

应力控制下 HTPB 推进剂的疲劳损伤及寿命研究

梁 蔚 陈 雄* 许进升

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘 要 为研究 HTPB 推进剂应力控制下的疲劳特性,在动态热机械分析仪上开展了不同应力幅值的疲劳试验。结果表明,应力幅值增大会使疲劳寿命缩短,应力幅值越大,相同加载次数下的疲劳峰值应变越大,疲劳谷点应变越小,最终断裂应变值基本一样。以疲劳峰值应变作为损伤因子,基于损伤力学理论建立了不同应力幅值下的疲劳损伤演化模型,克服了原有的 Chaboche 模型不能解释循环应变松弛的缺点,可以很好地表征材料损伤演化规律。

关键词 HTPB 推进剂,应力控制,疲劳寿命,损伤模型

Study on fatigue damage and life of HTPB propellant under stress control

Liang Wei Chen Xiong Xu Jinsheng

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing 210094)

Abstract In order to investigate the fatigue properties of HTPB propellant under stress loading, fatigue tests with different stress amplitudes were carried out on the dynamic thermo mechanical analyzer. The results showed that when the stress amplitude increased, the fatigue life was shortened. The bigger the stress amplitude was, the bigger the maximum fatigue strain was, the smaller the fatigue residual strain was, and the ultimate fracture strain value was basically the same. Based on the damage mechanics theory, the fatigue damage evolution model which can consider the stress amplitude was established by using the maximum fatigue strain as damage factor. The model can overcome the shortcomings of Chaboche model that can't explain the cyclic strain relaxation, therefore it can be used to characterize the damage evolution law of materials very well.

Key words HTPB propellant, stress control, fatigue life, damage model

推进剂药柱在全寿命周期内,会受到各种交变载荷的作用,如弹体振动载荷、温度应力载荷等^[1]。这些交变载荷短时间内不会造成药柱宏观的破坏,但长期作用会使推进剂力学性能劣化,造成发动机工作异常。因此,研究交变载荷下 HTPB 推进剂的疲劳特性对药柱寿命评估具有重要意义。

目前对材料疲劳性能的研究方法基本可分为 3 类:断裂力学法、耗散能法和唯象学法。断裂力学法是通过监测裂纹扩展速率,并计算裂纹尖端的应力强度因子来研究疲劳。但该方法局限性在于应力强度因子不是一个常数,受温度影响较大。耗散能法是通过计算滞回曲线的面积来研究疲劳损伤。邓斌等^[4]基于不可逆能量耗散原理,对发动机药柱累积损伤和使用寿命进行了分析。邢耀国等^[5]基于耗散

能的装药累积损伤理论,提出了在不同海域执行任务的发动机寿命的评估方法。但高周疲劳下累积耗散能的计算复杂、工程应用困难。唯象学法通过弹性模量等宏观力学参数的变化来研究疲劳损伤。Drozdo^[6]对聚乙烯进行不同温度下的疲劳试验,建立了用残余应变表征的疲劳损伤模型。Paepgen 等^[7]用剩余强度和剩余刚度耦合的方法,建立了考虑初始段循环软化的纤维材料的损伤演化模型。高艳宾等^[8]建立了应变控制下 NEPE 推进剂的疲劳损伤演化模型,并分析了疲劳过程中颗粒的“脱湿”和损伤的发展。

本研究开展了应力控制下 HTPB 推进剂的疲劳试验,分析了疲劳寿命等力学参数的变化规律,建立了疲劳损伤演化模型。研究结果可为火箭发动机

基金项目:国家自然科学基金(51606098)

作者简介:梁蔚(1994-),男,硕士生,研究领域为固体火箭发动机装药结构分析。

联系人:陈雄。

在交变载荷作用下的安全设计提供参考。

1 实验部分

实验用 HTPB 推进剂成分为:铝粉(Al)17%,高氯酸铵(AP)70%,基体 HTPB 橡胶及其他组分 13%。试件的尺寸和夹头的粘结方式见图 1。使用环氧树脂胶将 HTPB 推进剂试样上下两端和铝制夹头粘结,试件制作完成后静置 30min 使胶充分固化,然后放入温度为 70℃大 V 保温箱中保温 48h。

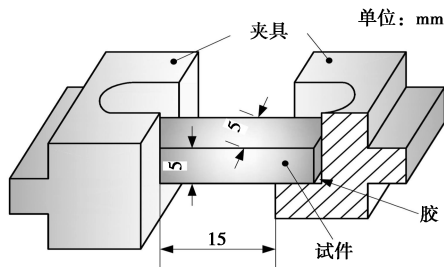


图 1 HTPB 推进剂试件

疲劳试验在动态热机械分析仪(美国 BOSE 公司的 ELF3200)上进行。实验采用应力控制正弦波加载,频率为 20Hz,温度保持 20℃。实验中最小应力 $\sigma_{\min}$ 的取值为 0,最大应力 $\sigma_{\max}$ 设定为 0.1~0.7MPa,则应力幅值 $\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2$,取值为 0.05、0.1、0.15、0.2、0.25、0.3 和 0.35MPa,每个条件下实验重复 3 次,结果取平均值。

2 结果与讨论

2.1 疲劳寿命

疲劳寿命 N_f 是指材料经受循环载荷作用直至疲劳断裂所经受循环加载次数,如图 2 所示。

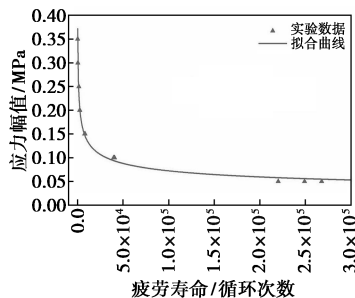


图 2 HTPB 推进剂疲劳寿命和应力幅值的关系图

从图 2 中可以看出,应力幅值越大,疲劳寿命越小,表明应力幅值越大,材料每个循环造成的损伤越大,达到疲劳断裂所需的次数就越少。而且二者之间的关系可以用幂函数进行拟合,拟合结果如式(1),相关系数达到了 0.988。

$$\sigma_a = 1.861 \times (N_f)^{-0.282}, R^2 = 0.988 \quad (1)$$

2.2 疲劳过程中的力学响应

因为 HTPB 推进剂是黏弹性材料,当承受周期性变化的正弦应力时,材料产生周期性正弦应变,但应变落后于应力,形成滞回曲线。以应力幅值 0.25MPa 为例,如图 3 所示。

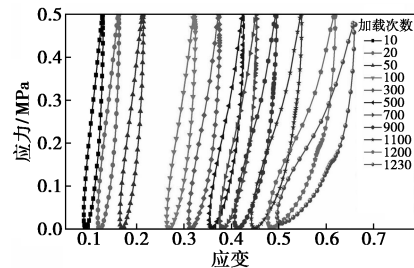


图 3 应力-应变滞回曲线

由图 3 知随着循环加载次数的增加,滞回曲线逐渐右移,即疲劳过程中的应变不断增大。同时发现滞回曲线的面积随着循环周次的增加而增大,这说明材料的损伤程度逐渐增强。疲劳应变主要关注的是疲劳峰值应变和疲劳谷点应变,图 4 给出了部分应力幅值下的疲劳应变随加载次数的关系图。

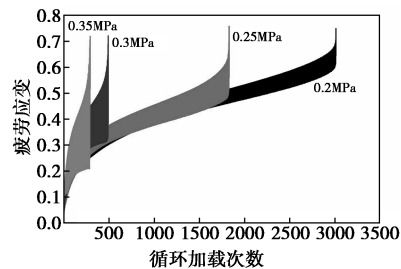


图 4 部分应力幅值下的疲劳应变变化曲线

从图 4 可以看出,疲劳峰值应变呈现三阶段的发展规律^[9]:初始变形阶段、稳定发展阶段和加速阶段。初始阶段,变形增长较快,应变曲线呈明显上凸状,该阶段持续时间较短;稳定发展阶段,应变增长速率大幅降低,每个循环周期产生的变形量累积较小,持续时间较长;加速阶段曲线上凹,应变快速发展直至材料疲劳断裂。疲劳谷点应变有相似的前两个发展阶段,没有最后将要疲劳失效的应变快速增长阶段。应力幅值越大,相同循环次数下的疲劳峰值应变越大,最后的应变增长阶段所占的比例也越大,材料更容易疲劳失效。不同应力幅值对疲劳断裂应变的影响不大,其值在 0.72~0.76 之间。应力幅值越大,相同循环次数下的疲劳谷点应变越小,疲劳谷点应变与疲劳峰值应变的差值随着应力幅值的增大而增大。

3 疲劳损伤演化

3.1 损伤变量的表征

疲劳就是损伤不断积累、力学性能不断劣化的过程。考虑到疲劳峰值应变是材料内部损伤的宏观表现,选择疲劳峰值应变作为损伤变量,定义为式(2):

$$D = \epsilon_N / \epsilon_F \quad (2)$$

式中, ϵ_N 是材料加载 N 次时的疲劳峰值应变; ϵ_F 是材料疲劳断裂时对应循环周期的峰值应变; D 的取值范围为 $0 \sim 1$, $D=0$ 时材料无疲劳损伤, $D=1$ 时材料疲劳断裂。

将疲劳峰值应变和循环加载次数无量纲化,得到损伤和寿命比的曲线,如图 5 所示。

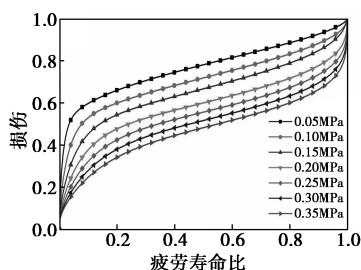


图 5 不同应力幅值下的疲劳损伤演化曲线

从图 5 可看出,疲劳损伤呈现三阶段发展规律:包括材料循环应变松弛、微裂纹萌生与扩展、宏观裂纹的萌生和扩展^[10]。并且应力幅值越大,曲线越向下移,第一阶段损伤所占的比例减小,第二、三阶段损伤所占的比例增加。

3.2 损伤模型的建立

Chaboche 等在研究复合材料时,提出了一种基于连续介质力学的损伤演化方程^[11-12],如式(3):

$$\frac{dD}{dN} = \left[\frac{\sigma_a}{M_0(1-D)} \right]^\beta [1 - (1-D)^{\beta+1}]^\alpha \quad (3)$$

式中, α 、 β 、 M_0 是材料常数。

对(3)式进行积分得到损伤 D 和循环加载次数 N 的关系如式(4):

$$[1 - (1-D)^{\beta+1}]^{1-\alpha} = (1-\alpha)(1+\beta)(\sigma_a/M_0)^\beta N \quad (4)$$

当材料疲劳断裂时, $D=1$, $N=N_f$, 可以得到疲劳寿命的表达式,如式(5):

$$N_f = (\sigma_a/M_0)^{-\beta} / [(1-\alpha)(1+\beta)] \quad (5)$$

则材料失效之前某个时刻的损伤 D 的函数关系为式(6):

$$D = 1 - [1 - (N/N_f)^{1/(1-\alpha)}]^{1/(1+\beta)} \quad (6)$$

但是 Wu 等^[13]和吴旷怀等^[14]在研究沥青混合料等黏弹性材料时,发现 Chaboche 模型忽略了材

料在初始疲劳阶段由于循环应变松弛引起的疲劳损伤。高艳宾等^[8]在研究 NEPE 推进剂的疲劳损伤时也发现了类似的情况。用 Kelvin 模型的蠕变方程^[15]进行推导,得到式(7):

$$X(t) = X_0 [1 - \exp(-t/\lambda)] \quad (7)$$

式中, $X(t)$ 为瞬时应力, MPa; X_0 为初始应力, MPa; t 为时间, s; λ 为延迟时间, s。

相应的损伤演化方程为式(8):

$$D(n) = D_c [1 - \exp(-\mu N/N_f)] \quad (8)$$

式中, D_c 为第一阶段循环应变松弛的饱和损伤量; μ 为拟合常数。

因此,总的疲劳损伤演化方程为式(9):

$$D = D_c [1 - \exp(-\mu N/N_f)] + D_a \{1 - [1 - (N/N_f)^A]^B\} \quad (9)$$

式中, D_a 为第二、三阶段的饱和损伤量; $A=1/(1-\alpha)$ 和 $B=1/(1+\beta)$ 为拟合常数。

3.3 模型参数的获取和验证

取应力幅值为 0.05、0.1、0.15、0.25、0.3 MPa 的曲线用来拟合实验参数,用应力幅值为 0.2 MPa 和 0.35 MPa 的实验曲线来验证。疲劳试验数据统计分析结果见表 1。

表 1 疲劳损伤模型参数统计表

σ_a/MPa	D_c	μ	D_a	A	B
0.05	0.342	72.356	0.658	0.253	0.603
0.10	0.325	32.845	0.675	0.252	0.482
0.15	0.306	19.265	0.694	0.246	0.382
0.25	0.263	10.563	0.737	0.254	0.284
0.30	0.248	8.571	0.752	0.248	0.253

计算 3 个阶段的饱和损伤量如式(10):

$$D_c = -0.389 \times \sigma_a + 0.363, \mu = 2.018 \times \sigma_a^{-1.198} \\ D_a = 0.389 \times \sigma_a + 0.637, B = 0.141 \times \sigma_a^{-0.505} \quad (10)$$

由表 1 可知, A 是一个近似为 0.25 的常数,与应力幅值的大小无关。将式(10)代入到式(9)中即可得到频率为 20 Hz、温度为 20℃ 的不同应力幅值的 HTPB 推进剂的疲劳损伤演化方程,如图 6 所示。

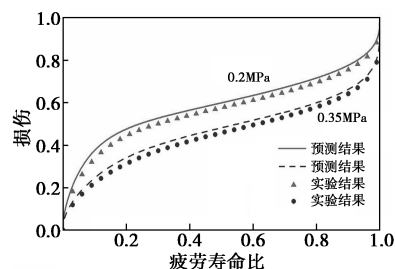


图 6 预测结果与实验结果对比图

从图 6 可以看出,循环初期预测结果与实验结果吻合很好,随着加载次数的增加,出现了一定的误差。误差产生的原因主要是,加载周期微裂纹的扩展和脱湿点的张开闭合比较复杂^[16],其次实验本身也存在一定的误差,总的来说实验和预测结果吻合较好。

4 结论

(1)HTPB 推进剂在不同应力水平加载下存在着明显的滞回现象,滞回曲线随着循环次数的增大而整体右移,其疲劳应变不断增大,滞回曲线的面积也越来越大,损伤逐渐增强。

(2)应力幅值越大,相同加载次数下的疲劳峰值应变越大,疲劳谷点应变越小,达到断裂应变所需的循环次数越少,疲劳寿命相应就越短。但是疲劳断裂应变值基本一样。

(3)HTPB 推进剂损伤过程主要包括循环应变松弛、微裂纹的萌生和扩展、宏观裂纹的萌生和扩展 3 个阶段。以疲劳峰值应变作为损伤变量,建立了不同应力幅值下的疲劳损伤演化模型,可以很好地表征温度 20℃、频率 20Hz 的 HTPB 推进剂的损伤演化规律。

参考文献

- [1] 周红梅,王连生,王宏伟,等.随机载荷下固体发动机药柱黏弹动力响应[J].导弹与航天运载技术,2009(5):46-49.
- [2] Singh A, Tang L, Dao M, et al. Fracture toughness and fatigue crack growth characteristics of nanotwinned copper[J]. Acta Materialia, 2011, 59(6): 2437-2446.
- [3] Lin Y K, Yang J N. A stochastic theory of fatigue crack propagation[J]. Aiaa Journal, 2015, 23(23): 117-124.
- [4] 邓斌,董可海,谢燕.基于能量耗散的药柱黏弹性累积损伤[J].

国防科技大学学报, 2013, 35(1): 24-27.

- [5] 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.
- [6] Drozdov A D. Cyclic thermo-viscoplasticity of high density polyethylene[J]. International Journal of Solids & Structures, 2010, 47(11): 1592-1602.
- [7] Paepegem W V, Degrieck J. A new coupled approach of residual stiffness and strength for fatigue of fibre-reinforced composites[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(7): 747-762.
- [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.
- [9] Plumtree A, Melo M, Dahl J. Damage evolution in a $[\pm 45]_2$ S, CFRP laminate under block loading conditions[J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(1): 139-145.
- [10] 吴健栋,蔡志鹏,汤之南,等.低周疲劳过程损伤变量的复合分析法和三阶段损伤演化模型[J].机械工程学报, 2015, 51(10): 86-95.
- [11] Wang B, Lu H, Tan G, et al. Strength of damaged polycarbonate after fatigue[J]. Theoretical & Applied Fracture Mechanics, 2003, 39(2): 163-169.
- [12] Dattoma V, Giancane S, Nobile R, et al. Fatigue life prediction under variable loading based on a new non-linear continuum damage mechanics model[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(2): 89-95.
- [13] Wu F, Yao W X. A fatigue damage model of composite materials[J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(1): 134-138.
- [14] 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): 19-24.
- [15] 程光旭,韦玮.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.
- [16] 常武军,鞠玉涛,王蓬勃.HTPB 推进剂脱湿与力学性能的相关性研究[J].兵工学报, 2012, 32(3): 261-266.

收稿日期: 2017-07-06

修稿日期: 2017-08-22

(上接第 145 页)

- [8] Sankaraiah S, Lee J M, Kim J H, et al. Preparation and characterization of surface-functionalized polysilsesquioxane hard spheres in aqueous medium[J]. Macromolecules, 2008, 41(16): 6195-6204.
- [9] Hao L F, Gao T T, Wang X C, et al. Synthesis and characterization of polyaminopropyl methylsilsesquioxane nanospheres[J]. Fine Chemicals, 2016, 33(7): 721-725.
- [10] Ottenbrite R M, Wall J S, Siddiqui J A. Self-catalyzed synthesis of organo-silica nanoparticles[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2000, 83(12): 3214-3215.
- [11] Kim S S, Kim V, Kim Y B. Preparation and characterization of polysilsesquioxane particles containing UV-absorbing groups

[J]. Macromolecular Research, 2012, 20(5): 437-446.

- [12] Lee D, Kim Y A, Kim Y B, et al. One step preparation of spherical silicon resins from immiscible reaction mixtures[J]. Macromolecular Research, 2008, 16(4): 353-359.
- [13] Mori H, Sada C, Konno T, et al. Film-forming amphiphilic silsesquioxane hybrids prepared by hydrolytic co-condensation of hydroxyl-functionalized and fluorinated triethoxysilanes[J]. Polymer, 2012, 53(18): 3849-3860.
- [14] Li Z, Tolbert S H, Loy D A. Hybrid organic-inorganic membranes from size exclusion deposition of fluorescent, octylene-bridged polysilsesquioxane particles[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2014, 403: 88-96.

收稿日期: 2017-06-20