

应变控制下 NEPE 推进剂非线性疲劳损伤

高艳宾, 许进升, 陈 雄, 胡少青
(南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094)

摘 要: 为研究高能硝酸酯增塑聚醚(NEPE)推进剂的非线性疲劳损伤特性,基于损伤力学和黏弹性理论,建立了一种非线性疲劳损伤累积模型.该模型考虑了材料疲劳过程中刚度衰减的特征.建立的疲劳损伤模型,通过动态热机械分析仪(DMA)进行 5 组不同应变水平下疲劳实验,获得模型参数,并对模型进行验证,利用电荷耦合器件图像传感器(CCD)进行显微观察,分析了应变加载历史对推进剂微观上的影响.结果表明:提出的损伤演化模型能够很好的描述 NEPE 推进剂应变控制下的损伤;定应变往复拉伸造成了推进剂颗粒与基体的脱湿,在循环初期脱湿速度较快,随着循环周期增加,脱湿程度逐渐趋于稳定.

关 键 词: 硝酸脂增塑聚醚推进剂; 损伤模型; 应变控制; 应力松弛; 脱湿

中图分类号: V311⁺.3 **文献标志码:** A

Nonlinear fatigue damage model for strain-controlled fatigue of nitrate ester plasticized polyether propellant

GAO Yan-bin, XU Jin-sheng, CHEN Xiong, HU Shao-qing
(School of Mechanical Engineering,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to explore the nonlinear fatigue damage characteristics of nitrate ester plasticized polyether (NEPE) propellant, a nonlinear fatigue damage model was proposed based on damage mechanics and visco-elasticity theory, which took into account the stiffness degradation. With dynamic momechanical analysis (DMA) apparatus, NEPE propellant fatigue tests were conducted under five strain amplitudes, the model parameters were obtained and the presented model was verified. A morphology analyze was conducted with charge coupled device (CCD), the effect of strain loading history on the mechanical properties of the propellant was analyzed. The result shows that the model is capable of describing micro-mechanically the nonlinear damage evolution of NEPE dewetting subjected to strain fatigue loading; the repeated loading strain leads to dewetting between the particles and matrix. At the initial stage of the cycle phases, the velocity of dewetting is fast. With the increased number of cycles, the rate of damage development of the material is steady and slow.

Key words: nitrate ester plasticized polyether (NEPE) propellant; damage model; strain-control; stress relaxation; dewetting

硝酸脂增塑聚醚聚氨脂(NEPE)推进剂具有能量高和力学性能好等优点,是当前及未来高能推进剂研制和使用的重点^[1].固体推进剂药柱在生产、储存、运输过程中,都会受到各种力学载荷的作用,如温度应力载荷、振动和冲击载荷等^[2].这些载荷短时间内不会造成宏观上的破坏,但长时间循环疲劳作用下,会对推进剂性能造成不良影响.因此疲劳损伤演化研究是安全设计标准里

一项重要的研究。

近年来推进剂的疲劳损伤研究取得一定的进展,对疲劳累积损伤的认识也从线性到非线性转化。曲凯等^[3-4]利用 Miner 线性累积损伤理论获得了复合固体推进剂的疲劳损伤特性,并对发动机危险部位的损伤进行了评估。NEPE 推进剂属于黏弹性材料,文献^[5-6]认为非线性损伤模型更能描述黏弹性材料的疲劳损伤演化过程。邢耀国等^[7]基于耗散能的非线性累积损伤理论,提出了在不同海域执行任务的舰载导弹固体火箭发动机舰载寿命的评估方法。WU 等^[8]提出唯象学的非线性疲劳损伤模型,对多种材料进行实验验证,效果较好。此外,推进剂的疲劳细观机理也得到了关注,刘著卿等^[9]以丁羟推进剂为研究对象,结合电镜观察发现应变幅值决定了颗粒与基体间的脱湿。以上疲劳研究多针对丁羟推进剂推进剂,而 NEPE 推进剂的实验以及理论研究较少。

推进剂复合材料其颗粒与基体界面疲劳损伤及破坏机理非常复杂,这导致了从微观角度定量研究疲劳损伤的困难,目前的研究多是从宏观角度研究其疲劳损伤机理^[10-11]。本文基于损伤力学和黏弹性理论,分析了 NEPE 的疲劳过程,建立了疲劳损伤宏观非线性模型,结合 CCD 显微观察,分析了疲劳损伤细观机理,为固体火箭发动机在交变应变作用下的安全设计提供参考。

1 疲劳损伤模型

1.1 Miner 线性疲劳损伤模型

疲劳损伤应用最广泛的累计法则是 Miner 线性疲劳损伤模型^[12]

$$D(N) = \frac{N}{N_f}$$

(1)

式中 N 为应变幅值下循环作用次数, N_f 为疲劳寿命。

Miner 法则的两个假定是:相同应变幅值和平均应力下的 N 个应变和应力循环将按照线性累加,造成 N/N_f 的损伤,即消耗掉 N/N_f 部分的疲劳寿命,每个周期所造成的损伤是相同的;疲劳破坏将在损伤按线性累加为 1 时发生。其表达式为

$$D(N) = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{N_{f_i}}$$

(2)

式中 N_{f_i} 为载荷 i 单独作用时的疲劳寿命。 N_i 为在该载荷下承受的循环周期。

Miner 法则由于其简单的数学形式而受到工程界的欢迎,目前仍然是使用最广泛的损伤累计

法则。主要缺点是不能考虑复杂的非线性的相互影响。非线性疲劳损伤模型的主要特征是损伤与加载过程相关,即在相同的条件下(如应力应变幅,温度,频率等),载荷处于损伤的不同阶段产生的损伤效果不同,这是与 Miner 线性累计损伤最大的不同点。

1.2 非线性疲劳损伤模型

在应变控制下的疲劳,一种常用的损伤演化模型为^[13]

$$\frac{\delta D}{\delta N} = \frac{(1-D)^{-q}}{(q+1)N_f}$$

(3)

式中 q 为材料参数, N_f 为在应变幅值为 $\Delta\epsilon$ 情况下的疲劳寿命。

对式(3)进行积分, $D(0)=0$, 得到常应变疲劳演化方程 $D(N)$

$$D(N) = 1 - (1 - N/N_f)^{\frac{1}{q+1}}$$

(4)

1.3 NEPE 推进剂疲劳损伤模型

如图 1 所示恒应变幅控制下 NEPE 推进剂

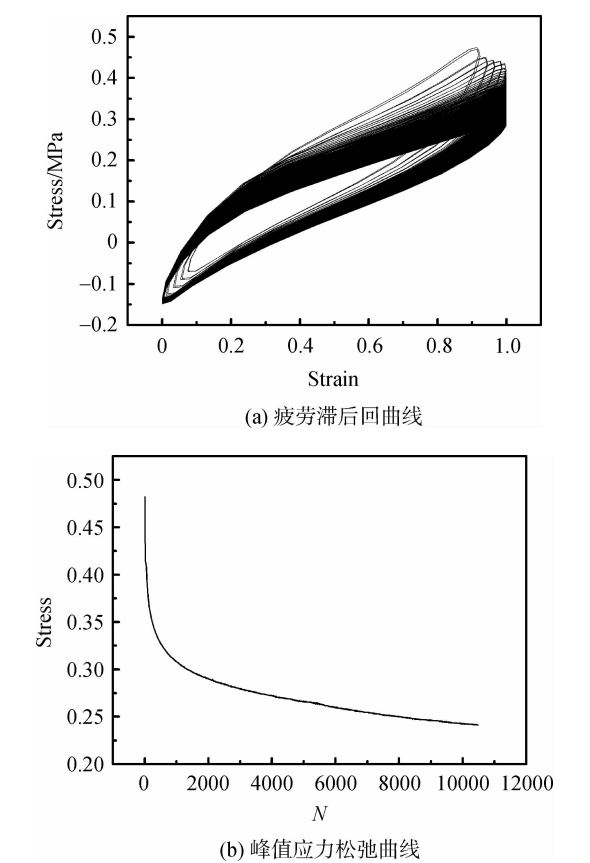


图 1 恒应变幅控制下 NEPE 推进剂的疲劳滞后回曲线与峰值应力松弛曲线

Fig. 1 Stress versus strain hysteresis loops and peak stress relaxation curve of NEPE propellant at constant strain

的疲劳滞后回线与峰值应力松弛曲线。从图中可以看出 NEPE 推进剂表现出应力周期峰值逐渐降低,这种行为称为循环软化。材料刚度随着循环周期的增加而衰减,从微观上对应着微孔洞的形成和扩展,这样的损伤可以用损伤参量来描述^[14]。为建立损伤力学模型,本文将损伤参量定义为

$$D = 1 - \frac{E_N}{E_0} \tag{5}$$

式中 E_0 为未损伤材料的初始刚度, E_N 是 N 次加载后材料的刚度。刚度定义为一个循环中应力波峰与应变波峰的比值。

在应变控制疲劳实验中,理论上可以把直接拉伸的半正矢疲劳应变分解为一个恒定的应变和一个正弦交变应变的叠加^[15],如图 2(a)。由于 NEPE 推进剂是典型的黏弹性材料,其应力响应可以分解为一个松弛效应和拉压疲劳效应,如图 2(b)。

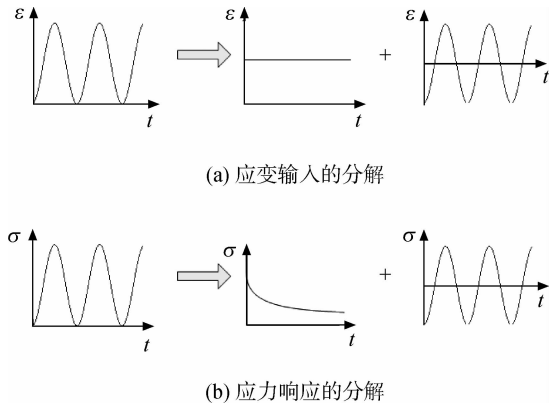


图 2 应变疲劳实验输入与响应分解图

Fig. 2 Analysis of strain input and stress output of fatigue experiment

为描述 NEPE 推进剂疲劳过程中循环软化效应,我们引入一种简单的 Maxwell 黏弹性模型,借用松弛曲线的演化趋势,将松弛模量与刚度关联起来,进而对疲劳损伤过程进行更好的描述。松弛模量表示为

$$E(t) = E e^{-t/\tau} \tag{6}$$

式中 τ 为模型中 Maxwell 单元的松弛时间,通过松弛曲线拟合得到, t 为实验时间。

疲劳实验过程中的频率不变,时间的推迟可以看作是循环周期的增加,则有

$$E\left(\frac{N}{N_f}\right) = E e^{-N/N_f\tau} \tag{7}$$

式(7)为定应变输入部分的模量衰减方程,设试件

达到疲劳寿命时,由松弛引起的总损伤量为 D_r ,由式(5),循环 N 次时由松弛引起的损伤 D_1 为

$$D_1 = D_r(1 - e^{-N/N_f\tau}) \tag{8}$$

其中 D_r 是试件达到疲劳寿命时由松弛引起的损伤总量,与应变范围 $\Delta\epsilon$ 有关。

对于交变应变引起的损伤,引入式(4)的损伤模型,设 D_c 为试件达到疲劳寿命时由交变应变引起的总损伤量,则循环 N 次时由交变应变引起的损伤 D_2 可表达为

$$D_2 = D_c[1 - (1 - N/N_f)^p] \tag{9}$$

其中 D_c 试件达到疲劳寿命时有交变应变引起的损伤,与应变范围 $\Delta\epsilon$ 有关。上标 p 是与材料性能有关的参数。

设试件破坏时的临界损伤总量为 D ,则总的演化方程写为

$$D = D_1 + D_2 \tag{10}$$

将式(8)和式(9)代入式(10),则有

$$D = D_r(1 - e^{-N/N_f\tau}) + D_c[1 - (1 - N/N_f)^p] \tag{11}$$

式(11)即考虑应力松弛的 NEPE 推进剂疲劳损伤演化方程。

2 实验材料及方法

本文实验中 NEPE 推进剂基本组成为聚乙二醇(PEG)黏合剂、高氯酸铵(AP)和奥克托今(HMX)、燃料铝粉、丁三醇三硝酸酯(BTTN)/丙三醇三硝酸酯(NG)增塑剂,其中固体质量分数为 70%~73%。选用同一批次的某 NEPE 浇铸推进剂坯料,疲劳测试在美国 BOSE 公司的 DMA(动态热机械分析仪)上进行。本文参照文献[16]单轴拉伸试验方法设计了疲劳实验试样与夹具。试件与拉头之间用环氧树脂胶黏结,试件的有效长度为长(15±1.5)mm、宽(5.5±0.5)mm、高(5.5±0.5)mm。试件与实验机夹具系统见图 3。

本文采用单轴拉伸应变控制式疲劳实验方法进行实验。实验有效试件为 5 个,实验温度为 20℃,加载频率为 10 Hz,加载波形为半正矢疲劳应变如图 2,应变范围 $\Delta\epsilon = \epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}$,其中 $\epsilon_{\min} = 0$,分别取 $\Delta\epsilon = 0.2, \Delta\epsilon = 0.3, \Delta\epsilon = 0.4, \Delta\epsilon = 0.5, \Delta\epsilon = 0.6$ 进行实验,其中 $\Delta\epsilon = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ 用于拟合模型参数, $\Delta\epsilon = 0.6$ 用于模型验证。由于在应变控制条件下试件不会出现明显的断裂破坏,应力衰减到一定的水平后呈稳定状态,如图 1(b),通常以荷载持续作用刚度衰减至初始刚度的 50%作为疲劳判据^[17],此时的荷载循环次数为

疲劳寿命 N_f .

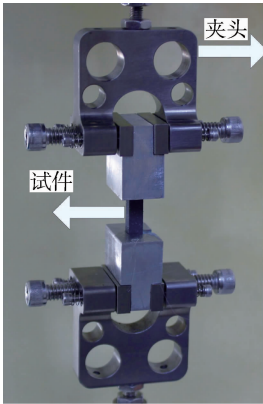


图 3 试件与动态热机械分析仪夹具
Fig. 3 Specimen and DMA fixture

3 实验结果与微观分析

3.1 实验结果与参数获取

实验所得的 NEPE 推进剂的疲劳实验数据统计分析结果见表 1. 由于 NEPE 推进剂是一种多组在散差^[18-19], 单独进行 $E-N$ 图像处理存在困难. 将坐标无量纲化, 得到 $(1-E_i/E_0)-(N/N_f)$

曲线. 式中 E_i 为第 i 次循环后材料模量. 按照推进剂刚度退化的实验数据, 获得不同应变载荷下疲劳损伤值, 根据式(11)对相同频率下 NEPE 推进剂非线性疲劳演化进行拟合, 结果如图 4 所示. 疲劳实验与模型参数统计结果见表 1. R^2 为相关系数. 其中, 由松弛引起的损伤总量 D_r 、松弛时间 τ 、由交变应变引起的总损伤量 D_c , 材料参数 p 对疲劳应变幅值 $\Delta\epsilon$ 有式(12)的关系.

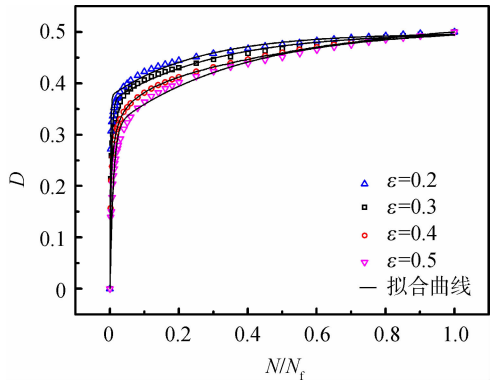


图 4 不同应变水平下 NEPE 推进剂损伤演化
Fig. 4 Damage development of NEPE propellant under different strain

表 1 NEPE 推进剂疲劳实验与模型参数统计结果

Table 1 NEPE propellant statistical results of fatigue experiment and model parameters

$\Delta\epsilon$	E_0/Pa (均值)	N_f (均值)	D_r	τ	D_c	p	R^2
0.2	2314828	518317	0.12309	0.25769	0.37427	550.500	0.97588
0.3	1781018	87860	0.13444	0.30409	0.36401	234.032	0.97968
0.4	1244482	65145.6	0.17184	0.36131	0.33391	181.819	0.98867
0.5	1069842	13581.5	0.19347	0.36878	0.31307	100.000	0.98676

$$D_r = 0.232 + 0.073\Delta\epsilon$$

$$\tau = 0.0259 \cdot \exp(\Delta\epsilon/0.267) + 0.2118$$

$$D_c = -0.0085 \cdot \exp(\Delta\epsilon/0.2127) + 0.3956$$

$$p = 2674 \cdot \exp(-\Delta\epsilon/0.1169) + 61.08$$

将式(12)代入式(11)可得温度 20℃ 频率为 10 Hz 下的应变疲劳损伤演化方程.

3.2 微观分析

在疲劳寿命的最初阶段, 损伤扩展快速上升, 随着循环周期的增加损伤过程逐渐稳定并变缓. 疲劳过程中材料的损伤与诸多因素有关, 其中起主导作用的是材料在循环过程中微观组织的变

化. 为了研究有损伤造成的疲劳软化机理, 对 $\Delta\epsilon=0.4$ 的疲劳试件在循环过程中的微观组织变化进行了显微观察. 图 5(a)~图 5(h)为往复拉伸 $N=0, 1, 100, 500, 1000, 10000, 20000, 40000$ 次后静置, 将试件再次拉伸至 $\Delta\epsilon$ 的微观图. 图 5(a)为未拉伸时的细观形貌, 分析可知推进剂颗粒含量高, 高氯酸铵(AP)大颗粒表面光滑, 分布较为均匀, 大颗粒多呈圆形和椭圆形. 图 5(b)为第 1 次拉伸至 $\Delta\epsilon$ 时的微观图, 当应变达到峰值点时, 沿加载方向许多不同形状的大颗粒沿界面出现为孔洞即出现脱湿点. 脱湿点首先出现在大颗粒及大颗粒聚集区, 说明大颗粒更容易发生脱湿. 当进

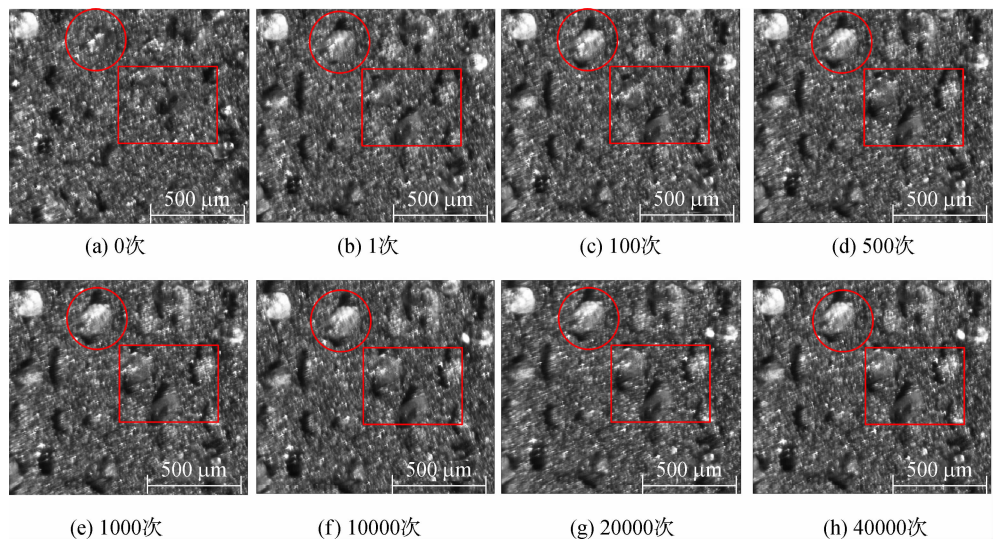


图 5 往复拉伸过程中推进剂脱湿形貌示意图

Fig. 5 Dewetting morphology at tensile process

行循环加载时,脱湿点经过了闭合张开的过程,在循环初期,孔洞迅速扩大如图 5(c)~图 5(d)造成推进剂刚度下降迅速,这是材料出现软化的原因.当脱湿点基本上在基体上饱和时,孔洞的变化逐渐稳定图 5(e)~图 5(h).

4 模型验证

图 6 为采用本文所构建的损伤模型预测曲线与 $\Delta\epsilon=0.6$ 的疲劳实验结果对比.由图可以看出,在模型初期预测曲线与实验结果吻合较好.随着加载周期的增加,预测结果与实验结果出现偏差,这种误差的主要原因,首先是实验误差,主要表现在试件对中性,特别是对 NEPE 这种较软的黏弹性材料,往复拉伸过程中要求较高的对中性;其次复合材料疲劳损伤的复杂性,脱湿点在疲劳过程中张开闭合,对材料造成的影响难以表述,这也是

以后研究的重点.

5 结 论

本文基于应变疲劳过程中的应力松弛效应建立了疲劳损伤演化模型,利用 DMA 疲劳测试系统完成对 NEPE 推进剂应变疲劳性能的研究,结合 CCD 显微观察,分析了疲劳损伤的细观机理.结果表明:

- 1) 该模型能够很好的描述 NEPE 推进剂 20℃ 常应变疲劳损伤过程,因此可以用刚度衰减规律来描述 NEPE 推进剂疲劳损伤演化.
- 2) 结合 CCD 显微分析,微观损伤是造成宏观力学性能下降的主要原因,脱湿点主要出现在大颗粒及大颗粒聚集区,循环周期影响界面脱湿程度,在循环初期,脱湿程度明显增加,造成推进剂刚度下降迅速,当脱湿点在基体上基本饱和时,不在萌生和扩展,脱湿过程逐渐变平稳,应力也趋于稳定.

参考文献:

[1] 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 Linfa, YANG Zhongxiong. The progress and prospects of high energy propellants[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2001, 24(1): 28-34. (in Chinese)

[2] 沈伟,王立波. 疲劳载荷对丁羟推进剂力学性能影响的实验研究[J]. 海军航空工程学院学报,1999,14(4):314-316.
SHEN Wei, WANG Libo. The influence of fatigue load of naval aeronautical engineering academy[J]. Journal of Na-

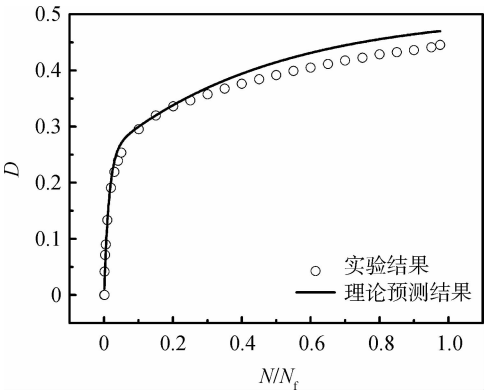


图 6 不同 N/N_f 下理论与实验结果比较

Fig. 6 Comparison of theoretical and experimental damage variables at different N/N_f

val Aeronautical and Astronautical University, 1999, 14 (4):314-316. (in Chinese)

[3] 曲凯,邢耀国,张旭东. 摇摆载荷作用下舰载固体火箭发动机药柱疲劳损伤[J]. 航空动力学报,2011,26(11):2636-2640.

QU Kai,XING Yaoguo,ZHNAG Xudong. Fatigue damage of ship borne solid rocket motor propellant under swing loading[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26 (11): 2636-2640. (in Chinese)

[4] 曲凯,张旭东,李高春. 定应力和拉伸速率对复合固体推进剂反复拉伸试验的影响[J]. 火炸药学报,2011,34(3):79-82.

QU Kai, ZHANG Xudong, LI Chungao. Effect of fixed stress and tension rate on composite solid propellant cyclic loading experiment[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants,2011,34(3):79-82. (in Chinese)

[5] 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.

[6] Lee H J,Kim Y R. Viscoelastic constitutive model for asphalt concrete under cyclic loading[J]. Journal of Engineering Mechanics,1998,124(1):32-40.

[7] 邢耀国,曲凯,许俊松. 舰船摇摆条件下固体火箭发动机舰载寿命预估[J]. 推进技术,2011,32(1):32-35.

XING Yaoguo, QU Kai, XU Junsong. Life prediction of ship borne solid rocket motor under the ship swing motion [J]. Journal of Propulsion Technology, 2011, 32 (1): 32-35. (in Chinese)

[8] WU Fuqiang,Yao W X. A fatigue damage model of composite materials [J]. International Journal of Fatigue, 2010,32(1):134-138.

[9] 刘著卿,李高春,王玉峰. 应变加载历史对推进剂力学性能的影响[J]. 火炸药学报,2010,33(4):5-9.

LIU Zhuqing,LI Gaochun,WANG Yufeng. Effect of strain loading history on the mechanical property of propellant [J]. Chinese Journal of Explosives Propellants, 2010, 33 (4):5-9. (in Chinese)

[10] 徐颖,温卫东,崔海涛. 复合材料层合板疲劳逐渐累积损伤寿命预测方法[J]. 航空动力学报,2007,22(4):602-607.

XU Ying,WEN Weidong,CUI Haitao. Progressive fatigue damage analysis method of laminated composites[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22 (4): 602-607. (in Chinese)

nese)

[11] Sun Z,Daniel I M,Luo J J. Modeling of fatigue damage in a polymer matrix composite[J]. Materials Science and Engineering: A,2003,361(1):302-311.

[12] Miner M A. Cumulative damage in fatigue[J]. Journal of Applied Mechanics,1945,12(3):159-164.

[13] Lemaitre J,Plumtree A. Application of damage concepts to predict creep-fatigue failures [J]. Journal of Engineering Materials and Technology,1979,101:284.

[14] 程光旭,韦玮,李光哲. 复合材料疲劳损伤演化的两阶段模型[J]. 机械工程材料,2000,24(5):1-4.

CHENG Guangxu, WEI Wei, LI Guangze. A general two stage model for accumulation of fatigue damage in composite material [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2000,24(5):1-4. (in Chinese)

[15] 吴旷怀,杨国良,张肖宁. 考虑松弛的沥青混合料疲劳损伤累计模型研究[J]. 深圳大学学报:理工版,2008,25(4):345-350.

WU Kuanghuai, YANG Guoliang, ZHANG Xiaoning. A fatigue damage model of mixture considering stress relaxation[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2008,25(4):345-350. (in Chinese)

[16] Jung G D,Youn S K. A nonlinear viscoelastic constitutive model of solid propellant[J]. International Journal of Solids and Structures,1999,36(25):3755-3777.

[17] 关宏信. 2005. 沥青混合料黏弹性疲劳损伤模型研究[D]. 长沙:中南大学,2005.

GUAN Hongxin. Fatigue damage model fore asphalt mixtures[D]. Changsha: Central South University, 2005. (in Chinese)

[18] 胡少青,鞠玉涛,常武军. NEPE 固体推进剂粘-超弹性本构模型研究[J]. 兵工学报,2013,34(2):168-173.

HU Shaoqing,JU Yutao,CHANG Wujun. A visco-hyperelastic constitutive behavior of NEPE propellant[J]. Acta Armamentarii,2013,34(2):168-173. (in Chinese)

[19] 张建伟,职世君,孙冰. 基于细观颗粒夹杂模型的复合固体推进剂松弛模量预测[J]. 航空动力学报,2013,28(10):2370-2375.

ZHANG Jianwei,ZHI Shijun,SUN Bing. Estimation of relaxation modulus of composition solid propellant based on partial packing model [J]. Journal of Aerospace Power, 2013,28(10):2370-2375. (in Chinese)