

微型固体脉冲推力器结构 强度有限元分析^{*}

吴祥法 张 平

(北京理工大学机电工程学院, 北京, 100081)

摘 要: 对用于飞行姿态控制和弹道修正的微型固体脉冲推力器的结构强度进行了动静态有限元分析, 考虑了脉冲推力器的结构设计特点和加工工艺, 模拟其台架静压试验和实际工作的载荷历程。数值分析结果表明, 当静态台架试验内压采用动压峰值时, 计算所得的结构应力、变形及其分布与模拟推力器实际工作过程的动态峰值应力、变形及分布具有较好的比拟性; 燃烧室壳壁沿平行其轴线方向的破裂以及燃烧室与点火器壳体螺纹连接处退刀槽根部的开裂是推力器结构强度的主要破坏形式。计算预示与台架试验出现的相符。

主题词: 脉动式火箭发动机, 微型装药火箭发动机, 有限元法, 结构强度

分类号: V435.13

FINITE ELEMENT ANALYSIS ON STRUCTURE STRENGTH OF A SOLID IMPULSIVE MICROTHRUSTER

Wu Xiangfa Zhang Ping

(School of Electro-Mechanical Engineering, Beijing Inst. of Technology, Beijing, 100081)

Abstract: A static and dynamic finite element analysis (FEA) on a solid impulsive microthruster with the flight attitude control was presented. The design characteristics and technological effect were considered during the numerical simulation of both the static deformation on test bed and real dynamic loading of the microthruster. Numerical results show that there exists a very similar comparison of the stress and deformation distribution between dynamic and static loading, where the static internal pressure in the combustion chamber is equal to the peak one of the dynamic load; and the major broken behaviors which parallel to the axis of the combustion chamber may appear at the roots of the technological grooves near the screw connetion between its chamber and igniter or and nozzle. The broken behaviors predicted by FEA agree with that observed in tests.

Subject terms: Impulse rocket engine, Micrograin rocket engine, Finite element method, Structural strength

1 引 言

微型固体脉冲推力器是带旋高速飞行器飞行姿态控制和弹道修正的一种执行装置。可分为点火具式和发动机式两种^[1,2]。发动机式脉冲推力器具有固体发动机的全部主要性能, 其尺寸微小、响应快、工作时间短、推力冲量比大, 是一种具有明显瞬态特性的特种固体发动机^[2]。

* 收稿日期: 1998-11-07, 修回日期: 1999-02-25, 本课题系 “九五” 国家重点科研项目

脉冲推力器燃烧室壳体组件的结构安全性是设计和使用所必需考虑的一个重要前提。它的正常工作过程是一个包括固体推进剂燃烧过程在内的热化学、气动、粘弹性和热力学等耦合的复杂过程。本文主要以脉冲推力器燃烧室壳体组件的结构强度分析为主,采用有限元法(FEA)对燃烧室壳体组件在静态和动态台架试验两种工况下的变形和应力分布进行分析,对其结构安全性(可能的结构强度危险点和破坏形式)以及动静态试验的比拟性作出初步的评价。

2 有限元计算模型

未装药的发动机式脉冲推力器由点火器壳体、燃烧室壳体和喷管组成,结构简图见图1。有限元分析模拟脉冲推力器燃烧室壳体组件在台架静、动态试验中的变形和应力分布情况。计算程序采用ADINA。有限元分析时利用结构和静、动载荷的轴对

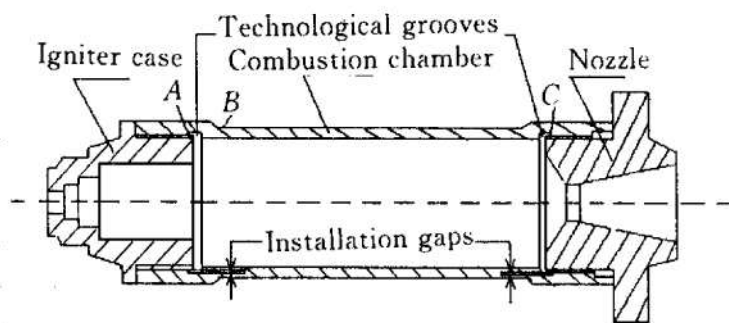


Fig. 1 Schematic diagram of microthruster

称性,采用的轴对称单元,以任意过其对称轴线的一个剖面为分析对象。由于制造工艺的需要,在燃烧室壳体两端螺纹根部分别设计有1.3 mm宽的环向退刀槽(如图1所示),从而使燃烧室的壳壁厚度局部减小,装配时在燃烧室两端的环向退刀槽与点火器壳体和喷管之间含有0.1 mm的装配间隙。环向退刀槽和装配间隙在台架试验时推进剂燃气的进入而可能成为强度危险点,有限元网格划分时考虑了这一局部因素(见图2a)。为了提高退刀槽处的结构安全性,也设计和加工了无退刀槽的连接螺纹,有限元分析时将此也作为一种结构工况以便进行比较,其结构网格划分如图2b。推力器结构材料按设计要求为超硬铝LC4,其材料特性为:质量密度 $\rho = 2\,690\text{ kg/m}^3$,杨氏模量 $E = 6.9 \times 10^4\text{ MPa}$,泊松比 $\nu = 0.33$,强度极限 $\sigma_b = 510\text{ MPa}$ 。

静态分析时的计算内压为103.74 MPa,由台架动态试验记录的动态推力峰值推算而得。动态分析时,不计材料的阻尼影响,其时间积分采用具有稳定性的隐式直接积分法(Newmark法)^[3]。台架动态试验实测的推力如图3所示,动压在脉冲推力器点火后0.15 ms达到峰值。为了精确地模拟这一脉冲过程,时间积分时采用的积分步长为0.005 ms,分析时考虑到动压峰值的出现位置取时间积分区域为点火后0 ms~0.20 ms,取40个时间积分步。边界约束按台架试验的夹持方式在点火器壳体外侧部分节点沿周向对称固结。

数值计算的其他原始数据有:燃烧室螺纹段外径11 mm,圆筒段外径10.6 mm,退刀槽出壁厚0.4 mm,圆筒段壁厚0.76 mm,燃烧室壳体长度31.5 mm。

3 计算结果分析

(1) 按图2的两种结构网格进行有限元分析,数值结果表明脉冲推力器在静压作用下燃烧室两端退刀槽处产生了较大的变形,放大后如图4所示。燃烧室壳壁沿环向的拉应力分量沿轴线方向的分布规律如图5所示,由图5可知,环向退刀槽使燃烧室两端退刀槽根部的环向拉应力偏大。在过轴线的剖面内燃烧室两端螺纹连接处的退刀槽根部(图1,位置A、B)出现了较大的应力集中(见表1),此处是强度危险点。忽略环向退刀槽(图2b)数值分析表明在与点火器壳体连接处的燃烧室壳体肩部(图1,位置B)是强度危险点。

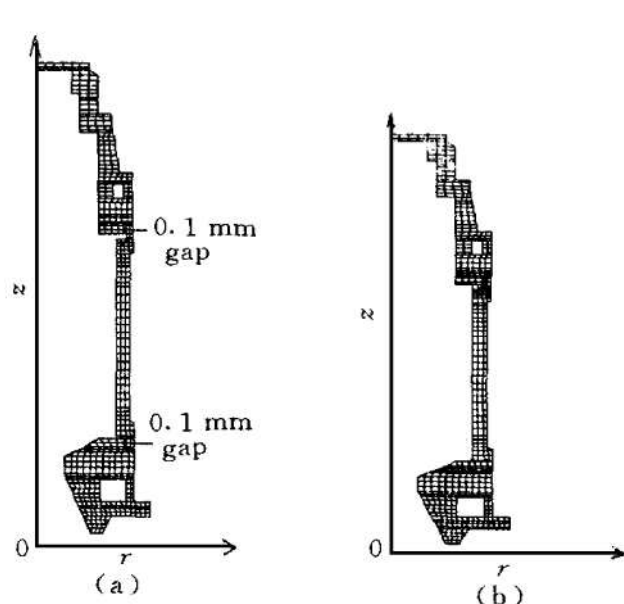


Fig. 2 FEA mesh

- (a) Technological grooves included
(b) Technological grooves ignored

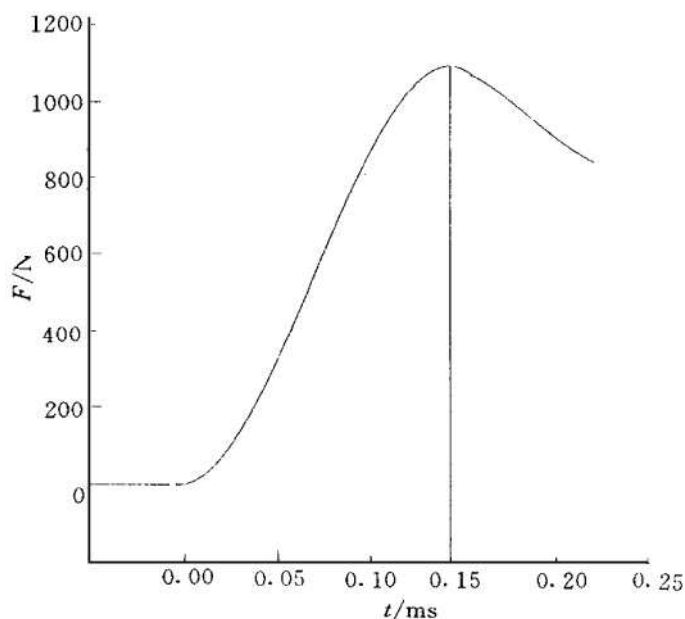


Fig. 3 Typical curve $F-t$ measurement

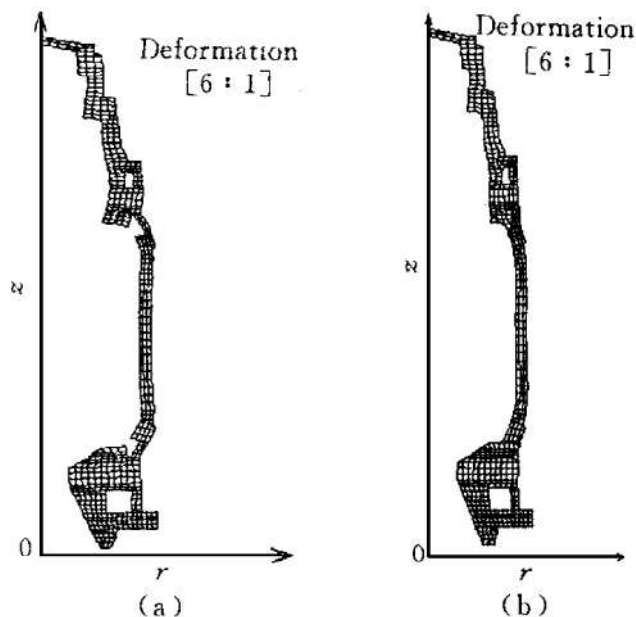


Fig. 4 FEA mesh after deformation

- (a) Technological grooves included
(b) Technological grooves ignored

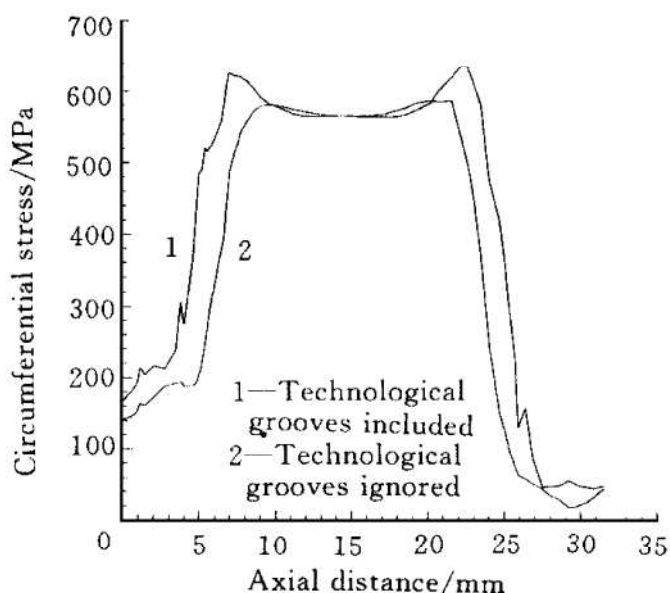


Fig. 5 Distribution of circumferential stress component in case shell versus axial distance

(2) 两种结构网格 (考虑和忽略退刀槽) 进行动态有限元分析的数值结果表明, 脉冲推力器在动压峰值位置 (点火后 0.15 ms) 出现了峰值变形和应力, 其变形、应力分量以及分布规律与采用动压峰值作静态分析得到的结果十分接近 (最大动应力不大于该处静应力 2.5%), 这是动压峰值具有脉冲形式的缘故。说明静态台架试验具有较好的动态比拟效果。

(3) 固体脉冲推力器静态分析的危险点主应力值, 如表 1 所示。有限元分析发现在连接螺纹处的燃烧室环向退刀槽的根部出现了最大的环向拉应力, 这表明在静动压作用下此处可能出现平行于燃烧室壳体轴线方向的开裂; 在假定螺纹连接是固定的情况下, 在过轴线的剖面内退刀槽根部 (图 1, 位置 A, C) 出现的最大拉应力其方向约与退刀槽根的角平分线垂直, 该应力将引起螺纹连接件之间分离或开裂; 因退刀槽存在而出现的 0.1 mm 的装配间隙可以近

似认为是 I 型裂纹, 因此在过轴线剖面内退刀槽根部位置的计算应力必然偏大。当忽略燃烧室两端环向退刀槽影响时, 计算结果表明在与点火器壳体连接一端的燃烧室的肩部 (图1, 位置 B) 出现了最大的环向拉应力其对应的燃烧室破坏形式为燃烧室壁的沿轴线方向开裂。

(4) 按两种结构网格图进行有限元分析得到的燃烧室壳体组件的危险点位置以及相应的结构破坏形式与台架试验得到的固体脉冲推力器的破坏形式相符。

但从表1的数据可以看出, 计算得到的最大应力值均已超过超硬铝 LC4 的强度极限, 而试验结果仅有部分推力器结构发生破坏。其原因可能是: (a) 实测瞬态推力峰值为伪峰值 (由传感器瞬态响应超调引起); (b) 动压力峰值的推导误差。

Table 1 Static principal stresses at dangerous points of combustion chamber

Dangerous points	Principal stress along circumference/ MPa	Principal stresses in vertical section including the chamber axis/ MPa	
Fig. 1, point A (Technological grooves included)	741.1 (σ_2)	1 349.1 (σ_1)	485.4 (σ_3)
Fig. 1, point C (Technological grooves included)	513.9 (σ_2)	1 119.0 (σ_1)	355.4 (σ_3)
Fig. 1, point B (Technological grooves included)	684.5 (σ_1)	333.6 (σ_2)	- 30.0 (σ_3)
Fig. 1, point B (Technological grooves ignored)	655.6 (σ_1)	158.9 (σ_2)	- 69.4 (σ_3)

* Assume screw connetions fixed during FEA

4 结 论

(1) 燃烧室端部连接螺纹处有退刀槽时, 该处 (图1, A 点) 出现了最大的环向拉应力和过轴线剖面内的最大应力, 沿该处平行于壳体轴线方向的开裂以及退刀槽根部螺纹连接处沿根角平分线方向的开裂是结构的主要破坏形式; 无退刀槽时, 在燃烧室壳体的肩部 (图1, B 点) 出现最大的环向拉应力, 沿壳体轴线方向的开裂是其主要破坏形式。

(2) 两种结构网格的静态和动态有限元分析表明, 两者所获得的结构应力和变形具有较好的比拟性, 最大动应力不大于最大静应力2.5%。

(3) 用有限元分析获得的推力器结构强度危险点位置以及相应的破坏形式与实际试验得到的结果相符。

参 考 文 献

- 1 Zhang P, Sun X. Preliminary analysis of internal ballistic performances of an igniter type impulsive control motor. AIAA 94-3332
- 2 张 平, 周生国, 张训文, 等. 微型固体脉冲推力器内弹道性能的实验研究. 推进技术, 1997, 18 (2): 35~38
- 3 Bathe K J. ADINA/ADINAT 使用手册——自动动态增量非线性分析有限元程序. 赵兴华, 徐福嫡, 梁醒培译. 北京: 机械工业出版社, 1986.