

定容法测定双基固体推进剂 的能量特征参数

邢 郁 明

摘 要

本文介绍了关于测定双基固体推进剂能量特征参数的实验研究方法,测定的主要参数有爆热 $Q_v(1)$,爆温 T_v ,燃气平均分子量 $\bar{\mu}$,燃气的平均比热 $\bar{C}_v$, $\bar{C}_p$,比热比 K ,燃气比容 W ,火药力 f_v ,特征速度 C^* 等。测量是在装有测压装置的绝热式热量计中进行的。对双铅-2双基固体推进剂测定的结果,是令人满意的。

一、前 言

对于推进剂工作者来说,固体推进剂的能量特性是大家都非常关心的。表征固体推进剂能量特性的参数有:定容爆热 Q_v 或 $Q_{v(1)}$ (水为液态时的定容爆热),定容燃烧温度 T_v (或称为爆温),气体燃烧产物的平均分子量 $\bar{\mu}$,平均定容比热 $\bar{C}_v$,平均定压比热 $\bar{C}_p$,比热比 K ,火药力 f_v ,特征速度 C^* 以及比冲 I_{sp} 等。过去,通常利用发动机试验测定固体推进剂的比冲^[1],利用热量计测定其爆热 $Q_{v(1)}$ ^[2],或利用密闭爆发器测量出火药力 f_v ^[3]。其他一些参数如 $\bar{\mu}$, $\bar{C}_v$ 和 K 等,通常是由理论计算得到^[1],不能直接测定。计算得到的参数往往与实际情况有较大的差别。直接测定推进剂的比冲时,往往要应用实验发动机及较复杂的测试设备,并且要用较大的药量。而且比冲、爆热和火药力的实验测量不是同时进行的。这给测试带来诸多不便,因而对于推进剂配方的筛选研究是十分不利的。

本文所介绍的实验研究,就是企图建立一种直接而又简单的测量方法,以便很方便地通过一次实验,就能同时测量出上述的全部能量特征参数,而且所用的药量较少。这就可以大大减少推进剂配方研究工作的人力、物力和时间。我们对双铅-2双基推进剂进行了定容法测量能量特性的研究,实践证明,我们所建立的方法是可行的,测量的结果是令人满意的。

二、理论考虑

固体推进剂在容积一定的容器中点火燃烧时,将放出大量热量,产生大量气体燃烧产物,随着燃烧进行,容器中的压力将急剧增加,当燃烧终了的瞬时,容器中的压力和温度都达到最大值。随后,由于容器器壁的冷却,温度和压力都随之下降;最终,内部温度与周围环境的温度相平衡时,容器内的压力也将达到某一恒定值。

利用热量计可以精确地测定一公斤固体推进剂在真空条件或充以氮气条件下燃烧后,燃气中全部水转为液态时所放出的燃烧热量,这种热量称为水为液态时推进剂的爆热,用 $Q_{v(1)}$

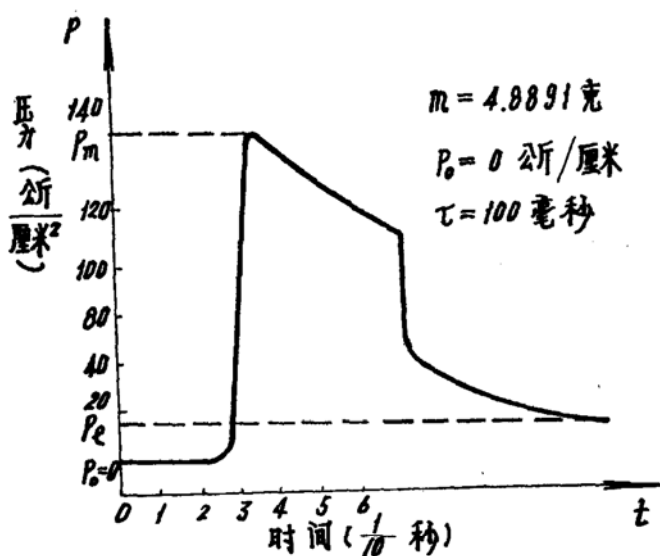


图1 压力——时间曲线

表示, 其单位为千卡/公斤。

当在热量计的量热弹上装一测压装置, 则可以在测定爆热的同时, 测量出弹体内压力随时间的变化曲线。图1就是粉末状双铅-2双基固体推进剂在量热弹内定容燃烧的压力——时间变化曲线。

从图1可以看出, 当推进剂点火以后, 压力很快地陡升到最大值 P_m , 而后慢慢下降, 直至弹内温度与热量计内筒蒸馏水的温度相等时, 压力则达到稳定值; 该值应是热量计最终平衡温度 T_e 时量热弹内气体的平衡压力 P_e 。

根据点火前后热量计内筒蒸馏水的温升和热量计的水当量, 容易求得

推进剂的爆热 $Q_{v(1)}$ 。量热弹的内部容积是已知的, 推进剂在弹内燃烧以后可以得到热量计的最终平衡温度 T_e 和平衡压力 P_e , 最大压力 P_m , 不难求得固体推进剂燃烧所生成的气体产物的摩尔数和燃烧完成瞬时弹内气体的最高温度 T_m 。由此可以求得推进剂的能量特征参数。为此, 我们采用以下近似合理的假设:

1. 双基固体推进剂在燃烧时全部气化, 产物不含凝相成分。这对于双基固体推进剂基本上是合理的。当然如果有凝相产物产生时, 也可以进行修正。

2. 推进剂燃烧所产生的水, 假定在燃烧完了时全部为汽态, 而在冷却至平衡温度 T_e 时, 则完全转变为液态。此假定也基本上是合理的。因为燃烧完了的瞬时, 弹内的温度是很高的, 水肯定处于汽态; 而在很低的 T_e (大约为 20°C 左右) 时, 水的蒸汽压很低, 可以忽略不计。

3. 由于量热弹是放在内筒的蒸馏水中, 并不断的搅拌, 所以冷却过程也还是比较快的过程, 因此, 可以假定燃烧产物在冷却过程中各组分基本保持不变, 即所谓组分冻结。这种假定对双基固体推进剂有一定的合理性。

4. 假定燃烧气体产物 (包括汽态水) 近似为理想气体。这是由于利用量热弹进行定容燃烧时, 药量比较小, 大约为 4.5 克以下, 所以最终平衡压力 P_e 是不大的, 约为 20 公斤/厘米² 左右。这样低的压力, 实际气体可以按理想气体处理而不会发生错误。当处于最大压力 P_m 时, 压力虽然增加, 但弹体内的温度是很高的, 这时燃气也可以近似按理想气体处理。

根据以上假定, 可以写出燃气在最大压力 P_m 和平衡压力 P_e 时的状态方程:

$$P_m V = n R T_m \quad (1)$$

$$P_e V = (n - n_{\text{水}}) R T_e \quad (2)$$

式中, V 为量热弹的内体积, 在我们实验中, $V = 300$ 毫升;

n 为燃气的总摩尔数 (包括生成的水在内), 当实验前向量热弹充以氮气时, 则有:

$$n = n_g + n_{\text{N}_2} \quad (3)$$

此时 n_g 表示为燃气的摩尔数;

R 为普通气体常数, $R = 0.848$ 公斤·米/摩尔·度;

T_m 为燃烧完了时弹内的最高温度, 开;

T_e 为热量计最终平衡时的内筒最高温度, 开。

也可以写出质量守恒方程:

$$m = n \bar{\mu} \quad (4)$$

式中: m —— 实验中所用的推进剂质量, 克;

$\bar{\mu}$ —— 燃气平均分子量, 克/摩尔。

在实验中, m 和 V 是给定已知的; P_m , P_e 可由压力时间曲线求得。 $n_{\text{水}}$ 也可以在实验中求得(见后面)。因此, 就可以利用方程 (1), (2), (4) 计算出燃气的总摩尔数 n 和平均分子量 $\bar{\mu}$, 从而可以求得燃气在燃烧时所达到的最高温度 T_m 。如果燃烧产物中含有固相时, 也可以测定固相含量 m' , 这时燃气的平均分子量应为:

$$\bar{\mu} = \frac{m - m'}{n} \quad (5)$$

在实验中, 根据热量计内筒的温升值可以求出固体推进剂的爆热 $Q_{v(1)}$, 公式为:

$$Q_{v(1)} = K (T_e - T_0) / m \quad (6)$$

式中: $Q_{v(1)}$ —— 水为液态时, 每克推进剂的定容爆热 (卡/克);

K —— 热量计的仪器常数 (卡/度);

T_e —— 平衡温度 (开);

T_0 —— 内筒水在点火前的初始温度 (开);

m —— 推进剂的药量 (克)。

水的冷凝热可以查手册表得到, 利用下式可以求得推进剂在水为汽态时的定容爆热 Q_v

$$mQ_v = mQ_{v(1)} - n_{\text{水}}q \quad (7)$$

式中: q —— 为水的冷凝热, 我们取 $q = 10.6$ 千卡/摩尔。

假定燃气的平均定容比热为 $\bar{C}_v$, 则能量守恒方程可以写成:

$$mQ_v = n\bar{C}_v (T_m - T_0) + Q \quad (8)$$

附加项 Q 代表在测量时的热损失 (卡)。

当推进剂在绝热条件下燃烧时, $Q = 0$, 则有:

$$mQ_v = n\bar{C}_v (T_v - T_0) \quad (9)$$

即: $T_v = T_m$

通常把 T_v 称为定容绝热燃烧温度, 又称为推进剂的爆温。

利用 (9) 式可以求得 $\bar{C}_v$ 值, 从而由下式可以求得平均定压比热 $\bar{C}_p$:

$$\bar{C}_p = R + \bar{C}_v \quad (10)$$

再根据:

$$K = \frac{\bar{C}_p}{\bar{C}_v} = 1 + \frac{R}{\bar{C}_v} \quad (11)$$

可以求出比热比 K 。

根据火药力的定义:

$$f_v = \frac{1000}{\bar{\mu}} RT_v \quad (12)$$

可以求出推进剂的火药力 f_v 。

推进剂的特征速度 C^* 定义为：

$$C^* = \frac{\sqrt{g f_v}}{\Gamma} \quad (\text{米/秒}) \quad (13)$$

$$\Gamma = K \sqrt{\left(\frac{2}{K+1}\right)^{\frac{K+1}{K-1}}} \quad (14)$$

容易计算出 Γ 和 C^* 。

推进剂的比容由下式算出：

$$W = \frac{1000}{\mu} 22.412 \quad (\text{升}) \quad (15)$$

实际上，推进剂在量热弹中定容燃烧时，因有热辐射和热传导等热损失存在，不可能达到定容绝热条件，因此 $T_m < T_v$ 。这给计算结果带来误差，对此我们在后面将专门详细分析热损失和解决方法。

三、实验和结果

在本研究中，我们应用了长沙仪器厂出产的JR2800型绝热式热量计，其精度为0.3%。在其量热弹的上盖上装一只薄膜电阻式压力传感器，测得的信号通过放大后用光线示波器记录，把所得的曲线用标准压力校正仪标定成压力时间曲线。

本实验用的推进剂是五机部245厂生产的双铅-2双基固体推进剂，为了使推进剂能瞬时燃烧，我们把推进剂加工成粉末型。药量在5克以下，这样热量计内筒水的温升在2℃左右，最大压力不超过200公斤/厘米²，平衡压力在20公斤/厘米²左右。

实验是在抽真空和充氮气两种条件下进行的。

抽空的目的是排除弹内的空气，真空度为700毫米汞柱。

充氮气是想提高推进剂的燃烧速度，减少燃烧时间，以达到瞬时燃烧。充氮气时，先用氮气换掉弹内的空气，然后再充到一定的氮气压力。充氮压力不同可以得出充氮压力对测量的影响。

实验完了后，再用热的氮气把量热弹中的气体全部赶出来，并用无水氯化钙吸收，根据无水氯化钙重量的变化，可以求出燃气中的含水量 w 克，从而可以得 m 克推进剂燃烧时所产生的水的摩尔数 $n_{\text{水}}$ 。

$$n_{\text{水}} = \frac{W}{18} \quad (16)$$

根据我们实验测定，双铅-2燃烧时，每公斤推进剂生的水摩尔数为 7.1 ± 0.5 摩尔/公斤。 m 克推进剂可生成：

$$n_{\text{水}} = 7.1 \times m / 1000 \text{ 摩尔} \quad (17)$$

的水。

实验结果列于表1和表2中。

表 1 真空条件下的实验结果

№	药 m (克)	最 大 压 力 P _m (公斤/厘米 ²)	平 衡 压 力 P _e (公斤/厘米 ²)	爆 热 Q _v (1) (卡/克)
1	4.8891	140.0	15.0	851.6
2	4.3560	111.5	13.3	849.2
3	4.7240	131.5	14.5	854.0
4	5.2461	151.5	16.5	848.6
5	3.8563	105.5	12.0	849.5
6	2.5386	73.8	8.2	850.7
7	2.5895	75.1	8.3	851.6

表 2 充不同压力氮气的实验结果

№	药 m (克)	充 气 压 力 P ₀ (公斤/厘米 ²)	最 大 压 力 P _m (公斤/厘米 ²)	平 衡 压 力 P _e (公斤/厘米 ²)	爆 热 Q _v (1) (卡/克)
1	4.8891	0	140.0	15.0	851.6
2	4.3560	1.0	135.5	14.0	856.4
3	4.7040	10.0	187.7	24.0	861.4
4	4.4582	15.0	169.5	27.0	865.4
5	4.4691	20.0	185.5	32.0	868.5

利用表 1 的结果,根据第二部分所介绍的计算公式,可以求得双铅-2的各能量特征参数,计算结果列于表 3 中,表中我们只计算了燃气摩尔数,平均分子量,以及假定热损失 $Q=0$ 时双铅-2的爆温 T_v (即 $T_v = T_m$) 和平均比热 $\bar{c}_v$, 比热比 K 。

计算时所用的常数为:

$$R = 0.847 \text{ 公斤} \cdot \text{米} / \text{摩尔} \cdot \text{开};$$

$$= 1.987 \text{ 卡} / \text{摩尔} \cdot \text{开};$$

$$q = 10600 \text{ 卡} / \text{摩尔水 (水的冷凝热)};$$

$$V = 300 \text{ 厘米}^3;$$

$$n_{\text{水}} = 7.1 \text{ 摩尔} / \text{公斤推进剂}.$$

表 3 真空条件下参数计算结果

№	燃气摩尔数 n	平 均 分 子 量 $\bar{\mu}$ (克/摩尔)	爆 温 T _v (开)	平 均 比 热 $\bar{c}_v$ (卡/摩尔·开)	比 热 比 K
1	0.2159	22.64	2294.0	8.7838	1.226
2	0.1915	22.75	2296.5	8.7882	1.226
3	0.2086	22.65	2230.5	9.0817	1.219
4	0.2364	22.19	2267.2	8.6915	1.229
5	0.1723	22.38	2166.2	9.2502	1.215
6	0.1170	21.70	2231.5	8.6804	1.229
7	0.1186	21.83	2240.2	8.7035	1.228

利用表 2 进行计算时, 由于点火前充有 P_0 压力的氮气, 故状态方程 (1) (2) 应改为:

$$\begin{aligned} P_0 V &= n_{N_2} R T_0 \\ P_m V &= (n_{N_2} + n_g) R T_m \\ P_e V &= (n_{N_2} + n_g - n_{\text{水}}) R T_e \end{aligned} \quad (18)$$

能量守恒方程应改为:

$$m Q_{v(1)} - n_{\text{水}} q = n_g \bar{C}_v (T_m - T_0) + n_{N_2} \bar{C}_{vN_2} (T_m - T_0) + Q \quad (19)$$

方程 (18) (19) 式中:

P_0 ——初始充氮气的压力 (公斤/厘米²);

n_{N_2} ——充入氮气的摩尔数;

T_0 ——充入氮气后热量计内筒水的温度(开);

$\bar{C}_{vN_2}$ ——在温度为 T_0 至 T_m 时氮气的平均定容比热, 设为恒值, 计算时取 $\bar{C}_{vN_2} = 5.45$ 卡/摩尔·开;

n_g ——为总的燃气摩尔数;

$n_{\text{水}}$ ——为水的摩尔数。

其他符号的意义与前相同。

计算时仍假定 $Q = 0$, 计算所得的 $\bar{\mu}$ 、 $\bar{C}_v$ 、 K 和 T_m , T_v 列于表 4 中。

表 4 初始充气压力不同的参数

N_0	P_0	$\bar{\mu}$	$\bar{C}_v$	K	T_m	T_v
1	0	22.64	8.7838	1.226	2294.0	2294.0
2	1.0	22.99	8.5350	1.233	2376.6	2397.0
3	10.0	23.28	9.5851	1.207	2048.9	2202.0
4	15.0	24.41	12.9837	1.153	1648.7	1778.2
5	20.0	24.47	13.8242	1.144	1547.4	1697.5

表 4 中的 T_v 是利用下式反算得到的:

$$m Q_{v(1)} - n_{\text{水}} q = n \bar{C}_v (T_v - T_0) \quad (20)$$

计算所应用的常数值与前相同。

四、结果分析

1. 由表 3 的结果可以得出, 利用本研究的方法, 在抽真空条件下求得双铅-2 一些参数为:

燃气平均分子量 $\bar{\mu} = 22.306$ 克/摩尔, 测量的标准偏差: $S_{\bar{\mu}} = 5.4 \times 10^{-3}$ 克/摩尔。

平均定容爆温 $T_v = 2246.5$ 开, 测量的标准偏差 $S_{T_v} = 45$ 开;

燃气平均定容比热 $\bar{C}_v = 8.8542$ 卡/摩·开, 测量的标准偏差:

$$S_{\bar{C}_v} = 0.223 \text{ 卡/摩尔·开};$$

燃气的平均比热比 $K = 1.2246$, 测量的标准偏差 $S_K = 5.44 \times 10^{-3}$

由此可以算出:

$$\text{燃气平均定压比热 } \bar{C}_p = 10.8412 \text{ 卡/摩尔·开};$$

平均火药力 $f_v = 8.592 \times 10^4$ 公斤·米/公斤;
 平均特征速度 $C^* = 1265.3$ 米/秒;
 平均比容 $W = 1004.8$ 升/公斤。

2. 由表 4 可以看出

i) 双铅-2 的爆热和平均分子量都随充入 N_2 的压力 P_0 增加而稍有增加。双基推进剂的爆热随充气压力增加而增加, 这曾有过报导^{[4][5]}。而不曾见到平均分子量的变化方面报导。

ii) 双铅-2 的 $\bar{C}_v$ 随充气压力 P_0 增加而变化, 在 $P_0 = 1.0$ 公斤/厘米² 时具有极小值。 T_m , T_v 和 K 也随 P_0 而变化, 在 $P_0 = 1.0$ 公斤/厘米² 有极大值。这可以解释为热损失不同而引起的。在 $P_0 = 1.0$ 公斤/厘米² 时, 其热损失为最小, 故 $\bar{C}_v$ 为最小值, T_m 和 T_v 均为最大值。

利用表 4 中 $P_0 = 1.0$ 公斤/厘米² 的数据, 可以计算出:

燃气平均定压比热 $\bar{C}_p = 10.5236$ 卡/摩尔·开;
 双铅-2 的火药力 $f_v = 8.8415 \times 10^4$ 公斤·米/公斤;
 特征速度 $C^* = 1283.5$ 米/秒;
 比容 $W = 974.8$ 升。

现将我们对双铅-2 推进剂所测得的有关参数, 和发动机实验结果与理论计算的结果^[6] 对比列于表 5 中

表 5 双铅-2 特征参数的对比

参 数	理论计算值 ^[6]	发动机实验值 ^[7] ($CF = 1.442$)	本 方 法 值		参 考 值 ^[8]
			$P_0 = 0.0$	$P_0 = 1.0$	
Q_p (千卡/公斤)	712.9				
$Q_{v(1)}$ (4卡/公斤)	813.3		851.6	856.4	85018
$\bar{\mu}$ (克/摩尔)	24.3		22.30	22.99	23.39
$\bar{C}_p$ (卡/克·开)	0.417		0.484	0.458	
$\bar{C}_v$ 卡/摩尔·开	8.1044		8.8542	8.5350	
T_p (开)	2248.3				2277
T_v (开)			2294.0	2397.0	
C^* (米/秒)	1335.3	1351.34	1265.3	1283.5	1342
K	1.252		1.225	1.233	1.250
f_v (公斤·米/公斤)	79481.8		85923.0	88414.8	
I_{sp} (公斤·秒/公斤)	214.5	198.67	186.03*	188.66*	196

注 *计算时取推力系数 $C_F = 1.442$ (发动机值)

由表 5 的对比结果得出, 利用本文所介绍的方法, 所得的结果与理论计标值和发动机测量之间有一定的偏差, 特征速度 C^* 偏低, 比冲也稍偏低。这种偏低主要来自热损失的影响。

推进剂在量热弹中燃烧, 其热损失(或能量损失), 我们考虑主要有四个方面:

1. 燃烧时产物处于高温状态, 必然有热辐射存在, 这是热损失原因之一。我们考虑在本实验中, 量热弹的内表面是比较光滑的, 反射能力比较强, 同时, 由于我们采用粉末药, 燃烧时间较短。因此可以估计, 辐射所产生的热损失是不大的, 是可以忽略不计的。

2. 压力传播过程的能量损失。推进剂在定容下燃烧,要产生压力传播。压力波的传播可以近似地看作是球形传播^[9]。压力波以声速传播,比火焰传播快得多。如果容器是近乎球形的,测压传感器的位置和响应选择适当,则可以测得比较精确的压力峰值。但是,在我们实验的实际情况下,我们把传感器放在量热弹的盖上面,并有一个连接管,这样,压力波首先要通过小孔而后达到传感器上,通过小孔时会产生散射而造成能量的损失。因此,所测得的压力峰值会有些偏低,这与发动机测试的情况基本类似。可以想像,选择合宜的充氮条件,可以大大提高压力波的速度,从而使因小孔散射而造成的压力偏低的现象得到改善,另外,我们估计,这种能量损失也是不大的,是可以忽略的。

3. 装药坩埚在燃烧过程中吸收热量。实验中,我们是把粉末药装在不锈钢的坩埚中进行燃烧的。当推进剂燃烧时,坩埚直接接触火焰,它在推进剂燃烧过程,要吸收热量用来加热本身,使坩埚的温度升高。由于坩埚吸热作用,从而使得用于加热燃气的热量减少,即降低了燃气的温度。

我们用实验测定出我们所用的坩埚在燃烧过程中大约吸收的热量为150卡。4.5克左右的推进剂的发热量约为3500卡,故坩埚的吸热约占发热量的4.3%左右。我们知道,坩埚的吸收热量与坩埚的质量和平均温度增加值有关:

$$q = mC\Delta T \quad (21)$$

式中: q ——坩埚所吸收的热量(卡);

m ——坩埚的质量(克);

C ——坩埚的热容(卡/克·开);

ΔT ——坩埚在吸热过程的温度增加值(开)。

坩埚的平均温升可以看成是壁厚 x 和加热时间 t 的函数^[10]:

$$\Delta T = \Delta T(x, t) \quad (22)$$

因此,可以预计,减少坩埚的壁厚 x 和质量 m ,减少推进剂燃烧过程的时间 t ,必将减少坩埚的吸热作用,从而将提高测试结果的可靠性。由于条件所限,没能进一步探讨。

如果考虑到所用坩埚的吸热损失,可以对前述的能量方程进行修正。修正时应用下列公式:

$$mQ_{v(1)} - n_{\text{水}}q - Q_{\text{坩}} = n\bar{C}_v(T_m - T_0) \quad (23)$$

$$mQ_{v(1)} - n_{\text{水}}q - Q_{\text{坩}} = ng\bar{C}_v(T_m - T_0) + n_{N_2}\bar{C}_{vN_2}(T_m - T_0) \quad (24)$$

(23)式运用于真空条件下的修正公式,(24)式适用于充氮气条件下的修正公式。二式中 $Q_{\text{坩}}$ 为坩埚所吸收的热量,其他符号与以前一样。修正以后的结果如下:

真空条件: $\bar{C}_v = 8.4596$ 卡/摩尔·开;

$K = 1.235$;

$T_v = 2376.2$ 开;

$f_v = 89001.9$ 公斤·米/公斤;

$C^* = 1287.8$ 米/秒;

$I_{sp} = 189.3$ 公斤·秒/公斤。

充氮压力 $P_0 = 1.0$ 公斤/厘米²条件下:

$\bar{C}_v = 7.9622$ 卡/摩尔·开;

$K = 1.250$;

$$T_v = 2626.7 \text{ 开};$$

$$f_v = 96887.4 \text{ 公斤} \cdot \text{米} / \text{公斤};$$

$$C^* = 1338.6 \text{ 米} / \text{秒}$$

$$I_{sp} = 196.8 \text{ 公斤} \cdot \text{秒} / \text{公斤}.$$

修正值与表 5 中发动机测量值和理论计算值相比较, 在充有一公斤/厘米²压力的氮气条件所得的结果, 是十分相吻合的。

4. 高温燃烧产物与量热弹热交换所造成的热损失, 也是热损失的重要原因之一。推进剂在量热弹中燃烧, 并非瞬时完成的, 而是有一燃烧过程。在此过程中, 燃烧产物会很快的扩散。一旦高温燃烧产物迁到冷的弹壁以后, 就会被弹壁冷却。通过弹壁的吸收和传导, 一部分热量损失掉, 这样势必使所测得的最大压力和根据最大压力计算得到的最高温度降低。通常热交换取决于热交换的表面积、给热系数, 温度差和热交换的时间。在本实验条件下, 减少热交换时间, 可能有效地减少热交换造成的热损失。减少热交换可以通过减少燃烧时间来达到, 即减少从点火到最大压力峰的时间。对于一特定的推进剂来讲, 减少燃烧时间就是增加推进剂的燃烧表面积和提高推进剂的线性燃速。

增加燃烧表面积主要是减少推进剂的药柱尺寸。我们曾用柱状药柱和粉末药进行对比, 在实验条件相同情况下, 粉末药的燃烧时间比柱状药要快得多。从图 1 可以看出, 在真空条件, 粉末(4.5克左右)燃烧时间为100毫秒左右, 而柱状药(也取4.5克)的燃烧时间大约要2.5秒左右, 而且有时根本点不着火。因而所得到的最大压力也低得多, 只有66.6公斤/厘米², 这与粉末药($P_m = 111.5 \text{ 公斤} / \text{厘米}^2$)相比是相差较大的。这正是我们选择粉末药进行实验的原因, 选择较小尺寸的粉状药, 可以大大减少热损失, 提高实验结果的可靠性。

减少燃烧时间另一措施是通过提高推进剂的线性燃速来实现。对一定的推进剂, 燃速与燃烧室的压力有下面的关系^[2]:

$$r = ap^n \quad (22)$$

式中: r ——推进剂的线性燃速
(厘米/秒);

p ——燃烧室压力(公斤/厘米²);

a ——常数;

n ——燃速压力指数。

由式(22)可知, 增加燃烧室压力可以增加燃速(因为通常 n 是小于1的正数), 从而能减少燃烧时间, 即减少热交换时间。图2是4.5克粉状药, 在充有10公斤/厘米²压力氮气的量热弹中燃烧时, 记录的压力——时间曲线。比较图 1 和图 2 可以明显地看出: 点火段大大的缩短了, 从点火到最大压力的时间, 大约为19毫秒。仅为真空条件时的 1/5。这说明, 增加

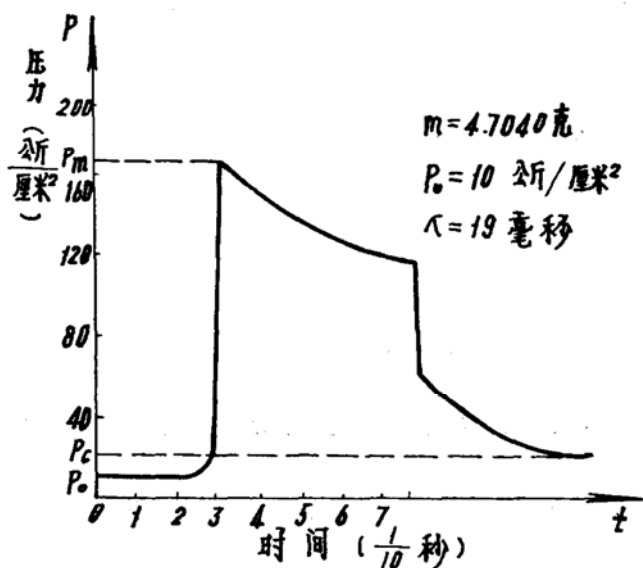


图 2 开始充有10公斤/厘米²氮气时压力——时间曲线

充气压力可以大大缩短燃烧时间,有利于减少热交换的损失。

然而,在充有氮气条件下推进剂燃烧时,氮气是要吸收热量使本身的温度增高。从而使推进剂的燃烧温度降低,这对推进剂的燃烧是不利的。同时,因有氮气存在,势必会改变热交换状态,使热交换加快,这将要增加热损失。

综合考虑加压氮气的作用,既有增加燃速,缩短燃烧时间,增加压力波的传播等有利于减少热损失方面。同时由于氮气的吸热作用,加速热交换等也增加了热损失。加压氮气的这种双重作用,就使得热损失将随充氮压力的改变而有最小值。这就解释了前面我们实验所得的结果。

五、结论和存在的问题

根据我们的实验研究,利用带有测压装置的热量计,可以测得双基固体推进剂的一套能量特性参数。选择适当的条件、减少热损失或进行修正后,所得到的测量结果与理论计算值和发动机测量值相对比,是令人满意的一致。

本方法的突出优点在于可以利用很少的药量,一次试验就可以得到比较完整的能量特性参数,尤其是可以直接求得推进剂的定容燃烧温度,燃气的平均比热·比热比·平均分子量等发动机实验和其他实验所不测得的参数,显然,这种测量是很有实际意义的。

当然,本方法实施时,关于热损失所引起的测量误差,还应当更加深入的探讨,以便使实验条件更加完善、合理。

另外,本方法还有待进一步推广其应用。

本研究是由104教研室杨宗浩同志,109研究室张超才、黄淑珍、王丽荣同志,503教研室郑霞卿、邢郁明同志以及78—531班的刘健、蒲远远和史百鸣3同学等共同完成的。本文由邢郁明执笔写成。

参 考 文 献

1. 固体推进剂火箭发动机的基本问题 F.A. Willans et al 著 京固译
2. 复合固体推进剂国防科技大学503教研室
3. A Ballistic Bomb Method of Determining the Experimental Performance of Rocket Propellants. Donald N. Griffin Charles F. Turner and Georget T. Angeloff A-RS. № 29 P15(1959).
4. 加压气体扩散对固体双基推进剂爆热的影响。木村一 久保田 浪之介 工业火药(日) V37 27(1976)
5. Combustion and Flame H.L. Gidher and A.J. Arore 28 291(1977)
6. 五机部204所计算值
7. 109研究室发动机实测值
8. 五机部245厂提供值
9. 爆炸法热力学研究和燃烧过程计算 (苏) A.M. 古尔维奇 Ю. X. 沙乌洛夫著 国防工业出版社1958版
10. 化工数学
(日) 河村 治等编 张克等译 化学工业出版社1980年出版