

文章编号: 1001-2486(2008)01-0015-04

含内聚空洞固体发动机药柱的寿命预估*

李九天¹, 雷勇军¹, 袁端才¹, 申志彬¹, 蒙上阳²

(1. 国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 中国人民解放军 63961 部队, 北京 100012)

摘要: 为了对含内聚空洞固体导弹发动机的贮存寿命进行预估, 采用加速老化试验, 得到该推进剂最大延伸率随贮存时间的变化规律; 应用三维粘弹性有限元分析方法, 对含内聚空洞的发动机贮存一定时间后直接点火发射过程进行数值仿真, 从中获得发动机药柱在点火增压和轴向过载联合作用下的最大 Von Mises 应变。将不同贮存期药柱的最大 Von Mises 应变值与推进剂的最大延伸率进行对比, 利用结构完整性评估准则, 给出了某发动机药柱不同贮存期间内聚空洞大小的允许值。该方法可为含内聚空洞固体发动机的判废提供定量参考。

关键词: 固体导弹发动机; 粘弹性; 内聚空洞; 老化试验; 贮存寿命

中图分类号: V512 **文献标识码:** A

The Prediction of the Service Life of Solid Motor Grain with Cohesive Cavities

LI Jiu-tian¹, LEI Yong-jun¹, YUAN Duan-cai¹, SHEN Zhi-bin¹, MENG Shang-yang²

(1. College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Chinese People's Liberation Army 63961 Unit, Beijing 100012, China)

Abstract: Cohesive cavities often occur in the solid missile motor grain. The strain field analysis of the cohesive cavity is an important problem to the evaluation of grain structural integrity. In this paper, a method to analyze the cohesive cavity's strain field is presented. With accelerated aging test, the variation law of the extensibility of propellant in the storage period was obtained. Using three-dimension viscoelastic finite element method, the Von Mises strain of the grain with cohesive cavities under internal pressure and axial acceleration loading was analyzed. In comparing the extensibility of propellant and the Von Mises strain of the grain in different storage period, the allowable maximum diameter of the cohesive cavity in different storage period was determined by the maximum Von Mises strain criterion. The analysis of a practical motor shows that the analytical method and these conclusions are available for using solid motor with cohesive cavities.

Key words: solid missile motor; viscoelasticity; cohesive cavity; aging test; storage life

导致发动机药柱产生内聚空洞的现象很多。当发动机在浇注推进剂时, 由于推进剂内气泡未能排尽等原因导致固化后在药柱中留下空腔; 发动机药柱经过长时间的贮存以后, 随着内部未完成的化学反应的进行, 内部的各种微观缺陷(如裂纹和空隙)聚集、长大和发展, 在药柱内会形成内聚空洞; 推进剂的化学反应产生气体逸出, 在药柱内同样会产生内聚空洞。内聚空洞的存在会使药柱的应力应变在空洞处发生变化, 尤其是在发动机点火发射时, 在燃气内压和轴向过载的作用下, 可能导致内聚空洞应变集中处的应变超过允许的最大应变而开裂, 而裂纹的产生又进一步加剧了该处的应力应变集中程度, 极有可能引起裂纹扩展, 燃气还有可能窜入裂纹空腔中, 致使原裂纹失稳扩展或内弹性性能改变, 从而导致灾难性后果^[1]。由于含内聚空洞固体发动机寿命预估的复杂性, 这方面的研究工作还处于起步阶段^[2]。

1 推进剂延伸率随贮存时间的变化规律

对推进剂方坯进行老化试验, 老化温度分别为 50℃、60℃和 70℃, 测量推进剂的最大延伸率。依据

* 收稿日期: 2007-06-30

基金项目: 国防科技大学预研基金资助项目(JC06-01-01); 湖南省自然科学基金资助项目(02JJY2009)

作者简介: 李九天(1975-), 男, 博士生。

统计检验判据,剔除试验异常数据,建立推进剂最大延伸率与贮存时间的关系。

对丁羟推进剂,取最大延伸率与化学反应速率及老化时间的关系为

$$\varepsilon_m = A \exp(-Kt) \quad (1)$$

式中, ε_m 为最大延伸率, A 为常数, K 为化学反应速率, t 为时间。

建立贮存温度与化学反应速率的关系。老化过程中,假定固体推进剂中的物理化学性能变化遵循 Arrhenius 方程,即

$$K = H \cdot \exp\left[-\left(\frac{E}{R}\right) \frac{1}{T}\right] \quad (2)$$

式中, K 为温度 T 时的反应速率, E 为活化能, H 为频率因子, R 为气体常数。

确立任一贮存温度下最大延伸率与贮存时间的关系。由(1)式和(2)式可得任一贮存温度 T_s 下最大延伸率 ε_m 与贮存时间 t 的关系,即

$$\varepsilon_m = A_{T_s} \exp\left[-H \exp\left(-\frac{E}{RT_s}\right) t\right] \quad (3)$$

其中, A_{T_s} 为对应贮存温度 T_s 时的常数。

2 固体发动机三维粘弹性有限元分析

X 发动机结构在几何上具有对称性,纵向(Z 方向)共有 6 个对称剖面,将发动机均分成完全对称的 12 等份,每一份的夹角为 30° ,因此有限元建模时,只用取其中一份建立三维有限元计算模型,图 1 为 X 发动机的三维有限元计算模型局部示意图。用六面体单元对发动机药柱进行有限元划分,其中单元总数为 19 800 个,节点总数为 21 002 个。

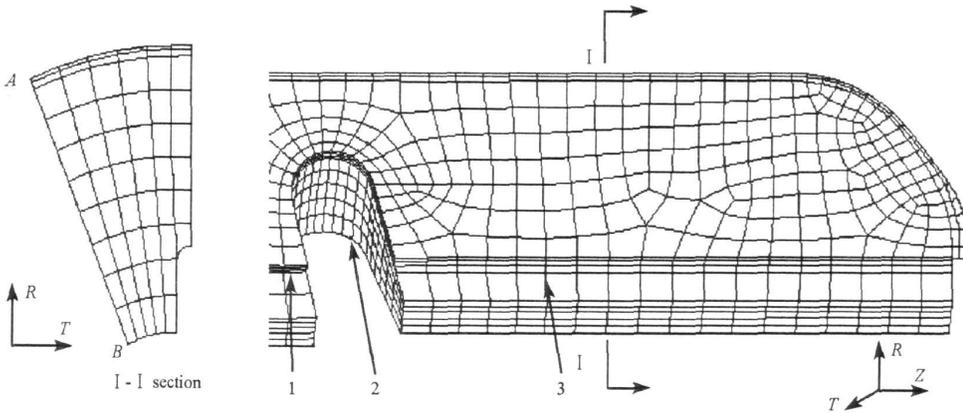


图 1 固体发动机后部三维有限元模型(1. 中部翼槽 2. 后伞盘 3. 后翼槽)

Fig. 1 The rear part of 3D finite element model of the solid motor (1. middle slot 2. rear umbrella slot 3. rear slot)

根据对称性的特点,在垂直于对称剖面上设置位移简支边界条件,壳体的后端端面上也设置位移简支条件。通过加速老化,得到一定老化时间的试件,测该试件各个时刻的松弛模量,得到松弛模量曲线,便于点火发射时的粘弹性计算。松弛模量曲线刚开始模量变化大,因为有瞬时弹性的作用,随着时间的延长,曲线变化平缓。

如某推进剂开始贮存时松弛模量的 Prony 级数为

$$E(t) = 7.05886 + 3.68169e^{-0.000331887t} + 5.98714e^{-0.000331887t} + 8.93038e^{-0.000331887t}$$

包覆层开始贮存时松弛模量的 Prony 级数为

$$E(t) = 5.65261 + 2.73683e^{-0.000331887t} + 4.75402e^{-0.000331887t} + 6.95733e^{-0.000331887t}$$

壳体 and 绝热层的弹性模量与泊松比分别为: 2.06×10^4 MPa, 0.3 和 30.0 MPa, 0.490。

发动机点火建压时间为 200ms,线性增压至最大内压 10MPa,轴向加速度为 15g。

在燃气内压和轴向过载作用下,无缺陷发动机后部应变场等值线分布如图 2 所示。

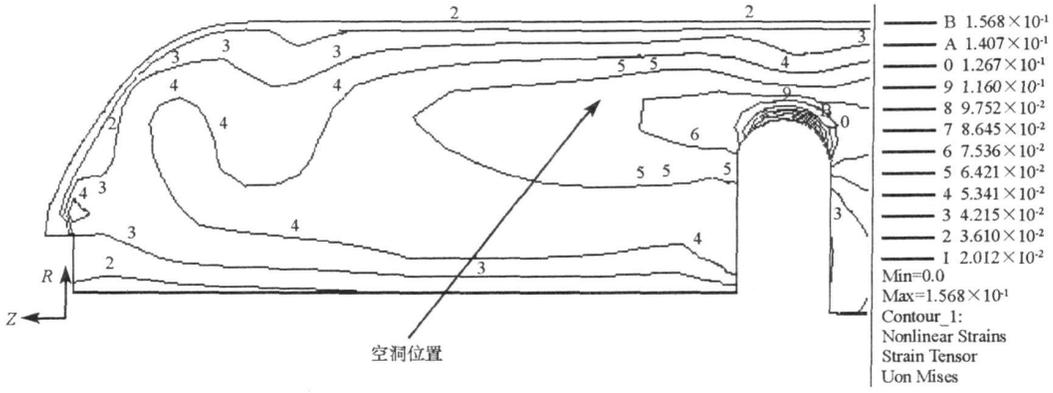


图 2 无缺陷发动机药柱后部应变分布及内聚空洞设置位置

Fig. 2 The Von Mises strain contour of the rear of the perfect motor grain and the region of presetting cohesive cavity

由无缺陷发动机药柱应变场分析结果可知, 图 1 所示 AB 一侧药柱面上的 Von Mises 应变相对较大, 于是在此侧面预设内聚空洞, 设在发动机后部中段应变相对较高且应变梯度较大处设置内聚空洞, 将空洞直径分别预设分别为 4.0mm、5.5 mm、7.5 mm、9.0 mm、10.0 mm、11.0 mm 进行计算。

根据对称性可知相当于在整个发动机上设置了六个内聚空洞, 由于内聚空洞的尺寸与发动机全局相比是一个小量, 所以根据圣维南原理, 空洞之间的应力应变不会互相影响。直径 7.5mm 的内聚空洞的三维有限元模型如图 3 所示。

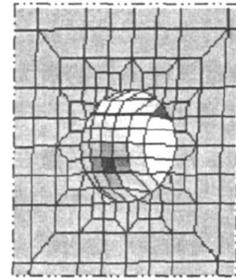


图 3 7.5mm 内聚空洞有限元模型

Fig. 3 The finite element model of presetting cohesive cavity (cavity's diameter: 7.5mm)

3 推进剂药柱 Von Mises 应变随贮存时间的变化规律

对含内聚空洞发动机药柱进行三维粘弹性分析, 计算药柱经过不同贮存期后在点火增压和轴向过载联合作用下, 危险点的最大 Von Mises 应变值。计算结果表明, 发动机全局的最大 Von Mises 应变值位于内聚空洞最凹处。图 4 所示为内聚空洞直径为 7.5mm 时常温贮存 2 年的 Von Mises 应变场等值线图,

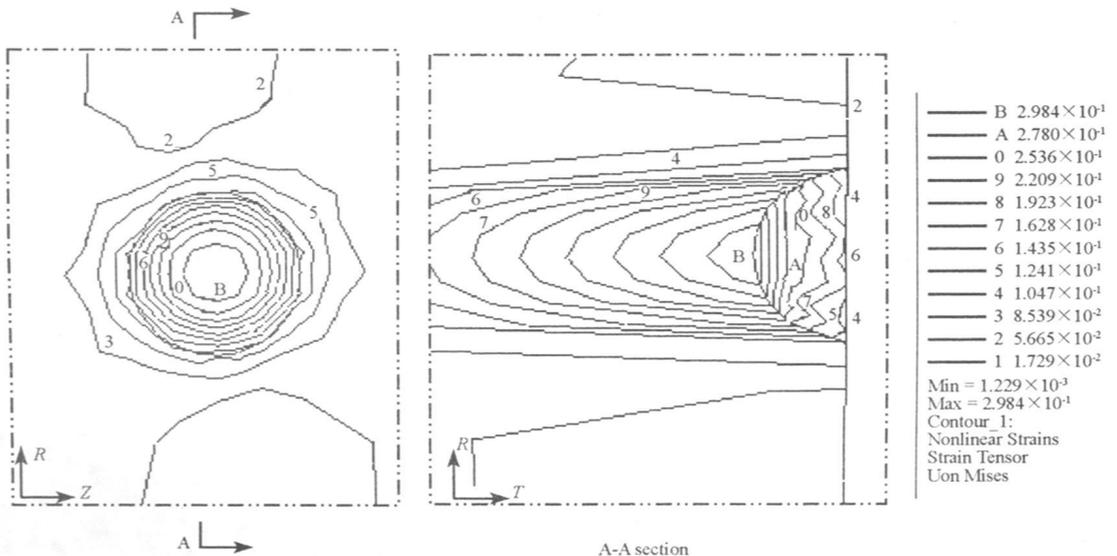


图 4 7.5mm 内聚空洞贮存 2 年后 Von Mises 应变场分布

Fig. 4 The Von Mises strain contour of the cohesive cavity stored 2 years which diameter is 7.5mm

从图中可以看出明显的应变集中。

4 固体发动机药柱的贮存寿命预估

将推进剂老化试验所得的最大延伸率与计算所得的药柱 Von Mises 应变进行比较,利用结构完整性评估准则,即可判定发动机贮存寿命是否终止^[3]。图 5 为推进剂最大延伸率与药柱 Von Mises 应变的比较图。曲面 I 是常温(20℃)贮存时推进剂最大延伸率 ε_m 随贮存时间 t 变化的曲面,曲面 II 是含不同内聚空洞的药柱危险点的最大 Von Mises 应变值 ε 随贮存时间 t 变化的曲面。在曲面 I 和曲面 II 的交线 L_e , 含内聚空洞的发动机药柱经过 t_e 年贮存后

点火发射时药柱诱发的最大 Von Mises 应变 ε 等于推进剂经过 t_e 年贮存后的最大延伸率 ε_m 。依据结构完整性评估准则,当 $\varepsilon < \varepsilon_m$ 时,药柱满足结构完整性要求,认为发动机能安全点火发射。当 $\varepsilon > \varepsilon_m$ 时,不满足结构完整性要求,空洞表面会产生裂纹,认为发动机药柱寿命终止。因此,由寿命预估图可以得出贮存多少年后、多大的内聚空洞是安全的,从而可以确定发动机药柱不同贮存期内聚空洞的临界尺寸大小。如从图 5 知,该发动机药柱贮存 6 年后,球形内聚空洞的直径大小不能超过 8.3mm;贮存 10 年后,直径不能超过 7.5mm;贮存 14 年后,直径不能超过 6.0mm。通过现有无损检测技术,得到发动机药柱的伤情程度后,由寿命预估图可以确定发动机寿命终止与否。

5 结束语

由于内聚空洞的存在,空洞内将产生很大的应力应变集中。在气泡的环向最凹处产生最大的 Von Mises 应变,当内聚空洞的直径超过允许值时,在燃气内压和轴向过载的作用下,可能导致发动机结构完整性破坏。因此,在发动机浇注时应当尽量使推进剂中气泡排尽或使不能排尽的气泡直径受人工控制。基于三维粘弹性有限元分析与老化试验相结合的方法,可以得到含内聚空洞固体发动机药柱的寿命预估图,由寿命预估图可以得到药柱不同贮存时期内聚空洞的允许值。与无损测伤技术相结合,可以确定发动机寿命终止与否。

参考文献:

- [1] Meng S Y, Tang G J, Lei Y J. Strain Field Analysis of Solid Rocket Motor Grain with Cohesive Cavity[C]//Theory and Practice of Energetic Materials, 2003 International Autumn Seminar on Propellants, 2003: 270-276.
- [2] 邢耀国,马银民,董可海,等.用长期贮存定期检测法预测药柱使用寿命[J].推进技术,1999,20(5):39-43.
- [3] 袁端才,唐国金,李海阳,等.基于加速老化与三维粘弹性有限元分析的固体导弹发动机寿命预估[J].兵工学报,2006,27(4):685-689.

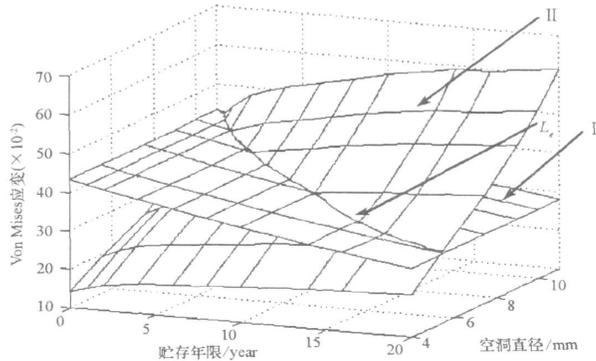


图 5 药柱 Von Mises 应变与推进剂延伸率比较图

Fig. 5 The comparison of Von Mises strain of the grain with the variation law of the extensibility of propellant