

温度载荷下带筋套管形装药结构完整性分析*

于 洋, 王宁飞, 张 平

(北京理工大学 机电工程学院, 北京 100081)

摘 要: 为了分析带筋套管形装药在低温多次出现点火爆炸的原因, 基于 Updated Lagrangian 方法, 推导了热粘弹性大变形增量本构关系。在分析瞬态温度场的基础上, 进一步给出了热应力应变分布, 指出了危险点位置。通过选取十二种热膨胀系数以及十四种肉厚系数, 对推进剂药柱进行了结构完整性计算, 得出热膨胀系数与最大等效应力应变成线性关系, 而肉厚系数与最大等效应力应变之间成指数函数关系的结论。结果说明: 肉厚系数的选择对固体火箭发动机装药保持结构完整性有重要影响。

关键词: 固体推进剂火箭发动机; 结构完整性; 热粘弹性; 热膨胀系数⁺; 肉厚系数⁺

中图分类号: V435.21 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2006) 06-0492-05

Structural integrity analysis for the canular solid propellant grains subjected to temperature loading

YU Yang, WANG Ning-fei, ZHANG Ping

(School of Electromechanical Engineering Beijing Inst. of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract For test-firing failure evaluation of the canular solid propellant grains under low temperature surrounding, the thermoviscoelastic large deformation incremental constitutive equation was derived based on Updated Lagrangian method. In order to investigate the transient temperature field and the distribution of thermal stress and strain, a step-by-step finite element model accompanied by concepts of time-temperature shift principle and thermologically simple material assumption was used. In addition, the dangerous location was obtained from the simulation. Twelve different thermal expansion coefficients and fourteen thickness coefficients were assumed to evaluate the effects on the structural integrity. The results show that thermal expansion coefficient has a linear relation to the maximum equivalent stress and strain response, whereas thickness coefficient has an exponential relation to them, which show that thickness coefficient plays an important role in structural integrity of solid propellant grains.

Key words Solid propellant rocket engine; Structural integrity; Thermoviscoelasticity; Thermal expansion coefficient⁺; Thickness coefficient⁺

1 引 言

为提高现代武器的作战效能, 要求固体火箭发动机在短时间内产生很大推力, 而当推进剂燃速调节有困难时, 选择增大燃烧面积是重要的手段之一。近几年来, 人们在探索用套管形结构来提高燃烧面积的方法, 为了改善中间套管的支撑特性, 在内外管中间采用连接筋连接, 这种装药结构形式可以大幅度增加固

体火箭发动机单位时间燃气生成率, 但该类装药在低温时多次发生热试车点火爆炸事故, 分析认为是由于结构复杂使降温过程中出现结构完整性发生破坏的问题。因此, 需要建立有效的分析方法对此加以研究。

目前国内外普遍采用的研究方法是应用小变形线性热粘弹本构关系研究固体火箭发动机药柱的热应力分布^[1-4], 成果多在于研究温度循环载荷作用下, 药柱变形情况以及药柱结构变化对应力应变集中

* 收稿日期: 2005-10-23 修订日期: 2006-07-17。

基金项目: 国防基础科研项目 (K1305060614)。

作者简介: 于 洋 (1978—), 女, 博士生, 研究领域为固体火箭发动机装药结构完整性。

Email: ylingly2002@bit.edu.cn

作用的影响。但对于热膨胀系数和肉厚系数对结构完整性的影响,则少见报道。本文基于 Updated Lagrangian 法建立了针对带筋套管形装药的大变形有限元分析方法,研究其在降温条件下的温度场及应力应变分布规律,得到了危险点与热膨胀系数、肉厚系数之间的关系。

2 计算模型及其数值方法

2.1 热粘弹性本构关系

热粘弹性温度应力求解问题的主要困难在于力学响应和热响应相互耦合,工程上常简化处理进行解耦,忽略应力应变场对温度场的影响来确定温度场,再根据已知的温度场求解力学响应。

假设固体火箭发动机药柱为各向同性,且为热流变简单材料,不考虑物理非线性,则积分型热粘弹本构关系,可以写成^[5]

$$S_{ij}(t) = \int_0^t (t - \tau) D \frac{\partial}{\partial \tau} [\epsilon_{ij}(\tau) - 3\alpha_0(T(\tau))] d\tau \quad (1)$$

式中, S_{ij} , ϵ_{ij} 分别为 Kirchhoff 应力张量和 Green 应变张量, $E(t)$ 为松弛模量, α_0 为材料的热膨胀系数, 矩阵 D 为粘弹性刚度矩阵。

2.2 基于 Updated Lagrangian 方法的大变形粘弹性有限元方程

以 t 时刻构形为参考构形,推导出 $t + \Delta t$ 时刻增量虚功方程

$$\int_V \{\epsilon\}^T D \{\epsilon\} dv + \int_V \{\eta\}^T \{\sigma\} dv = W^{t+\Delta t} + \int_V \{\epsilon\}^T \{\Delta S\} dv - \int_V \{\epsilon\}^T \{\sigma\} dv \quad (2)$$

式中, $\{\epsilon\}$ 和 $\{\eta\}$ 分别为 t 时刻线性增量应变向量和现时非线性增量应变向量, W 为外力虚功。

由 (2) 式得到有限元刚度方程

$$([K_L]_t + [K_{NL}]_t)(U) = \{P\}_{t+\Delta t} - \{F\}_t + \{\Delta F\}_t \quad (3)$$

式中, $\{U\}$ 为单元节点位移增量, $[K_L]_t$, $[K_{NL}]_t$ 分别为 t 时刻的线性和非线性应变增量刚度矩阵, $\{P\}_{t+\Delta t}$ 为 $t + \Delta t$ 时刻的等效节点外载荷, $\{F\}_t$, $\{\Delta F\}_t$ 分别为 t 时刻真实应力 $\{\sigma\}$ 和松弛应力增量 $\{\Delta S\}$ 产生的等效节点力。

2.3 药柱破坏的经验准则

低温下推进剂材料的应变能力最低,而同时药柱内孔表面存在较高的应变。大量试验研究表明,推进剂内孔变形是最主要的失效模式。对于复合推进剂来讲,当

单向拉伸应变值达到推进剂材料的最大应变能力 $[\epsilon]$ 时,氧化剂和粘结剂之间开始发生“脱湿”,最终发展为裂纹,当裂纹进一步扩展即导致推进剂药柱的断裂。

因此,一般采用最大应变理论作为药柱破坏的经验准则^[6]。但对于三向应力状态,应用最大变形能理论更为合理,此时,应力和应变用等效 Von Mises 应力和 Von Mises 应变表示

$$\sigma_{eq} = (\sqrt{2}/2) \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (4)$$

$$\epsilon_{eq} = (\sqrt{2}/2) \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2} \quad (5)$$

根据最大变形能理论,药柱内表面不发生裂纹的条件为

$$\epsilon_{eq} = [\epsilon] \quad (6)$$

一般情况下,对于复合推进剂低温许用应变通常低于 30%。

3 物理模型和性能参数

贴壁浇铸的带筋套管形装药,在降温过程中的应力应变分析,属于三维问题,但是为了确定药柱出现的危险位置,本文对原有问题进行适当简化,按照广义平面应变问题处理。假设: (1) 壳体厚度无变化,认为壳体均匀; (2) 绝热层视为弹性体; (3) 药柱内孔中的空气传热按纯导热处理,不考虑对流的影响。

由于药柱结构对称,取四分之一建立有限元模型,采用广义平面应变单元进行离散。药柱半径 R 取为 7.5 mm, 中心孔半径 r 取为 7.5 mm, 侧孔半径 r_1 取为 $r + 2e$, r_2 取为 $R - e$, 药柱肉厚 e 取为 18 mm。绝热层和壳体厚 δ 均取为 1 mm。因为在药柱内孔边缘为高应变区,为提高计算精度,对网格进行了加密处理,其几何外形及网格如图 1 所示。

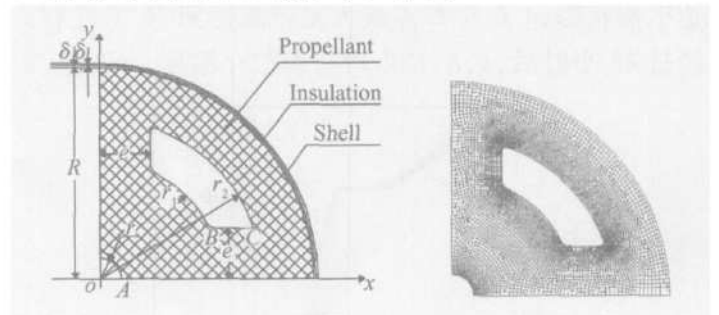


Fig 1 Geometrical structure and finite element mesh

3.1 温度变化历程

充分固化后温度保持在 50 °C, 然后经 15 小时线

性缓慢冷却到常温 20 ℃ (降温速率为 - 2 ℃ /h), 保温 9 小时, 再经 4 小时从 20 ℃ 线性降低到 - 60 ℃ (降温速率为 - 20 ℃ /h), 再保温 20 小时。

3 2 性能参数

壳体采用 30C M nS A 合金钢, 药柱为 HTPB 复合推进剂, 其零应力温度为 58 ℃, 松弛模量^[7]为

$$E(T, t) = E_e + \sum_{i=1}^n E_i \exp[-(t)/\tau_i] \quad (7)$$

式中平衡模量 $E_e = 7.8203 \text{ MPa}$ $\tau_i = 10^{i-3}$ ($i = 1 \sim 8$ s), 见表 1。药柱时间-温度等效因子

$$\log a_T(T) = \frac{-20.09(T-20)}{403.61+(T-20)} \quad (8)$$

材料其它性能参数, 见表 2。

Table 1 Parameters of prony progression

i/s	1	2	3	4	5	6	7	8
E_i/MPa	1.409	3.3895	-0.151	1.8233	-0.8319	1.0695	-0.5291	0.694

Table 2 Parameters of materials

	Propellant grains	Insulation	Case
Thermal conductivity/(W/(m·K))	0.59	0.29	27.63
Specific heat/(J/(kg·K))	1256.1	2261	512.91
Density/(kg/m ³)	1750	1280	7850
Thermal expansion coefficient ($\times 10^{-4}$)/(1/K)	1.714	1.714	0.11
Poisson's ratio	0.49	0.49	0.29
Relaxation modulus/MPa	-	24.178	1.9614×10^5

3 3 边界条件

认为内孔表面为自由面, 在药柱的对称面上施加相应的对称约束, 法向位移为零, 并在整个冷却分析过程中, 发动机仅外壁散热, 其余为绝热。

4 计算结果及分析

4 1 降温过程药柱温度场分布

图 2 给出了降温过程中, 孔尖 A、B、C 三点的温度随时间变化曲线, 推进剂药柱在整个固化冷却过程中存在明显的温度滞后, A 点温度慢于 B 点, C 点到达平衡状态, A 点与 C 点最大温差能达到 26 ℃ 左右。经过 48 小时后, A、B、C 点均达到贮存温度 - 60 ℃。

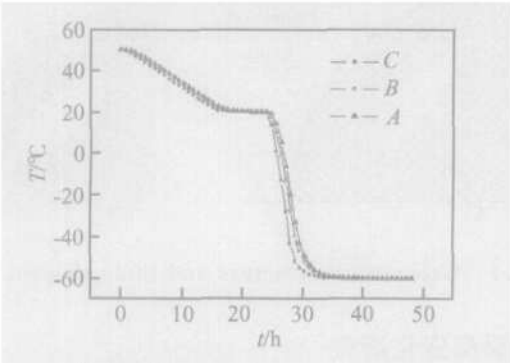


Fig 2 Temperature contour

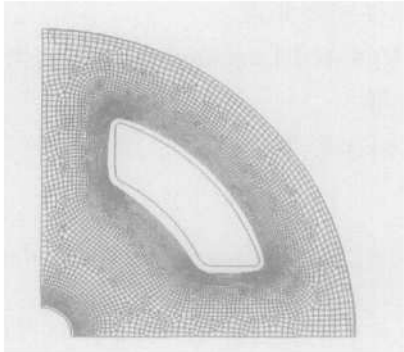


Fig 3 Deformed shape after cooling down period

4 2 降温过程药柱的热应力及热应变的分布

图 3 是 - 60 ℃ 保温 20 小时后固体发动机药柱的变形图, 从图中可以看出, 中心孔与侧孔都出现了一定程度的变形, 中心孔与侧孔的半径均增大。图 4 给出了等效 Von Mises 应变、应力分布图, 药柱内等效 Von Mises 应变、Von Mises 应力最大值出现在 C 点, 分别是, $\epsilon_{eq\ max} = 27.95\%$, $\sigma_{eq\ max} = 0.2964 \text{ MPa}$ 通过判断该点处的主应力, 能够判断 C 点处于三向受拉状态。图中还可看出 B 点、C 点的 Von Mises 应力、应变值均大于 A 点, 但是由于 C 点处的倒角比 B 点小, 更易造成应力、应变集中, 因此, 相对于 A 点、B 点, C 点在低温贮存过程中更容易开裂。此外, 药柱

与绝热层,绝热层与壳体之间交界面上也存在着较大 Von Mises 应力,分别为 0.4887 MPa 和 7.593 MPa。

由于复合推进剂在低温环境下一般具有良好的机械强度,但延伸率相对较低,因而更加关心固体火箭发动机药柱长时间贮存时的应变值。图 5(a)显示出药柱侧孔孔尖 A、B、C 三点等效 Von Mises 应变随时间的变化情况,随着温度降低,三点应变值逐渐增加。在常温保持 9 小时、低温 -60℃ 贮存 20 小时的过程中,由于温度场趋于稳定,应变值基本不发生变化,因此可以认为当温度达到最低时,药柱内的应变值达到最大。

图 5(b)中给出了药柱孔尖 A、B、C 三点的温度-等效 Von Mises 应力曲线。随着温度的降低,推进

剂药柱的等效 Von Mises 应力逐渐增大,由开始的 0.025 MPa 左右分别增加到 0.103、0.228、0.296 MPa。说明当温度降低到最低时,药柱内的应力也达到最大值。

4.3 热膨胀系数对装药结构完整性的影响

分别选取了从 0.65×10^{-4} 到 1.75×10^{-4} 之间的 12 个热膨胀系数(每次递增 0.1×10^{-4})对图 1 结构进行计算。通过计算得知,药柱内的最大应力、应变位置保持不变,仍位于 C 点。为了分析最大应力、应变特性,只计算 -60℃ 贮存时,推进剂药柱在不同热膨胀系数时的最大等效 Von Mises 应力、应变分布,计算结果如图 6(a)所示。

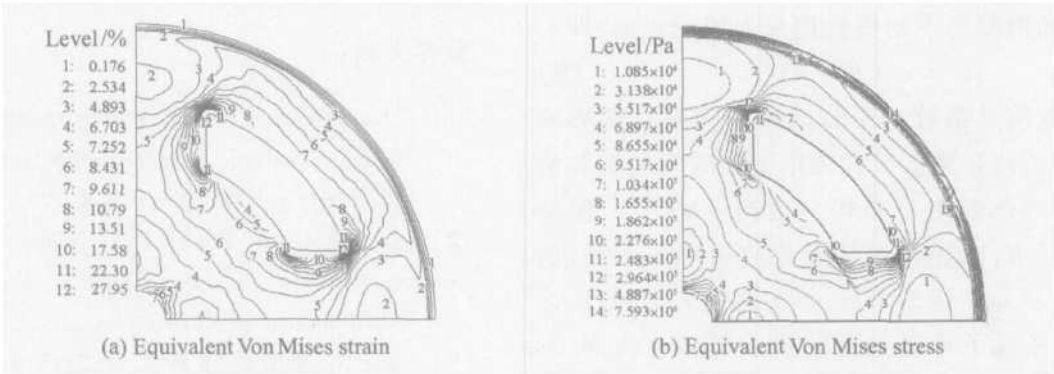


Fig 4 Equivalent Von Mises strain and stress contours

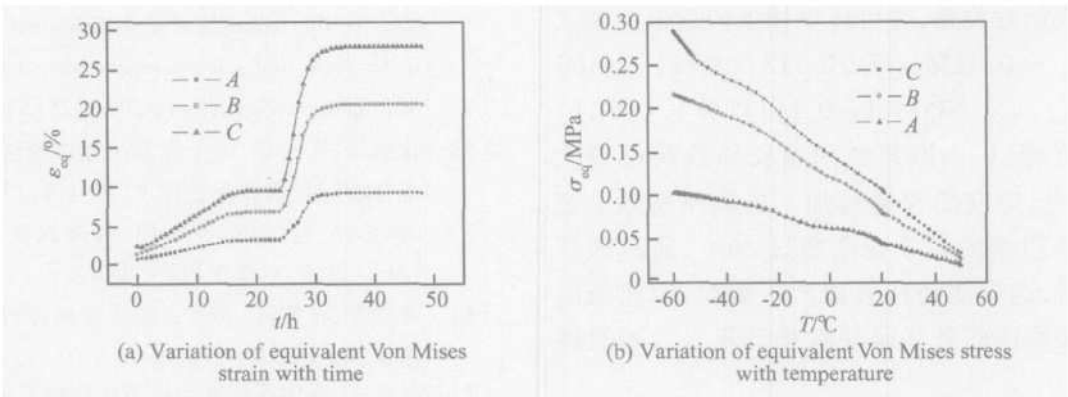


Fig 5 Equivalent Von Mises strain and stress curves for point A, B, C

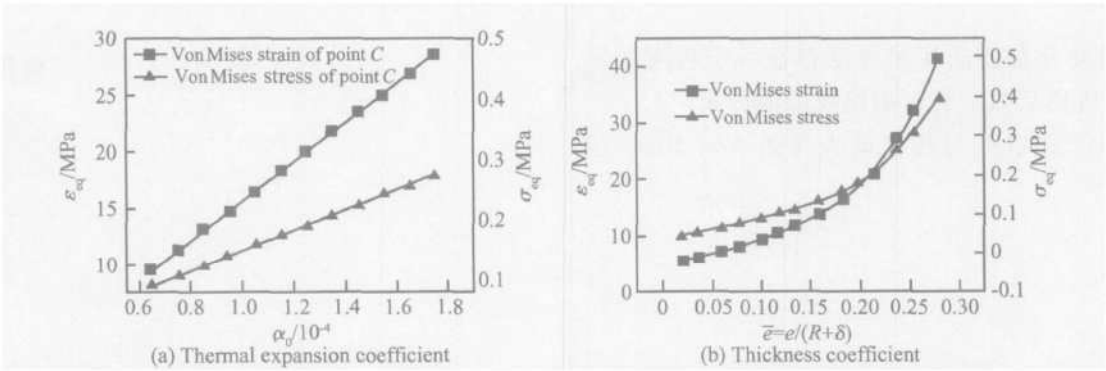


Fig 6 Effect of coefficients on equivalent Von Mises strain and stress

由以上的结果可以看出,随着热膨胀系数的增加,药柱的最大等效 Von Mises 应力、应变增长的幅度相同,因此可以认为药柱最大 Von Mises 应力、应变与热膨胀系数之间基本成线性递增关系。

4.4 肉厚系数对装药结构完整性的影响

如果药柱降温过程比较缓慢(降温速率很小),并且降温前后均能保证药柱内部温度沿整个药柱截面是均一分布,对于相同的药型,仅等比例放大或缩小药型尺寸,对于发动机装药内部热应力、应变值及其分布并不会产生影响^[6],因此可以判断,推进剂药柱内热应力、应变与药柱肉厚的绝对值无关,而与肉厚的相对值有关。

对于固体火箭发动机装药,肉厚系数 $\bar{e}$ 定义为推进剂药柱的肉厚与发动机燃烧室内径的比值,即

$$\bar{e} = e/(R + \delta) \quad (9)$$

为了研究肉厚系数对于装药结构完整性的影响特点,只考虑药柱在最低贮存温度下长时间放置的情况,认为药柱内部温度分布均匀达到 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。保持参数药柱外径 R , 内径 r , 壳体及绝热层厚 δ 不变,选取肉厚 e 从 1.5 mm 到 21 mm (每次递增 1.5 mm), 计算 14 种肉厚条件下推进剂药柱最大等效 Von Mises 应力、应变的值。将计算结果绘成曲线如图 6(b) 所示,经曲线拟合,最大等效 Von Mises 应力、应变与肉厚系数成指数函数关系,并可建立如下的近似关系式

$$\sigma_{\text{eq max}} = 0.0328 \exp(\bar{e}/0.113) \text{ (MPa)} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{\text{eq max}} = 3.675 \exp(\bar{e}/0.117) \text{ (%) } \quad (11)$$

图中还可看出,肉厚系数的增长导致药柱最大 Von Mises 应力、应变的快速增加。当肉厚系数 $\bar{e}$ 超过 0.25 时,该药型的等效应变超过 30%,通过破坏准则能够判断,这将使药柱表面产生裂纹,因此低温下装药结构完整性的破坏是导致热试车失败的直接原因。

5 结 论

(1) 温度分布随药柱的厚度存在一定程度的滞后,这种温度滞后效应将影响热应力的分布。

(2) 热膨胀系数与药柱最大等效 Von Mises 应

力、应变之间成线性增长关系。适当降低热膨胀系数,将有利于固体火箭发动机装药在温度载荷作用下的结构完整性。

(3) 对于相同药型,如果保证药柱降温过程非常缓慢并且降温前后内部温度分布均一,则等比例放大或缩小并不改变其内部热应力、应变值及其分布,即药柱内部热应力、应变与药柱肉厚的绝对值无关,与药柱肉厚的相对值有关。

(4) 最大等效 Von Mises 应力、应变与肉厚系数成指数函数的关系。随着肉厚系数的增加,应力、应变将快速增长,当药柱肉厚系数超过一定数值后,温度载荷会导致固体火箭发动机装药结构完整性的破坏。

参考文献:

- [1] Shiang-Woei Chyuan A study of loading history effect for thermoviscoelastic solid propellant grains [J]. *Journal of Computers and Structures* 2000 77.
- [2] Copetti M IM, French D A. Numerical solution of a thermoviscoelastic contact problem by a penalty method [J]. *SIAM Journal on Numerical Analysis* 2003 41(4).
- [3] 蒙上阳,唐国金,雷勇军. 低温环境下固体火箭发动机药柱伞盘结构设计 [J]. 推进技术, 2004 25 (5). (MENG Shang-yang TANG Guo-jin LEI Yong-jun Design for the umbrella slot configuration of the solid rocket motor grain under low temperature condition [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2004 25(5).)
- [4] 徐新琦,于胜春. 固化降温过程中推进剂药柱的瞬态响应分析 [J]. 固体火箭技术, 2004 3(27).
- [5] 李亚智,赵美英,万小朋. 有限元法基础与程序设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2004
- [6] 董师颜,张兆良. 固体火箭发动机原理 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996
- [7] 强洪夫. 固体火箭发动机药柱结构完整性数字仿真与实验研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 1999

(编辑: 张雅凤)