

文章编号: 1001- 2486(2010) 04- 0025- 05

基于 Patran 二次开发的星形药柱几何参数灵敏度分析*

申志彬, 李 磊, 雷勇军, 唐国金

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 为了分析几何参数对星形药柱结构完整性的影响, 在有限元软件 MSC. Patran/Nastran 平台上, 用 Patran 的二次开发工具 PCL(Patran Command Language) 实现了星形药柱建模与分析的参数化。研究了星形药柱最大 Von Mises 应变随药型几何参数的变化规律并进行了灵敏度分析。结果表明, 星形药柱肉厚、星角系数、星角数以及沟槽顶弧倒圆半径等对药柱结构完整性影响较大, 药型设计时应重点关注这些参数。所提出的方法和相应结论可为固体发动机设计提供参考。

关键词: 固体发动机; 星形药柱; 灵敏度分析; 结构完整性; PCL

中图分类号: V435 文献标识码: A

Geometric Parameters Sensitivity Analysis for Star Grain Based on Secondary Development of Patran

SHEN Zhi-bin, LI Lei, LEI Yong-jun, TANG Guo-jin

(College of Aerospace and Materials Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to analyze the effect of geometric parameters on the structural integrity of star grain, the parameterized model of star grain was constructed through PCL(Patran Command Language) on the platform of FM software MSC. Patran/Nastran. The law of maximum Von Mises strain variation with geometric parameters was studied, and the geometric parameters sensitivity was analyzed based on the parameterized model. The results show that grain web thickness, star angle coefficient, star hole number, and the rounding radius of groove top have great effect on the structure integrity of star grain. Therefore, more attention should be paid to these parameters in motor design. The analytical method and conclusion are beneficial for designing SRM.

Key words: SRM; star grain; sensitivity analysis; structure integrity; PCL(Patran Command Language)

星形药柱由于具有多个可设计几何参量, 可以通过调整星孔几何参数获得恒面性、减面性和增面性的燃烧, 被广泛应用于长时间工作、大推力的火箭发动机上^[1]。但星形药柱内孔复杂, 其结构完整性一直备受固体火箭发动机设计和使用部门关注。

理论和试验表明, 固体火箭发动机药柱的几何构型和材料参数是影响结构完整性的重要因素。学者们已经对材料参数对药柱结构完整性的影响做了较深入的研究^[2-4], 而关于几何构型对药柱结构完整性影响的研究还相对较少。王元有^[1]采用经验公式分析了星形药柱各个几何参数对应力集中参量的影响。于洋等^[5]对温度载荷下装药内外径比和长径比对结构完整性影响规律进行了研究。李磊等^[6]讨论了低温载荷作用下的前伞盘曲面形式、宽度和深度对该部位最大 VonMises 应变的影响。雷勇军等^[7]利用 MSC.Nastran 软件的结构优化功能, 对星形药柱发动机进行了形状优化分析。由于发动机几何构型的复杂性, 以上研究都只对少数的几个参数进行了分析, 不够全面。

利用有限元方法, 研究药型几何参数对药柱结构完整性的影响, 不可避免的要进行多次重复建模。直接应用有限元软件进行手动建模, 工作量大, 耗时较长。本文采用 MSC. Patran 的二次开发工具 PCL^[8]建立了星形药柱固体发动机的参数化模型, 研究了各个几何参数对其结构完整性的影响并进行了几何参数灵敏度分析, 为下一步开展药柱结构随机分析和药型优化设计提供参考。

* 收稿日期: 2010- 04- 29

基金项目: 国防科技大学优秀研究生创新资助项目(B100103); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET- 08- 0148)

作者简介: 申志彬(1983-), 男, 博士生。

1 计算模型和方法

星形药柱的几何参数主要有: 药柱外径 D 、长度 L 、内径 d 、肉厚 e 、沟槽深度 h 、星角数 n 、星边夹角 θ 、星角系数 ε 和倒角圆弧半径 R_1 、 R_2 等^[1]。图 1 给出了部分参数示意图。在有限元计算过程中, 为了便于分析特做假设: (1) 固体推进剂是均匀、各向同性的线性粘弹性材料; (2) 推进剂的泊松比为一常数; (3) 壳体为薄壁弹性圆筒; (4) 在点火增压过程中不考虑内孔烧蚀。

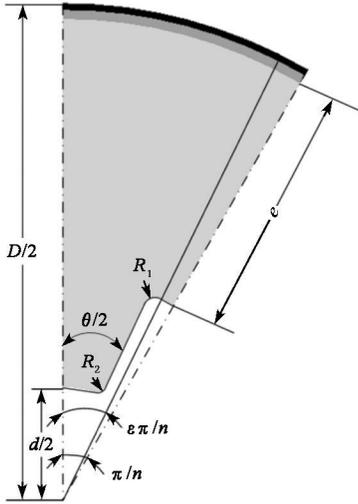


图 1 星形药柱截面几何参数示意图

Fig. 1 Sectional drawing of geometrical parameters of star-shaped grain

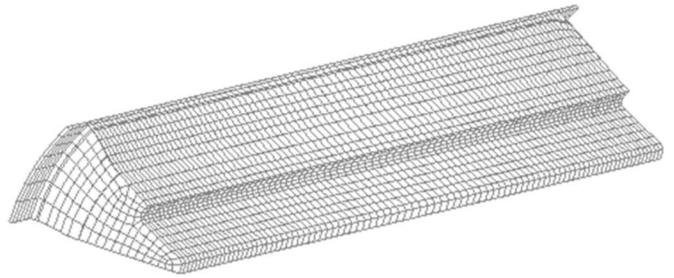


图 2 有限元计算模型

Fig. 2 Finite element model

1.1 材料性能参数的获得

固体发动机有限元计算需要的材料性能参数包括壳体、包覆层、绝热层和推进剂的线膨胀系数、密度, 以及壳体和绝热层材料的弹性模量、泊松比, 可通过试验测定。对于包覆层和推进剂, 反映其粘弹性力学性能的参数为松弛模量, 采用 Burgers 模型表述的材料参数有: 弹性模量 K_e 、主蠕变模量 K_p 、主蠕变阻尼 C_p 和次蠕变阻尼 C_s 。由应力松弛试验数据进行数值拟合后得到^[9]。

1.2 结构完整性评估准则

在温度和内压载荷作用下, 危险点处于药柱中, 药柱的破坏准则采用八面体剪应变准则较为合理^[10]。根据 Nastran 软件的特点, 本文采用与八面体剪应变准则等效的 Von Mises 应变准则作为药柱结构完整性评估准则。

1.3 有限元计算模型

星形发动机具有循环对称性, 对于 n 角星形发动机, 可将发动机药柱均分成完全对称的 $2n$ 等份, 每一份的夹角为 π/n , 取其中一份建立固体发动机的三维有限元计算模型, 在过渡圆弧处加密网格, 如图 2 所示。单元和节点数都在 40 000 以上, 随着发动机药柱几何形状的变化, 有限元计算模型的单元数和节点数略有增减。

默认几何参数为: $D = 400\text{mm}$, $L = 1600\text{mm}$, $d = 45\text{mm}$, $e = 105\text{mm}$, $n = 6$, $\theta = 50^\circ$, $\varepsilon = 0.87$, $R_1 = 5\text{mm}$, $R_2 = 4\text{mm}$ 等。根据试验数据, 得到推进剂线粘弹性材料参数如下: $K_e = 12.796\text{MP}$ 、 $K_p = 1.126\text{MP}$ 、 $C_p = 155.9\text{MP}\cdot\text{s}$ 和 $C_s = \infty$, 推进剂的泊松比取 0.498。壳体和绝热层的弹性模量与泊松比分别为: 200 000MPa、0.3 和 22.0MPa、0.4985。

由于包覆层和推进剂材料性质十分接近, 因此模型中包覆层采用推进剂的材料参数。

本文主要研究药柱在温度和内压载荷联合作用下星形药柱的结构完整性。零应力温度为 58°C , 经缓慢降温至 20°C , 然后进行点火试车, 点火压强峰值为 10.0MPa。

1.4 参数化建模

Patran 的建模过程一般是界面操作,但实际上是一组命令的执行过程,patran. ses 文件中就保存了这些命令。因此,参数化建模程序的编写可采用 Patran 自动生成和手工编写相结合的方式。首先通过反复建模比较,确定出一种具有通用性的建模方法。其次,利用通用建模方法,手工在 Patran 中建立结构的有限元模型,保存 Patran. ses 文件。随后,编辑修改 Patran. ses 文件中的命令流,增加参数化变量声明,并在文件中找到参数化物理量所在的位置,对应的数据用相应的变量替换。最后,为了方便调用,将用到的所有 PCL 子函数集成为一个二进制文件。经过这样修改后,给变量赋予不同的值,本来只能实现单一模型建模的 Patran. ses 文件可以根据不同的参数建立模型了。

1.5 几何参数灵敏度分析及系统开发

建立固体发动机的参数化模型后,通过编制循环语句来控制几何变量,就可以分析各个几何参数对发动机结构完整性的影响了,具体流程如图 3 所示。对于星形药柱,药柱的外径 D 、长度 L 、内径 d 等参数是由发动机的总体任务和要求所决定的,一般不能随意改变。因此,本文主要研究星角数 n 、星孔高度 h 、星边夹角 θ 、星角系数 ε 和倒角圆弧半径 R_1 、 R_2 等几何参数对发动机结构完整性的影响。固体发动机结构完整性采用 Von Mises 应变准则做判据,因此研究各几何参数对星形药柱固体发动机结构完整性的影响只需分析药柱最大 Von Mises 应变随以上几何参数的变化规律即可。

用同样的方式开发完成了包括星形、车轮形、伞盘形以及组合形等典型药型的参数化建模和参数灵敏度分析程序。为方便用户使用,用 PCL 编写了相应的用户界面,调用参数化建模和灵敏度分析程序,开发了固体发动机几何参数灵敏度分析系统。利用该系统可以快速对典型结构的药柱进行参数化建模,结构完整性分析以及几何参数敏感性分析。

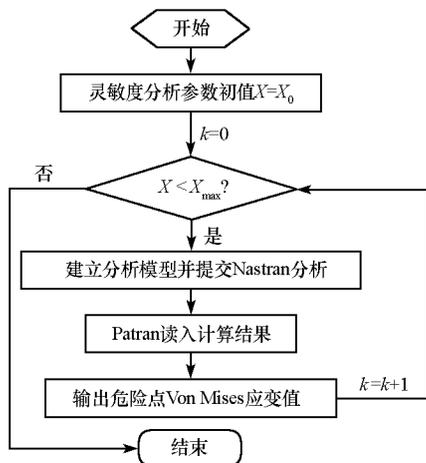


图 3 几何参数灵敏度分析流程

Fig. 3 The flow chart of geometrical parameters sensitivity analysis

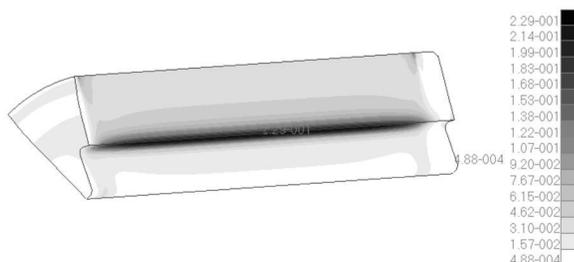


图 4 星形药柱 Von Mises 应变云图

Fig. 4 Von Mises strain distribution of star-shaped grain

2 计算结果及分析

2.1 星形药柱结构完整性分析

直接运行参数化建模程序,得到默认参数下星形药柱的 Von Mises 应变场,如图 4 所示。

由图 4 可知,由于药柱头尾部人工脱粘层的存在,使得药柱端部的应变场与中部应变场不一致。星形药柱最大 Von Mises 应变值出现在药柱中部的沟槽顶部,因此,对它分析设计的目标是缓解沟槽顶部的应力集中水平,减小其最大 Von Mises 应变值。

2.2 星角数对结构完整性的影响

星形药柱的星角数常见的有五、六、七和八星,其中以六星和七星居多。图 5 给出了其它参数一定的条件下,星形药柱 ε_v 随星角数 n 的变化规律。由图可以看出, ε_v 随星孔数的增多而减小。因

此,星形药柱发动机设计时,在满足总体性能和内弹道要求的前提下,应尽量采用较多的星孔。

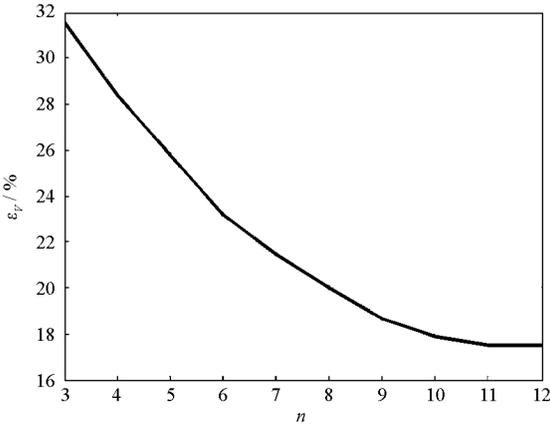


图5 ε_v 随n的变化规律
Fig. 5 ε_v variation with n

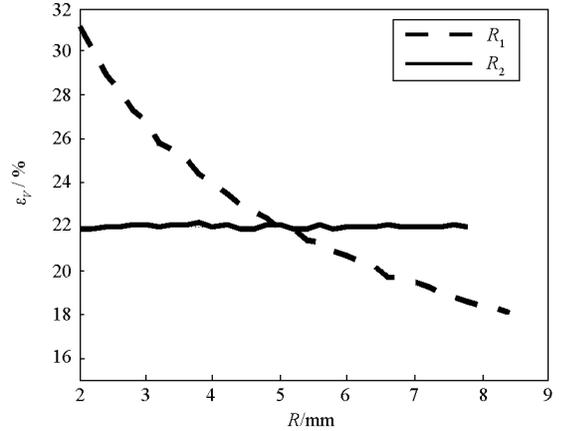


图6 ε_v 随R₁和R₂的变化规律
Fig. 6 ε_v variation with R₁ and R₂

2.3 倒角圆弧对结构完整性的影响

由图6可知,沟槽顶部倒圆半径R₁对星形药柱结构完整性影响很大,当R₁由2.0mm变到8.0mm时,危险点的Von Mises应变值ε_v减小了近50%;而沟槽底部倒圆半径R₂的变化对结构完整性几乎不产生影响。其原因是危险部位就在R₁圆弧附近,增大R₁减缓了危险部位的应力集中,应变也随之减小;而R₂远离危险部位,对其结构完整性影响不大。R₁增大,应力集中水平降低,但药柱装填系数也随着降低,会影响装药量。因此,R₁选择要适当,一般选取R* = R₁/D = 0.015~0.030,其中D为药柱外径。若推进剂力学性能好,可取其下限;若力学性能差,则应取其上限或更高些^[1]。结构完整性对R₂没有过多要求。

2.4 星边夹角对结构完整性的影响

图7给出了药柱危险点的Von Mises应变值ε_v随星边夹角θ(如图1所示)的变化规律。由图7可知,θ对星形药柱结构完整性的影响很小,当θ从40°变化到80°时,ε_v只有微小的变化。这是由于星边夹角的变化对危险部位几何尺寸影响较小。θ是内弹道设计的重要参数,通过改变θ的大小可以获得恒面性、减面性或增面性的燃烧。

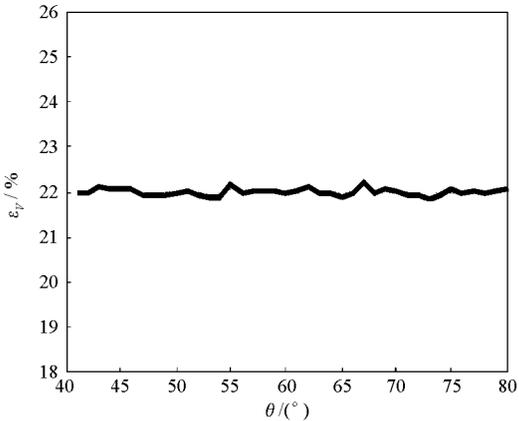


图7 ε_v 随θ的变化规律
Fig. 7 ε_v variation with θ

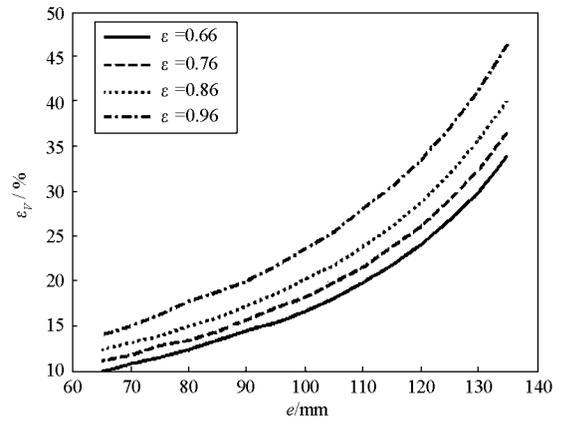


图8 ε_v 随e和ε的变化规律
Fig. 8 ε_v variation with e and ε

2.5 星角系数和肉厚对结构完整性的影响

从图8可知,危险点的Von Mises应变值ε_v随星角系数ε和肉厚e的增大而增大,变化显著。当ε从0.96变到0.66时,ε_v变化了近30%,而当e从135mm减小到65mm时,ε_v的变化达70%。这是因为

当星角系数或肉厚减小时,都使得沟槽部位几何尺寸变大,降低了顶部的应力集中水平。但是,减小 ε 特别是 e ,会降低装填系数,损失装药量,影响发动机总体性能和内弹道特性。因此,在发动机设计过程中,综合考虑其他性能的前提下,应适当减小肉厚和星角系数,以提高推进剂力学性能。

2.6 几何参数灵敏度分析

在研究药柱几何参数的随机结构响应分析或药型优化设计时,需选择对结构响应影响大的参数做随机参数或设计变量即可,以提高分析效率。前面通过计算定性地分析了几何参数对星形药柱结构完整性的影响,而参数灵敏度分析可定量地计算各几何参数对结构响应的影响因子,从而更加准确地对几何参数进行筛选。

几何参数灵敏度是指结构响应对各几何变量的变化率即偏导数。由于各几何参数单位不同,变化范围差别很大,为便于比较,对各个几何变量进行无量纲处理,使之在 0~1 之间变化。采用中心差分法得到了结构响应(Von Mises 应变)对各几何变量的灵敏度系数,取其均值作为各几何参数的灵敏度系数,如表 1 所示。

通过灵敏度分析,定量给出了各几何参数对 ε_v 的影响程度。由表 1 可知,星形药柱各个几何参数对结构完整性影响程度依次为: e 、 ε 、 n 、 R_1 、 θ 和 R_2 。其中, ε_v 对 e 最为敏感, ε 次之,对 R_2 和 θ 较不敏感, n 和 R_1 对 ε_v 影响程度相当,这和前面的分析结果一致。虽然 e 和 n 对 ε_v 的影响程度很大,但改变它们会引起装药量的较大改变,因此,建议通过调整 ε 和 R_1 来改善星形药柱的力学性能。

表 1 各几何参数结构响应的灵敏度系数

Tab.1 Geometric parameters sensitivity coefficient

变量类型	几何变量		ε_v (%)		灵敏度系数
	min	max	min	max	
n	0.25	1.00	14.30	27.40	18.71
R_1	0.25	1.00	18.42	31.14	16.93
R_2	0.25	1.00	21.88	22.15	1.95
θ	0.50	1.00	21.90	22.24	3.36
ε	0.61	1.00	17.15	27.46	23.54
e	0.50	1.00	12.30	45.69	46.66

注:灵敏度系数取绝对值

3 结论

(1) 基于 Patran 的二次开发技术,实现了星形药柱结构建模与分析的参数化,并开发了固体火箭发动机几何参数灵敏度分析系统,可以减少重复劳动,提高分析效率。

(2) 在温度和内压载荷联合作用下,星形药柱最大 Von Mises 应变随星角数和沟槽顶弧倒圆半径的增加而减小,随星角系数和肉厚的增大而增大,随星边夹角和沟槽底部倒圆半径变化不大。

(3) 通过灵敏度分析,星形药柱结构分析中较为敏感的参数依次为:肉厚、星角系数、星角数和沟槽顶部倒圆半径。在装药改变不大的前提下,可以通过调整星角系数、沟槽顶部倒圆半径来改善药柱的结构完整性。

参考文献:

- [1] 王元有,等. 固体火箭发动机设计[M]. 北京:国防工业出版社,1984.
- [2] 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.
- [3] 潘奠华,胡明勇. 固化降温过程中固体火箭发动机材料参数的影响分析[J]. 烟台大学学报,2006,19(1):63-67.
- [4] 田四朋,唐国金,雷勇军. 固体火箭发动机随机药柱结构分析参数的灵敏度研究[J]. 固体火箭技术,2008,31(1):28-32.
- [5] 于洋,王宁飞,张平. 温度载荷下装药内外径比和长径比对结构完整性影响的规律研究[J]. 航空动力学报,2007,22(9):1565-1568.
- [6] 李磊,唐国金,雷勇军. 固体火箭发动机药柱伞盘结构应力应变分析[J]. 推进技术,2008,29(4):477-481.
- [7] 雷勇军,袁端才,何焯. 固体发动机星形药柱的形状优化分析[J]. 国防科技大学学报,2008,30(4):6-10.
- [8] MSC. Software. PCL and Customization [M]. Los Angeles: The Macneal-Schwendler Corporation, 2005.
- [9] 蒙上阳,唐国金,雷勇军,等. Bungers 模型的参数获取方法[J]. 固体火箭技术,2003,26(2):27-30.
- [10] 陈汝训. 固体火箭发动机设计与研究[M]. 北京:宇航出版社,1992.