

基于能量耗散的药柱粘弹性累积损伤*

邓斌¹,董可海²,谢燕¹

(1. 国防科技大学 航天科学与工程学院,湖南 长沙 410073;

2. 海军航空工程学院 飞行器工程系,山东 烟台 264001)

摘要:基于不可逆能量耗散的损伤变量定义方法和动态线粘弹性理论,建立了固体推进剂累积损伤模型,利用不同拉伸速率下的试验数据,拟合得到了推进剂破坏耗散能表达式,进而给出了推进剂在周期应力响应下的累积损伤计算式,并讨论了周期应力幅值和频率对累积损伤的影响,最后对某舰载发动机药柱进行了累积损伤及使用寿命分析。提出的累积损伤分析方法,为固体发动机贮存寿命预估提供了一条有益的技术途径。

关键词:固体推进剂;能量耗散;粘弹性;累积损伤

中图分类号:V435 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2013)01-0024-04

Viscoelastic cumulative damage of dolid propellant grain based on energy dissipation

DENG Bin¹, DONG Kehai², XIE Yan¹

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

2. Department of Aircraft Engineering, Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai 264001, China)

Abstract: A cumulative damage model of solid propellant was established based on energy dissipation damage variable defining method and dynamic linear viscoelastic theory. The expression of dissipated energy when destroyed was obtained according to the experimental data of different stretch rates, and the formula of cumulative damage for grain was presented as well. Considering influence of circular stress magnitude and frequency, the rule of cumulative damage varying was researched respectively, and a case of cumulative damage and life prediction for solid rocket motor grain was analyzed finally. The method is beneficial for the storage life prediction of solid rocket motor.

Key words: solid propellant; energy dissipation; viscoelasticity; cumulative damage

固体发动机药柱在服役过程中要长期承受振动、冲击及温度等载荷的作用。在值班或贮存过程,药柱内部产生的应力往往远小于其抗拉强度,不会使药柱立即发生破坏,但这种载荷长期作用将产生累积损伤效应,严重影响着发动机的结构完整性及其使用寿命。固体推进剂是一种颗粒增强基粘弹性聚合物,其累积损伤过程与加载应变率及时间等因素紧密相关。普遍采用基于连续应力损伤模型等的累积损伤计算方法^[1-3],由于没有很好考虑这些因素的影响,并不能够准确反映粘弹性材料的真实破坏过程。

固体推进剂损伤的累积过程本质上是一种能量非均匀耗散的不可逆过程,为使材料破坏必须提供一定的能量来克服内部固体颗粒和基体之间的结合能^[4]。一般地,损伤应包含应力和应变项才能比较全面地反映损伤的发展。因此,从耗散

能从能量角度定义损伤变量更为合理^[5]。

基于耗散能的损伤定义方法在沥青、岩石及复合材料等领域中得到了有效应用^[4-7]。在固体推进剂领域,国内亦有相关研究,并取得了一些有意义的成果^[8-9]。然而由于推进剂材料力学性能复杂,如何确定一种更有效的结构失效评估方法,一直是科研人员致力研究的难题。

1 基于耗散能的累积损伤模型

1.1 基于能量耗散的累积损伤定义

按照能量守恒定律,对单位体积的推进剂来说,有^[4]

$$W = U_e + U_d + U_h \quad (1)$$

式中 W 为单位体积输入的总机械能, U_h 为单位体积耗散的热能, U_e 为单位体积弹性应变能, U_d

* 收稿日期:2011-09-20

基金项目:国家部委资助项目

作者简介:邓斌(1984—),男,江西南康人,博士研究生,E-mail:dbhj0@sina.cn;

谢燕(通信作者),女,讲师,博士,E-mail:xyy80@163.com

为单位体积材料不可逆塑性应变能。

塑性应变能是其产生损伤的主要原因,假设药柱的破坏过程认为是绝热的过程,即可以忽略热耗散能项,则式(1)可写成

$$W = U_e + U_d \quad (2)$$

对于推进剂的破坏过程,总机械功、弹性回复能和耗散能的关系如图 1 所示。

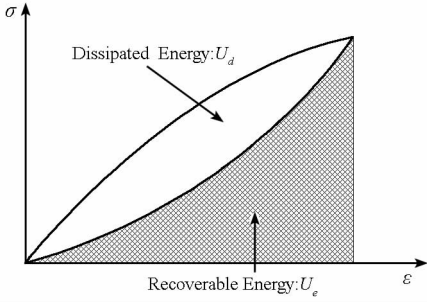


图 1 循环载荷作用下的能量耗散示意图

Fig. 1 Illustration of the dissipated energy for circular load

按照能量的观点,当材料产生粘塑性变形后,材料所能承受的粘塑性应变能已大大降低,这也是由于材料细观结构发生变化而引起材料性能下降的一种表现,符合损伤的定义。因此,可以根据材料能量耗散定义损伤变量^[6]

$$D_n = \frac{U_n}{U_f} \quad (3)$$

式中 U_n 为载荷作用 n 个周期时的耗散能; U_f 为相应载荷作用下结构破坏时总耗散能。

基于耗散能的损伤变量的结构失效准则为

$$D_n \geq 1 \quad (4)$$

1.2 推进剂的损伤破坏试验研究

1.2.1 单应变率下的推进剂破坏耗散能试验

以某型 HTPB 推进剂为研究对象,采用电子万能试验机系统和哑铃型推进剂试件,分别在拉伸速率为 5mm/min、25mm/min、100mm/min 和 500mm/min 的条件下进行单向拉伸破坏试验,并记录拉伸过程中的应力-应变曲线等数据。

由图 1 所示能耗关系,即各部分面积代表了相应的能量值,并结合试验获得的应力-应变曲线,即可求得相应的总破坏耗散能。表 1 为 20℃ 时不同应变率下的推进剂总破坏耗散能数据。

表 1 不同拉伸速率下的破坏耗散能

Tab. 1 Dissipated energy under different stretch rates

拉伸速率(mm/min)	5	25	100	500
破坏耗散能(kJ/m ³)	265.13	400.4	504.90	566.76

根据拉伸速率与应变率的转换关系,对表 1 所示的数据进行处理,拟合得到单位体积推进剂

的破坏耗散能与应变率关系为

$$U_f = 8.06 \times 10^5 \dot{\epsilon}^{0.1461} \quad (5)$$

1.2.2 多应变率下的推进剂累积损伤

在上述单拉伸速率试验的基础上,进行了多级拉伸速率下的拉伸试验破坏耗散能试验,并结合层合复合材料基于耗散能的累积损伤模型,拟合得到如下累积损伤形式^[8]

$$D_n = \sum_{i=1}^n \left[\frac{U_{id}}{U_{fi}} \right]^q, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

式中 $q = 1.14 - 2.04 \dot{\epsilon}_i$; 其中 $\dot{\epsilon}_i$ 为第 i 级载荷的应变速率; U_{id} 为第 i 级载荷下的耗散能; U_{fi} 为第 i 级载荷下的破坏耗散能。

1.3 耗散能及累积损伤计算

1.3.1 相关材料性能参数

某型发动机药柱为丁羟推进剂,其松弛模量 $E(t)$ 的 Prony 级数形式为

$$E(t) = E_e + \sum_{i=1}^n E_i e^{-a_i t} \quad (7)$$

其中各相应系数如表 2 所示^[8]。

表 2 松弛模量 $E(t)$ 的 Prony 级数参数
Tab. 2 Parameter of Prony progression for $E(t)$

i	0	1	2	3	4
E_i (MPa)	1.799	1.431	2.053	3.040	3.886
a_i	—	1/2.4	1/24	1/240	1/2400

1.3.2 由松弛模量求解复蠕变柔量

根据线粘弹力学基础,动态存储模量和损耗模量与静态应力松弛模量的转换关系为^[10]

$$E'(\omega) = E_e + \omega \int_0^{\infty} [E(t) - E_e] \sin \omega t dt \quad (8)$$

$$E''(\omega) = \omega \int_0^{\infty} [E(t) - E_e] \cos \omega t dt \quad (9)$$

把式(7)代入上述两式并进行积分可得

$$E'(\omega) = E_e + \omega \sum_{i=1}^n E_i \frac{\omega}{a_i^2 + \omega^2} \quad (10)$$

$$E''(\omega) = \sum_{i=1}^n E_i \frac{\omega a_i}{a_i^2 + \omega^2} \quad (11)$$

根据式(10)和(11),并结合表 1 中的 $E(t)$ 各系数值,即可计算得到 $E'(\omega)$ 和 $E''(\omega)$ 的值。

另根据复柔量与复模量的关系

$$F^*(i\omega) E^*(i\omega) = 1 \quad (12)$$

$$F^*(i\omega) = F'(\omega) + iF''(\omega) \quad (13)$$

式中 存储柔量 $F'(\omega)$ 与 损耗柔量 $F''(\omega)$ 为

$$\begin{cases} F'(\omega) = \frac{E'(\omega)}{E'^2(\omega) + E''^2(\omega)} \\ F''(\omega) = \frac{-E''(\omega)}{E'^2(\omega) + E''^2(\omega)} \end{cases} \quad (14)$$

1.3.3 基于能量耗散的累积损伤公式

本文暂不考虑温度因素的影响,给定周期应力响应 $\sigma(t) = \sigma_0 e^{i\omega t}$,其实部为 $\sigma(t) = \sigma_0 \cos\omega t$ 时,其应变响应函数的实部为

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= \text{Re}[F^*(i\omega)\sigma(t)] \\ &= F'(\bar{\sigma} + \sigma_0 \cos\omega t) - F''\sigma_0 \sin\omega t \quad (15) \end{aligned}$$

其应变率为

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\sigma_0\omega(F'\sin\omega t + F''\cos\omega t) \quad (16)$$

则输入单位体积的总能量为

$$\begin{aligned} U(t) &= \int_0^t \sigma(\tau) d\varepsilon(\tau) = \int_0^t \sigma(\tau) \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} d\tau \\ &= U_e + U_d \quad (17) \end{aligned}$$

式中 U_e 为存储能; U_d 为耗散能,其表达式为

$$U_d = -\frac{1}{4}\sigma_0^2 F''(2\omega t + \sin 2\omega t) \quad (18)$$

则作用 n 个周期后的药柱耗散能为

$$U_n = U_d\left(\frac{2n\pi}{\omega}\right) = -n\pi\sigma_0^2 F'' \quad (19)$$

取一个周期内平均应变率为药柱应变率,即

$$\begin{aligned} \bar{\dot{\varepsilon}} &= \frac{1}{T} \int_0^T |\dot{\varepsilon}(t)| dt \\ &= \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi} |-\sigma_0\omega(F'\sin\omega t + F''\cos\omega t)| dt \\ &= \frac{2}{\pi}\sigma_0\omega \sqrt{F'^2 + F''^2} \quad (20) \end{aligned}$$

假设各周期内应变率均服从式(20)所示的规律,结合式(6),可得到此周期应力下药柱破坏时的耗散能计算式

$$U_f = 8.06 \times 10^5 \left[\frac{2}{\pi}\sigma_0\omega \sqrt{F'^2 + F''^2} \right]^{0.1461} \quad (21)$$

则 n 个周期内的药柱累积损伤计算式

$$D_n = \frac{U_n}{U_f} = \frac{-n\pi\sigma_0^2 F''}{8.06 \times 10^5 \left[\frac{2}{\pi}\sigma_0\omega \sqrt{F'^2 + F''^2} \right]^{0.1461}} \quad (22)$$

2 基于耗散能的药柱累积损伤规律研究

2.1 不同应力幅值下的累积损伤规律

给定频率 $\omega = 1 \text{ rad/s}$,先后取周期应力幅值为 1000、2000、3000 及 4000Pa,分别进行计算,得到如图 2 所示的累积损伤随时间变化曲线。

在恒定的载荷频率下,累积损伤—时间曲线由总体的线性变化部分和局部的余弦变化部分叠加组成,如图 2 所示,且随应力幅值 σ_0 的增大,累积损伤值及其波动幅值都将增大;忽略周期变化的余弦波动部分,累积损伤值随时间总体上呈线

性增长趋势。

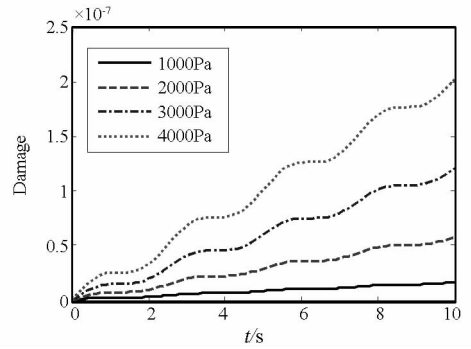


图 2 不同应力幅值下的累积损伤—时间曲线

Fig. 2 Curve of cumulative damage-time for different stress

2.2 不同频率下的累积损伤规律

依次取周期应力幅值 σ_0 为 1000、2000、3000 和 4000Pa,在频率为 1 ~ 20rad/s 的范围内,根据式(22)分别进行累积损伤计算。由于累积损伤随时间总体上呈线性增长,计算时间取 10s,得到如图 3 所示的累积损伤随频率变化曲线。

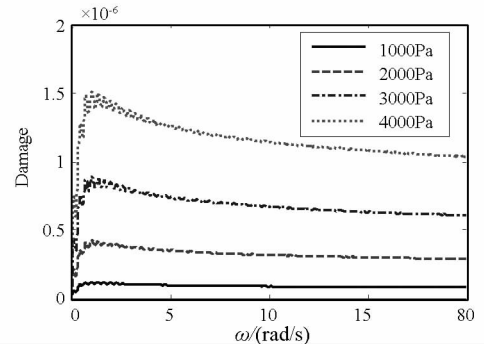


图 3 累积损伤—频率变化规律

Fig. 3 Rule of cumulative damage vs frequency

由计算结果(图 3)可知,药柱的累积损伤值受到频率影响,其变化趋势是:当载荷频率 $\omega < 1.05 \text{ rad/s}$ 时,随着频率的增大而迅速增大,频率约在 $\omega = 1.05 \text{ rad/s}$ 处达到最大值,当 $\omega > 1.05 \text{ rad/s}$ 时,随着频率的增大开始缓慢减小,并不断趋近于某一下限值,即可认为当频率在大于一定值后,频率的变化对其累积损伤值的影响已不明显。另从中还可知,累积损伤值随频率的变化产生波动,且随着频率的不断增大,波动幅值逐渐减小,在频率较高时逐渐趋近于零。

3 算例分析

根据文献[9]对某型发动机进行舰载条件下的分析结果,可知在 3 ~ 7 级不同海况下的某舰载发动机药柱的响应频率变化不明显,其结构响应频率近似为 $\omega = 1.257 \text{ rad/s}$,另药柱最大应力幅值 σ_0 与海况等级 r 之间的拟合表达式为

$$\sigma_0 = -2r^4 + 35r^3 - 72r^2 + 87r \quad (23)$$

本文所研究发动机及其药柱与上述发动机及其药柱性能极为接近,可假定在相同的载荷下应力响应一样。装载该型发动机的同类舰艇于西北太平洋某海域执行任务,值班巡航时间为15天,根据该海域的海况统计数据^[11],并结合式(23),可以得到其海况等级和应力幅值与其出现概率数据,如表3所示。

表3 某海域海况的相关数据

Tab. 3 Data of sea scales in a sea area

海况等级 r	3	4	5	6	7
应力幅值 σ_0/Pa	396	924	1760	2898	4284
出现概率 P	0.050	0.230	0.521	0.159	0.040

不考虑海况出现的先后顺序影响,并认为各段时间内各海况以表3所示概率出现,并结合载荷频率及累积损伤表达式(7)和式(22),即可计算得到舰船值班状态下药柱累积损伤值,图4为10s内的应力最大的星尖部位累积损伤曲线,其中拟合曲线为斜率等于 $1.289 \times 10^{-8} \text{1/s}$ 的直线。

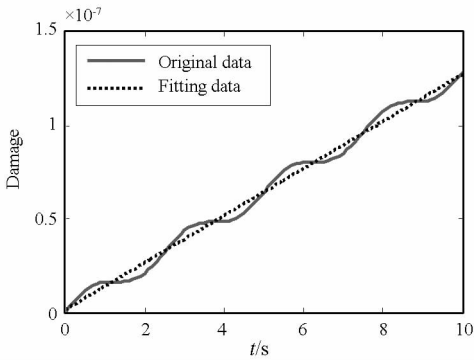


图4 药柱累积损伤—时间曲线

Fig. 4 Curve of cumulative damage vs time for grain

由图4可知,在固体发动机该海域的累积损伤随时间总体呈线性增长,经历10s的累积损伤为 1.289×10^{-7} ,按照线性叠加方法,则可得到经历15天值班后药柱星尖部位的累积损伤值为0.0167。不考虑此较短时间内的药柱性能化学老化,则根据舰载值班条件与正常弹库贮存条件下的寿命折算方法^[9],可知上述载荷历程下的固体发动机比弹库贮存的剩余寿命减少了约99天。

4 结论

(1)药柱累积损伤受到周期应力幅值因素的显著影响。不考虑温度影响时,应力幅值越高,累积损伤值及其波动幅值越大,在值班过程中应尽

量采取减振保护措施。

(2)累积损伤受到频率的一定影响,并在某处存在极大值。为减小药柱的累积损伤量,在贮存使用过程应尽量使其远离这一频率,或采用相应的频率隔离等方案。

(3)根据发动机服役过程的载荷谱及性能老化数据,建立一种基于力学损伤与化学老化分析方法,综合累积损伤与化学老化效应的失效模型,可进一步提高固体发动机寿命预估的精度。

参考文献 (References)

- [1] Duncan E J S. A nonlinear viscoelastic theory for solid rocket propellants based on a cumulative damage approach [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1998, 23(1): 94-104.
- [2] Heller R A, Singh M P, Zibdeh H. Environmental effects on cumulative damage in rocket motors [J]. 1985; 22(2), 149-155.
- [3] Kunz R K. Characterization of solid propellant for linear cumulative damage modeling [J]. AIAA 2009-5257, 2009.
- [4] 轩福贞, 孙树勋, 汤红卫, 等. 复合材料层板疲劳损伤的有效能耗分析法 [J]. 复合材料学报, 1997; 14(3), 115-124. XUAN Fuzhen, SUN Shuxun, TANG Hongwei, et al. Effective energy dissipation analysis method for fatigue damage of laminated composites [J]. Acta Mechanica Sinica, 1997; 14(3), 115-124. (in Chinese)
- [5] 金丰年, 蒋美蓉, 高小玲. 基于能量耗散定义损伤变量的方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004; 23(12), 1976-1980. JIN Fengnian, JIANG Meirong, GAO Xiaoling. Defining damage variable based on energy dissipation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004; 23(12), 1976-1980. (in Chinese)
- [6] 陈建康, 黄筑平. 高三轴应力条件下粒子填充粘弹性材料的能量耗散 [J]. 工程力学, 2004; 23(3), 167-173. CHEN Jiankang, HUANG Zhuping. Energy dissipation in particulate-reinforced viscoelastic materials under the condition of high stress triaxiality [J]. Engineering Mechanics, 2004; 23(3), 167-173. (in Chinese)
- [7] Huang H S. Composite material failure prediction using dissipated energy method [M]. Ph.D. Stanford University, 2003.
- [8] 邢耀国, 董可海, 沈伟, 等. 固体火箭发动机使用工程 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010. XING Yaoguo, DONG Kehai, SHEN Wei, et al. Usage engineering of solid rocket motor [M]. Beijing, National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [9] 邢耀国, 曲凯, 许俊松, 等. 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, et al. Life prediction of shipborne solid rocket motor under the ship swing motion [J]. Journal of Propulsion Technology, 2011; 32(1), 32-35. (in Chinese)
- [10] 牛秉彝, 王元有, 黄人骏. 高聚物粘弹及断裂性能 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1991. NIU Bingyi, WANG Yuanyou, HUANG Renjun. Viscoelastic and fracture properties of high polymer [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1991. (in Chinese)