

文章编号: 1001- 2486(2010) 06- 0107- 04

# 固体发动机药柱正交各向异性材料参数灵敏度分析\*

雷勇军<sup>1</sup>, 袁端才<sup>2</sup>, 蔺文峰<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073;

2. 国防科技大学 指挥军官基础教育学院, 湖南 长沙 410072)

**摘要:** 正交各向异性材料已在大型固体发动机上得到广泛应用。为了较大地降低发动机药柱的 Von Mises 应变水平, 极大地提高发动机的结构完整性能, 以星形药柱为例, 对固体发动机药柱推进剂和绝热层的弹性模量和泊松比等正交各向异性材料参数进行了灵敏度分析, 得到了固体发动机药柱正交各向异性材料参数的灵敏度系数。分析方法与结论对固体发动机的优化设计具有指导作用。

**关键词:** 固体发动机; 正交异性材料; 灵敏度分析; 结构完整性

**中图分类号:** V435      **文献标识码:** A

## The Orthotropic Material Parameters Sensitivity Analysis of Solid Motor Grain

LEI Yong jun<sup>1</sup>, YUAN Duar cai<sup>2</sup>, LIN Wen feng<sup>1</sup>

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

2. College of Basic Education for Commanding Officers, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The orthotropic material has been widely applied in large solid motors. In order to reduce the Von Mises strain, and greatly improve the structural integrity of solid motors, the star grain is taken as an example. The orthotropic material parameters sensitivity analysis of elastic modulus and Poisson's ratio of propellant and insulation blanket are studied. The orthotropic material parameters sensitivity coefficients of solid motor grain are obtained. The methods and conclusions are helpful for the designers, manufacturers of solid motors.

**Key words:** solid motor; orthotropic material; sensitivity analysis; structural integrity

理论和试验表明, 装药的材料参数是影响固体发动机结构完整性能的重要因素之一。复合材料具有高强度和比刚度, 在不改变内弹道性能的前提下, 使用复合材料可以有效地提高发动机的结构完整性能, 因此在大型固体发动机上得到了广泛应用。20 世纪 90 年代以来, 美国新研制的固体发动机主要采用碳纤维复合材料, 以提高发动机压强, 得到较高比冲<sup>[1]</sup>。在装药材料参数与发动机结构完整性能的研究方面, Chyuand<sup>[2]</sup> 采用有限元法研究了点火增压过程中各向同性推进剂泊松比的变化与药柱应力场变化的关系, 蒙上阳等<sup>[3]</sup> 分析了各向同性推进剂材料特性对固体发动机结构完整性的影响, 田俊良等<sup>[4]</sup> 对复合材料壳体固体发动机药柱在工作内压下的三维结构进行了分析, 史宏斌等<sup>[5]</sup> 计算了固化降温和轴向过载作用下各向同性绝热层和包覆层材料的性能对推进剂/包覆层界面应力的影响。鉴于结构材料的选取是在考虑多方面因素下的一种折中, 不同参数关于结构完整性的灵敏度系数是很重要的参考指标之一, 本文就固体发动机药柱正交各向异性材料参数的灵敏度进行分析。

### 1 固体发动机药柱有限元模型

为了方便有限元分析, 建立如图 1 所示的三维星形药柱有限元模型, 并定义 1 方向为发动机径向方向, 2 方向为环向方向, 3 方向为发动机轴向方向, 计算时气燃内压取 14MPa。

\* 收稿日期: 2010- 02- 01

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET- 08- 0148); “十一五” 国家部委资助项目

作者简介: 雷勇军(1968-), 男, 教授, 博士。

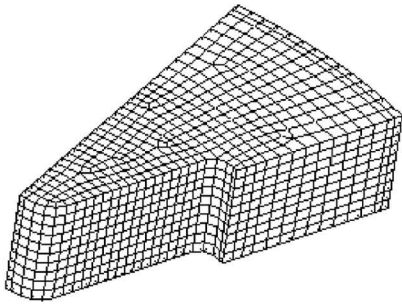


图1 药柱三维有限元模型  
Fig.1 The FEM model of grain

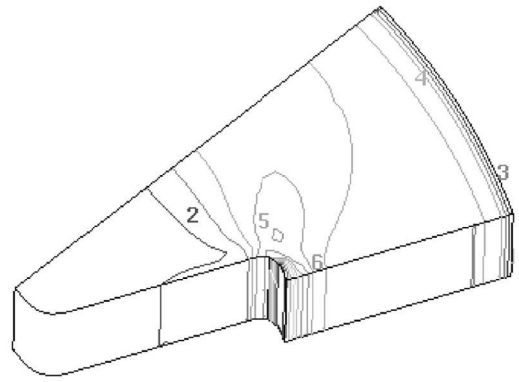


图2 各向同性材料药柱的应变等值线图  
Fig.2 The Von Mises strain of isotropy grain

各向同性材料药柱的 Von Mises 应变等值线图如图 2 所示。从图 2 可以明显看出, Von Mises 应变的最大区域主要集中在沟槽顶端。

## 2 固体发动机药柱正交各向异性材料参数灵敏度分析

### 2.1 正交各向异性推进剂药柱材料参数灵敏度分析

将弹性模量和泊松比分为两组,分别采用满应力设计法,使每个物理量各自逼近自己的最佳值。弹性模量作为设计变量时,正交各向异性推进剂材料弹性模量、药柱最大 Von Mises 应变和灵敏度系数如表 1 所示;泊松比作为设计变量时,药柱的最大 Von Mises 应变和三个泊松比的灵敏度系数如表 2 所示。

表 1 推进剂弹性模量灵敏度分析

Tab.1 The sensitivity analysis of elastic modulus of propellant

优化迭代 次数	弹性模量 $E_1$ (MPa)	弹性模量 $E_2$ (MPa)	弹性模量 $E_3$ (MPa)	Von Mises 应变	$E_1$ 灵敏度 系数	$E_2$ 灵敏度 系数	$E_3$ 灵敏度 系数
1	6.14E+00	3.19E+01	6.14E+00	136.08%	1.96E+00	-4.61E+00	-1.35E+00
2	6.07E+00	3.23E+01	6.20E+00	132.50%	2.03E+00	-4.71E+00	-1.37E+00
3	6.01E+00	3.26E+01	6.26E+00	128.80%	2.27E+00	-4.74E+00	-1.37E+00
4	5.95E+00	3.29E+01	6.32E+00	125.01%	2.40E+00	-4.71E+00	-1.37E+00
5	5.89E+00	3.32E+01	6.39E+00	121.12%	2.54E+00	-4.83E+00	-1.34E+00
6	5.84E+00	3.36E+01	6.45E+00	117.14%	2.64E+00	-4.78E+00	-1.32E+00
7	5.78E+00	3.39E+01	6.51E+00	113.09%	2.77E+00	-4.84E+00	-1.28E+00
8	5.72E+00	3.43E+01	6.58E+00	108.96%	2.93E+00	-4.99E+00	-1.23E+00

从表 1 可以看出,正交各向异性材料并没有给发动机药柱的结构完整性能带来好处,其 Von Mises 应变值达到了 100% 以上。但三个弹性模量的灵敏度系数较各向同性材料( $10^{-6}$ )要高得多,从另一方面说明了正交各向异性材料的可调控性。

从表 2 不难看出,泊松比是非常敏感的参数。由于有 3 个泊松比在变化,因此发动机药柱的 Von Mises 应变响应明显。其中,表征径向和环向耦合程度的泊松比  $\nu_2$  最为敏感,其灵敏度系数要比另外两个高出一个数量级。

表 2 推进剂泊松比灵敏度分析

Tab. 2 The sensitivity analysis results of Poisson's ratio of propellant

优化迭代 次数	泊松比 $\nu_{12}$	泊松比 $\nu_{23}$	泊松比 $\nu_{31}$	Von Mises 应变	$\nu_{12}$ 灵敏度 系数	$\nu_{23}$ 灵敏度 系数	$\nu_{31}$ 灵敏度 系数
1	3.00E-01	3.00E-01	4.50E-01	136.08%	-1.48E+01	-1.48E+00	-5.34E+00
2	3.11E-01	1.00E-02	5.47E-01	111.39%	-1.47E+01	-1.53E+00	-5.52E+00
3	3.18E-01	1.08E-02	5.50E-01	98.33%	-1.62E+01	-1.70E+00	-5.81E+00
4	3.24E-01	1.14E-02	5.52E-01	86.00%	-1.76E+01	-1.85E+00	-6.07E+00
5	3.30E-01	1.20E-02	5.54E-01	74.60%	-1.87E+01	-1.97E+00	-6.26E+00
6	3.35E-01	1.25E-02	5.55E-01	64.25%	-2.00E+01	-2.11E+00	-6.51E+00
7	3.39E-01	1.29E-02	5.57E-01	55.02%	-2.07E+01	-2.19E+00	-6.59E+00
8	3.42E-01	1.33E-02	5.58E-01	46.96%	-2.08E+01	-2.22E+00	-6.56E+00
9	3.45E-01	1.36E-02	5.59E-01	40.07%	-2.02E+01	-2.17E+00	-6.29E+00
10	3.48E-01	1.39E-02	5.59E-01	34.35%	-1.87E+01	-2.00E+00	-5.80E+00
11	3.50E-01	1.10E-02	5.61E-01	29.71%	-1.54E+01	-1.63E+00	-4.78E+00
12	3.51E-01	1.00E-02	5.62E-01	26.09%	-9.45E+01	-9.74E+00	-3.00E+00

## 2.2 正交各向异性绝热层材料参数灵敏度分析

绝热层的弹性模量和推进剂药柱相差不多, 和药柱一样体现近似不可压属性。对绝热层的复合材料缠绕通常是沿轴向采用对称均衡铺层方式实现的, 此时轴向和环向的弹性模量大致相等, 径向的弹性模量则要大一些。

分别给出绝热层三个弹性模量和三个泊松比一组初始数据, 即分别令  $E_1 = 6.14\text{MPa}$ ,  $E_2 = 31.9\text{MPa}$ ,  $E_3 = 6.14\text{MPa}$  和  $\nu_{12} = 0.3$ ,  $\nu_{23} = 0.3$ ,  $\nu_{31} = 0.45$ , 以发动机药柱 Von Mises 应变最小为目标函数对其进行优化, 所得结果如表 3 和 4 所示。

表 3 绝热层弹性模量灵敏度分析

Tab. 3 The sensitivity analysis results of elastic modulus of insulation blanket

优化迭代 次数	弹性模量 $E_1$ (MPa)	弹性模量 $E_2$ (MPa)	弹性模量 $E_3$ (MPa)	Von Mises 应变	$E_1$ 灵敏度 系数	$E_2$ 灵敏度 系数	$E_3$ 灵敏度 系数
1	6.14E+00	3.19E+01	6.14E+00	13.01%	6.30E-03	-1.89E-03	-1.85E-03
2	5.96E+00	3.33E+01	6.19E+00	12.61%	7.49E-03	-1.96E-03	-1.40E-03
3	5.89E+00	3.49E+01	6.24E+00	12.24%	8.43E-03	-2.00E-03	-8.97E-04
4	5.84E+00	3.63E+01	6.29E+00	11.90%	9.33E-03	-2.05E-03	-4.42E-04
5	5.73E+00	3.73E+01	6.33E+00	11.60%	1.03E-02	-2.09E-03	-8.32E-05
6	5.46E+00	3.72E+01	6.38E+00	11.31%	1.17E-02	-2.19E-03	-1.02E-04
7	5.36E+00	3.78E+01	6.43E+00	11.07%	1.26E-02	-2.24E-03	-3.61E-04
8	5.26E+00	3.82E+01	6.48E+00	10.85%	1.35E-02	-2.28E-03	-5.71E-04

表 3 给出了绝热层三个弹性模量变化时, 药柱最大 Von Mises 应变和三个灵敏度系数的变化规律。结果表明, 各向异性绝热层对发动机药柱的 Von Mises 应变有一定的影响, 各弹性模量最大变化率不超过 20%, 就可以引起药柱 Von Mises 应变约 2% 的变化。三个弹性模量中以径向弹性模量  $E_1$  和环向弹性模量  $E_2$  的灵敏度系数较高。在本文所选的初始设计中,  $E_1$  的减小,  $E_2$  和  $E_3$  的增大, 都能提高发动机药柱的结构完整性能。

表4 绝热层泊松比灵敏度分析

Tab.4 The sensitivity analysis results of Poisson's ratio of insulation blanket

优化迭代 次数	泊松比 $\nu_{12}$	泊松比 $\nu_{23}$	泊松比 $\nu_{31}$	Von Mises 应变	$\nu_{12}$ 灵敏度 系数	$\nu_{23}$ 灵敏度 系数	$\nu_{31}$ 灵敏度 系数
1	3.000E-01	3.000E-01	4.500E-01	13.01%	-4.705E-01	-4.861E-02	-1.521E-01
2	3.225E-01	8.942E-02	5.203E-01	11.89%	-1.847E-01	-5.043E-02	-1.570E-01
3	3.356E-01	8.847E-02	5.223E-01	11.20%	-5.189E-01	-5.431E-02	-1.622E-01
4	3.451E-01	1.000E-02	5.512E-01	10.67%	-5.280E-01	-5.553E-02	-1.648E-01
5	3.508E-01	1.061E-02	5.530E-01	10.33%	-5.255E-01	-5.535E-02	-1.618E-01
6	3.546E-01	1.000E-02	5.551E-01	10.10%	-5.456E-01	-5.756E-02	-1.667E-01
7	3.572E-01	1.000E-02	5.562E-01	9.94%	-5.412E-01	-5.731E-02	-1.642E-01
8	3.591E-01	1.000E-02	5.566E-01	9.83%	-5.416E-01	-5.710E-02	-1.628E-01
9	3.603E-01	1.013E-02	5.570E-01	9.75%	-5.713E-01	-5.947E-02	-1.700E-01
10	3.611E-01	1.021E-02	5.572E-01	9.70%	-5.346E-01	-5.439E-02	-1.558E-01
11	3.612E-01	1.022E-02	5.573E-01	9.70%	-6.681E-01	-6.770E-02	-1.935E-01
12	3.617E-01	1.027E-02	5.574E-01	9.66%	-5.517E-01	-5.232E-02	-1.518E-01
13	3.620E-01	1.030E-02	5.575E-01	9.64%	-5.828E-01	-4.479E-02	-1.408E-01

表4给出了绝热层采用各向异性材料时,三个泊松比在目标函数下的变化规律及其灵敏度系数。从表4可以看出,绝热层三个泊松比变化对发动机药柱的结构完整性有比较大的影响,其中以径向和环向间的泊松比  $\nu_{12}$  影响最大。同时,通过泊松比在优化计算过程中的变化趋势可以看出,泊松比  $\nu_{12}$  和  $\nu_{31}$  是越大越好,而  $\nu_{23}$  则基本上稳定在 0.01 左右。

绝热层的改变并不影响发动机药柱的内弹道性能,正交各向异性在工艺上也易于实现,因此,固体发动机采用复合材料绝热层是一项性价比较高的技术改良。

### 3 结束语

(1) 对推进剂的选择,最好选用各向同性材料。尽管正交各向异性材料参数的灵敏度系数很大,能够允许发动机的 Von Mises 应变有较大范围的调整,但其 Von Mises 应变水平很高。

(2) 绝热层的设计,应尽量选用复合材料。通过调整绝热层材料参数,对提高发动机药柱结构完整性性能有一定的作用。尤其在发动机设计后期,在内弹道性能、发动机尺寸、药柱药型等大部分指标和参数都确定的情况下,如果发动机点火失败,对绝热层材料进行调整,提高发动机点火的安全系数,是一种不错的选择。

(3) 在设计各向异性绝热层时,在现有设计的基础上,径向弹性模量可以减小,环向和轴向弹性模量则需要增大,由于环向的灵敏度系数大于轴向,因此在运用复合材料缠绕时,纤维方向应尽可能偏向环向。三个泊松比中,表征径向和环向关系的泊松比  $\nu_{12}$  影响最大,其值应该尽量增大,泊松比  $\nu_{23}$  可以适当减小,泊松比  $\nu_{31}$  适当增大。

### 参考文献:

- [1] 阮崇智. 大型固体火箭发动机研制的关键技术[J]. 固体火箭技术, 2005, 28(1): 23-28.
- [2] Chyuan S W. Studies of Poisson's Ratio Variation for Solid Propellant Grains Under Ignition Pressure Loading [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2003, 80(12): 871-877.
- [3] 蒙上阳, 唐国金, 雷勇军. 材料性能对固体发动机结构完整性的影响[J]. 国防科技大学学报, 2002, 24(5): 10-15.
- [4] 田俊良, 朱祖念, 张善祁, 等. 复合材料壳体固体发动机药柱工作内压三维结构分析[J]. 固体火箭技术, 2001, 24(3): 34-38.
- [5] 史红斌, 朱念祖, 张善祁. 多种材料人工脱粘应力场分析 [J]. 固体火箭技术, 1995, 18(1): 24-29.