

固体火箭发动机前、后翼药柱 三维有限元分析*

王 昆 田维平

(陕西动力机械研究所, 西安, 710025)

摘 要: 应用 PRO/ENGINEER、I-DEAS 软件构造药柱三维几何模型, 利用视算技术和方法对药柱几何模型进行处理, 建立药柱三维有限元模型, 对药柱受固化降温、轴向飞行过载、工作内压载荷作用下的应力应变及位移完成了三维线弹性有限元分析计算, 进行了图形后处理, 得到了合理的结果。为大型固体火箭发动机药柱结构完整性分析提供了更为准确合理的理论依据。

主题词: 固体推进剂火箭发动机, 推进剂药柱, 结构完整性, 有限元法

分类号: V435. 21

THREE-DIMENSIONAL FINITE-ELEMENT ANALYSIS FOR FORE AND AFT FINOCYL GRAIN OF SOLID ROCKET MOTOR

Wang Kun Tian Weiping

(Shaanxi Inst. of Power Machinery, Xi'an, 710025)

Abstract: Three-dimensional finite-element modeling and calculation analysis method for fore and aft finocyl grain of large scale solid rocket motor are researched. Using PRO/ENGINEER and I-DEAS softwares, a three-dimensional grain geometry model is constructed, in which the visual calculation technology and method are used, then the three-dimensional finite-element model of grain is established. For vulcanization cool down and axial flight acceleration, as well as operating pressure of the grain, the three-dimensional linear elasticity finite-element analyses of stress, strain and displacement are accomplished, the post-processing images are accomplished and reasonable results are obtained. Thus, the problem of three-dimensional finite-element analysis of large-scale solid rocket motor grain with various loads is possible to be solved. It supplies a more accurate and reasonable method for the construction integrity analysis of large-scale solid rocket motor grain.

Subject terms: Solid propellant rocket engine, Propellant grain, Structural integrity, Finite element method

1 引 言

对于前、后翼三维药柱强度分析, 目前大多局限于用平面应变或轴对称有限元法来处理, 没有真正考虑翼槽的三维结构, 而此处的应力集中现象最严重。本文从三维实体造型构造精确的三维药柱几何模型(所有曲线、曲面用非均匀有理 B 样条 Nonuniform rational B-splines 函

* 收稿日期: 19960608, 修回日期: 19970226

数表示)出发,依据药柱三维几何模型的拓扑结构,合理划分药柱几何模型体,控制并生成合理的网域网体,给定合理的参数生成规整的有限元元素,采用六面体 20 节点等参元素,依照节点的线、面、网域、网体等相关性及药柱的相应载荷建立边界位移条件,应用线弹性有限元方法计算了发动机药柱在固化降温、轴向过载、工作内压载荷下的应力、应变、位移。在计算前进行了带宽优化(GPS 算法)、波前优化及节点重新编号,使计算效率显著提高。从而提高了药柱结构完整性分析的水平。

2 有限元计算方程

2.1 几何与物理方程

对空间三维问题,用 (x_1, x_2, x_3) 表示药柱内的任一点。

$$\{\epsilon\} = [L]\{u\} \quad (1)$$

其中位移向量: $\{u\} = [u_1, u_2, u_3]^T$, 应变向量: $\{\epsilon\} = [\epsilon_{11} \epsilon_{22} \epsilon_{33} \gamma_{12} \gamma_{23} \gamma_{31}]^T$, 几何矩阵略。

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\} \quad (2)$$

其中应力向量: $\{\sigma\} = [\sigma_{11} \sigma_{22} \sigma_{33} \sigma_{12} \sigma_{23} \sigma_{31}]^T$, 弹性矩阵略。

2.2 六面体 20 节点的等参元素

取边长为 2 的立方体为母单元,以立方体中心为原点,以分别平行立方体三个正交平面的直线为轴,取无量纲局部坐标 $\xi_i (i = 1, 2, 3)$,并对 20 节点进行编号。对单元内任一点位移进行二次插值,即

$$u_i = \sum_{k=1}^{20} N^{(k)}(\xi_1, \xi_2, \xi_3) u_i^{(k)} (i = 1, 2, 3) \quad (3)$$

位移形状函数 $N^{(k)}$ 的具体形式可由它应满足的以下两个条件唯一确定:(a) $N^{(k)}$ 是三重二次函数;(b) $N^{(k)}(\xi_1^{(l)}, \xi_2^{(l)}, \xi_3^{(l)}) = \begin{cases} 0 & (k \neq l) \\ 1 & (k = l) \end{cases} (k, l = 1, 2, \dots, 20)$ 。

位移函数统一形式为:

$$N^{(k)} = \begin{cases} \frac{1}{8} (1 + \xi_1^{(k)} \xi_1) (1 + \xi_2^{(k)} \xi_2) (1 + \xi_3^{(k)} \xi_3) (\xi_1^{(k)} \xi_1 + \xi_2^{(k)} \xi_2 + \xi_3^{(k)} \xi_3 - 2) \\ \quad (k = 1, 3, 5, 7, 13, 15, 17, 19) \\ \frac{1}{4} (1 - \xi_1^2) (1 + \xi_2^{(k)} \xi_2) (1 + \xi_3^{(k)} \xi_3) (k = 2, 6, 14, 18) \\ \frac{1}{4} (1 - \xi_2^2) (1 + \xi_1^{(k)} \xi_1) (1 + \xi_3^{(k)} \xi_3) (k = 4, 8, 16, 20) \\ \frac{1}{4} (1 - \xi_3^2) (1 + \xi_1^{(k)} \xi_1) (1 + \xi_2^{(k)} \xi_2) (k = 9, 10, 11, 12) \end{cases}$$

2.3 坐标变换

六面体 20 节点等参元素的坐标变换为:

$$x_i = \sum N^{(k)}(\xi_1, \xi_2, \xi_3) x_i^{(k)} \quad (4)$$

经参数变换将自然坐标系 $2 \times 2 \times 2$ 立方体映射成坐标系 x_1, x_2, x_3 中以抛物线边的任意曲六面体,其 Jacobi 矩阵为:

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N^{(k)}(\xi_i)}{\partial \xi_1} x_1^{(k)} & \frac{\partial N^{(k)}(\xi_i)}{\partial \xi_1} x_2^{(k)} & \frac{\partial N^{(k)}(\xi_i)}{\partial \xi_1} x_3^{(k)} \\ \frac{\partial N^{(k)}(\xi_i)}{\partial \xi_2} x_1^{(k)} & \frac{\partial N^{(k)}(\xi_i)}{\partial \xi_2} x_2^{(k)} & \frac{\partial N^{(k)}(\xi_i)}{\partial \xi_2} x_3^{(k)} \\ \frac{\partial N^{(k)}(\xi_i)}{\partial \xi_3} x_1^{(k)} & \frac{\partial N^{(k)}(\xi_i)}{\partial \xi_3} x_2^{(k)} & \frac{\partial N^{(k)}(\xi_i)}{\partial \xi_3} x_3^{(k)} \end{bmatrix}$$

$\det [J] \neq 0$ 就是要求单元不严重变形, 各边中间节点不过分偏离中点。

3 药柱有限元模型

3.1 坐标系及几何模型

药柱结构如图 1 所示, 前后各有 8 个翼片, 宽度均为 H , 前后人工脱粘分别在 A, B 处, 其半径分别为 D_A, D_B 。在图 1 三维笛卡尔坐标系中, y 轴为药柱轴线, 正向指向头部, xy 平面为翼槽对称面, 原点距头部 Z_0 mm。假设: 推进剂为弹性材料; 药柱小变形; 推进剂泊松比不随时间温度变化; 忽略绝热层的影响且燃烧室壳体不变形。

药柱三维实体模型如图 2 所示。量纲单位: 长度 mm, 质量 kg, 时间 s, 力 mN, 压强 daPa。

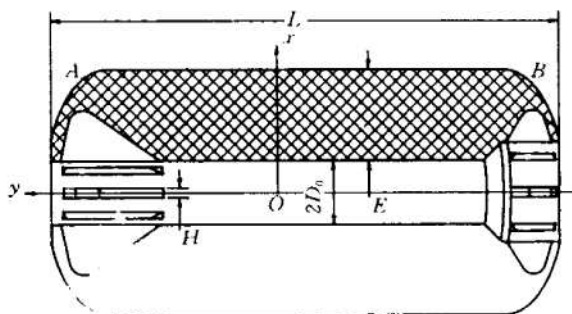


Fig. 1 Motor grain structure

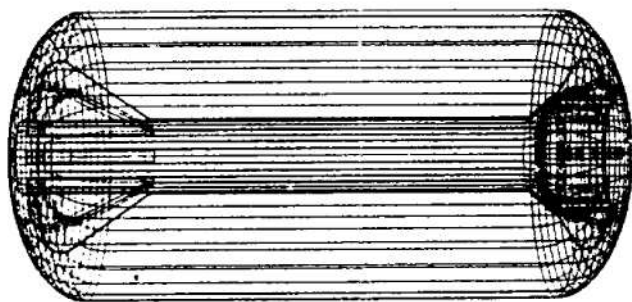


Fig. 2 Grain three-dimensional solid model

3.2 网格网体单元及节点

由于药柱结构及载荷的对称性, 分析了药柱体的 $1/16$, 共划了 1650 个单元, 9100 个节点, 单元采用曲六面体 20 节点等参元元素。每个元素的自由度是 3×20 , 总自由度 3×9100 , 这样能很好地逼近药柱边界, 使计算结果保持较高的精度。药柱内外表面有限网格形状及药柱三维有限元网格如图 3 所示。

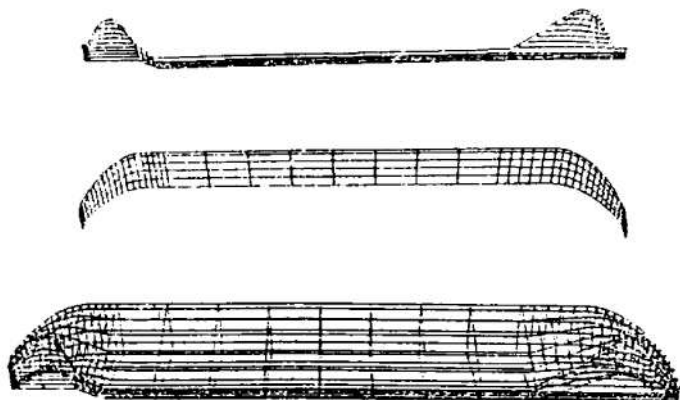


Fig. 3 Propellant finite-element grid

3.3 力学性能和载荷数据

考虑由于推进剂固化产生的固化收缩、固化降温及温度、时间等因素, 因此取推进剂模量为 1.4, 取零应力温度 T_2 为 58°C , 周围环境温度 T_1 为 20°C ; 在轴向冲击和工作内压下, 由于作用时间很短, 推进剂的应变速率很高, 因此取推进剂模量为 7.0。有关性能以及载荷数据见表 1。

Table 1 Mechanical properties and load data

Load fashion	E/MPa	ν	$\lambda_1 - \lambda_2$	Load
Cure cooling	1.4	0.495	$9.0E-5$	$T_1 - T_2$
Axial impact	7.0	0.495	—	Over load
Operating pressure	7.0	0.495	—	5.0MPa

3.4 边界条件

由于金属壳体弹性模量 E_s 远大于推进剂弹性模量 E_p ，除前、后人工脱粘面以外，1/16 药柱体与绝热层粘接被固定。在固化降温载荷方式下，前、后人工脱粘面及轴向冲击的前人工脱粘面处，边界条件的自由位移；而轴向冲击下的后人工脱粘面及工作内压下的前、后人工脱粘面处，边界条件为滑动位移。所谓滑动是指人工脱粘表面变形到壳体内表面后，受到来自前后封头内表面法线方向的约束，只能在切线方向滑动。载荷加载和约束条件的处理有必要建立一种点、线、面、网面、网体相关性。

4 计算结果及结论

对药柱的破坏判据，在固化降温及内压作用下，采用 Von Mises 应变准则：

$$\epsilon_v = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_1 - \epsilon_3)^2} \tag{5}$$

采用单向延伸试验可测推进剂延伸率 ϵ_m 。当拉应变达到 ϵ_m 时， $\epsilon_1 = \epsilon_m, \epsilon_2 = \epsilon_3 = -\nu^* \epsilon_m$

可得 $\epsilon_{vm} = (1 + \nu) \epsilon_m$

$$S_i = (1 + \nu) \frac{\epsilon_m}{\epsilon_v} \quad (i = 1, 3) \tag{6}$$

在轴向冲击载荷作用下，采用 Von Mises 弹度准则：

$$\sigma_v = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \tag{7}$$

可得 $S_2 = \frac{\sigma_m}{\sigma_v} \tag{8}$

式中 S_2 为药柱轴向过载安全系数， σ_m 为推进剂拉伸强度。

药柱在固化降温载荷作用下的计算结果见表 2，应变分布如图 4 所示，安全系数 $S_1 = 2.177$ ($\epsilon_v = 30\%$, $\nu = 0.495$)。在冲击载荷作用下的计算结果见表 3，应力分布如图 5 所示，安全系数 $S_2 = 5.545$ ($\sigma_m = 0.8\text{MPa}$)。在工作内压作用下的计算结果见表 4，应变分布如图 6 所示，安全系数 $S_3 = 2.505$ ($\epsilon_m = 40\%$)。

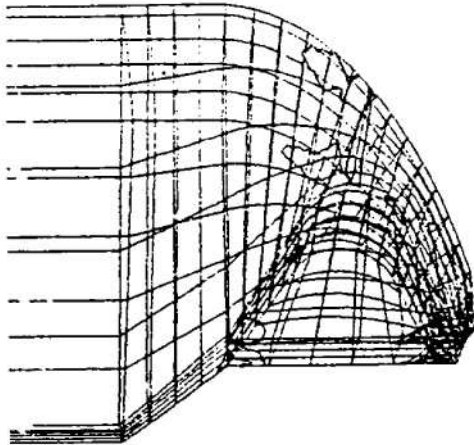


Fig. 4 The stress distribution in cure cooling loads condition

Table 2 The calculation results of cure cooling loads condition

	Max. strain	Medium principle strain	Min. strain	Max. shear strain	Von Mises strain
Node No.	3061	3069	3587	11518	11518
Max. value of strain	1.214E-01	1.901E-02	-2.974E-03	2.347E-01	2.061E-01
Node No.	6114	3062	11518	12696	12696
Min. value of strain	-4.384E-03	-3.589E-02	-1.546E-01	1.379E-06	1.339E-06
Mean value of strain	-1.077E-03	-2.965E-03	-4.579E-03	3.502E-03	3.230E-03

Table 3 The calculation results of shock loads

Unit: MPa

	Max. stress	Medium principle stress	Min. stress	Max. shear stress	Von Mises stress
Node No.	12676	12676	12676	14314	14314
Max. value of stress	9.618E-02	8.495E-02	7.717E-02	8.252E-02	1.468E-01
Node No.	12663	12663	12663	12591	12591
Min. value of stress	-1.602E-01	-1.786E-01	-2.043E-01	3.939E-06	6.913E-06
Mean value of stress	7.020E-04	-1.359E-04	-1.332E-03	1.017E-03	1.856E-03

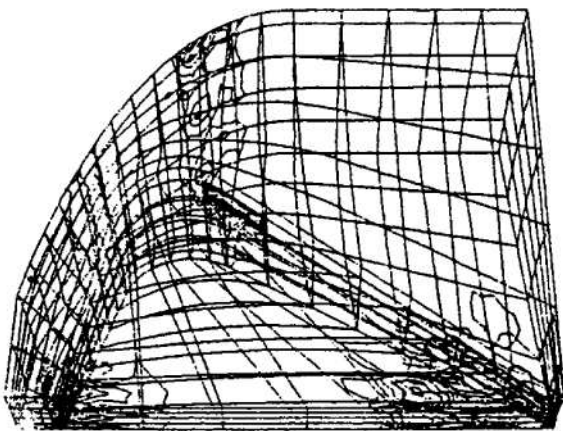
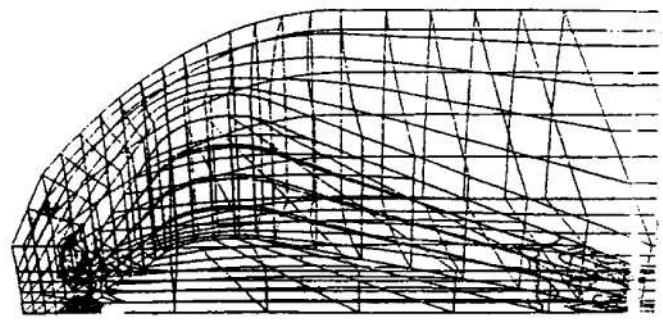
**Fig. 5 The stress distribution in shock loads condition****Fig. 6 The strain distribution in internal pressure loads condition**

Table 4 The calculation results of internal pressure loads condition

	Max. strain	Medium principle strain	Min. strain	Max. shear strain	Von Mises strain
Node No. Max. value of strain	8601 1.541E-02	8595 3.413E-02	9857 -7.180E-07	8233 2.692E-01	8233 2.387E-01
Node No. Min. value of strain	9857 2.626E-07	8601 -4.521E-01	8233 -1.181E-01	9857 9.806E-07	9857 8.792E-07
Mean value of strain	5.963E-02	-7.341E-04	-5.882E-02	1.185E-01	1.060E-01

由上述计算结果可得出:

(1) 固化降温载荷应变较大区域为人工脱粘根部, 翼槽表面, 尤其是后翼两根处, 其最大值 $\epsilon_m = 0.2061$;

(2) 冲击载荷应力较大区域为翼片根部, 特别是靠近前封头、翼槽最深处下面、人工脱粘根部。其应力最大值 $\sigma_v = 0.1468\text{MPa}$;

(3) 工作内压载荷应变较大区域为翼片与柱段连接部位, 特别是前翼翼根处, 其最大值 $\epsilon_v = 0.239$;

(4) 本文采用的三维有限元分析, 比二维轴对称有限元分析方法能更准确地再现工程中所关心的应力集中和应变情况。通过对实际发动机药柱的计算表明: 计算结果合理, 药柱安全系数较高, 能够保证药柱结构的完整性。