

文章编号: 1001- 2486(2009) 01- 0021- 05

固体发动机尾部点火性能影响因素分析*

樊超, 张为华

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 采用准一维非定常数值模型, 对某小型固体发动机尾部点火瞬态过程进行性能预示; 以预示结果为基础, 对尾部点火性能主要影响因素进行了参数研究。研究结果可为尾部点火器和喷管堵盖的点火匹配性设计提供有益指导。

关键词: 固体火箭发动机; 尾部点火; 点火瞬态; 尾部点火器

中图分类号: V435 **文献标识码:** A

Parameters Analysis of Ignition Transient in Solid Rocket Motor with Rear Igniter

FAN Chao, ZHANG Wei-hua

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

Abstract: With a quasi 1-D unsteady flow model, a numerical simulation is completed to analyze the ignition transient in a small solid rocket motor activated by a rear igniter. Based on the simulation results, a detailed parameter analysis is performed for some key factors which may heavily affect the performance of ignition transient. The results can provide a useful guide for the matching design between the rear igniter and the nozzle seal.

Key words: solid rocket motor; aft-end ignition; ignition transient; rear igniter

尾部点火器以安装维修方便、可提高发动机质量比等优点, 广泛应用于各种中小型战术发动机。与头部点火器相比, 尾部点火器的燃气喷射方式和流动特征都不相同。借鉴头部点火设计经验进行尾部点火设计与试验结果差异较大^[1-4]。而通过大量实验来确定点火器和喷管堵盖的点火匹配性设计存在耗时长, 研制经费高的局限。因此, 在借助头部点火设计经验的基础上, 通过数值模拟尾部点火瞬态过程, 对不同设计条件下发动机点火延迟、初始压强峰等点火性能进行预先了解十分必要。

本文针对某固体发动机的尾部点火问题, 采用准一维非定常数值仿真模型, 在完成对尾部点火瞬态过程正确预示的基础上, 对影响尾部点火性能的几个主要因素, 如点火药量、装药初温、喷管堵盖破坏压强等, 进行了详细的参数研究, 以期对点火器和喷管堵盖的点火匹配性设计提供有益的指导。

1 控制方程和数值方法

考虑某尾部点火固体发动机, 主装药为贴壁浇注三星孔药型、端面限燃, 点火药盒采用可消融赛璐珞, 利用支架固定在发动机装药末端, 如图 1 所示。

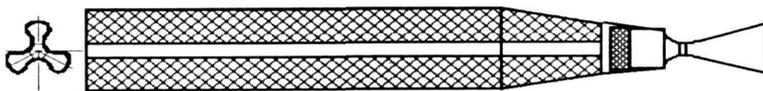


图 1 某尾部点火固体发动机结构示意图

Fig. 1 Structure sketch of solid rocket motor

将燃烧室、点火器、喷管作为一体, 对发动机点火瞬态性能进行仿真预示。假定燃气为混合均匀的

* 收稿日期: 2008- 12- 06

作者简介: 樊超(1979-), 女, 博士生。

理想气体,考虑壁面摩擦、热传递、推进剂加质和点火燃气源作用,得到守恒形式的质量、动量和能量守恒方程组,写成矩阵形式为

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial (F - F_v)}{\partial x} = S_{lg} + S_B + S_w \quad (1)$$

其中,

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho e \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ (\rho e + p)u \end{bmatrix} \quad F_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{4}{3}\mu \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{4}{3}\mu u \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \end{bmatrix}$$

$$S_{lg} = \frac{1}{A} \begin{bmatrix} u_{ig}^2(t) \\ u_{ig}^2(t) \\ \rho u_{ig}^2(t) \\ u_{ig}^2(t) h_{ig} \end{bmatrix} \quad S_B = \frac{1}{A} \begin{bmatrix} r_{gr}^2 \rho_{gr} s \\ r_{gr}^2 \rho_{gr}^2 s \cdot \text{tg} \theta / \rho \\ r_{gr}^2 \rho_{gr} s \cdot h_p \end{bmatrix} \quad S_w = \begin{bmatrix} 0 \\ -\tau_w \\ -q_w \end{bmatrix}$$

式中, $u_{ig}^2(t)$ 为 t 时刻点火质量流率,其他各符号定义参考文献[5]。

1.1 封闭方程

为封闭控制方程组,需要提供热传递、表面温度、摩擦力和燃速等辅助计算模型。

推进剂点燃前,点火燃气通过对流和辐射方式向推进剂表面传递的热流率为

$$q_w = h_c (T_s - T_{aw}) + h_r (T_s - T) \quad (2)$$

式中各符号定义及计算方法参考文献[6]。

推进剂着火准则采用临界温度准则,即认为装药表面温度大于推进剂临界着火温度时,推进剂点燃。假设推进剂内温度分布近似为 x 的三次多项式,采用近似模型能量积分法^[7],得到确定装药表面温度的一阶常微分方程

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{4q_w}{3} \frac{\left(\frac{q_w}{k_p} \right)^3}{2(T_s - T_0) \left(\frac{q_w}{k_p} \right) - \frac{\partial \left(\frac{q_w}{k_p} \right)}{\partial T_s} \cdot (T_s - T_0)^2} \quad (3)$$

推进剂点燃前,点火燃气与装药表面的摩擦力采用准稳态壁面剪切应力表达式

$$\tau_w = \frac{f}{2} \rho u^2 \frac{u}{|u|} \quad (4)$$

其中摩擦系数 f 采用 Colebrook 粗糙圆管湍流摩擦系数公式^[8]。推进剂点燃后,由于表面加质作用,认为摩擦力为零。

推进剂燃速采用考虑初温敏感性和侵蚀燃烧效应的燃速模型

$$\begin{cases} r_0 = r_{rf} \left(\frac{p}{p_{rf}} \right)^n e^{\alpha_r (T_0 - T_{st})} \\ r \geq r_0 + \alpha \left(\rho u \right)^{0.8} D_h^{-0.2} e^{-\beta \rho_p / (\rho u)} \end{cases} \quad (5)$$

式中 α, β 为经验系数。

1.2 数值计算方法

气相控制方程采用 Van Leer 矢量通量分裂方法和时间、空间都具有二阶精度的 Warming-bean 预估—校正格式离散;瞬态燃速模型采用二分法迭代求解;推进剂表面温度模型采用四阶龙格—库塔法求解。

1.3 初始和边界条件

发动机头部为固壁边界,喷管出口边界根据堵盖打开和封闭情况分别按固壁和开放边界处理,开放边界时,亚声速出口压强提背压条件,超声速出口所有参数一阶外推。

流场初始条件按实际初始状态给出。

2 数值模拟验证

为验证上述仿真模型和程序代码,对图1所示固体发动机点火过程进行数值模拟,并将仿真结果与发动机试验结果进行比较。根据点火器模拟自由容积试验压强时间曲线,假设点火器流量与压强成正比(图2),计算得到点火器质量流率变化规律^[5],将其作为发动机点火质量源。图3给出了计算条件取环境温度20℃、点火药量5.0g、喷管堵盖破坏压强5.0MPa、推进剂临界着火温度750K,发动机头部压强时间曲线计算值与相同条件下发动机静态试验测量数据的比较结果。由图3可见,发动机头部压强计算值与试验结果基本一致,说明了仿真模型和程序代码的有效性。

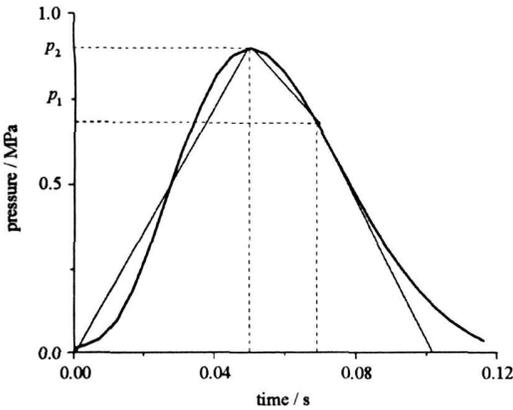


图2 点火器模拟自由容积压强时间曲线
Fig.2 Igniter experiment pressure vs. time

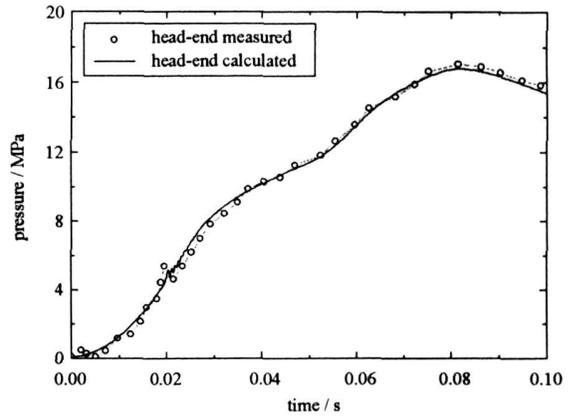


图3 压强时间曲线计算值与试验测量值比较
Fig.3 comparison of pressure variation between calculated results and experiment measured results

3 点火性能影响因素分析及结果

点火药量、装药初温和喷管堵盖破坏压强是影响点火性能的主要因素。以图3点火瞬态计算参数和仿真结果作为基准,对上述影响因素及其作用进行参数研究。为方便分析,定义几个点火过程特征参数,见表1。其中点火延迟时间 t_1 、火焰传播时间 t_2 和初始压强峰值 p_{max} 是本文主要考查指标。

表1 点火过程特征参数定义

Tab.1 Definition of character parameters in ignition process

符号	定义
t_1	点火延迟时间,从发出点火信号至推进剂表面第一点点燃之间的时间间隔
p_1	t_1 对应时刻发动机头部压强
t_2	从装药表面第一点点燃至推进剂全表面点燃之间的时间间隔
p_2	装药全表面点燃时刻发动机头部压强
p_{max}	初始压强峰值,发动机达准稳态工况前的最大压强
$t_{p_{max}}$	p_{max} 对应时刻

3.1 点火药量对尾部点火性能的影响

其他条件相同,仅点火药量变化时,仿真得到点火过程各特征参数见表2。由表2可知,随点火药量增加, t_1 和 t_2 呈减小趋势, p_{max} 呈递增趋势。与 t_1 和 t_2 变化量相比, p_{max} 增加的幅度最小。原因是推进剂第一点点燃发生在堵盖打开前,点火药量对点火延迟时间和堵盖打开前的火焰传播过程有较大影响;而堵盖打开后,较大部分点火燃气直接从喷管流出,对燃烧室建压过程不作贡献,削弱了点火药量对初始压强峰值的影响,这是与头部点火方式的一大不同。点火药量分别取4.5g、5.0g和5.5g时,发动机

头部压强时间曲线如图4所示。

表2 不同点火药量条件下点火特征参数计算值

Tab.2 Values of ignition character parameters with different igniter powder mass

w_{ig}/g	t/ms	p_1/MPa	t_2/ms	p_2/MPa	t_{pmax}/ms	p_{max}/MPa
4.50	21.185	4.5366	66.341	15.6832	91.142	15.7993
4.75	20.253	4.3483	64.737	15.9981	88.024	16.0817
5.00	19.415	4.2712	60.748	16.7313	81.742	16.7577
5.25	18.650	4.1838	57.587	17.3882	76.863	17.3922
5.50	17.953	4.1130	55.717	17.8715	73.676	17.8715

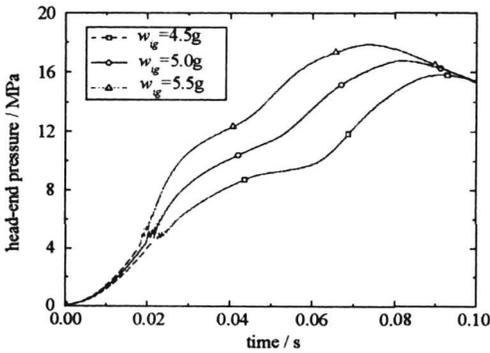


图4 不同点火药量条件下头部压强时间曲线
Fig.4 Head-end pressure vs. time with different igniter powder mass

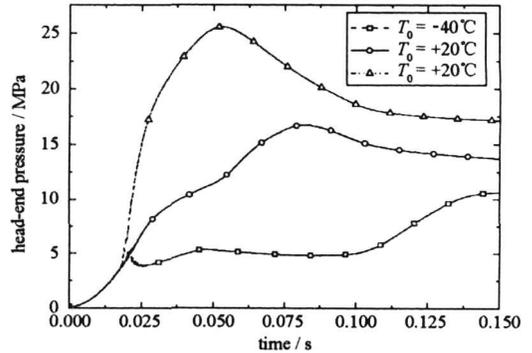


图5 不同装药初温条件下头部压强时间曲线
Fig.5 Head-end pressure vs. time with different initial grain temperature

3.2 装药初温对尾部点火性能的影响

其他条件相同,仅推进剂初温不同时,仿真得到点火过程各特征参数见表3。由表3可知,随着推进剂初温升高, t_1 和 t_2 缩短, p_{max} 上升。相比较而言, t_1 减小幅度较小, t_2 减小幅度和 p_{max} 增加的幅度都较大。可见,装药初温变化对于尾部点火性能的影响,不仅在于改变了达到临界点火温度所需跨越的温度范围,更为重要的是初温改变了推进剂的燃速,从而改变了推进剂表面加质流率,使得装药表面火焰传播速率和燃烧室压强发生较大变化。装药初温分别取 -40°C 、 $+20^\circ\text{C}$ 和 $+60^\circ\text{C}$ 时,发动机头部压强时间曲线如图5所示。

表3 不同装药初温条件下点火特征参数计算值

Tab.3 Values of ignition character parameters with different initial grain temperature

$T_0/^\circ\text{C}$	t/ms	p_1/MPa	t_2/ms	p_2/MPa	t_{pmax}/ms	p_{max}/MPa
-40	21.537	5.1043	115.271	10.1206	150.580	10.5935
-20	21.072	4.9865	103.835	11.3300	138.766	11.9030
20	19.415	4.2712	60.748	16.7313	81.742	16.7577
40	18.603	3.9894	46.802	20.5671	66.644	20.5880
60	17.802	3.7132	34.435	25.5433	52.938	25.5519

3.3 喷管堵盖破坏压强对尾部点火性能的影响

其他条件相同,仅喷管堵盖破坏压强不同时,仿真得到点火过程各特征参数见表4。由表可知,堵盖破坏压强在一定范围内变化时, t_1 和 t_2 随之增大而减小, p_{max} 随之增大而增大。但当堵盖破坏压强大于 4.5MPa 时, t_1 不再减小,说明堵盖处燃气压强达 4.5MPa 时装药表面第一点已经点燃。同样地,对 t_2 产生影响的堵盖破坏压强也存在一个上限值,该值使得堵盖破坏瞬间火焰传播过程刚好结束。此外由

于尾部点火的特殊性,要保证装药顺利点燃,喷管堵盖能够承受的压力载荷应该比相同条件下采用头部点火方式时高,否则点火燃气的过早流失,可能导致推进剂不能正常预热并点燃。如在本文计算条件下,当堵盖破坏压强取4.5MPa时,发动机头部压强时间曲线较之堵盖破坏压强取5.0MPa时已经发生了较大变化,如图6所示,说明火焰传播过程受到较大影响。

表4 不同喷管堵盖破坏压强条件下点火特征参数计算值

Tab.4 Values of ignition character parameters with different seal opening pressure

p_{ncr}/MPa	t/ms	p_1/MPa	t_2/ms	p_2/MPa	$t_{p_{max}}/\text{ms}$	p_{max}/MPa
3.5	19.951	2.6112	102.539	14.1642	137.088	15.2177
4.0	19.561	4.0673	83.636	15.0939	106.772	15.3550
4.5	19.415	4.2712	76.142	15.2825	100.017	15.4619
5.0	19.415	4.2712	60.748	16.7313	81.742	16.7577
5.5	19.415	4.2712	56.592	17.4734	77.515	17.4959
6.0	19.415	4.2712	53.352	17.9477	73.525	17.9528

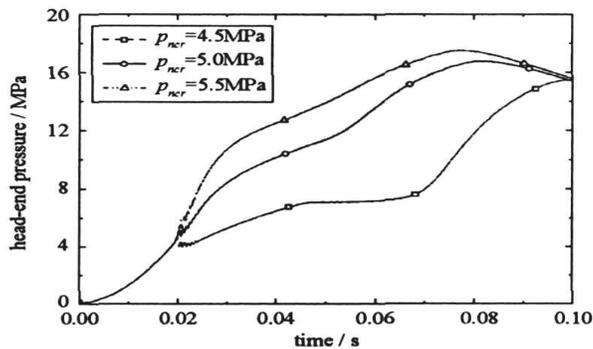


图6 不同堵盖破坏压强条件下发动机头部压强时间曲线

Fig.6 Head-end pressure vs. time with different seal opening pressure

4 结论

(1) 点火药量、装药初温、喷管堵盖破坏压强都对尾部点火性能存在较大影响。其影响趋势与头部点火方式相似。

(2) 与头部点火相比,采用尾部点火方式时,点火药量的变化对初始压强峰值的影响较小;此外,尾部点火时喷管堵盖必须能承受足够高的压力载荷,以保证堵盖破坏后推进剂能顺利着火。

(3) 根据不同设计条件下的点火瞬态性能预示结果和点火性能参数设计指标,对设计方案进行筛选,可为点火器和喷管堵盖的匹配性设计提供早期设计指导和性能评价方法。

参考文献:

- [1] 宋明德,叶定友. 几种典型的尾部点火器[J]. 推进技术, 1992, 4(2): 72-76.
- [2] 张秋芳,王宁飞,田维平. 小型固体火箭发动机尾部点火设计与实验[J]. 火炸药学报, 2006, 29(2): 51-54.
- [3] 张秋芳,李越森,胡乃合. 边界条件对尾部点火性能的影响[J]. 火炸药学报, 2002(2): 50-56.
- [4] 屠小昌,张春英,等. 大长细比小型固体发动机后点火试验研究[J]. 固体火箭技术, 2001, 24(1): 68-72.
- [5] 方丁酉,张为华,杨涛. 固体火箭发动机内弹道学[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 1997.
- [6] Luke G D. A Study of the Ignition Transient of Large Aspect Ratio Solid Rocket Motor[D]. University of California, 1996.
- [7] Ozisik M N. Heat Conduction[M]. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1980: 335-352.
- [8] Welty J R, Wicks C E, et al. Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer[M]. Fourth Edition. John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001.