

文章编号: 1000-8055(2009)10-2379-05

固体火箭发动机的一种点火药量估算方法

樊超, 张为华, 王中伟

(国防科学技术大学 航天与材料工程学院, 长沙 410073)

摘 要: 针对传统经验公式估算点火药量存在的不足, 从固相点火理论出发, 推导得到固体发动机点火药量的计算公式. 对不同配置的固体火箭发动机进行点火药量验算的结果表明, 该公式估算的点火药量与发动机真实试验药量基本一致, 估算精度明显优于传统经验公式, 且公式通用性较好.

关 键 词: 固体火箭发动机; 点火药量估计; 点火理论; 固相点火; 经验公式; 点火器设计
中图分类号: V435 **文献标识码:** A

Method of amorce mass estimation for solid rocket motor

FAN Chao, ZHANG Wei hua, WANG Zhong wei

(Institute of Aerospace and Material Engineering,
National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to break through the limitation of traditional engineering empiric formulas for amorce mass estimation, a method was introduced based on the hypothesis of solid phase ignition. The formula was used to estimate the amorce mass for solid rocket motor in different concepts and configurations. The results indicate the estimations agree well with the experiment values. The results show that this method is superior to classic engineering formulas in estimation precision and applicability.

Key words: solid rocket motor; amorce mass estimation; ignition theory;
solid phase ignition; empiric formulas; igniter design

点火器传统设计方法是通过经验公式估算药量, 再通过验证性试验最后确定药量. 经验公式是试验结果的总结, 存在许多局限^[1], 如通用性差, 药量估算范围太大, 仍需大量试验才能确定药量的适中值. 并且多数经验公式只考虑了影响发动机点火性能的一种或几种因素, 经验参数的选择依赖于设计人员的设计经验, 计算结果误差较大. 为弥补上述不足, 本文从固相点火理论出发, 推导出一种固体发动机点火药量估算公式, 对不同类型、不同配置的固体发动机进行点火药量估算的结果表明, 该点火药量估算公式比传统经验公式具有更高的精度和更小的误差范围, 公式适用性强.

1 传统点火药量经验公式

用于估算点火药量的经验公式很多, 但主要基于头部点火设计, 不同的经验公式所考虑的主要因素不尽相同, 对计算结果影响很大. 表 1 列出了常用的点火药量估算公式及其使用条件^[2-3].

从表 1 可知, 点火容积 V_{fic} 和点火压强 p_{ig} 是主要考虑的因素. 而点火压强定义不明确, 取值依赖于设计人员的设计经验, 当主装药为双基或改性双基药时, 一般取 p_{ig} 略大于主装药推进剂的点火临界压强, 或取为发动机平均工作压强的 30% ~ 40%; 当主装药为复合推进剂时, 一般取 1.5 ~ 3.0 MPa. 点火压强的不确定为点火药量估

收稿日期: 2008 10 14; 修订日期: 2008 12 15

作者简介: 樊超 (1979-), 女, 四川资中人, 博士生, 主要从事固体火箭发动机点火过程研究.

表 1 常用的点火药量估算公式

Table 1 Empiric formulas for amorce mass estimation

编号	经验公式	使用条件
A	$w_{\text{ig}} = 4.65 \times 10^{-2} A_p^{1.1} L_p^{0.72}$	点火药为黑火药,主药柱为双基推进剂.
B	$w_{\text{ig}} = 36.0 [A_{b0} A_t D_c / (\Delta L_p)]^{0.5}, \Delta = \frac{M_p}{V_c}$	点火药为黑火药,主药柱为多根管状双基推进剂.
C	$w_{\text{ig}} = 1.4 h_t \left[9.6 A_t \sqrt{A_b/A_t} + 5.7 V_{\text{ic}} \right],$ $h_t = 1.0 + 0.01 (20 - T_0)$	点火药为大粒 2 号黑火药,发动机主药柱为复合推进剂.
D	$w_{\text{ig}} = 0.95 \left(V_{\text{ic}} A_b A_p L_p \right)^{0.32}$	点火药为黑火药,根据点火发动机统计得到.
E	$w_{\text{ig}} = K \left(\frac{R}{1 - \theta} \right) \frac{V_{\text{ic}}}{R/M_{\text{ig}} T_{\text{ig}}}, K = 1.25 \sim 1.75$	点火药为黑火药或烟火剂,发动机主药柱可为双基推进剂、复合推进剂.
F	$w_{\text{ig}} = 9.6 \times 10^{-4} V_{\text{ic}} + 2.0 \times 10^{-5} A_t + 300$	点火发动机.
G	$w_{\text{ig}} = C_{\text{Dig}} A_t t_r, \quad t_r = V_{\text{ic}} / (\Gamma c_i^* A_t)$	点火发动机, C_{Dig} 一般取 $7 \sim 21 \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$.

算带来极大误差.

实际影响点火性能的因素众多,如推进剂性能、点火器工作性能、发动机结构和环境条件等均对点火性能产生不同程度的影响,这些因素相互关联,在不同条件下所起的作用相差很大.因此上述经验公式均带有不同程度的局限性.

2 一种点火药量估算方法

根据固相点火机理^[4],点火所导致的化学反应仅在初始物质被加热的那一层(即表面附近)中进行,加热层的厚度远小于物体表面曲率半径和物体大小,且点火延迟只与外界热流及物质导热性能有关,与气相压力、氧化剂浓度无关.

考虑固体发动机点火过程,将推进剂看作半无限大平板,假设表面处只存在点火药燃气的对流传热,则描述推进剂点燃前传热过程的一维非稳态热传导方程及其定解条件为^[5]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_p \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \tag{1}$$

$$-\lambda_p \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = h_c (T_{\text{ig}} - T)$$
$$T(\infty, t) = T_0 \tag{2}$$
$$T(y, 0) = T_0$$

式中 λ_p, α_p 分别为推进剂导热系数和热耗散系数,且 $\alpha_p = \lambda_p / c_p \rho_p$, c 为推进剂比热容, ρ_p 为推进剂密度; T_{ig} 为点火药燃气温度; T_0 为推进剂初温; $T(y, t)$ 为推进剂内温度分布,是距推进剂表面距离 y 和时间 t 的函数; h_c 为点火药燃气与推进剂表面之间的表面传热系数.

假设 h_c 为常数,利用拉氏变换,得到装药表面温度 $T(0, t)$ 随时间的变化关系

$$T(0, t) = T_0 + (T_{\text{ig}} - T_0) \left[1 - e^{\frac{h_c^2 \alpha_p t_{\text{ig}}}{\lambda_p^2}} \operatorname{erfc} \left(\frac{h_c \sqrt{\alpha_p t}}{\lambda_p} \right) \right] \tag{3}$$

推进剂着火准则取临界温度准则,则当装药表面温度达临界点燃温度 T_{cr} 时,点火延迟时间 t_{ig} 与 T_{cr} 的对应关系为

$$T_{\text{cr}} = T_0 + (T_{\text{ig}} - T_0) \left[1 - e^{\frac{h_c^2 \alpha_p t_{\text{ig}}}{\lambda_p^2}} \operatorname{erfc} \left(\frac{h_c \sqrt{\alpha_p t_{\text{ig}}}}{\lambda_p} \right) \right] \tag{4}$$

考虑到通常情况下,式(4)中的 $\frac{h_c \sqrt{\alpha_p t_{\text{ig}}}}{\lambda_p} \ll 1$,故

$$1 - e^{\frac{h_c^2 \alpha_p t_{\text{ig}}}{\lambda_p^2}} \operatorname{erfc} \left(\frac{h_c \sqrt{\alpha_p t_{\text{ig}}}}{\lambda_p} \right) \approx \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{h_c \sqrt{\alpha_p t_{\text{ig}}}}{\lambda_p} \tag{5}$$

将式(5)代入式(4)得到点火延迟时间 t_{ig} 表达式

$$t_{\text{ig}} = \frac{\pi}{4} \frac{\lambda_p c_p \rho_p}{h_c^2} \left(\frac{T_{\text{cr}} - T_0}{T_{\text{ig}} - T_0} \right)^2 \tag{6}$$

表面传热系数 h_c 取圆管湍流强迫表面传热系数经验关系式

$$h_c = \frac{\lambda}{D} Nu = b \frac{\lambda}{D} \left(\frac{\rho u D}{\mu} \right)^m Pr^n \tag{6}$$

式中 ρ, u, λ, μ 分别为来流密度、速度、导热系数和黏性系数; D 为圆管有效内径; Nu 为努塞尔数; Pr 为普朗特数; b, m, n 为经验参数.根据湍流强制对流传热研究结果^[6],湍流雷诺数指数 $m \approx 0.8, n \approx \frac{1}{3}$;传热经验系数 b 与点火器射流和发动机装药结构有关.

方程式(7)中, h_c 应是 $0 \sim t_{ig}$ 之间的平均值, 即

$$h_c = \frac{1}{t_{ig}} \int_0^{t_{ig}} b \frac{\lambda}{D} \left(\frac{\rho u D}{\mu} \right)^m Pr^n dt \tag{8}$$

在靠近点火器喷孔附近的装药位置, 如头部点火时的装药前端 $x = 0$ 处, $\lambda \approx \lambda_g$, $\mu \approx \mu_g$, 且

$$\dot{m}_{ig} \approx \rho_0 u_0 A_{p0} \tag{9}$$

式中 ρ_0, u_0, A_{p0} 分别为 $x = 0$ 处的气流密度、速度和通道面积; λ_g, μ_g 分别为点火燃气导热系数和黏性系数。

将式(9)代入式(8), 假设 λ_g, μ_g 为常数, 在 $x = 0$ 处有 $D = D_0, b = b_0$, 则

$$h_c = b_0 \frac{\lambda_g D_0^{m-1} Pr^n}{\left(\mu_g A_{p0} \right)^m} \frac{1}{t_{ig}} \int_0^{t_{ig}} \dot{m}_{ig}^m dt \tag{10}$$

将式(10)代入式(6), 得到计算装药前端点火延迟时间 t_{ig} 的方程

$$\frac{T_{cr} - T_0}{T_{ig} - T_0} = \frac{2b_0 \lambda_g D_0^{m-1} Pr^n}{\sqrt{\pi} \left(\mu_g A_{p0} \right)^m} \frac{1}{t_{ig}} \int_0^{t_{ig}} \dot{m}_{ig}^m dt \tag{11}$$

若取 $\dot{m}_{ig}$ 为点火器工作时间 t_{ia} 内的平均值, 即 $\dot{m}_{ig} = w_{ig}/t_{ia}$, w_{ig} 为点火药量, 可得点火药量 w_{ig} 与点火延迟时间 t_{ig} 之间的近似关系

$$w_{ig} = \left[\frac{\pi}{4} \frac{\lambda_g \rho_p}{b_0^2 \lambda_g^2 Pr^{2n}} \left(\mu_g A_{p0} \right)^{2m} D_0^{2(1-m)} \left(\frac{T_{cr} - T_0}{T_{ig} - T_0} \right)^{\frac{1}{2m}} \right]^{\frac{1}{m}} t_{ia} \tag{12}$$

点火器工作时间 t_{ia} , 应大于点火燃气在发动机内的停留时间 t_r 和点火延迟时间 t_{ig} , 即

$$t_{ia} \geq \max(t_r, t_{ig}) \tag{13}$$

通常, 点火燃气在发动机内的停留时间 $t_r = \frac{V_{fc}}{A_{ic} \Gamma^*} < t_{ig}$, 即 $t_{ia \min} \approx t_{ig}$ 。

为防止过高的初始压强峰, t_{ia} 应不大于装药全表面着火时间, 后者受火焰传播过程影响, 与多种因素有关, 难以定量描述, 可粗略取为

$$t_{ia} \leq t_{ig} + \frac{L_p}{c_i \Gamma^*} \approx t_{ig} + \frac{L_p}{\sqrt{f}} \tag{14}$$

式中 L_p 为药柱长度; f 为点火药的火药力, 即假设装药末端初始受热时间为点火燃气在药柱通道内的停留时间。

对于尾部点火情形, 只需将装药末端通道直径 D_L 、通道面积 A_{pL} 、经验系数 b_L 代入式(12), 可得到尾部点火时点火药量估算公式。但由于尾部

点火时燃气流动特点与头部点火不同, 仅有部分点燃气参与点火, 且发动机头部装药距离点火器较远, 点火初期燃烧室内冷空气被压缩在燃烧室头部, 使得头部装药着火前预热时间较长。考虑到尾部点火燃气利用率, 应适当增加点火药量。

此外, 由于传热经验系数关联式(7)是建立在来流为纯气相的基础上, 应对公式(12)进行修正以包括点火燃气固相粒子。假设点火药产物中固相粒子质量百分数为 ε , 并且利用如下转换关系:

$$Pr = \frac{\gamma}{2.25\gamma - 1.25}, \quad \lambda = \frac{\mu c_p}{Pr}, \tag{15}$$
$$\mu = 1.1846 \times 10^{-7} M^{1/2} T^{0.67}$$

式中 c_p 为燃气比定压热容, M 为燃气平均相对分子质量; 将式(15)代入式(12), 整理得到点火药量估算公式

$$w_{ig} = C_0 D_0^{2.25} t_{ig}^{-0.625} \left(t_{ig} + \eta \frac{L_p}{\sqrt{f}} \right) \tag{16}$$

其中

$$C_0 = C_1 \frac{1}{1 - \varepsilon} \frac{1}{\gamma_{ig}^{5/12} \left(2.25\gamma_{ig} - 1.25 \right)^{5/6}} \times \left(\frac{M_{ig}^{1.8}}{T_{ig}^{0.268}} \right)^{0.625} \left(\frac{T_{cr} - T_0}{T_{ig} - T_0} \right)^{1.25} \left(\rho_p c_p \lambda_p \right)^{0.625} \tag{17}$$

式中 $0 \leq \eta \leq 1$, $\eta = 0$ 对应点火药量下限值, $\eta = 1$ 对应点火药量上限值; C_1 为与传热有关的经验常数, 对于湍流强迫对流传热, $C_1 \approx 0.029 \sim 0.15$ 。

3 公式验证

按照点火药类型分几种情况对多台固体火箭发动机点火药量进行估算, 并将估算结果与采用传统经验公式估算的结果和真实点火药量进行对比, 以考查公式(16)的适用性和优越性。计算所需参数部分来自文献[7], 部分由相关研制单位提供。

情况 1: 点火药为黑火药

根据主发动机推进剂类型, 进行了两组测试。第一组为黑火药点燃双基推进剂; 第二组为黑火药点燃复合推进剂。估算结果分别见表 2 和表 3。表中 D_w 为发动机外径。

情况 2: 点火药为烟火剂

考虑镁、聚四氟乙烯、硼、硝酸钾等烟火剂类点火药情形。估算结果见表 4。

情况 3: 点火药为复合推进剂, 点火装置为点火发动机

估算结果见表 5.

由表 2~ 表 5 可见, 对参与点火药量估算的 18 种固体火箭发动机, 公式 (16) 均能给出比较满意的药量估算结果, 且估算结果与真实点火药量相对误差小于 5%. 传统经验公式由于考虑的点火因素较少, 且多为试验经验的总结, 受限于一定

的试验条件和发动机配置条件, 只能针对某些固体发动机给出比较满意的估算结果. 条件变化时, 传统经验公式可能给出不当的估算结果, 并且各个传统经验公式估算结果之间差异极大, 与真实药量的偏差从百分之几到百分之几百不等, 难以给设计者提供可信的参考.

表 2 黑火药点燃双基推进剂情形点火药量估算结果对比

Table 2 Comparison of amorce mass estimation results between different formulas for case 1-1

算例号	D_w / mm	$V_{\text{fic}} / \text{cm}^2$	t_{ig} / s	w_{ig} / g	(估算点火药量/g) / (相对误差/%)			
					公式(A)	公式(B)	公式(D)	公式(16)
1-1-1	654	233 926	< 0.15	2000	1 592/ 20.40	1806/9.70	2133/6.65	1 965/ 1.75
1-1-2	370	112 994	≤0.05	550	558.58/ 1.56	677/23.09	926/68.6	546/0.73
1-1-3	150	1 176.4	≤0.07	45	8.96/80.09	71.96/59.91	21.62/51.96	44.86/0.31
1-1-4	135	10619	< 0.15	95	70/26.32	22.33/76.49	107/12.63	91.00/4.21

表 3 黑火药点燃复合固体推进剂情形点火药量估算结果对比

Table 3 Comparison of amorce mass estimation results between different formulas for case 1-2

算例号	D_w / mm	$V_{\text{fic}} / \text{cm}^2$	t_{ig} / s	w_{ig} / g	(估算点火药量/g) / (相对误差/%)			
					公式(C)	公式(D)	公式(E)	公式(16)
1-2-1	654	223 339	< 0.13	1900	3 247/ 70.89	1 303/ 31.42	1827/3.84	1 946/ 2.42
1-2-2	360	29567	≤0.02	320	343/7.19	309/3.44	299/6.56	318.6/0.44
1-2-3	300	65102	≤0.01	320	1 369/327.81	1 139/255.94	493/54.06	316/1.25
1-2-4	286	13694	< 0.05	250	208/16.80	130/48.00	224/10.40	251/0.40
1-2-5	90	192.5	< 0.02	5.0	6.62/32.40	6.18/23.60	5.44/8.80	5.03/0.60

表 4 点火药为烟火剂情形点火药量估算结果对比

Table 4 Comparison of amorce mass estimation results between different formulas for case 2

算例号	D_w / mm	$V_{\text{fic}} / \text{cm}^2$	t_{ig} / s	$p_{\text{ig}} / \text{MPa}$	w_{ig} / g	(估算点火药量/g) / (相对误差/%)	
						公式(E)	公式(16)
2-1	654	219 849	≤0.13	2.0	1800	2001/ 11.17	1 743/ 3.17
2-2	400	48566	≤0.05	3.0	266	294/10.53	271/ 1.88
2-3	230	5 177.5	≤0.02	3.0	60	59.41/ 0.98	59.90/0.17
2-4	156	17510	≤0.01	5.0	320	327/2.19	315/ 1.56
2-5	29	7.025	< 0.002	5.0	0.16	0.1598/ 0.13	0.161/0.62

表 5 点火装置为点火发动机情形点火药量估算结果对比

Table 5 Comparison of amorce mass estimation results between different formulas for case 3

算例号	D_w / mm	$V_{\text{fic}} / \text{cm}^2$	t_{ig} / s	w_{ig} / g	(估算点火药量/g) / (相对误差/%)		
					公式(F)	公式(G)	公式(16)
3-1	1 400	411 300	< 0.05	670	695/ 3.73	5919/783.43	679/ 1.34
3-2	700	162 590	≤0.12	532	456/14.29	1 170/119.92	527.8/0.789
3-3	360	30082	≤0.05	600	329/45.17	618/ 3.00	578/ 3.67
3-4	286	11514	≤0.08	182	311/70.88	116/ 36.26	181.38/0.34

4 结 论

从固相点火理论出发, 推导得出点火药量估算公式. 考虑了发动机结构、推进剂、点火药, 以及环境条件等众多因素, 该公式具有较强的可用性; 对不同配置固体火箭发动机进行点火药量估算的结果表明, 本文点火药量估算结果与试验真实药量较为接近, 且估算精度明显优于传统经验公式, 说明了公式的广泛适用性; 但由于考虑因素多, 尤其是点火药和推进剂的物理化学性质参数难以准确测得, 热力计算参数常取近似值, 给估算结果带来误差. 因此, 点火药量的最终确定, 仍需经由试验验证.

参考文献:

[1] 张为华, 雷碧文, 黄世荣, 等. 固体火箭发动机点火器的工

程设计和流量估算[J]. 推进技术, 1991, 10(5): 77-80.
ZHANG Weihua, LEI Biwen, HUANG Shirong, et al.
The engineering design and mass flow rate estimation of igniter in SRM [J]. Journal of Propulsion Technology, 1991, 10(5): 77-80 (in Chinese)
[2] 陈汝川, 刘铭初, 阮崇智, 等. 固体火箭发动机设计与研究 (下) [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005, 10: 413-417.
[3] 王铮, 胡永强, 张善祁, 等. 固体火箭发动机[M]. 北京: 中国宇航出版社, 1993.
[4] 冯长根. 热点火理论[M]. 吉林: 吉林科学技术出版社, 1991.
[5] 叶万举, 常显奇, 曹泰岳. 固体火箭发动机工作过程理论基础[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1985.
[6] Kaviany M. Principles of heat transfer[M]. New York: John Wiley and Sons Inc. , 2002
[7] 李葆宣, 王克秀. 固体推进剂性能[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1990.