

φ90实验发动机中的几个问题

王 荣 祥

提 要 本文探讨了在φ90实验发动机试验中出现的三种现象,即a)药柱与绝热塑料管脱粘;b)p~t曲线尾部翘起;c)Al₂O₃粒子在喉部沉积。推导了估计沉积对压力曲线影响公式(当药柱作端面燃烧时)。提出了克服脱粘和沉积的措施。

前 言

为了研制761气象火箭主发动机,我们采用了直径为φ90毫米的实验发动机。通过φ90发动机的试验,为761主发动机初始药型的选择、药型初始锥角参数的确定、金属丝根数及位置的确定、带金属丝的装药燃烧的稳定性及其燃速的测定和喉部材料的选择等提供设计依据。

在进行φ90发动机大量试验的过程中,我们观察到了三个主要问题:1. 在含铝粉的聚丁过氧酸铵系统中,氧化剂为二级配与三级配的情况下,塑料管与装药之间有脱粘现象。试车时常出现保险片突然打开,试验中止,测不出数据(刚一点火即试验中断)。2. 燃烧室压力时间曲线,有明显的翘尾现象。3. 在喷管收敛段、喉部和扩散段均有大量金属氧化物的沉积物,其中Al₂O₃占了主要成分。

在后来的试验中,由于我们采取了改进措施即在喷管喉衬背面加了一层薄的绝热固体材料^[3],压力时间曲线翘尾现象和沉积现象得到了明显改善;用5-Ⅲ软片代替塑料管,消除了装药脱粘现象。

一、装药与塑料管间的脱粘问题

把经过清理的塑料管与药模装配好,固定好金属丝,然后将混合好的药浆真空浇铸到塑料管里,经过固化后,装药成型,再经过整形用胶将5-Ⅲ软片贴在头部端面,装药即可提供试验。如图1所示。

塑料管内壁与装药之间没有包复层和绝热层,是直接接触的,塑料管起了绝热层的作用。当时采用这种结构主要是为了节省实验发动机。

现在看来脱粘现象产生的原因可能是由于 1. 没有采用人工脱粘结构; 2. 由于环境温度变化,使得装药与塑料管变形不协调产生了温度应力,使装药与塑料管之间结合

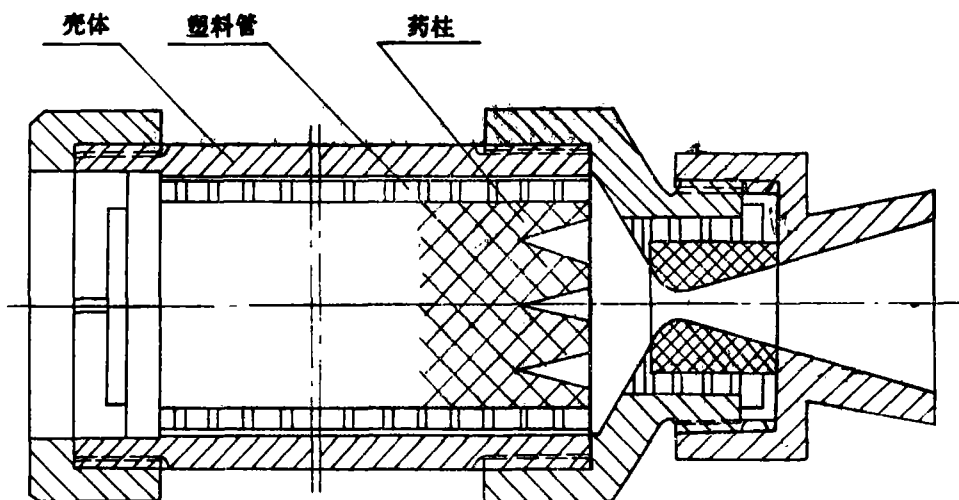


图 1 试验发动机结构简图

不牢固，在点火压力下产生了活塞效应，使结合面受到剪力作用而脱粘。又因为没有包复剂，所以燃面突然增大，压力突然升高，保险片突然打开试验中断。为了弄清试验中止的原因，我们把塑料管解剖剥下来，确实发现装药与塑料管之间结合不太牢固的情况。在以后的试验中采取了把塑料管剥下来，然后用包复剂和 5-Ⅲ 软片包复药柱的办法，进行了点火试验，结果全部成功。而且，有两次把从中止水箱中捞出来的点过火的带塑料管的药柱，经过上面的处理，再进行点火试验，也得到了成功。5-Ⅲ 软片起到了两个作用，一是绝热，使壳体与装药不直接接触绝热性能好。二是它与装药之间变形比较协调，再加上包复剂的粘结与阻燃作用，因而获得成功。这种形式的进一步发展就成了绝热包复全部自由脱粘的结构形式。

二、金属氧化物沉积对压力时间曲线的影响

目前关于喷管的沉积现象不象喷喉烧蚀现象研究得那么成熟，可供利用的资料很少。在 $\phi 90$ 发动机试验中，点火后燃烧室压力持续上升，发动机工作 18 秒左右结束时，超过设计压力很多，最高压力达到 150 kg/cm^2 左右。如图 2。试车结束后卸下喷管、发现有大量金属氧化物沉积物(主要成份为 Al_2O_3)。30# 装药的的压力时间曲线见图 2。

粗略统计，在燃烧室压力为 70 kg/cm^2 ，工作时间为 15~18 秒左右的条件下，背衬无绝热材料，碳/碳喉衬的沉积平均速率为 $0.0437 \sim 0.08575 \text{ mm/s}$ ；石墨喉衬材料沉积平均速率为 $0.085 \sim 0.120 \text{ mm/s}$ 。

关于 $\phi 90$ 实验发动机压力时间曲线的形状可以做如下解释：1. 金属氧化物沉积物的沉积有一个过程。发动机开始工作时，喉部壁温比较低，燃气流从收敛段先开始滞止沉积，而中间气流不易滞止，故中间喉部处沉积层较薄。这样，从收敛段逐渐扩展到喉部，沉积逐渐扩大。2. 由于采用了带金属丝的锥型端面药柱，要达到稳定段工作有一个过渡段，此时压力也是逐渐增大的，所以压力曲线上升的不太快，随着沉积层的加厚

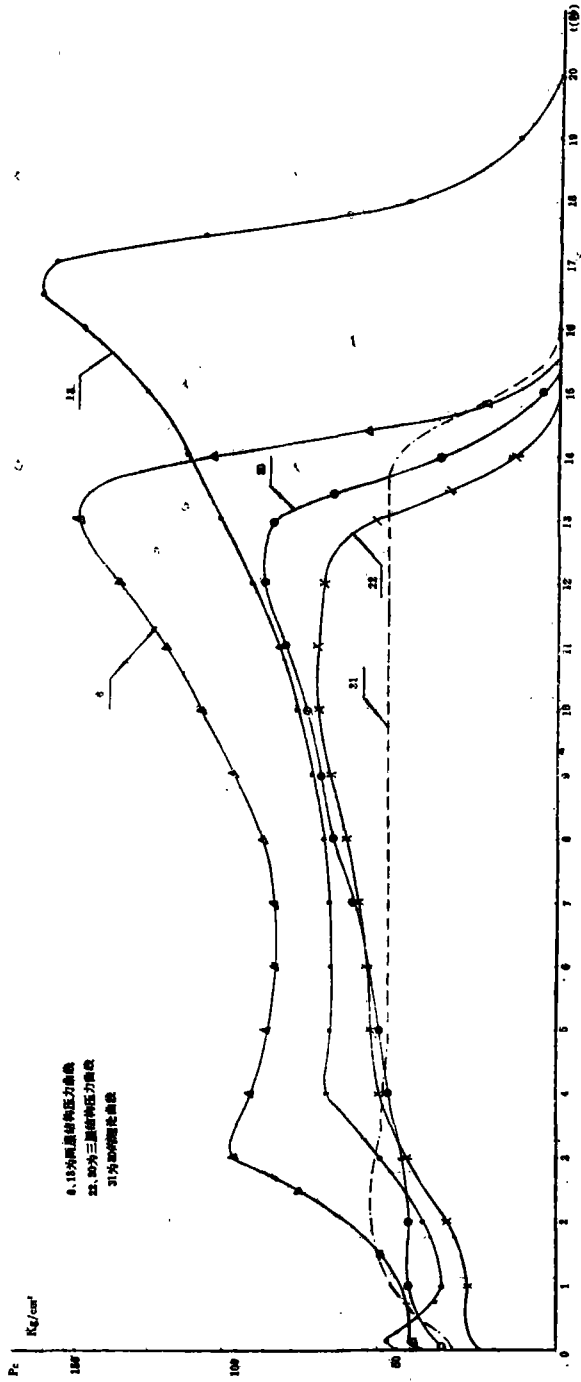


图 2 φ90 发动机试验曲线

和燃面的增大,压力不断上升,过了过渡段之后,金属氧化物沉积层的厚度对压力时间曲线的影响就会突出出来。3. 在推进剂中沿轴向埋入长金属丝,当发动机工作快要结束时,由于有热量积累,促使燃速增大,也会使压力略有上升。其中起决定作用的因素是沉积的增加。

总之,厚壁小实验发动机工作时间不太长如在 20 秒以内,喉部结构设计不太完善,绝热性能差,环境温度比较低时就会出现这种主要由于沉积造成的压力曲线翘尾现象。因此,在设计和研制小型固体发动机时,若推进剂中含有铝粉,工作环境温度比较低时,就要特别注意喉部的结构合理性。另外也要注意,沉积物中不仅只有 Al_2O_3 ,也还可能有其它的成份。

由于复合固体推进剂含有 15~17% 的铝粉和一定数量的燃速催化剂,在燃烧过程中金属粉末形成凝聚相金属氧化物粒子,这种液态粒子在喷管中流动与喷管表面撞击和接触,所以当喷管壁面温度低于金属氧化物的熔点时,金属氧化物便沉积在喷管喉衬表面上。当喷管喉衬的表面温度达到金属氧化物的熔点或者燃气气动阻力超过沉积层的强度时或者超过沉积层与喷管壁面粘结强度时,沉积物便被气流吹掉。

这种沉积层是很不稳定的,受到很多因素的影响。发动机工作过程中,喷管喉衬能否存在沉积物,沉积的程度以及能否承受气流冲刷烧蚀,与下列因素有关:喷管壁面温度,沉积物与壁面的粘结剪切强度,材料的性质,喷管内型面的加工光洁度,喉衬的热性能(导热性,热膨胀性,抗热冲击性),喷管型面及结构设计(如喷管收敛角,扩张角,圆弧半径,背衬材料等),推进剂中铝粉的含量,粒度大小及分布等等。

本文着重在喷管壁面温度和背衬材料方面做了计算和试验。

已知数据如下:

1. 燃气滞止温度 $T_c = 3200^\circ K$

燃气平均分子量 $\bar{M} = 26.5$

燃气比热比 $k = 1.2024$

燃烧室压力 $p_c = 70 \text{ kg/cm}^2$

工作时间 $t = 20 \text{ sec}$

特征速度 $c^* = 1503 \text{ m/sec}$

2. 喉部结构参数

喉部结构简图如图 3 所示。

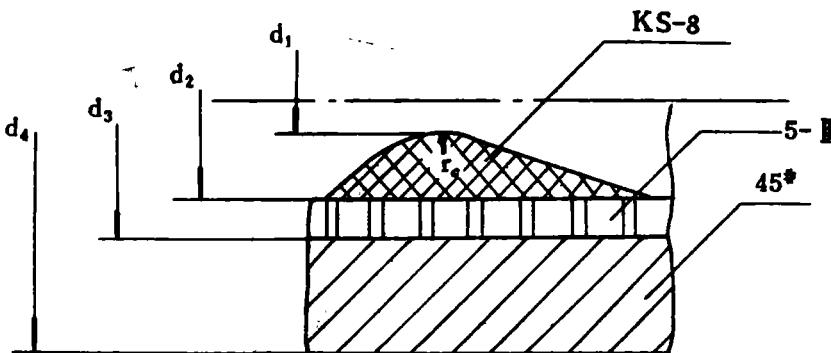


图 3 喉部结构简图

表 1

材 料	结构尺寸	密 度 g/cm ²	导热系数 kcal/mhr°C	比 热 kcal/kg°C
KS-8	$d_1=10\text{mm}$	2.2	39.6	0.415
	$d_2=44\text{mm}$			
5-Ⅰ	$d_2=44\text{mm}$	1.85	0.20	0.28
	$d_3=54\text{mm}$			
45 [#]	$d_3=54\text{mm}$	7.80	41.4	0.112
	$d_4=100\text{mm}$			
	$r_c=20\text{mm}$			

上面为三层结构方案，把 5-Ⅰ 去掉即为两层方案。(5-Ⅰ 换成同样厚度的 45[#] 钢) 对上面两种方案进行传热计算，是在下列假设条件下进行的。

1. 在喷管喉部，假设壁内的传热为沿径向方向的一维不稳定传热情况。
2. 假设外壁面是绝热的。燃气通过辐射传给内壁的热流忽略不计。
3. 燃气的物性参数，材料参数均为常数。
4. 发动机壁初温分布均匀，等于环境温度。

用有限差分方程，排成计算机程序，进行了计算，计算结果见图 4。

计算结果表明 1. 在 4.2 秒以前，喉部内壁面温度低于 Al_2O_3 的熔点 (2319.57°K ，有的手册上为 2323°K)，因此在喷管喉部发生的沉积的温度条件是存在的，至于金属氧化物沉积层能否存在下去，它还要受上面谈到过的许多因素的制约。2. 在相同厚度与结构条件下，导热性能好的材料壁温升的慢，因而沉积的要严重些。所以三层结构要比两层结构好。3. 初温的高低，对沉积也有影响。低的初温更容易沉积，而且持续时间也长些。上面的计算是在发动机额定状态下进行的，发动机参数取的是稳态时的理论参数，而实际情况要比上面的条件恶劣，因此实际情况要比计算情况严重，因而更容易沉积。

针对金属氧化物沉积对压力时间曲线的影响，我们采取了如下措施：1. 将喉部结构由两层改为三层，中间层采取绝热性能比较好的 5-Ⅰ 做背衬，对消除沉积物改善压力曲线性能比较有效。2. 在结构型面上减薄喉衬厚度，注意喷管参数的选取也是可取的。

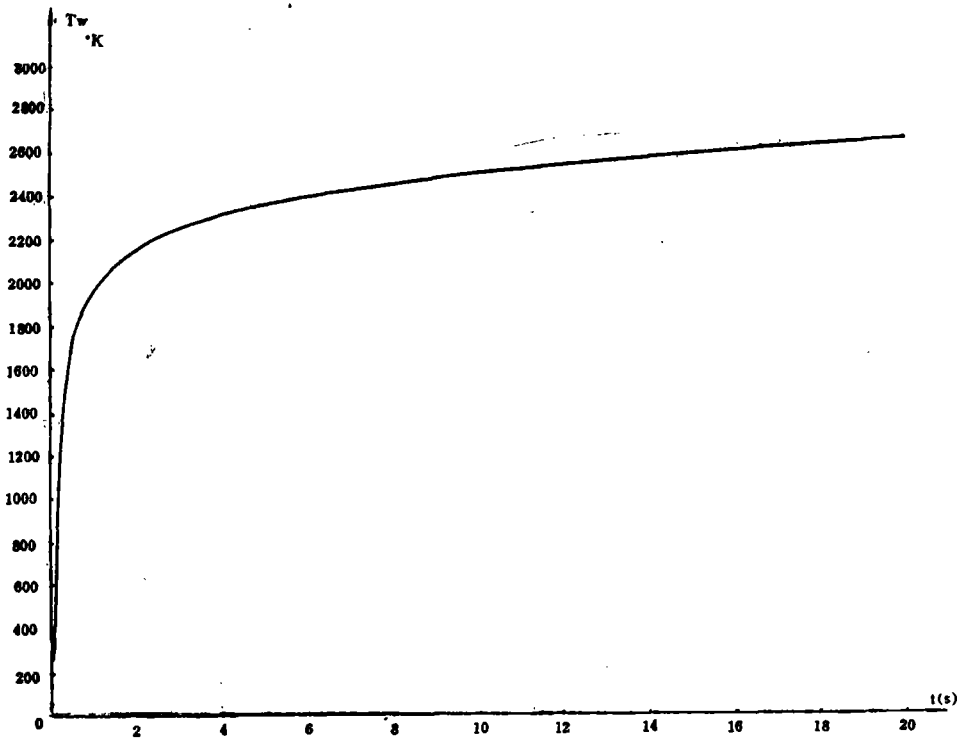


图 4 内壁面温度随时间的变化关系曲线 (初温 $+25^{\circ}\text{C}$)

三、沉积层对发动机性能影响的估计

1. 基本假设

- 1) 理想气体, 等熵流动;
- 2) 端面燃烧, 燃气在喷管进口处的速度为零;
- 3) 燃烧产物成份不变, 燃气的热力性能参数 K , R , C_p 不变, 压力指数不变。

2. 公式推导

1) 公式中的符号意义

- p_c ——燃烧室压力,
 n ——推进剂燃速压力指数, 有金属丝时用 n_f ,
 A_t ——喉部截面积,
 K ——平均等熵膨胀指数,
 R_t ——喷管喉部半径,
 A_b ——燃烧面积, 有金属丝时用药柱横截面积 A_{bT} ,
 L ——装药长度 (端面燃烧药柱长度)
 F ——发动机推力,
 I_S ——发动机总冲,

I_s ——发动机比冲,

t_k ——装药燃烧时间,

C_F ——发动机推力系数,

φ_e ——压力比 $\varphi_e = p_e / p_c$

Γ ——热力学函数 $\Gamma = \sqrt{K} \left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{K+1}{2(K-1)}}$,

A_e ——喷管出口截面积,

2) 公式推导

(1) 发动机总冲量公式^[1]:

$$I_{\Sigma} = \int_0^t F dt$$

由于假设为端面燃烧装药, 所以理想的推力时间曲线近似呈矩形, 故可简化为如下形式

$$I_{\Sigma} = F \cdot t_k$$

取对数微分:

$$\frac{dI_{\Sigma}}{I_{\Sigma}} = \frac{dF}{F} + \frac{dt_k}{t_k} \quad (1)$$

(2) 发动机推力公式:

$$F = C_F \cdot A_t \cdot p_c$$

取对数微分:

$$\frac{dF}{F} = \frac{dC_F}{C_F} + \frac{dA_t}{A_t} + \frac{dp_c}{p_c} \quad (2)$$

(3) 发动机工作时间

$$t_k = \frac{L}{\alpha p_c^n}$$

取对数微分:

$$\frac{dt_k}{t_k} = \frac{dL}{L} - n \frac{dp_c}{p_c} \quad (3)$$

(4) 平衡压力方程:

$$p_c = \left(C^* \rho_T a \frac{A_b}{A_t} \right)^{\frac{1}{1-n}}$$

取对数微分:

$$\frac{dp_c}{p_c} = \frac{1}{1-n} \cdot \frac{dA_b}{A_b} - \frac{1}{1-n} \cdot \frac{dA_t}{A_t} \quad (4)$$

(5) 将(4)式 dp_c/p_c 代入(2)式得:

$$\frac{dF}{F} = \frac{dC_F}{C_F} + \frac{dA_t}{A_t} + \frac{1}{1-n} \cdot \frac{dA_b}{A_b} - \frac{1}{1-n} \cdot \frac{dA_t}{A_t}$$

$$\frac{dF}{F} = \frac{dC_F}{C_F} - \frac{n}{1-n} \cdot \frac{dA_t}{A_t} + \frac{1}{1-n} \cdot \frac{dA_b}{A_b} \quad (5)$$

(6) 将(4)式 $\frac{dp_e}{p_e}$ 代入(3)式得:

$$\frac{dt_h}{t_h} = \frac{dL}{L} - \frac{n}{1-n} \cdot \frac{dA_b}{A_b} + \frac{n}{1-n} \cdot \frac{dA_t}{A_t} \quad (6)$$

(7) 将(5)式和(6)式相加代入(1)式得:

$$\begin{aligned} \frac{dI_S}{I_S} &= \frac{dC_F}{C_F} + \frac{dL}{L} + \left(\frac{1}{1-n} - \frac{n}{1-n} \right) \cdot \frac{dA_b}{A_b} \\ \frac{dI_S}{I_S} &= \frac{dC_F}{C_F} + \frac{dL}{L} + \frac{dA_b}{A_b} \end{aligned} \quad (7)$$

(8) 理论比冲公式^[2]:

发动机的真空比冲

$$I_{sv} = \sqrt{\frac{RT_c}{g}} \left\{ \sqrt{\frac{2K}{K-1} \left[1 - \left(\frac{p_e}{p_c} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right]} + \frac{1}{\Gamma} \cdot \frac{A_e}{A_t} \cdot \frac{p_e}{p_c} \right\} \quad (8)$$

面积比

$$\frac{A_e}{A_t} = \left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{1}{K-1}} \sqrt{\frac{K-1}{K+1}} \cdot \frac{\left(\frac{p_c}{p_e} \right)^{\frac{1}{K}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{p_e}{p_c} \right)^{\frac{K-1}{K}}}}$$

$$\Gamma = \sqrt{K} \left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{K+1}{2(K-1)}}, \quad \text{令 } \varphi_e = \frac{p_e}{p_c}$$

代入(8)式进行大量化简和整理得:

$$I_{sv} = \sqrt{\frac{RT_c}{g}} \left(\frac{2K}{K-1} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\left(1 - \frac{K+1}{2K} \varphi_e^{\frac{K-1}{K}} \right)}{\left(1 - \varphi_e^{\frac{K-1}{K}} \right)^{\frac{1}{2}}}$$

取对数微分并经过简化整理得:

$$\frac{dI_{sv}}{I_{sv}} = \frac{K-1}{2K} \cdot \frac{\varphi_e^{\frac{K-1}{K}}}{1 - \frac{K+1}{2K} \varphi_e^{\frac{K-1}{K}}} \cdot \frac{d\left(\frac{A_e}{A_t}\right)}{\frac{A_e}{A_t}} \quad (8')$$

当 $A_e = \text{常量}$ 时, 上式变为:

$$\frac{dI_{sv}}{I_{sv}} = - \frac{\frac{K-1}{2K} \varphi_e^{\frac{K-1}{K}}}{1 - \frac{K+1}{2K} \varphi_e^{\frac{K-1}{K}}} \cdot \frac{dA_t}{A_t} \quad (8'')$$

(9) 真空推力系数表示式及推力相对变化:

令 $p_a = 0$, $p_e/p_c = \varphi_e$, 则真空推力系数表示如下形式^[4]:

$$C_{FV} = \Gamma \left(\frac{2K}{K-1} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\left[1 - \frac{K+1}{2K} \varphi_* \frac{K-1}{K} \right]}{\left[1 - \varphi_* \frac{K-1}{K} \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (9)$$

当 $A_* = \text{常量}$ 时, 推力系数的相对变化:

$$\frac{dC_{FV}}{C_{FV}} = - \frac{\frac{K-1}{2K} \varphi_* \frac{K-1}{K}}{1 - \frac{K+1}{2K} \varphi_* \frac{K-1}{K}} \cdot \frac{dA_t}{A_t}$$

如果 $A_b = \text{常量}$, 则 $dA_b = 0$,

$$\frac{dF}{F} = - \frac{\frac{K-1}{2K} \varphi_* \frac{K-1}{K}}{1 - \frac{K+1}{2K} \varphi_* \frac{K-1}{K}} \cdot \frac{dA_t}{A_t} + \frac{dA_t}{A_t} - \frac{1}{1-n} \cdot \frac{dA_t}{A_t}$$

$$\frac{dF}{F} = \left[\frac{1 - \varphi_* \frac{K-1}{K}}{1 - \frac{K+1}{2K} \varphi_* \frac{K-1}{K}} - \frac{1}{1-n} \right] \frac{dA_t}{A_t} \quad (9)'$$

(10) 发动机总冲的相对变化式

由(7)式 令 $dL=0, dA_b=0$

$$\frac{dI_{\Sigma}}{I_{\Sigma}} = - \frac{\frac{K-1}{2K} \varphi_* \frac{K-1}{K}}{1 - \frac{K+1}{2K} \varphi_* \frac{K-1}{K}} \cdot \frac{dA_t}{A_t}$$

$$(11) \quad \frac{dA_t}{A_t} = \frac{d(\pi R_t^2)}{\pi R_t^2} = \frac{2dR_t}{R_t}$$

讨论:

1. 规定以初始喉径 R_t 为原点, 由于沉积层的存在使喉径变小, 即 dA_t 为负值, 结果使 dp 为正值, 表示压力升高。

2. 如果发动机在工作过程中由于烧蚀, 喉径变大, 则 dA_t 为正值, dp 为负值, 燃烧室压力要下降。

计算举例

已知 $p_o = 70 \text{ kg/cm}^2$; $p_e = 1 \text{ kg/cm}^2$; $d_t = 10 \text{ mm}$; $n = 0.3035$; $K = 1.20$

沉积层厚度为 1.5 毫米, 计算结果列表如下。

$\frac{\Delta p_c}{p_c}$	$\frac{\Delta F}{F}$	$\frac{\Delta I_{Sv}}{I_{Sv}}$	$\frac{\Delta I_{\Sigma}}{I_{\Sigma}}$	$\frac{\Delta C_F}{C_F}$	$\frac{\Delta t_k}{t_k}$
0.8615	0.3063	0.0448	0.0448	0.0448	-0.2615

结 束 语

1. 对于装药与塑料管之间的脱粘现象提出了可行的改进措施,用5- μ 软片代替塑料管取得成功。

2. 用绝热性能好的材料做背衬,可以比较有效的改善金属氧化物的沉积。

3. 计算和试验表明,固体发动机工作的前几秒钟,由于壁面温度较低,存在沉积条件。因此在设计含铝复合推进剂的小型固体发动机时,喉部结构宜选取组合结构,在选取材料和型面上要给以足够注意。

4. 由于沉积层的存在使喉径缩小,从而影响了发动机的性能,这里给出了估算这种影响的方法。

5. 计算和试验表明,沉积层相同时,喉径越小,对发动机性能影响越厉害。

参加试验和工作的有110研究室发动机组和109中心实验研究室测试组的有关同志,还有103教研室王祥海同志进行了喉部传热计算,这里向这些同志们表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 104教研室编:固体火箭发动机设计基础上册第三章,
长沙工学院1977年2月出版。
- [2] 钱学森著 星际航行概论 p47~49.
科学出版社 1963年2月出版。
- [3] 京固群译,固体推进剂火箭发动机的基本问题上册, p118~119,
国防工业出版社 1976年,6月出版。
- [4] 推进技术 1980年,2期

Some Problems in the Experiment of $\phi 90$ Subscale Engines

Wang Rong—xiang

Abstract

Three phenomena, occurring in the experiment of $\phi 90$ subscale engines, have been studied, i.e, a) unbounding of the grain to plastic tube to insulate; b) rising of the aft section of the pressure-time history, and c) the precipitating of Al_2O_3 particles on the throat of the nozzle. The paper derives for formulae of estimating the effects of the precipitate on the history as the burning grain is in smoking. The designs to overcome the unbounding and precipitating have been shown,