作用机理。

### 1.1 试验方案

为研究 NEPE 固体推进剂在低频疲劳载荷下的动态力学性能变化规律及动态力学性能变化的应变效应,首先开展包含不同应变条件的低频疲劳试验。低频疲劳特性研究的试验方案见表 1,其中名称含“FC”的试验组为试验对照组,“T”后数字表示试验加载温度,“E”后数字表示试验最大加载应变,如“T10E05”表示在 10 °C 的温度下进行疲劳加载,最大加载应变为 5%。对照组不进行疲劳加载,其余试验条件下的疲劳加载周期数均为  $10^4$ 。为防止试件在疲劳加载过程中受压发生弯曲变形或发生屈曲,影响疲劳加载效果,试验设定了最小加载应变。经多次试验校核,在以上试验条件下疲劳加载  $10^4$  个周期的过程中,试件不会受到压应力作用。

表 1 低频疲劳特性研究试验方案

Tab. 1 Low-frequency fatigue characteristic research testing scheme

温度/°C	名称	最大加载应变/%	最小加载应变/%
10	T10FC		
	T10E05	5	3
	T10E15	15	7
	T10E30	30	13
20	T20FC		
	T20E05	5	3
	T20E10	10	5
	T20E15	15	7
	T20E20	20	11
30	T20E30	30	13
	T30FC		
	T30E05	5	3
	T30E15	15	7
	T30E30	30	13

研究主要针对的是值班环境中波浪载荷造成的药柱低频疲劳行为。不同海域的波浪载荷频率相差较大,频率量级介于  $10^{-3} \sim 10^1$  之间<sup>[14-16]</sup>,其

中多数海域波浪载荷的频率量级<sup>[17]</sup>为 $10^{-1}$ ,因此低频疲劳试验的加载频率定为 0.5 Hz。此外,试验设置了三个温度条件用于对比常温段内热力耦合作用对 NEPE 固体推进剂的影响规律。

为了进一步考察低频疲劳加载后 NEPE 固体推进剂的损伤程度,总结低频疲劳加载历史对 NEPE 固体推进剂拉伸力学性能的影响规律,将疲劳加载后的 NEPE 固体推进剂试件以恒定速率拉伸至断裂。

固体推进剂在单轴拉伸时的损伤演化较为复杂,在不同应变率作用下,分别表现出黏合剂基体撕裂、粘接界面破坏及颗粒破碎等多种破坏模式<sup>[18-19]</sup>。其中,固体推进剂在低应变率拉伸时的破坏模式由界面“脱湿”及基体撕裂主导<sup>[20]</sup>。对于颗粒填充的高聚物材料,疲劳载荷除了会使基体的微观网络结构发生演化,还会使颗粒/基体界面产生裂纹、空穴等细观损伤<sup>[21]</sup>。为了深入研究疲劳加载导致的基体、界面初始缺陷对微观损伤演化的作用机制,以及疲劳加载历史对拉伸力学性能的影响规律,疲劳后拉伸试验采用低应变率拉伸模式,拉伸速率为 2 mm/min。

## 1.2 试验系统与试验方法

试验所研究的 NEPE 固体推进剂主要由铝粉、高氯酸铵颗粒、奥克托金粉末及基体构成,其中铝粉、高氯酸铵颗粒、奥克托金粉末的质量分数分别为 18%、12% 及 44%。测试试件均为 GJB 770B—2005《火药试验方法》中规定的 B 型标准哑铃形试件,试件形状与尺寸见图 1。疲劳试验与拉伸试验均由 WDW-10 电子万能试验机进行试验加载,试验加载系统由电子万能试验机、试验夹具与高低温试验箱组成,见图 2。

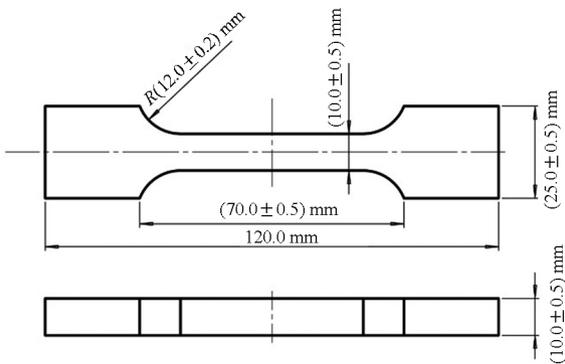


图 1 B 型标准哑铃形试件

Fig. 1 B-type standard dumbbell-shaped specimen

试验测试过程中,高低温试验箱提供试验所需环境温度,试验系统的上夹具固定,下夹具发生位移以施加相应的应变载荷。疲劳试验的加载步



图 2 试验加载系统

Fig. 2 Loading and testing system

骤分为线性准静态加载与疲劳加载两步。下夹具首先以 40 mm/min 的速率向下移动至平均位移,此时试验段由零应变以  $9.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  的应变率增大至平均应变  $\varepsilon_m = \frac{\varepsilon_{\max} + \varepsilon_{\min}}{2}$ ,而后下夹具再以正弦波形移动以施加应变疲劳载荷,疲劳加载曲线见图 3。

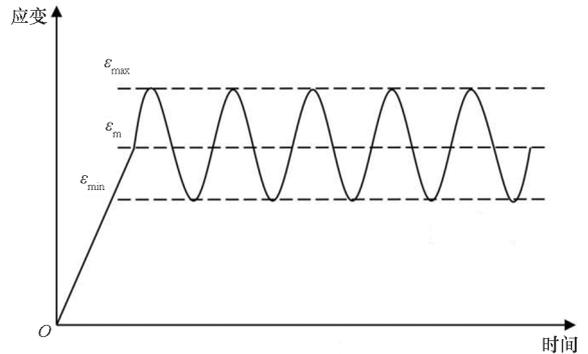


图 3 疲劳加载曲线

Fig. 3 Fatigue-loading curve

## 2 低频疲劳损伤行为

本节基于疲劳滞后环曲线的变化过程,分析 NEPE 固体推进剂的低频疲劳损伤演化规律,并从微观结构演化角度揭示 NEPE 固体推进剂的低频疲劳行为机理。

### 2.1 低频疲劳损伤机理

低频疲劳载荷作用下,NEPE 固体推进剂的基体、基体/颗粒粘接界面均会发生结构演化,从而影响试件的宏观力学行为。图 4 为 T20E05 试验加载后的试件表面细观形貌,从图中能够观测到较为明显的空穴结构以及发白区域。其中,空穴主要由界面损伤导致<sup>[21]</sup>,基体/颗粒粘接界面在疲劳载荷的作用下发生脱粘形成空穴,空穴在外载荷作用下逐

渐扩张,最终形成肉眼可观测到的明显孔洞。应力发白现象则是由 NEPE 固体推进剂基体微观结构的演化导致,疲劳载荷使得基体分子链沿外力方向取向重排,高度取向的分子链及周围空洞逐渐形成可逆的微裂纹。光线在微裂纹表面发生全反射,使得微裂纹聚集区的亮度更高,进而出现与热塑性塑料类似的应力发白现象<sup>[22]</sup>。

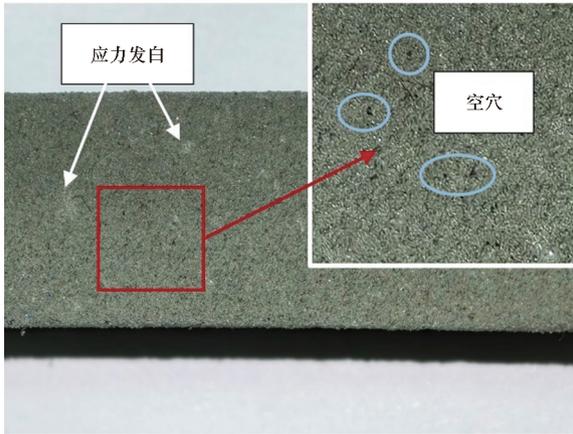


图 4 T20E05 低频疲劳加载后的结构形貌  
Fig. 4 Structural morphology of T20E05 after low-frequency fatigue-loading

疲劳加载过程中,NEPE 固体推进剂微观结构演化形成的微裂纹及基体/颗粒界面脱粘形成的空穴均会使固体推进剂材料的刚度有所衰减。虽然分子链的取向重排能够在一定程度上提升材料刚度,但其对刚度的提升作用远不如微细观损伤对刚度的削减作用,因此 NEPE 固体推进剂在低频疲劳加载下表现出应力软化行为。此外,分子链的伸长以及细观空穴的产生也使得固体推进剂产生残余应变,进而影响固体推进剂在疲劳加载下的力学行为。图 5 为未经疲劳加载的试样与疲劳加载  $10^4$  个周期后的试样,从图中能观测到明显的残余变形。

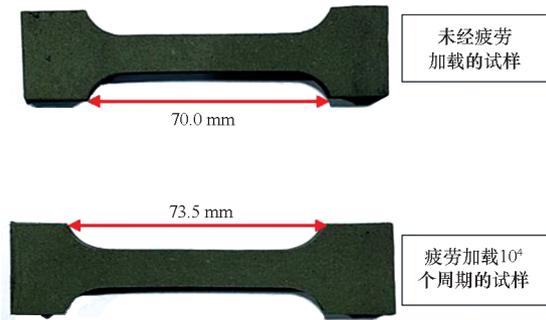


图 5 T20E05 低频疲劳加载后的残余变形  
Fig. 5 Residual deformation of T20E05 after low-frequency fatigue-loading

NEPE 固体推进剂在低频疲劳载荷作用下的宏观力学行为包括应力软化与残余应变积累,均

能基于疲劳滞后环曲线进行观测分析。图 6 为表征单个加载—卸载周期中应力应变关系的典型疲劳滞后环曲线。滞后环斜率与材料的宏观力学性能有关<sup>[23]</sup>,其应力中心反映每个疲劳加载周期的平均应力水平,滞后环曲线围成的面积则为单个加载周期所产生的疲劳耗散能。其中第  $N$  个周期的滞后环斜率由下式计算:

$$S_N = \frac{\Delta\sigma_N}{\Delta\varepsilon_N} \quad (1)$$

应力中心由下式计算:

$$\sigma_{cN} = \frac{\sigma_{N,max} + \sigma_{N,min}}{2} \quad (2)$$

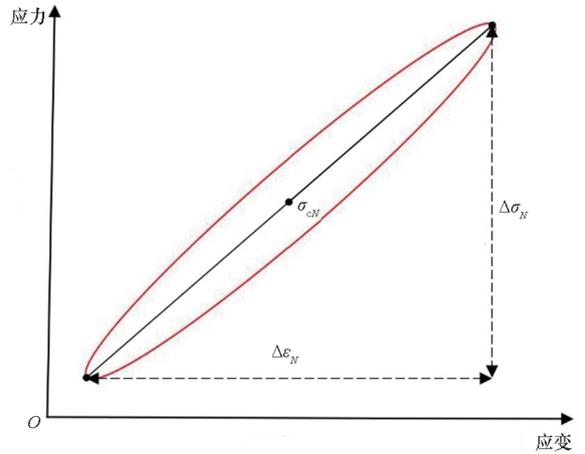


图 6 典型疲劳滞后环曲线

Fig. 6 Typical fatigue hysteresis loop curve

图 7 为 T20E05 试验加载第 10 个周期及第 100 个周期的滞后环曲线。根据图 7,恒应变幅低频疲劳加载过程中,滞后环曲线存在斜率减小及应力中心降低的变化趋势,分别反映了低频疲劳加载中国体推进剂的应力软化行为与残余应变逐渐积累的现象。因此,以下将结合滞后环曲线的主要变化趋势,分析低频疲劳下 NEPE 固体推进

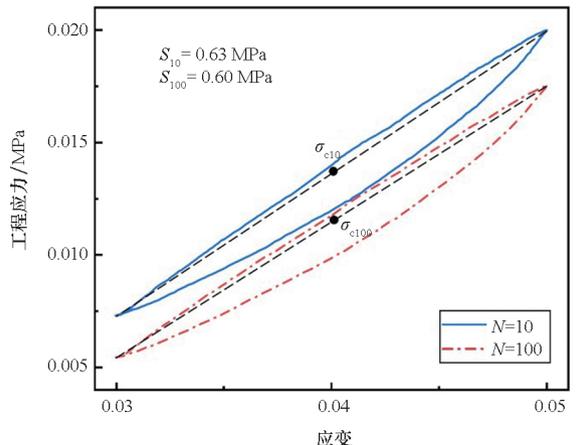


图 7 T20E05 疲劳滞后环曲线

Fig. 7 Fatigue hysteresis loop curve of T20E05

剂的微细观结构演化过程及损伤发展规律。

### 2.2 应力软化行为

滞后环斜率在疲劳加载过程中的衰减可反映材料刚度的变化过程<sup>[24]</sup>,进而表征材料的应力软化行为。采用归一化斜率  $S_N^*$  分析 NEPE 固体推进剂的应力软化行为,其由下式计算:

$$S_N^* = \frac{S_N}{S_1} \quad (3)$$

图 8 为 10 ℃ 环境下的归一化斜率随周期变化曲线,由图可见,疲劳损伤导致的应力软化行为可分为骤降段、过渡段与线性段三阶段。初始加载时刻,大量微细观疲劳损伤萌生并迅速扩展<sup>[8]</sup>,刚度急剧变化,定义为归一化斜率曲线的骤降段;第二阶段,界面性能较差的薄弱位置已陆续产生缺陷,细观裂纹形核与扩展速度逐渐变慢<sup>[12]</sup>,归一化斜率曲线变化趋势逐渐平缓,曲线段呈现为下凹的圆弧段,定义为过渡段;第三阶段,细观缺陷基本不再成核,疲劳损伤进入稳定发展阶段,归一化斜率曲线表现为线性直线,定义为线性段。

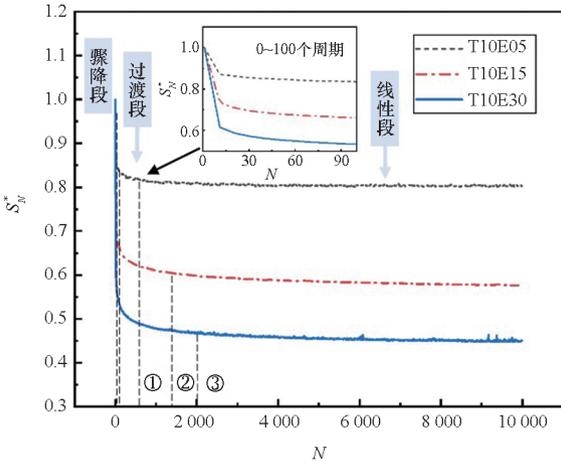


图 8 归一化斜率随周期变化曲线

Fig. 8 Curve of normalized slope varied with period

依据应力软化行为的三阶段演化特征,认为当归一化斜率曲线的斜率变化率小于  $10^{-7}$  时,应力软化行为进入第三阶段。图 8 中标示的序号 ①~③分别为 T10E05、T10E15 及 T10E30 应力软化行为进入第三阶段的分界线。根据图中反映的三阶段演化过程,归一化斜率骤降段一般出现在疲劳加载 0~20 个周期,而线性段出现在加载 1 000 个周期以后。加载最大应变越大,曲线越晚进入线性段,微细观结构演化越晚进入损伤稳定发展阶段。

图 9 为不同试验条件下疲劳加载第  $10^4$  个周期的应力软化行为的应变效应。从图中来看,不

同温度条件下的  $S_{10\,000}^*$  相差较小,温度变化对 NEPE 固体推进剂应力软化行为影响不明显。最大加载应变越大,应力软化行为越显著,疲劳损伤导致的应力软化程度与最大加载应变之间接近指数函数关系。最大加载应变为 30% 时,加载  $10^4$  个周期后,NEPE 固体推进剂刚度衰减至初始周期的 0.5 倍以下。长期的低频疲劳载荷对 NEPE 固体推进剂刚度有不可忽略的削弱作用,在理论建模与仿真分析时必须考虑疲劳损伤对 NEPE 固体推进剂力学行为的影响。

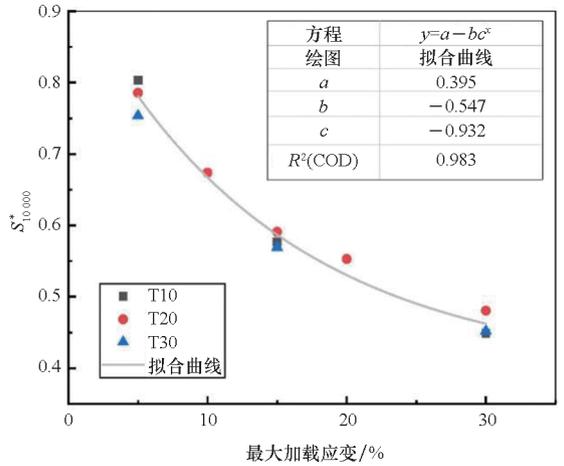


图 9 应力软化行为的应变效应

Fig. 9 Strain effect on stress-softening behavior

### 2.3 残余应变的积累

残余应变会造成试件试验段尺寸的增大,使得试件受到的应变载荷小于试验设定的工程应变载荷,是造成应力中心降低的主要原因。因此基于归一化应力中心  $\sigma_{cN}^*$  演化分析试件残余应变的积累过程,归一化应力中心由下式计算:

$$\sigma_{cN}^* = \frac{\sigma_{cN}}{\sigma_{c1}} \quad (4)$$

图 10 为 10 ℃ 环境下的归一化应力中心随周期变化曲线,由图可见,残余应变的积累过程也可分为骤降段、过渡段与线性段三阶段。残余应变的积累过程无明显的应变效应,不同应变疲劳载荷曲线进入过渡段与线性段的周期数相差较小。除了微细观损伤对残余应变有贡献,高聚物基体作为一种黏弹性材料,其迟滞性也会导致疲劳加载初始阶段的应力水平迅速下降<sup>[7]</sup>。对比图 8 中反映的应力软化行为可见,应力中心衰减程度明显大于刚度衰减程度,且加载初始时刻应力中心衰减极为显著,黏弹性材料的迟滞性是产生以上现象的主要原因。

图 11 为不同试验条件下疲劳加载第  $10^4$  个周期的残余应变积累的应变效应。最大加载应变越

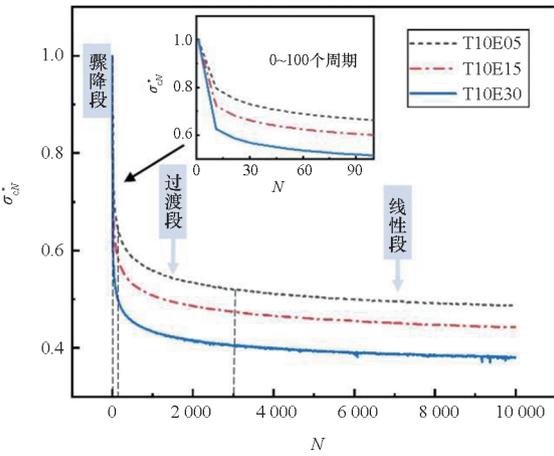


图 10 归一化应力中心随周期变化曲线

Fig. 10 Curve of normalized stress center varied with period

大,残余应变越大,不同温度下残余应变与最大加载应变之间均满足指数函数关系。随着温度升高,基体软化与界面损伤的耦合作用会加剧细观损伤<sup>[25]</sup>,但与此同时,材料迟滞性降低<sup>[26]</sup>又会使试件的残余应变减小。根据图 11,试验温度为 20 °C 时,归一化应力中心最大,即产生的残余应变最小;试验温度为 10 °C 时,归一化应力中心最小,即产生的残余应变最大。残余应变不随温度升高而单调递增,说明在 10 ~ 30 °C 的温度范围内,细观损伤及黏弹性材料的迟滞性对残余应变的影响作用相当。

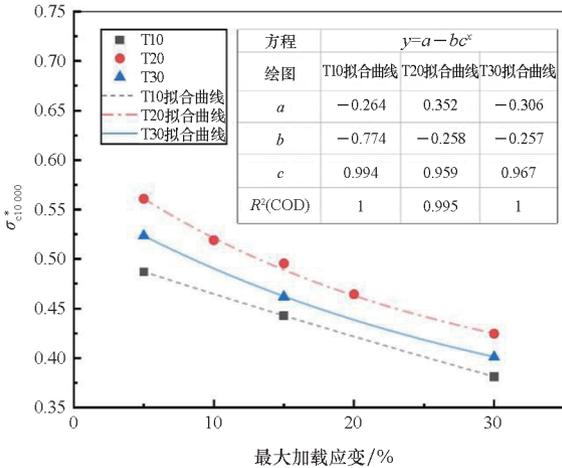


图 11 残余应变积累的应变效应

Fig. 11 Strain effect on the residual strain accumulation

低频疲劳加载  $10^4$  个周期后,滞后环曲线的应力中心下降至初始周期的 0.6 倍以下,说明 NEPE 固体推进剂在疲劳加载中积累了较大的残余应变,在理论建模时必须对应变项进行修正。

### 3 低频疲劳后的拉伸力学行为

为探究低频疲劳加载历史对 NEPE 固体推进剂拉伸力学性能及损伤演化过程的影响,本节对

低应变率拉伸曲线所反映的微观结构演化过程做分析,并阐释疲劳加载后的 Mullins 效应与力学性能强化现象。

#### 3.1 低应变率拉伸失效模式

在处理定应变率单轴拉伸试验数据时,一般假定试件在拉伸过程中横截面积不变,采用工程应力与工程应变生成应力-应变曲线。但由于试验采用的 NEPE 复合固体推进剂在低应变率拉伸时的最大伸长率与断裂伸长率均在 1 左右,试验加载后期试件截面积与初始截面积存在较大差距,此时真应力-应变曲线更能反映 NEPE 的微观结构演化过程与实际承载能力,因此后文均基于真应力进行分析。真应力由下式计算:

$$\sigma = (1 + \varepsilon)\sigma_E \quad (5)$$

式中, $\sigma$  为真应力, $\sigma_E$  为工程应力, $\varepsilon$  为工程应变。图 12 分别给出了 T10FC 的工程应力-应变曲线与真应力-应变曲线,从图中可以看出,依据工程应力-应变曲线所得到的抗拉强度与断裂强度约为实际强度的一半,且工程应力-应变曲线难以反映损伤演化的阶段性过程。

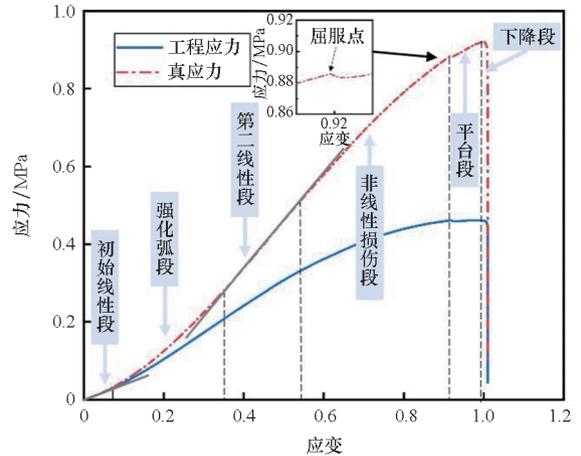


图 12 低应变率单轴拉伸下的微观结构演化过程

Fig. 12 Microstructural and mesostructural evolution process in the low-strain-rate uniaxial tensile test

NEPE 固体推进剂的低应变率拉伸应力-应变曲线可分为图 12 中所示的六个阶段,分别为初始线性段、强化弧段、第二线性段、非线性损伤段、平台段与下降段。加载初期,拉伸曲线为线性,表征初始加载阶段试件无损伤产生;而后应力-应变曲线逐渐变为下凹的弧线段,即强化弧段,此时基体的分子链取向排列<sup>[27]</sup>,NEPE 的刚度得到提升;当分子链达到高度取向时,基体刚度无法进一步提升,高度取向的分子链受到应变载荷作用而缓慢伸长,基体与颗粒的粘接界面处基本不产生损伤,拉伸曲线呈现第二线性段;随着加

载应变的进一步增大,拉伸曲线进入非线性损伤阶段,表现为上凸的弧线段,此时较大的固体颗粒与基体界面首先产生缺陷,颗粒底部与顶部逐渐出现空穴<sup>[28]</sup>;随后拉伸曲线出现屈服点<sup>[29]</sup>,NEPE 内部颗粒出现大规模“脱湿”并产生数个明显的空穴,应力重新分配造成曲线的小幅骤降<sup>[30]</sup>;屈服点过后,拉伸曲线进入平台段,此时“脱湿”造成的空穴扩展、融合,逐渐形成宏观裂纹<sup>[31]</sup>;宏观裂纹形成后迅速扩展,最终导致试件断裂,拉伸曲线表现为较短的下降段。

与高固含量端羟基聚丁二烯 (hydroxyl terminated polybutadiene, HTPB) 固体推进剂低应变率单轴拉伸的五阶段演化曲线<sup>[19]</sup> 相比,NEPE 固体推进剂的低应变率存在明显的第二线性段,在基体分子链高度取向后不会迅速出现界面损伤,这体现了 NEPE 固体推进剂较好的基体/颗粒粘接性能。

图 13、图 14 分别为 T10FC 试验组及 T10E15 试验组中某两根试件的拉伸曲线,图中曲线的屈服强度与屈服伸长率较为一致,但平台段长度相差较大。这是因为屈服强度、屈服伸长率与颗粒体积分、粘接界面强度、裂纹扩展速度有关,由基体、基体/颗粒粘接界面力学性能决定;平台段长短与宏观裂纹的位置及合并大小有关,具有一定的随机性。由此可见,由于 NEPE 固体推进剂的抗拉强度、断裂强度、最大伸长率及断裂伸长率与平台段长度有关,不再适合作为试件的失效判据,应以屈服伸长率为失效判据,基于屈服强度与屈服伸长率的变化分析疲劳加载历史对 NEPE 固体推进剂拉伸力学性能的作用规律。

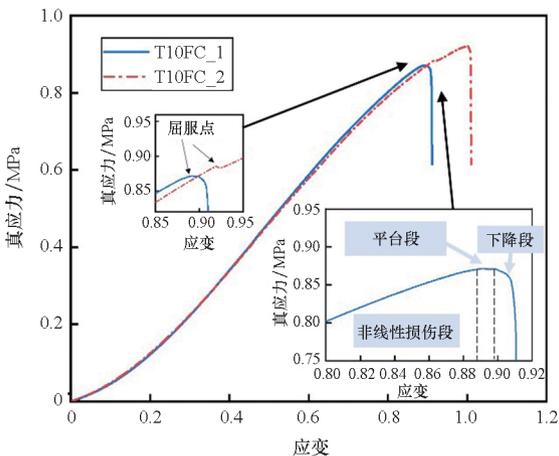


图 13 10 °C 对照组 (T10FC) 单轴拉伸试验的应力 - 应变曲线

Fig. 13 Stress-strain curve of the uniaxial tensile test of the control group at 10 °C (T10FC)

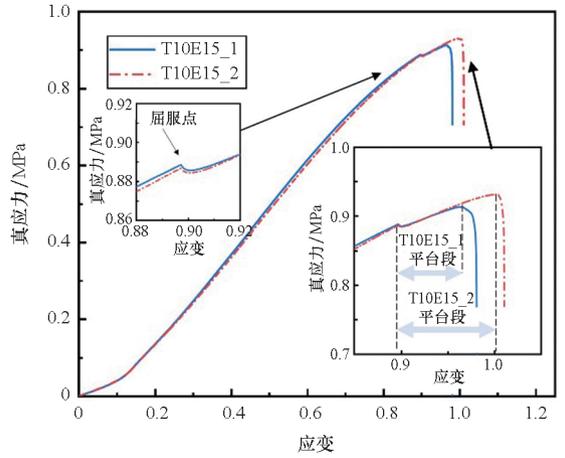


图 14 测试组 T10E15 单轴拉伸试验的应力 - 应变曲线  
Fig. 14 Stress-strain curve of the uniaxial tensile test of the testing group T10E15

低频疲劳加载历史显著影响 NEPE 低应变率单轴拉伸的微细观结构损伤演化过程。图 15 给出了 T10FC、T10E15、T10E30 的拉伸曲线。根据图 15,低频疲劳加载历史主要影响强化弧段与第二线性段。强化弧段初期, T10E15、T10E30 的初始斜率较低,反映疲劳损伤对试件初始模量的削减作用;强化弧段后期, T10E15、T10E30 的拉伸应力逐渐超过 T10FC 的拉伸应力,说明疲劳加载造成的初始损伤能够提升分子链重排能力,进而提升基体性能。图 15 中灰色区域与红色斜线区域分别为 T10E15 与 T10E30 的强化弧段区域,疲劳加载的最大应变越大,疲劳加载造成的初始微细观损伤越多,拉伸曲线的强化弧段越长,分子链重排的强化能力越显著。此外,图 15 中红色区域与蓝色方格区域分别为 T10E30 与 T10FC 的第二线性段,疲劳加载后试件的第二线性段较短,这是

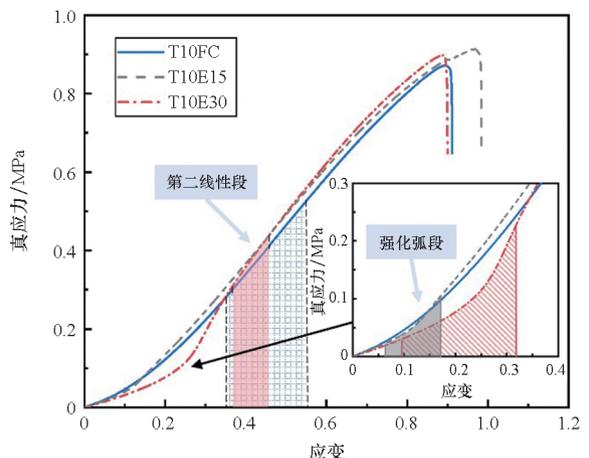


图 15 疲劳加载历史对微细观结构演化的影响  
Fig. 15 Influence of fatigue loading history on the microstructural and mesostructural evolution

因为疲劳加载历史使得部分基体/颗粒界面出现损伤,当分子链达到取向极限后,未出现缺陷的基体/颗粒界面所受到的应力更大,更易发生界面损伤。

### 3.2 Mullins 效应

Mullins 效应是指填充橡胶类材料在受到反复加载—卸载—再加载的载荷作用时,若再加载的应变小于历史最大拉伸应变,则再加载的应力小于初次加载的应力;当再加载应变超过历史最大加载应变时,再加载应力—应变曲线会逐渐回归加载主曲线<sup>[32]</sup>。目前对于 Mullins 效应的复杂机理和成因,学者们仍未达成共识<sup>[33]</sup>。从疲劳损伤的角度来看,疲劳加载历史会使分子链发生取向、长度上的变化,也会使颗粒/基体粘接界面发生细观损伤, Mullins 效应的产生应与基体网络结构演化及粘接界面损伤密切相关。加载初期的应力软化行为是 Mullins 效应的主要特征,因此以归一化初始模量表征疲劳加载后 NEPE 固体推进剂的 Mullins 效应。归一化初始模量  $E_0^*$  由下式计算:

$$E_0^* = \frac{E_0}{E_0^{FC}} \quad (6)$$

式中,  $E_0$  为初始模量,  $E_0^{FC}$  为未经疲劳加载的试验对照组的初始模量。

图 16 给出了不同试验条件下加载  $10^4$  个周期后的归一化初始模量,疲劳加载后试件的初始模量均有不同程度的下降,初始模量下降与最大加载应变的关系同样可以采用指数函数关系进行表征。对比图 9 中疲劳加载过程中的应力软化行为发现,初始模量劣化程度较应力软化程度整体有明显减轻,这是因为疲劳试验与单轴拉伸试验期间,测试试件被取下并重新安装,以微裂纹为

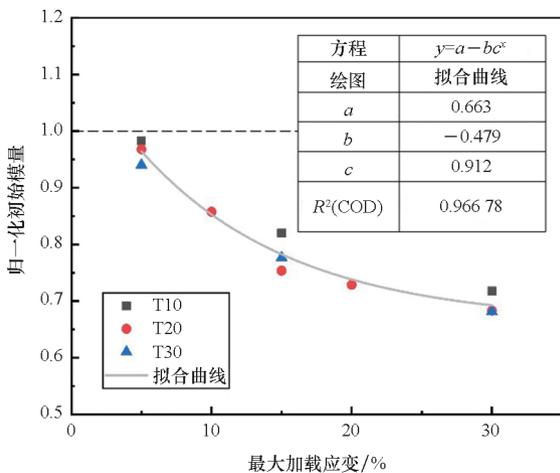


图 16 初始模量劣化的应变效应

Fig. 16 Strain effect on the degradation of the initial modulus

代表的部分微观损伤在此过程中迅速恢复<sup>[22]</sup>。这一现象表明:部分损伤在试件充分静置后可以恢复,具有可恢复性的微观损伤占总损伤的 20% 以上。利用上述性质可显著提升舰载导弹固体发动机的使用效能,后续可开展相关试验,研究固体推进剂疲劳加载后的力学性能恢复特性,为提升舰载导弹固体发动机使用效能提供试验支撑与理论指导。

### 3.3 疲劳强化现象

低应变率单轴拉伸时,大范围“脱湿”造成的宏观裂纹将导致试件失效,界面性能是决定失效强度与失效伸长率的主导因素。根据图 15 所反映的疲劳加载历史对微细观结构演化的影响,疲劳损伤能够增大分子链重排能力,并提升基体强度,而基体性能的提升对界面性能也有一定的强化作用。因此部分疲劳加载试验后,试件的屈服强度、屈服伸长率有不同程度的提升。

#### 3.3.1 屈服强度

图 17 为不同试验条件下疲劳加载  $10^4$  个周期后测得的归一化屈服强度。归一化屈服强度  $\sigma_d^*$  由下式计算:

$$\sigma_d^* = \frac{\sigma_d}{\sigma_d^{FC}} \quad (7)$$

式中,  $\sigma_d$  为屈服强度,  $\sigma_d^{FC}$  为未经疲劳加载的试验对照组的屈服强度。根据图 17,除 T10E15 及 T10E30 外,其余试验条件下加载  $10^4$  个周期后试件的屈服强度均高于未经疲劳加载的对照组强度。试验温度越高,疲劳载荷的强化作用越明显。这是因为温度的升高提升了分子链的链段运动能力,增大了分子链取向阈值。

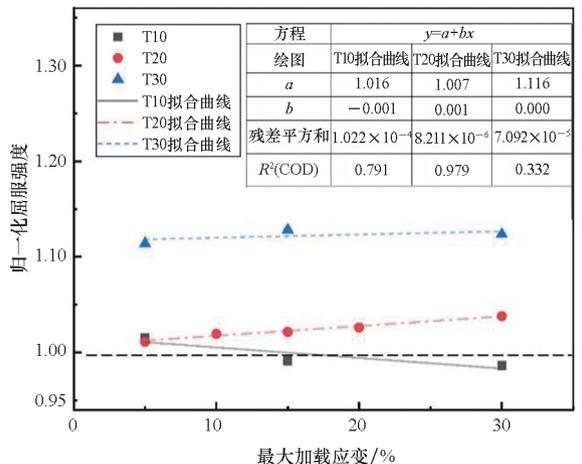


图 17 疲劳加载历史对屈服强度的影响规律

Fig. 17 Influence law of fatigue loading history on the yield strength

不同温度下,归一化屈服强度与最大加载应变之间基本呈线性关系。除了 10 ℃ 的试验组,其余试验组均为最大加载应变越大,屈服强度越高。这与图 15 中反映的强化弧段差异相互印证,有力证明了疲劳微细观损伤对分子链重排能力的强化作用。对于 10 ℃ 的试验组,最大加载应变越大,屈服强度越低,甚至小于对照组强度。这是因为疲劳加载历史已经造成了较多的损伤缺陷,疲劳损伤对 NEPE 固体推进剂的削弱作用大于对分子链取向的强化作用,导致了屈服强度的降低。

对于试验温度为 30 ℃ 的试验组,疲劳加载后,屈服强度提升了 10% 以上。在常温段的较高温度下,疲劳加载能够显著提升 NEPE 固体推进剂的屈服强度,提升 NEPE 固体发动机的使用安全性。但随着温度的进一步提升,NEPE 固体推进剂老化速度加快,其破坏强度会有所降低,因此要平衡多方因素,考虑合适的舰载环境温度。

### 3.3.2 屈服伸长率

图 18 为不同试验条件下疲劳加载后测得的归一化屈服伸长率。归一化屈服伸长率  $\varepsilon_d^*$  由下式计算:

$$\varepsilon_d^* = \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_{FC}^d} \quad (8)$$

式中,  $\varepsilon_d$  为屈服伸长率,  $\varepsilon_{FC}^d$  为未经疲劳加载的试验对照组的屈服伸长率。根据图 18,最大加载应变越大,归一化屈服伸长率越小。最大加载应变小于 20% 时,试件屈服伸长率均大于未经疲劳加载的对照组伸长率。温度对屈服伸长率的强化作用影响较小,不同温度下,归一化屈服伸长率与最大加载应变的关系均能采用同一直线拟合表征。

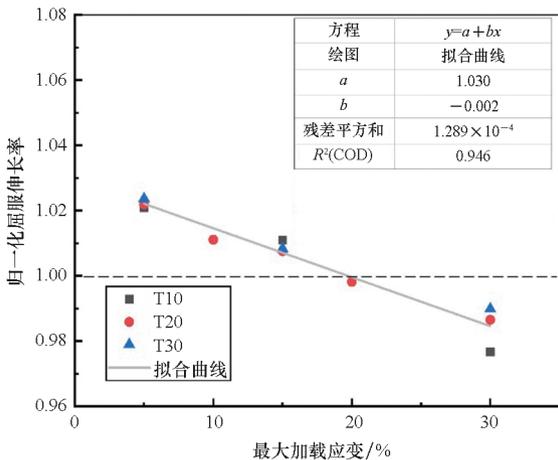


图 18 疲劳加载历史对屈服伸长率的影响规律

Fig. 18 Influence law of fatigue loading history on the yield elongation

最大加载应变为 5% 时,屈服伸长率均提升

了 2% 以上,小应变幅值的低频疲劳载荷对提升 NEPE 固体推进剂伸长率判据有积极作用。考虑到固体发动机点火时,一般以伸长率作为结构失效判据<sup>[34]</sup>,以上发现对于提升舰载导弹固体发动机的使用效能有重要指导作用。

## 4 结论

针对 NEPE 固体推进剂的低频疲劳损伤特性开展试验,分析疲劳加载中及加载后推进剂的微细观损伤演化过程,考察疲劳加载历史对 NEPE 拉伸力学性能的影响规律,得到主要结论如下:

1) 低频疲劳加载过程中,NEPE 固体推进剂基体会产生以微裂纹为主的微观损伤,并在基体/颗粒界面处产生空穴、裂纹等细观结构损伤;

2) 疲劳加载频率 0.5 Hz、最大加载应变 5% ~ 30%、加载温度 10 ~ 30 ℃ 的试验条件下,NEPE 固体推进剂出现了明显的应力软化行为及残余应变积累的现象,在进行理论建模时,必须考虑疲劳损伤导致的应力软化行为,并基于残余应变的积累过程对应变项进行修正;

3) 以上试验条件下,应力软化行为导致的刚度衰减、残余应变导致的应力中心降低均随最大加载应变的增大而逐渐加剧,且其归一化数值与最大加载应变呈指数函数关系;

4) 低频疲劳加载导致的部分微观损伤具有可恢复性,不可恢复的微细观损伤将造成初始模量的下降,且初始模量的下降程度为关于最大加载应变的指数函数;

5) 当疲劳加载最大应变较小时,低频疲劳加载历史对该 NEPE 固体推进剂具有疲劳强化作用,NEPE 固体推进剂的屈服强度及屈服伸长率均有不同程度的增大,且加载温度越高,屈服强度的增大越显著。

## 参考文献 (References)

[1] 邢睿思, 王龙, 侯传涛. NEPE 固体推进剂粘(黏)超弹本构模型研究[C]//北京力学会第二十七届学术年会论文集, 2021: 662 - 664.  
XING R S, WANG L, HOU C T. Research on the viscoelastic constitutive model of NEPE solid propellant [C]// Proceedings of the 27th Academic Annual Conference of Beijing Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2021: 662 - 664. (in Chinese)

[2] 张兴高, 张炜, 王春华, 等. 定应变作用下 NEPE 推进剂老化特性及寿命预估研究[J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(3): 20 - 24.  
ZHANG X G, ZHANG W, WANG C H, et al. The aging property and life prediction of NEPE propellant under constant strain [J]. Journal of National University of Defense

- Technology, 2009, 31(3): 20–24. (in Chinese)
- [3] 张亮, 申志彬, 虞跨海. 围压下固体推进剂的破坏机理分析[J]. 国防科技大学学报, 2022, 44(6): 6–13.  
ZHANG L, SHEN Z B, YU K H. Analysis on the failure mechanism of solid propellant under superimposed pressure[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2022, 44(6): 6–13. (in Chinese)
- [4] 鲁棣, 安振涛, 李天鹏. 环境载荷下固体火箭发动机结构完整性研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(2): 244–247.  
LU B, AN Z T, LI T P. Research status of structural stability of solid rocket engine under environmental load[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(2): 244–247. (in Chinese)
- [5] LI J F, HUANG W D, QU K, et al. Experimental research on fatigue damage of composite solid propellant with constant constrain [C]//Proceedings of the 5th International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control, 2016.
- [6] 邓斌. 考虑变泊松比、老化和损伤的固体发动机药柱粘(黏)弹性分析[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.  
DENG B. Viscoelastic analysis of solid rocket motor grain considering time-dependent Poisson's ratio, aging and damage effects [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014. (in Chinese)
- [7] 童心, 王永平, 许进升, 等. HTPB 推进剂的低温疲劳特性[J]. 航空动力学报, 2017, 32(5): 1234–1240.  
TONG X, WANG Y P, XU J S, et al. Fatigue properties of HTPB propellant at low temperature[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(5): 1234–1240. (in Chinese)
- [8] 高艳宾, 许进升, 陈雄, 等. 应变控制下 NEPE 推进剂非线性疲劳损伤[J]. 航空动力学报, 2015, 30(6): 1486–1491.  
GAO Y B, XU J S, CHEN X, et al. Nonlinear fatigue damage of nitrate ester plasticized polyether propellant for strain-control [J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(6): 1486–1491. (in Chinese)
- [9] HU Q W, FANG Q Z, SHA B L, et al. Study on the viscoelastic damage properties of NEPE solid propellant with different cyclic stress ratios [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2022, 47(5): e202100342.
- [10] MAIMAITITUERSUN W, 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.
- [11] 乌布力艾散·麦提提图尔荪, 周涛, 吴艳青, 等. 考虑细观损伤的推进剂粘(黏)弹性多尺度本构模型研究[J]. 含能材料, 2024, 32(2): 133–141.  
MAIMAITITUERSUN W, ZHOU T, WU Y Q, et al. A multiscale viscoelastic constitutive model for solid propellants considering microscale damage [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2024, 32(2): 133–141. (in Chinese)
- [12] 郭坚, 许进升, 高艳宾, 等. 基于能量耗散率的 NEPE 推进剂疲劳损伤分析[J]. 弹道学报, 2016, 28(2): 62–67.  
GUO J, XU J S, GAO Y B, et al. Fatigue damage evaluation of NEPE propellant based on dissipated energy[J]. Journal of Ballistics, 2016, 28(2): 62–67. (in Chinese)
- [13] 许进升, 杨晓红, 陈雄, 等. HTPB 推进剂疲劳特性试验研究[J]. 火炸药学报, 2021, 44(3): 372–378.  
XU J S, YANG X H, CHEN X, et al. Experimental investigation on fatigue properties of HTPB propellant [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2021, 44(3): 372–378. (in Chinese)
- [14] 中国船舶重工集团公司. 海军武器装备与海战场环境概论[M]. 北京: 海洋出版社, 2007.  
China State Shipbuilding Corporation Limited. Introduction to naval weapons and equipment and marine battlefield environment [M]. Beijing: China Ocean Press, 2007. (in Chinese)
- [15] 张奥博, 闯振菊, 刘社文, 等. 极地半潜式海洋平台在不同环境载荷下的动态响应分析[J]. 船舶力学, 2024, 28(3): 422–434.  
ZHANG A B, CHUANG Z J, LIU S W, et al. Dynamic response analysis of arctic semi-submersible offshore platform under different environmental loads [J]. Journal of Ship Mechanics, 2024, 28(3): 422–434. (in Chinese)
- [16] 成辰, 管义锋, 刘元元, 等. 波浪载荷直接计算的开体泥驳甲板铰链载荷设计方法[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(24): 52–56.  
CHENG C, GUAN Y F, LIU Y Y, et al. Design method of split hopper barge deck hinge based on direct calculation of wave load [J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(24): 52–56. (in Chinese)
- [17] CAO Y J, HUANG W D, LI J F. Effect of ambient vibration on solid rocket motor grain and propellant/liner bonding interface [C]//Proceedings of the AIP Conference Proceedings, 2017.
- [18] 李世奇, 强洪夫, 陈铁铸, 等. 单轴拉伸下 NEPE 固体推进剂细观结构演化行为研究[J]. 含能材料, 2024, 32(2): 175–182.  
LI S Q, QIANG H F, CHEN T Z, et al. Mesostructure evolution behavior of NEPE solid propellant under uniaxial tension [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2024, 32(2): 175–182. (in Chinese)
- [19] 吴成丰, 胡少青, 卢莹莹, 等. 应变率对高固含量 HTPB 推进剂力学特性与破坏机制的影响[J]. 火炸药学报, 2024, 47(7): 656–664.  
WU C F, HU S Q, LU Y Y, et al. Effect of strain rate on mechanical properties and failure mechanisms of HTPB propellant with high solid content [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2024, 47(7): 656–664. (in Chinese)
- [20] 王亚平, 王北海. 丁羟推进剂拉伸脱湿的电子显微镜观测[J]. 固体火箭技术, 1998, 21(2): 71–74.  
WANG Y P, WANG B H. Study on dewetting and fracture behavior of HTPB propellants by SEM [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 1998, 21(2): 71–74. (in Chinese)
- [21] GARCÍA I G, MANTIĆ V, GRACIANI E. A model for the prediction of debond onset in spherical-particle-reinforced composites under tension. Application of a coupled stress and energy criterion [J]. Composites Science and Technology, 2015, 106: 60–67.
- [22] 何曼君, 张红东, 陈维孝, 等. 高分子物理[M]. 3 版. 上海: 复旦大学出版社, 2007.  
HE M J, ZHANG H D, CHEN W X, et al. Polymer physics [M]. 3rd ed. Shanghai: Fudan University Press, 2007. (in Chinese)
- [23] LYU S T, LIU C C, ZHENG J L, et al. Viscoelastic fatigue damage properties of asphalt mixture with different aging

- degrees [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2018, 22(6): 2073 - 2081.
- [24] CASTRO M, SÁNCHEZ J A. Estimation of asphalt concrete fatigue curves: a damage theory approach [J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(6): 1232 - 1238.
- [25] 曾毅, 黄薇, 陈家兴, 等. HTPB 推进剂热力耦合加速老化细观损伤机理分析 [J]. *含能材料*, 2024, 32(2): 162 - 174.
- ZENG Y, HUANG W, CHEN J X, et al. Analysis of mesoscopic damage mechanism of HTPB propellant under thermo-mechanical coupled accelerated aging [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2024, 32(2): 162 - 174. (in Chinese)
- [26] 高艳宾, 陈雄, 许进升, 等. NEPE 推进剂动态力学特性分析 [J]. *推进技术*, 2015, 36(9): 1410 - 1415.
- GAO Y B, CHEN X, XU J S, et al. Dynamic mechanical properties analysis of NEPE propellant [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(9): 1410 - 1415. (in Chinese)
- [27] ZHANG G L, LIU X Y, ZHANG J S, et al. Study on tensile mechanical properties of GAP/CL-20/HMX propellant [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2022, 47(11): e202200053.
- [28] 魏晋芳, 赖国栋, 柴海伟, 等. 准静态拉伸下固体推进剂三维结构变形损伤失效机理研究 [J]. *固体火箭技术*, 2023, 46(2): 186 - 194.
- WEI J F, LAI G D, CHAI H W, et al. Research on three-dimensional structural deformation failure mechanism of solid propellant under quasi-static tension [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2023, 46(2): 186 - 194. (in Chinese)
- [29] HAO P, DAI Z, LAHERI V, et al. A unified amorphous-crystalline viscoplastic hardening law for non-isothermal modelling of thermoplastics and thermosets [J]. *International Journal of Plasticity*, 2022, 159: 103469.
- [30] VAN RAMSHORST M C J, DIBENEDETTO G L, DUVALOIS W, et al. Investigation of the failure mechanism of HTPB/AP/Al propellant by in-situ uniaxial tensile experimentation in SEM [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2016, 41(4): 700 - 708.
- [31] 张鑫, 胡翔, 徐星星, 等. GAP 黏合剂基体与  $\epsilon$ -CL-20 界面作用 [J]. *含能材料*, 2021, 29(11): 1099 - 1105.
- ZHANG X, HU X, XU X X, et al. Surface interaction between GAP binder matrix and  $\epsilon$ -CL-20 [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2021, 29(11): 1099 - 1105. (in Chinese)
- [32] MULLINS L. Effect of stretching on the properties of rubber [J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 1948, 21(2): 281 - 300.
- [33] SHI Y J, LIU F F, WANG Z B. Mullins effect and its reversibility for compatibilised thermoplastic elastomers based on high-density polyethylene/waste ground rubber tyre powder under compression mode [J]. *Plastics, Rubber and Composites*, 2018, 47(8): 373 - 380.
- [34] 申志彬, 姜人伟, 职世君. 伞盘结构对大长径比发动机药柱结构完整性的影响 [J]. *国防科技大学学报*, 2017, 39(1): 148 - 152.
- SHEN Z B, JIANG R W, ZHI S J. Effects of umbrella slot on the structure integrity of solid rocket motor grain with large aspect ratio [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2017, 39(1): 148 - 152. (in Chinese)