

火箭装药贮存寿命失效临界点的研究*

赵 伯 华

(北京理工大学飞行器工程系, 北京, 100081)

高 鸣

(海军驻西安长峰机电研究所军代表室, 西安, 710061)

摘 要: 目前药柱贮存寿命失效临界点一般都是假设确定的。采用药柱空穴率非接触诊断技术和热加速老化累积损伤法, 实测得 CMDB 固体推进剂的贮存寿命失效临界点, 预测了其使用寿命。

主题词: 固体推进剂, 热老化, 贮存寿命, 失效判据, 累积损伤

分类号: V512

STUDY ON CRITICAL SERVICE LIFE FOR ROCKET GRAIN

Zhao Bohua

(Dept. of Flight Vehicle Engineering, Beijing Inst. of Technology, Beijing, 100081)

Gao Ming

(Navy Representative Office in Xi'an Chang Feng Electro-Mechanical Inst. Xi'an, 710061)

Abstract: The critical service life for rocket grain was presumed at present. In this paper, with the aid of discontiguous diagnostic technology and method of accumulated damage using accelerated aging or heat air-oven the critical service life was determined and the service life for CMDB solid propellant was predicted. The results in this paper are of practical significance for service life prediction of solid rocket grain.

Subject terms: Solid propellant, Heat aging, Storage life, Failure criteria, Cumulative damage

1 引 言

药柱在长期贮存过程中或采用热加速老化时, 随着老化温度和老化时间的增加, 由于药柱中粘合剂与某些添加剂的热降解和机械降解, 以及粘合剂与氧化剂的相互作用, 化学分解、蒸发, 分子键的裂变和界面脱湿, 药柱内部会产生气体和空穴。当气体生成率大于扩散率时, 气体将进一步聚集使药柱中气压增加, 促使药柱中裂纹, 空穴进一步增加甚至扩张。当气压和空穴率浓度达到某一临界状态时, 将引起药柱中空穴率迅速增加, 最后导致药柱破坏失效。这是某些改性双基推进剂和复合推进剂重要失效模式之一。

鉴于以力学性能(强度、伸长率、模量、松弛、蠕变等)、物理化学和化学动力学参量作

* 本文 1995 年 5 月 30 日收到, 本课题为部级预研基金资助项目

为贮存失效判据时, 其失效临界点往往是人为假定的, 不够可靠, 本文采用了药柱空穴率非接触测试技术^[1]和累积损伤判据, 实测得 CMDB 推进剂在两种老化温度下的贮存寿命失效临界点, 预测到该药柱贮存使用寿命。

2 失效临界点的实验测定

2.1 测试系统与试样

采用药柱空穴率非接触诊断技术和方法, 能准确测定贮存药柱空穴率迅速变化的临界点, 即贮存寿命失效临界点。该系统主要由试样体积变形和空穴率测量器、油压源和增压系统、抽真空系统、高低温槽与温测温控系统和实时数据采集与数据处理五大部分组成, 系统框图见文献 [1, 2]。

试件为 CMDB 推进剂, 试件形状为直径 $d=30\text{ mm}$, 高 $h=30\text{ mm}$ 的圆柱体。老化温度为 $80\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $90\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 老化时间间隔前期取 10 天, 后期取 5 天。每个老化温度对应的各个老化时间点均取 3 个试样, 在老化箱中老化到确定的老化时间, 取出试样至试验前放在塑料袋中封口, 在密封容器中存放 24 小时后, 在 $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下进行测试。

2.2 失效临界点的测试

边长为 s 的立方体试样或直径为 d 高为 h 的圆柱体试样, 在载荷压强 p 作用下每边压缩量为 δ , 则体积应变 $\Delta V/V$ 可由式 (1) 或式 (2) 计算。

$$\Delta V/V = 3\delta/s - 3(\delta/s)^2 + (\delta/s)^3 \quad (1)$$

$$\Delta V/V = 2\delta/d - \delta^2/d^2 - 2\delta^2/dh + \delta/h + \delta^3/d^2h \quad (2)$$

CMDB 推进剂在老化温度为 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 对应于不同老化时间 t , 压缩系数 $\Delta V/V$ 随载荷压强 p 的实测结果如图 1 和图 2 所示。

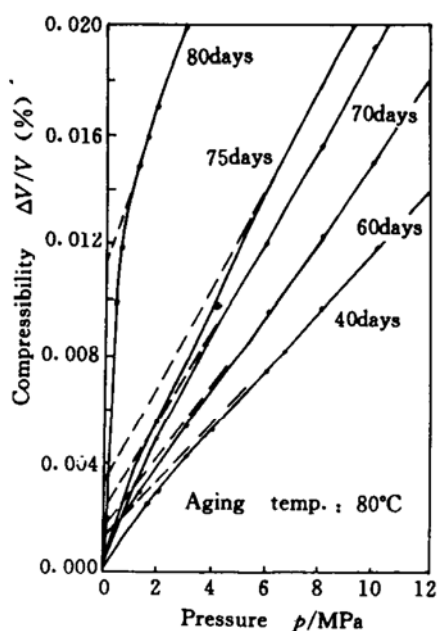


Fig. 1 A test trace of $\Delta V/V \sim p$ for CMDB propellant at ageing temperature of $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ and ageing time of 40~80 days

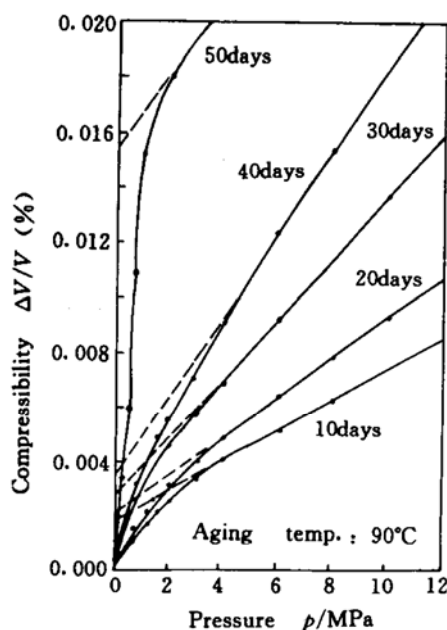


Fig. 2 A test trace of $\Delta V/V \sim p$ for CMDB propellant at ageing temperature of $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ and ageing time of 10~50 days

由实测的 $\Delta V/V \sim p$ 曲线分析可知, 在加载初期其曲线呈非线性。当试样受压体积减小时, 对压缩的阻力是增加的, 而大多数能量都用在消耗试样内部空穴的瓦解, 使表观体积减少。当试样内部空穴被压实后, $\Delta V/V \sim p$ 呈线性变化。非线性区间的大小与材料的类型和温度的高低有关。根据曲线形状可推到压强 p 为零时所对应 $\Delta V/V$ 值即为药柱的空穴率 ξ , 则得

$$\xi = \Delta V/V - p/K \quad (3)$$

$$K = -\Delta p/(\Delta V/V) \quad (4)$$

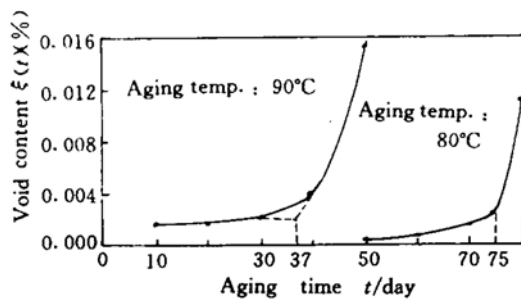


Fig. 3 A test trace of $\xi(t) \sim t$ for CMDB at aging temp. of 80°C and 90°C

根据图 1 和图 2 所示的实测结果, 可得到 CMDB 药柱空穴率 $\xi(t)$ 随老化时间 t 的变化, 如图 3 所示。在图 3 的二条 $\xi(t) \sim t$ 变化曲线中, $\xi(t)$ 迅速变化的拐点, 即二段曲线切线的交点所对应的时间 τ_1 和 τ_2 即为药柱贮存寿命失效的临界点。该 CMDB 推进剂在老化温度为 90°C 和 80°C 时, 实测得 $\tau_1 = 37 \text{ d} = 53280 \text{ min}$, $\tau_2 = 75 \text{ d} = 108000 \text{ min}$ 。

3 结果与分析

采用压力法预测贮存使用寿命, 其计算公式为

$$\tau_2/\tau_1 = C^{(T_1 - T_2)/5} \quad (5)$$

由式 (5) 得 +20°C 贮存使用寿命预测公式为

$$\tau = \tau_2 \left\{ \exp \left[\frac{\ln(\tau_2/\tau_1)}{(T_1 - T_2)/5} \right] \right\}^{(T_2 - 20)/5} \quad (6)$$

式中 τ_1 和 τ_2 分别表示老化温度为 T_1 和 T_2 时, 药柱贮存寿命失效的临界点。

由图 4 所示的实测 T_1 、 T_2 、 τ_1 和 τ_2 值代入式 (6) 得 CMDB 推进剂在 +20°C 时贮存使用寿命为 τ , 即

$$\tau = 108000 \left\{ \exp \left[\frac{\ln(108000/53280)}{(90 - 80)/5} \right] \right\}^{12} = 7490880 \text{ min} = 14.25 \text{ y}$$

采用人为假设方法确定药柱贮存使用寿命失效临界点, 由于缺乏充分的实验依据, 显然不够准确。对于不同类型的固体推进剂, 同一类型但组分比例含量多少的差异等, 均会影响贮存寿命失效临界点的变化。采用本文提出的技术和方法实测贮存寿命失效临界点与采用假设失效临界点相比, 大大提高了其准确度。实验证明, 若老化时间超过实测的临界点, 则药柱要出现裂纹, 超过时间越长其裂纹越大。

Cost T L 等人^[4]提出, 药柱中的气体聚集产生的裂纹和空穴是限制其使用寿命的主要因素, 临界气体浓度约为 $4.0 \pm 3 \times 10^{-6} \text{ g H}_2/\text{ml}$ 推进剂, 而气体释放速率超过 $0.02 \text{ ml H}_2/\text{ml}$ 推进剂/y 时, 不可能获得满意的贮存寿命。根据断裂力学还可求得引起药柱中球形裂纹扩张, 导致药柱破坏失效的临界压力 p_{cr} 的计算公式^[3]:

$$p_{cr} = \sigma_m(1 + \epsilon_m) \left[\frac{1 + \alpha}{\alpha} \right] \quad (7)$$

式中 $d = 1 + \Delta V/V$, $\Delta V/V = \epsilon_m \varphi [\ln(E/F)/(1 + \ln(E/F))]$, σ_m 为最大拉伸应力, ϵ_m 为对应于 σ_m 时的应变, φ 为固体所占的容积分数, E 为初始正切模量, $F = \sigma_m/\epsilon_m$ 。

由 $\Delta V/V \sim p$ 的实测曲线还可求得体积模量 $K(t)$ 和体积柔量 $B(t)$ 随老化时间 t 变化的硬化或软化特性曲线。若选 5 个老化温度点还可根据贮存寿命主曲线, 求得贮存寿命临界点及其贮存使用寿命。

参 考 文 献

- 1 赵伯华, 沈月萍. 火箭装药体积形变力学特性的研究. 推进技术, 1994 (2)
- 2 高鸣, 赵伯华. 固体推进剂体积模量主曲线试验研究. 推进技术, 1995 (2)
- 3 Beckwith S W. Bulk modulus technique for determining void content change due to solid propellant gas evolution. AIAA 19th Joint Propulsion Conference, 1989
- 4 Cost T, et al. Service life analysis of rocket motors with internal gas generation. AIAA 87-1546

(上接第 42 页)

实践应用表明, 该离散程序能快速准确地对由多种材料构成的轴对称结构自动离散; 对动边界和结构间隙进行有效处理, 可用于轴对称结构和平面结构的有限元自动离散。

参 考 文 献

- 1 姜晋庆, 张铎. 结构弹塑性有限元分析法. 北京: 宇航出版社, 1990
- 2 Structural Dynamics Research Corporation. I-DEAS finite element modeling user's guide. 1990

快 讯

在总结“八五”期间国防科技情报工作的基础上, 经航天工业总公司推荐及有关部门评选, 本刊于 1996 年 5 月被国防科学技术工业委员会授予“优秀国防科技期刊”。这是本刊于 1991 年获首届优秀国防科技期刊评比一等奖后, 再次荣获的最高国防科技期刊奖励。