

doi: 10.7690/bgzdh.2020.02.017

某头罩分离装置分离全过程仿真计算

王海清, 杨正才, 刘海旭, 王科伟, 刘建通, 何锋彦, 郭攀峰
(北方特种能源集团有限公司西安庆华公司火工技术研究所, 西安 710025)

摘要: 为解决头罩分离抛射过程中计算复杂的问题, 提出一种对其分离全过程的仿真计算方法。借鉴小型火箭发动机的工作原理, 通过燃气生成规律, 建立分离装置的数学模型, 分别对拉断螺钉剪断过程、头罩壳体运动过程和头罩分离装置侧抛过程进行分析, 对头罩分离装置内弹道和轴、径向分离速度进行仿真计算。仿真结果表明: 该方法对产品的设计具有参考价值, 可以节约研发成本和研制周期。

关键词: 内弹道; 仿真计算; 头罩分离装置; 分离速度

中图分类号: TJ012.1⁺4 **文献标志码:** A

Simulation Calculation of the Whole Separation Process for a Shroud Separation Device

Wang Haiqing, Yang Zhengcai, Liu Haixu, Wang Kewei, Liu Jiantong, He Fengyan, Guo Panfeng
(Pyrotechnics Technique Research Institute, Xi'an Qinghua Co., Ltd.,
North Special Energy Group Corporation, Xi'an 710025, China)

Abstract: In order to solve the complicated calculation problem in the process of separation and ejection of shroud separation device, a simulation calculation method of the whole separation process was proposed. Based on the working principle of the small rocket engine, the mathematical model of the separation device was established through the law of gas generation. The shearing process of the broken screw, the movement process of the shell and the side throwing process of the shroud separation device were analyzed respectively. The interior ballistic, the axial and radial separation speeds were simulated and calculated. The simulation results showed that the method has reference value for product design, which could save research and development cost and development cycle.

Keywords: interior ballistic; simulation calculation; shroud separation device; separation speed

0 引言

随着武器系统对智能化、高精度、高毁伤的要求, 各国均在研发带有制导能力的武器系统。头罩分离装置作为保护导引头的关键部件之一, 广泛应用于各类红外制导、激光制导、电视制导等武器装备中, 主要作用是在非工作时随弹飞行, 使导引头免遭气动热和背景干扰, 工作时可靠分离抛射使导引头有效寻的。为了适应制导武器系统发展的需要, 国内外也在竞相研制相应的头罩分离装置。国内, 西北工业大学对低空、跨声速飞行状态下的飞行器头罩抛射设计了 2 种分离方案: 内冲压四分旋转式分离和四分平推式分离^[1], 其原理均为在气动力作用下的被动抛罩。国外主要有被动式分瓣抛罩、主动式分瓣抛罩、主动式破碎抛罩、主动式整体抛罩等^[2]。如应用于某复合制导空空导弹等领域的主动式整体抛罩, 主要用作飞行过程中保护雷达/红外导引头; 同样, 应用在标准 3 导弹上的主动式整体抛

罩, 在穿越大气层时用于防护气动热对导引头造成的影响。纵观国内外, 国外对头罩的研制相对成熟, 抛罩种类相对较多, 国内尚未见主动式整体抛罩的报道。笔者研究的某头罩分离装置为一主动式整体抛罩, 用于某制导火箭弹导引头的保护。该头罩分离抛射过程较为复杂, 涉及起始固定螺钉的剪断解锁、头罩壳体轴向运动、头罩壳体止动、头罩分离装置整体轴向飞出、头罩分离装置整体侧向抛射。在设计之初, 如果单纯依靠实验确定设计参数势必消耗大量产品, 而将仿真计算引入产品设计中, 可节省大量的人力、物力、财力。笔者通过内弹道和运动学分析, 建立内弹道和分离过程数学模型, 并进行仿真计算, 得到内弹道 $p-t$ 曲线和轴、径向分离速度, 解决了头罩分离抛射过程中计算复杂的问题。

1 工作过程和物理模型

某头罩分离装置及作用前后的分离姿态如图 1

收稿日期: 2019-09-26; 修回日期: 2019-10-21

作者简介: 王海清(1984—), 男, 天津人, 硕士, 工程师, 从事火工品技术研究。E-mail: whq800810@163.com。

所示。其工作过程为：当头罩分离装置受到电流激发后，电发火件开始点火，点火药燃烧，再点燃推进剂主装药。主装药燃烧产生高压燃气，当燃烧室内压力到达预设压力后，将拉断螺钉剪断，实现头罩与火箭弹体的解锁分离，头罩壳体失去束缚继续运动到达止位点后，碰撞到止动螺钉后停止相对运动，将动量传递给整个头罩，使头罩以一定的速度与火箭弹体分离，头罩分离装置整体轴向飞出。头罩分离装置的壳体上设计有一侧喷管，当头罩壳体运动到达止位点后，侧喷管露出，内部燃气通过侧喷管向外喷出，为头罩分离装置提供侧向推力并到达一定的速度，实现与火箭弹体的侧向分离。该头罩分离装置主要工作原理借鉴小型火箭发动机，选用的点火药为硼-硝酸钾，主装药为改性双基推进剂。由于该火箭结构尺寸小，燃烧室的长径比小，工作时间短，完全可以忽略气体参数在轴向上的分布；因此，可以采用零维内弹道数学模型建模，而分离过程采用经典运动学方程建模。

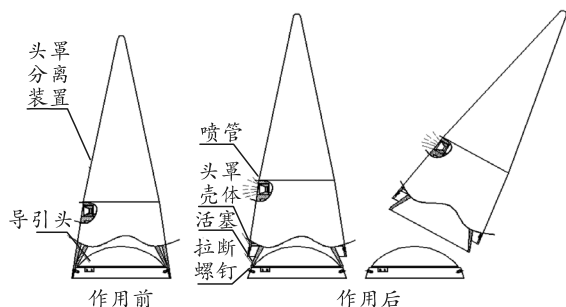


图 1 头罩分离装置作用前后

1.1 基本假设

- 1) 拉断螺钉瞬时脆性断裂。
- 2) 不考虑点火药的燃烧过程，认为点火药燃气瞬间烧完充满燃烧室。
- 3) 燃烧室的推进剂主装药瞬间同时点燃，药柱满足几何燃烧定律，燃烧速度是燃烧室压强的函数。
- 4) 燃烧室的喷孔堵帽在达到预定压力后瞬间破裂，只有燃烧生成的气体从燃烧室流出，且流动在足够小的时间内是稳定的等熵流动。
- 5) 不考虑喷孔的位置，只考虑喷孔的面积。
- 6) 燃气服从诺贝尔方程，组分冻结。
- 7) 热散失和次要功模型。热散失、火药气体运动功等各种形式的次要功用次要功计算系数进行修正^[3]。

1.2 数学模型

头罩分离装置从点火到分离抛射共经历 3 个过程，即拉断螺钉剪断过程、头罩壳体运动过程、头

罩分离装置整体侧抛过程。

1.2.1 拉断螺钉剪断过程

拉断螺钉剪断过程包含电发火件接受电流信号起爆、点燃点火药和推进剂主装药。点火药完全燃烧，推进剂部分燃烧，产生燃气压强将拉断螺钉剪断。此过程未有燃气流出，为密闭定容腔燃气膨胀做功过程。

1) 燃烧速度。

该推进剂主装药的燃烧速度是压力的函数：

$$r = 4.764 \times 10^{-5} \times p^{0.411} \quad (1)$$

式中： r 为燃烧速度，m/s； p 为燃烧室压强，Pa。

2) 燃气生成规律。

该主装药为管状装药，结构如图 2 所示。

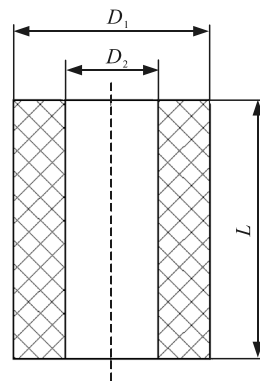


图 2 头罩分离装置主装药结构

主装药燃烧遵从几何燃烧定律，任意时刻的燃烧状态为：

$$\begin{aligned} d_1 &= D_1 - 2rdt, \\ d_2 &= D_2 + 2rdt, \\ l_1 &= L - 2rdt. \end{aligned} \quad (2)$$

式中： D_1 为主装药外径，m； D_2 为主装药内径，m； L 为主装药长度，m； d_1 为主装药燃烧到任意时刻的外径，m； d_2 为主装药燃烧到任意时刻的内径，m； l_1 为主装药燃烧到任意时刻的长度，m。

任意时刻燃面方程为：

$$\frac{dS}{dt} = \pi(d_1 + d_2)l_1 + \frac{1}{2} \times \pi(d_1^2 - d_2^2) \quad (3)$$

式中 S 为燃烧面积， m^2 。

任意时刻的燃气生成量：

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \rho_p S r \quad (4)$$

式中： ω_r 为已燃主装药的质量，kg； ρ_p 为主装药密度， kg/m^3 。通常燃气生成量用对值表示：

$$\psi = \frac{\omega_r}{\omega} \quad (5)$$

所以:

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{1}{\omega} \frac{d\omega_r}{dt} \quad (6)$$

式中: ω 为主装药总质量, kg; ψ 为燃气生成相对量。又 $\omega = \rho_p V$, 代入式(6)得:

$$d\psi/dt = Sr/V \quad (7)$$

式中 V 是主装药总体积, m^3 。

3) 燃烧室的燃气状态方程^[4]:

$$\begin{aligned} pV_\psi &= f\omega\psi + f_b\omega_b, \\ V_\psi &= V_0 - \frac{\omega}{\rho_p}(1-\psi) - \alpha\omega\psi. \end{aligned} \quad (8)$$

式中: V_ψ 是药室的自由容积, m^3 ; V_0 为燃烧室容积, m^3 ; α 是燃气的余容, m^3/kg ; f 为主装药火药力, J/kg ; f_b 为点火药火药力, J/kg ; ω_b 为点火药质量, kg。

将上述数学模型整理为:

$$\left. \begin{aligned} r &= 4.764 \times 10^{-5} p^{0.411} \\ \frac{dS}{dt} &= \pi(d_1 + d_2)l_1 + \frac{1}{2} \times \pi(d_1^2 - d_2^2) \\ d\psi/dt &= Sr/V \\ pV_\psi &= f\omega\psi + f_b\omega_b \\ V_\psi &= V_0 - \frac{\omega}{\rho_p}(1-\psi) - \alpha\omega\psi \\ d_1 &= D_1 - 2rdt \\ d_2 &= D_2 + 2rdt \\ l_1 &= L - 2rdt \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

1.2.2 头罩壳体运动过程

头罩壳体运动过程为拉断螺钉剪断后, 头罩壳体失去束缚开始运动直至到达止动螺钉止位点时, 壳体与活塞保持相对静止, 此过程点火药已经燃完, 仅主装药燃烧, 主装药燃烧规律同 1.2.1。该过程同样没有燃气流出, 为燃气密闭变容腔做功过程。此过程到达止位点后, 壳体轴向速度达到最大, 壳体碰撞到活塞, 通过动量守恒, 将速度传递给整个头罩分离装置^[5]。

1) 运动方程。

头罩壳体运动过程是个变加速过程, 速度方程为:

$$dl/dt = v. \quad (10)$$

加速度方程为

$$dv/dt = pS_1/M. \quad (11)$$

式中: v 为头罩壳体运动速度, m/s; l 为任意时刻头罩壳体运动行程, m; S_1 为燃气作用在活塞上的有效作用面积, m^2 ; M 为头罩壳体质量, kg。

2) 动量守恒方程。

头罩壳体碰撞到活塞止位点后止动, 将速度传递给整个头罩分离装置, 该过程动量守恒, 方程为

$$Mv = (M + m)v_1. \quad (12)$$

式中: v_1 为整个头罩分离装置的轴向运动速度, m/s; m 为活塞质量, kg。

将上述数学模型整理为:

$$\left. \begin{aligned} r &= 4.764 \times 10^{-5} p^{0.411} \\ \frac{dS}{dt} &= \pi(d_1 + d_2)l_1 + \frac{1}{2} \times \pi(d_1^2 - d_2^2) \\ d\psi/dt &= Sr/V \\ pV_\psi &= f\omega\psi + f_b\omega_b \\ V_\psi &= V_0 - \frac{\omega}{\rho_p}(1-\psi) - \alpha\omega\psi \\ d_1 &= D_1 - 2rdt \\ d_2 &= D_2 + 2rdt \\ l_1 &= L - 2rdt \\ dv/dt &= pS_1/M \\ dl/dt &= v \\ Mv &= (M + m)v_1 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

1.2.3 头罩分离装置侧抛过程

头罩分离装置侧抛过程为头罩壳体到达止位点与活塞运动相对静止, 整体获取轴向最大速度后, 侧喷管露出, 燃气喷出, 喷出的燃气对整个头罩分离装置提供侧向推力, 头罩实现侧抛, 直至推进剂主装药燃完, 获得侧向最高速度。

1) 燃气流出方程。

选取缩放喷管的喉部截面计算喷管的流量。根据外界压强与燃烧室燃气的静压比, 在喷管喉部截面处的流动分 2 种情形: ① 燃烧室压强很大, 该比值小于临界压力比时, 是音速流动; ② 燃烧室压强较小时, 该比值大于临界压力比, 是亚音速流动。流量的计算公式^[6-7]为:

$$\frac{d\eta}{dt} = \begin{cases} \frac{\phi A_p p}{\omega \sqrt{f}} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \sqrt{k} & \frac{p_a}{p} \leq \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \\ \frac{\phi A_p p}{\omega \sqrt{f}} \left\{ \frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{p_a}{p} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_a}{p} \right)^{\frac{k+1}{k}} \sqrt{k} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} & \frac{p_a}{p} > \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \end{cases} \quad (14)$$

式中: η 是流出的相对燃气质量; ϕ 是流量损失系数,

一般在 0.92~0.98 之间； A_1 是喷管截面积， m^2 ； p_a 是外界环境压力，Pa； k 是燃气的绝热指数。

2) 燃烧室的燃气状态方程^[6-7]。

与之前不同的是，该过程不再是密闭容腔药剂燃烧过程，而是有燃气流出，气体状态方程为：

$$pV_\psi = f\omega(\psi - \eta) + f_b\omega_b,$$

$$V_\psi = V_0 - \frac{\omega}{\rho_p}(1 - \psi) - \alpha\omega(\psi - \eta). \quad (15)$$

3) 推力方程。

整个头罩分离装置在燃气作用下，产生侧推力实现侧向抛射，侧推方程^[8]为

$$F = C_F p A_1. \quad (16)$$

式中： F 为燃气产生的侧推力，N； C_F 为推力系数。

4) 速度方程。

该过程推力是变化的，因此，是一个变加速过程，速度方程为

$$\frac{dv_2}{dt} = \frac{F}{M + m}. \quad (17)$$

式中 v_2 为整个头罩分离装置的径向侧抛速度，m/s。

将上述数学模型整理为：

$$\left. \begin{aligned} r &= 4.764 \times 10^{-5} p^{0.411} \\ \frac{dS}{dt} &= \pi(D_1 + D_2)l_1 + \frac{1}{2} \times \pi(D_1^2 - D_2^2) \\ \frac{d\psi}{dt} &= \frac{Sr}{V} \\ \frac{d\eta}{dt} &= \frac{\varphi A_1 p}{\omega \sqrt{f}} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \sqrt{k} \quad \frac{p_a}{p} \leq \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \\ \frac{d\eta}{dt} &= \frac{\varphi A_1 p}{\omega \sqrt{f}} \left\{ \frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{p_a}{p} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_a}{p} \right)^{\frac{k+1}{k}} \sqrt{k} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \\ \frac{p_a}{p} &> \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \\ pV_\psi &= f\omega(\psi - \eta) + f_b\omega_b \\ V_\psi &= V_0 - \frac{\omega}{\rho_p}(1 - \psi) - \alpha\omega(\psi - \eta) \\ d_1 &= D_1 - 2rdt \\ d_2 &= D_2 + 2rdt \\ l_1 &= L - 2rdt \\ F &= C_F p A_1 \\ \frac{dv_2}{dt} &= \frac{F}{M + m} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

1.3 数值计算

对上述 3 个方程组进行编程计算，选取时间步长 dt 为 0.001 s，临界点火压强赋初值 $p=3$ MPa。计算流程如图 3 所示。

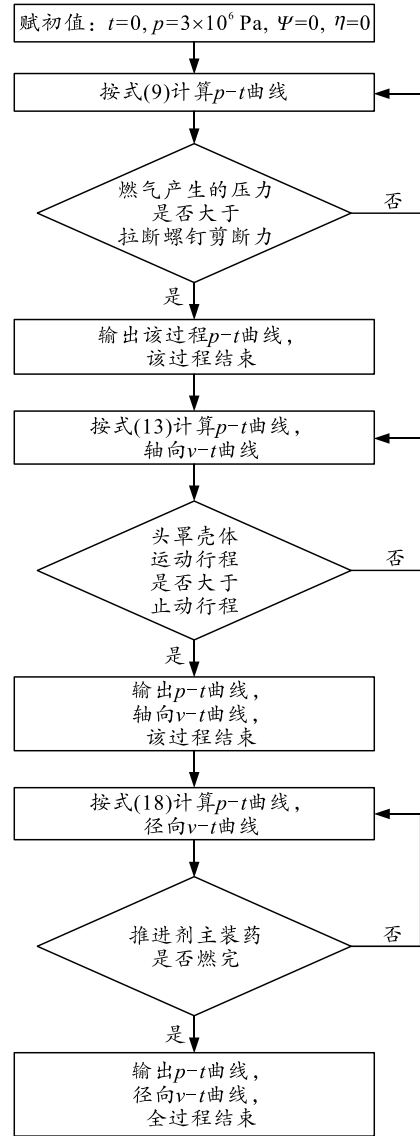


图 3 数值计算流程

2 计算结果与讨论

2.1 内弹道仿真计算结果

如图 4 所示，将内弹道仿真计算曲线与实验曲线进行比对。从图中可以看出：实验曲线螺钉剪断压强峰峰值时间相对仿真曲线滞后 2~3 ms，原因是点传火过程必然存在点传火时间延迟，且实际中螺钉拉断不是瞬时的脆性断裂，延长了断裂时间。实验曲线较仿真曲线下降段明显，原因是喷管存在烧蚀现象，孔径增大，导致压降较快。二者总体趋势基本吻合，仿真结果合理、可信。

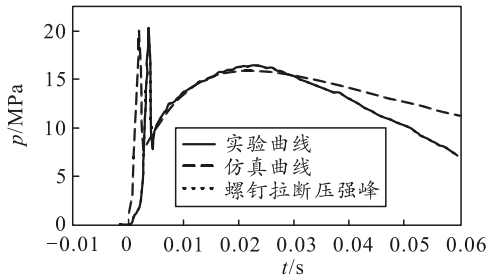


图 4 内弹道仿真计算与实验 $p-t$ 曲线对比

2.2 头罩壳体轴向分离速度仿真计算结果

拉断螺钉剪断后,头罩壳体作变加速直线运动,直至运动到止动点后和活塞产生碰撞,碰撞过程动量守恒,最终和活塞保持相对静止,整体以共同速度飞出。仿真计算结果如图 5 所示。从图中可以看出:头罩壳体最终速度为 33.7 m/s,依动量守恒头罩分离装置最终飞出速度为 22.9 m/s,而实际地面实验,高速摄影测出的速度为 21.3 m/s,仿真计算结果准确。

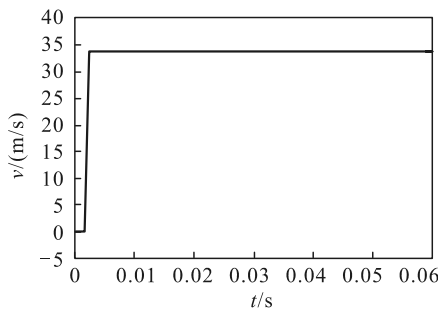


图 5 头罩壳体轴向速度仿真计算 $v-t$ 曲线

2.3 头罩分离装置径向速度仿真计算

头罩壳体运动到止动点后,喷管露出,燃气喷出,产生侧推力,在燃气推力作用下头罩分离装置做径向变加速运动,直至火药燃完,径向速度达到最大。仿真计算结果如图 6 所示。从图中可以看出:头罩分离装置最终速度为 14.3 m/s,而实际地面实验,高速摄影测出的速度为 14.5 m/s,仿真计算结果准确。

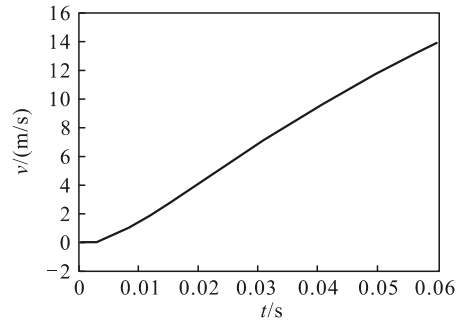


图 6 头罩分离装置径向速度仿真计算 $v-t$ 曲线

3 结束语

笔者通过建立数学模型对某头罩分离装置内弹道和轴、径向分离速度进行仿真计算,计算结果与地面实验结果基本吻合,可以为相关头罩分离装置产品设计提供理论参考。将仿真计算运用到产品设计中,可以通过计算结果获取设计参数,节约研发成本、缩短研制周期。

参考文献:

- [1] 范庆志, 孙秦. 飞行器头罩分离技术及设计方案分析研究[J]. 机械设计与制造, 2008(9): 8-10.
- [2] 张科, 陈之光, 赵玉印. 国外高速导弹的头罩防护技术[J]. 红外与激光工程, 2013(1): 154-158.
- [3] 刘赞, 王浩, 陶如意, 等. 点火过程对小型固体火箭发动机内弹道影响[J]. 含能材料, 2013, 21(1): 75-79.
- [4] 张柏生, 李云娥. 火炮与火箭内弹道原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996: 55-57.
- [5] 崔魁文, 米双山, 高敏. 药型罩锥角对聚能杆式侵彻体影响的数值分析[J]. 兵工自动化, 2018, 37(11): 67-71.
- [6] 王浩. 子母弹内燃式气囊抛撒模型及计算机仿真[J]. 兵工学报, 2001, 22(2): 178-181.
- [7] 杨正才, 廖昕, 江坤, 等. 大口径超短身管高低压发射装置内弹道过程的数值模拟与试验研究[J]. 火炸药学报, 2011, 34(5): 78-81.
- [8] 杨月诚. 火箭发动机理论基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010: 29-37.