

翼柱型药柱固体火箭发动机 工作过程仿真

汤志东 方国尧 向红军 屈文

(北京航空航天大学宇航学院, 北京: 100083)

摘 要: 将翼柱型药柱的 18 个关键尺寸定义成可变参数, 通过人机交互输入具体的数值, 构造任意烧去肉厚下的药柱模型, 并计算该模型的体积。由 $A_b = \Delta V / \Delta t$ 计算燃烧面积的大小, 并进而计算出燃烧室压强和发动机推力。把任意烧去肉厚下的药柱模型和相对应时刻的压强-时间、推力-时间坐标制作成幻灯文件, 通过计算机显示器屏幕连续演示, 达到动画模拟的效果。

主题词: 固体推进剂火箭发动机, 内弹道模拟计算, 推进剂燃烧, 图像显示

分类号: V435.11

THE WORKING PROCESS SIMULATION FOR THE SOLID ROCKET MOTOR OF FINOCYL GRAIN

Tang Zhidong Fang Guoyao Xiang Hongjun Qu Wen

(School of Astronautics, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100083)

Abstract: The working process simulation for the solid rocket motor of finocyl grain-burning surface moving and internal ballistic simulating, eighteen fundamental dimensions of finocyl grain are defined as variable parameters, their specific values can be inputted by the means of man-machine interaction, too. The finocyl grain model of any thickness burned is built and its volume is calculated. Burning area is estimated by the approximate formula $A_b = \Delta V / \Delta t$, therefore the chamber pressure and the motor thrust can be calculated. The grain models of all thickness burned and the corresponding pressure-time and thrust-time coordinates are made as slide files, these slide files are displayed continually on the computer video screen, so the result of animated simulation is obtained.

Subject terms: Solid propellant rocket engine, Internal ballistic simulation calculation, Propellant combustion, Image display

1 三维实体造型的应用

在 Auto CAD 环境下, 调用 AME (Advanced Modelling Extension) 进行三维实体造型, 由长方体、楔形体、圆柱体、圆锥体和旋转体等基本实体体素, 通过正则布尔运算的并、交和差生成三维翼柱型药柱实体模型。为了构造任意大小和形状的药柱模型, 引入参数化设计方法, 将 18 个翼柱型药柱的关键尺寸设置成 18 个可变参数, 基本实体体素的定位点坐标和形状尺寸数值由这 18 个可变参数通过计算得出。对 18 个可变参数赋予了一组数值, 通过不同的剖分等级和剖分方向来比较药柱模型体积计算的精度。药柱模型的外边界没有选用实际椭

球型前后端面,而选用圆柱型平底端面, α_1 , α_2 , β_1 , β_2 均为 90° 角,前后段药柱内径相等,以便能够通过解析式来计算药柱模型精确的体积,而又保证与实际药柱模型近似,这组数值如下(见图1):

药柱总长和前、后段药柱长度: $L = 250$,
 $L_1 = 120$, $L_2 = 120$;药柱外径: $D = 140$;前、后段翼顶直径: $d_1 = 79$, $d_2 = 92$;前、后段药柱内径: $D_1 = 38$, $D_2 = 58$;前、后段翼顶过渡圆弧半径: $r_1 = 6.5$, $r_2 = 5.5$ mm;前段翼的前、后斜角: $\alpha_1 = 70^\circ$, $\alpha_2 = 65^\circ$;后段翼的前、后斜角: $\beta_1 = 50^\circ$, $\beta_2 = 60^\circ$;前、后段翼槽宽度: $W_1 = 5$, $W_2 = 5$;前、后段翼个数: $n_1 = 6$; $n_2 = 6$ 。所得计算结果列于表1中。

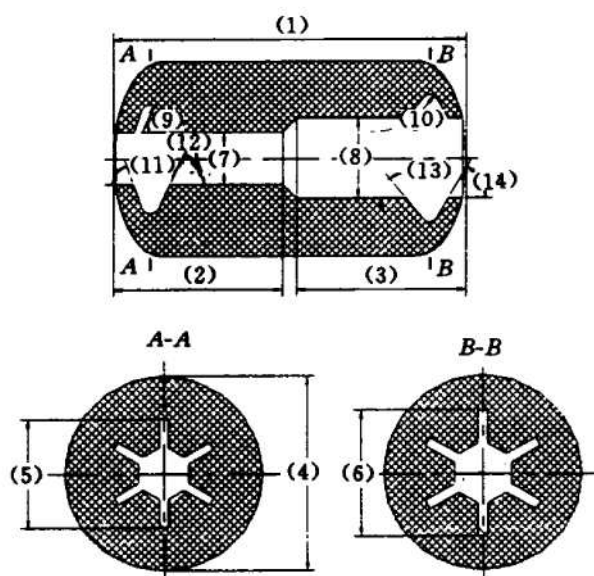


Fig. 1 The eighteen variable parameters of finocyl grain

Table 1 Computational results

Cut level	Cut density	Cut direction	Compute time (s)	Volume (mm ³)	Relative error (%)
6	4226	Y axes	51	3351976.00	0.0417
	4225	X axes	40	3346189.75	0.1310
	4225	Z axes	56	3342634.25	0.2371
7	11641	Y axes	210	3349467.25	0.0332
8	66049	Y axes	780	3349674.50	0.0270

本计算在主频为33MHz的386微机上进行,在剖分等级不变的情况下,沿Y轴剖分方向精度最高,而沿Y轴剖分方向不变的情况下,随剖分等级的提高,剖分密度成倍的增加,计算精度虽有提高,但不大,而耗时却数倍的增加。因此选择剖分方向沿Y轴,剖分等级为6级。

2 燃面推移仿真

在翼柱型药柱前后椭球型端面和圆柱面包覆阻燃、内孔燃烧条件下,根据分析得知18个可变参数中有10个参数的数值将随烧去肉厚的增加而变化。用上标(0)表示燃烧开始之前的初始值,用 e_b 表示烧去肉厚,按照平行层燃烧规律,这10个可变参数中直径的宽度随烧去肉厚的变化关系可以 $D_1 = D_1^{(0)} + 2e_b$ 的通式表示,半径变化的通式则为 $r_1 = r_1^{(0)} + e_b$ 。至于前后段药柱长度,需要根据前后段药柱内径以及前后段药柱初始长度来确定,如图2所示。

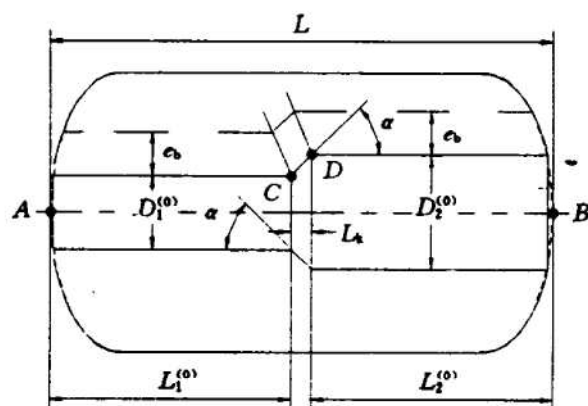


Fig. 2 The angle α moves in burning process

从图2可看出,只有C、D两点的位置影响前后药柱长度的变化。设C-D两点连线的倾

角为 α ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$), 按照平行层燃烧规律, α 角在燃烧过程中保持不变, 则

当 $D_1^{(0)} > D_2^{(0)}$ 时, $L_1 = L_1^{(0)} + e_b \operatorname{tg}(\alpha/2)$, $L_2 = L_2^{(0)} - e_b \operatorname{tg}(\alpha/2)$;

当 $D_1^{(0)} < D_2^{(0)}$ 时, $L_1 = L_1^{(0)} - e_b \operatorname{tg}(\alpha/2)$, $L_2 = L_2^{(0)} + e_b \operatorname{tg}(\alpha/2)$;

当 $D_1^{(0)} = D_2^{(0)}$ 时, $L_1 = L_1^{(0)}$, $L_2 = L_2^{(0)}$ 。

由上可知, 燃烧任意时刻的药柱模型均可根据 18 个可变参数的初始值以及对应时刻的烧去肉厚数值构造出来, 燃面推移仿真关键在于燃烧任意时刻药柱模型的图形显示。影响图形显示真实感的因素有两个: 栅格线密度和隐藏线的消除。AME 定义了变量 *Solwdens* (其值从 1 到 8) 来控制栅格线密度。*Solwdens*=8 时的模型从燃烧开始至燃烧结束的燃面推移变化如图 3 至图 6 所示。为了减少模型图形显示的计算时间, 选用栅格线密度 *Solwdens*=3。

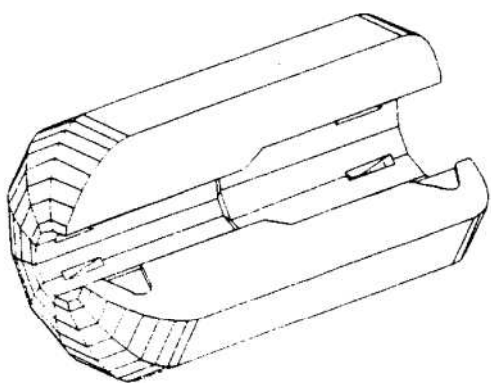


Fig. 3 The burning surface when thickness burned = 0mm

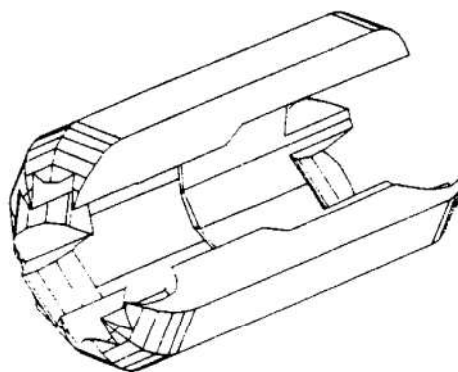


Fig. 4 The burning surface when thickness burned = 15mm

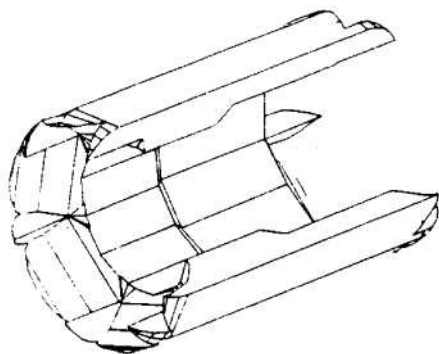


Fig. 5 The burning surface when thickness burned = 25mm

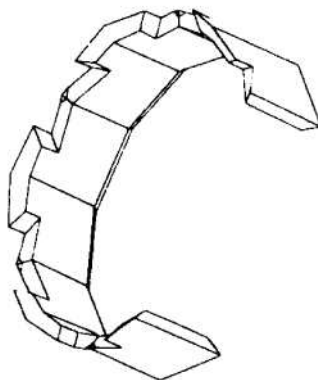


Fig. 6 The burning surface when thickness burned = 45mm

3 内弹道仿真

内弹道仿真主要包括任意燃烧时刻下压强、推力的计算, 和压强-时间、推力-时间坐标曲线的图形显示等, 压强、推力的计算关键在于确定燃烧面积的大小。但由基本体系进行正则布尔运算构造出来的复杂三维翼柱型药柱实体模型, 要确定药柱内孔由圆柱、圆锥和翼等构成空穴的内边界表面积是很困难的, 推导燃烧面积的解析式十分繁琐甚至是不可能的。

AME 提供了计算任意三维实体模型质量特性的 API 库函数 *ap-q-mprop*, 可以用此函数获得指定实体模型的体积大小, 用求体积的方法间接计算出所需要的翼柱型药柱实体模型的

燃烧面积: $A_b = \lim_{de \rightarrow 0} dv/de$ 。用有限量代替微元量, 则 $A_b = \Delta v/\Delta e$ 。

这是一个近似计算公式。当圆柱体底面半径增量 Δr 与底面直径的比值越小, 那么用 $\Delta v/\Delta r$ 计算出来的圆柱体侧面积就越精确。此结论同样适用于翼柱型药柱实体模型燃烧面积的计算。再根据平衡压强与推力计算公式计算压强与推力。

$$p_c = (\rho_p C^* a k)^{\frac{1}{1-n}}$$

其中 ρ_p 、 C^* 、 a 、 n 为药柱采用推进剂的性能参数, 选用 $\rho_p = 1600 \text{ kg/m}^3$, $C^* = 1297 \text{ m/s}$, $a = 1.167$ (燃速 $r = a p_c^n$, p_c 为 $[\text{Pa}]$, r 为 $[\text{m/s}]$), $n = 0.565$ 。

$$F = C_F p_c A_t$$

推力系数 $C_F = 1.49$, 喷管喉径 $d_t = 11.5 \text{ mm}$, 为了便于控制烧去肉厚的变化, 设置 3 个有关肉厚的可变参数, 相应定义了 3 个全局变量 (起始烧去肉厚 $e_1 (\geq 0)$; 终止烧去肉厚 $e_2 (\leq \text{总肉厚 } E)$; 平均烧去肉厚间隔 (Δe) , 通过人机交互输入具体的数值。

设置三个有关肉厚的可变参数可避免计算时间上不必要的浪费。每次计算均给出对应时刻的燃去肉厚和燃去时间, 烧去肉厚 (初始值为 0) 和燃去时间 (初始值为 0) 也是由本文定义的两个全局变量。当计算过程需要中断退出时, 记录下此时的烧去肉厚和燃烧时间, 如果需要可在程序执行一开始就赋予相应的数值, 使计算可以从上次中断的地方继续下去。

参 考 文 献

- 1 Saintout E, Ribereau D, Perrin P. A tool for 3D surface regression analysis in propellant grains. AIAA 89-2782
- 2 任仲贵主编. CAD/CAM 原理. 北京: 清华大学出版社, 1991. 9
- 3 孙家广, 陈玉健, 辜凯宁编著. 计算机辅助几何造型技术. 北京: 清华大学出版社, 1990. 2



欧洲动力装置制造公司研制 新型低温发动机

欧洲动力装置制造公司 (SEP) 正在阿里安 1174kN 推力的 Vulcain 低温发动机的基础上, 研制 1321kN 推力的新的改型发动机, 预计将在 2003 年完成。同时, SEP 还正在考虑研制一种更新型号的低温发动机, 推力达 1334kN, 暂定为 2008~2009 年完成。该公司认为, 从长期考虑, 需要低成本和高效能的火箭发动机来保持欧洲航天推进的竞争势态。研制一台先进技术的低温发动机将需要 25 年时间, 因此必须从现在开始考虑新的举措。

冯永红