

绝热指数 k 的测定方法研究

罗蕴华 余大桂 张彦洪

摘 要

采用测压量热装置,能比较准确地测定推进剂燃气的绝热指数。本文叙述了此项实验研究的有关原理、公式推导和实验方法,并列举了双铅-2等四种推进剂的测试结果。

主题词: 1.燃烧热——测量 2.比热——测定

气体的定压比热 c_p 与定容比热 c_v 的比值, $c_p/c_v = k$,称为绝热指数,它是研究气体热力过程的一个重要参数。

在火箭技术中,表征能量效率的特征速度和推力系数都直接与 k 值有关:

$$\text{推进剂特征速度 } C^* = \sqrt{gf_p} / \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$$

$$\text{发动机推力系数 } C_F = k \sqrt{\left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \cdot \frac{2 \left[1 - \left(\frac{p_e}{p_c} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}{k-1}} \quad (1)$$

式中 f_p 为定压火药力, p_c 为发动机工作压力, p_e 为喷管出口压力。

对于 k 值,目前都是在给定推进剂成分和燃烧室压力的条件下,通过热力计算得出的理论值。而在火箭装药和发动机设计中,往往还要求有更多的实测参数值。因此,设法建立绝热指数 k 的测定方法,是有一定意义的。

一、基本原理与公式推导

依定义 $k = c_p/c_v$, 通过燃气比热的测定,就能求出 k 值。但对高温状态的推进剂燃气, c_p 和 c_v 的精确测定是困难的。因此,还需根据热力学原理,进一步推导出绝热指数 k 的能量关系式。

对于理想气体, c_p 和 c_v 之间的关系,符合迈耶公式,即 $c_p = c_v + nR$,而 $c_v = u/T_v$,所以:

$$k = \frac{c_p}{c_v} = \frac{c_v + nR}{c_v} = 1 + \frac{nR}{c_v} = 1 + \frac{nRT_v}{u}$$

其中 u 为气体的内能, T_v 为气体的定容温度。

当推进剂以装填密度 Δ 于量热弹内燃烧时,燃气的内能即为其爆热值 Q_v ;燃气的最大压力与 Δ 的比值即为其火药力:

$$u = Q_v, \\ f_s = nRT_v = p_m/\Delta$$

于是 $k = 1 + \frac{nRT_v}{u} = 1 + \frac{p_m}{\Delta \cdot Q_v}$, 或 $k = 1 + \frac{p_m}{J \cdot \Delta Q_v}$ (J为热功当量)。

可见, 如能在同一实验装置中, 精确测定出 p_m 与 Q_v , 就可求得 k 值了。这在目前的技术条件下, 是容易解决的。

二、仪器设备与实验方法

在测定爆热的量热弹弹盖上, 装一只小型电阻式测压传感器, 并用一台光线示波器记录传感器的输出信号。另有一台压力检验泵校正压力曲线。

实验条件和方法, 基本上按照兵器部标准 WJ54-75 “火药爆热测定方法” 的规定, 所不同的只是在测定爆热的同时, 测压系统记下弹内燃气的压力-时间曲线。这样, 通过一次实验和数据处理, 就能得出爆热 Q_v 值和弹内气体的压力 p 值。

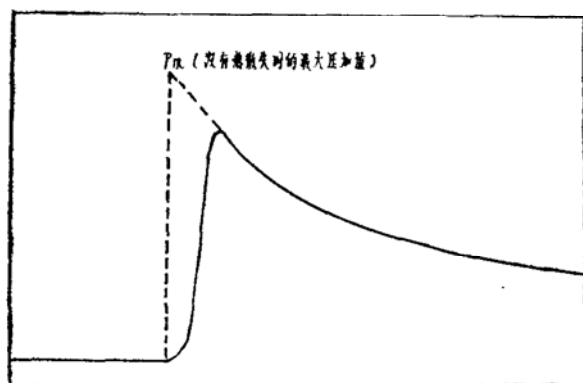


图1 $p-t$ 曲线外推求 p_m

为了求得最大压力的真值, 数据处理中应对热散失进行修正。比较简单而可靠的修正方法, 是 $p \sim t$ 曲线外推法^[2]。该方法认为: 推进剂在定容情况下燃烧, 如果没有热散失, 压力上升到最大值以后, 就基本上保持等压不变。但实际上, 由于不可避免的存在热散失, 压力会很快下降。如果点火是在瞬间完成, 那末, 在压力上升段也存在和压力下降段相同速率的热散失。这样, 我们可以按下降段的曲线斜率, 将压力曲线外推到对应于 $t = 0$ 的位置, 外推后的最大压力 p_m , 就是没有热散失时的真

实压力(如图1所示)。

三、测试结果的分析

表1列出了双铅-2等四种推进剂的实测数据和计算结果。

表2为理论计算值与实测值的对照。

由测试结果看出, 采用本文建立的实验方法测定绝热指数 k , 有较好的测量精度, 测试值与理论计算值的相对偏差在0.11~1.12%之间。

表1 四种推进剂的实验数据

推进剂名称	Δ (g/cm ³)	p_m (Pa)	$\left(\frac{p_m / \Delta}{\frac{\text{Pa} \cdot \text{cm}^3}{\text{g}}} \right)$	$Q_v(l)$ (kJ/kg)	绝热指数 k
双铅-2	0.0203	1.922×10^7	94.68×10^7	3541.3	1.258
双石-2	0.0202	1.932×10^7	95.64×10^7	3694.9	1.247
76-2	0.0200	2.187×10^7	107.35×10^7	4779.4	1.228
171-25	0.0149	1.687×10^7	113.22×10^7	5138.4	1.216

如果将本文所列的实测 k 值, 代入推进剂的比冲公式 $I_{sp} = C^* \cdot C_F / g$, 所得比冲值, 与弹道摆法测定的比冲值基本一致(见表 3)。

表 2 k 值的理论计算对照
实验数据

推进剂名称	$k_{理}$	$k_{测}$
双铅-2	1.252 ^{〔3〕}	1.258
双石-2	1.254 ^{〔3〕}	1.247
76-2	1.242 ^{〔4〕}	1.228
171-25	1.218 ^{〔3〕}	1.216

表 3 比冲 I_{sp} 值的对照

推进剂名称	弹道摆法	由 k 值推算
双铅-2	1949.5 m/s	1971.1 m/s
双石-2	1961.3	1990.7
76-2	2157.5	2158.4
171-25	2255.5	2226.1

表 4 双铅-2 推进剂的一组 Δ 、 p_m 和 p_m/Δ 值

编 号	ω (g)	Δ (g/cm ³)	(p_m Pa)	$p_m/\Delta = nRT = fv$ (Pa·cm ³ /g)	
1	2.9096	0.0096	0.9512×10^7	99.1×10^7	$\approx 97.95 \times 10^7$
2	3.9998	0.0134	1.3337×10^7	99.53×10^7	
3	4.9171	0.0165	1.5887×10^7	96.28×10^7	
4	6.0125	0.0201	1.9809×10^7	98.55×10^7	

四、讨论与结语

在推导绝热指数 k 的能量关系式时, 是完全遵从理想气体状态的规律处理的, 实际情况下的气体行为是否符合这种规律呢?

一般认为, 当测压量热弹的装填密度控制在 0.02 g/cm^3 以下时, 推进剂燃气的最大压力不会超过 $2.4517 \times 10^7 \text{ Pa}$, 而燃气温度将高达 2500 K 左右。对于此种状态下的气体行为, 计算时不考虑其分子本身的体积和分子间的相互作用, 而作为理想气体处理是可以的。

为了验证上述看法的合理性, 在测压量热弹中装填不同的推进剂量, 测得了表 4 所列数据。从中可以看出, 当装填密度在一定范围内变化时, p_m/Δ 值却基本保持不变, 这就清楚地说明了该条件下的气体行为, 符合理想气体状态方程所描述的规律。也就表明了本文建立的实验方法是合理的。

总之, 可以认为: 根据能量关系式 $k = 1 + p_m/J \cdot \Delta \cdot Q_v$ 建立起来的测压量热弹法, 能够比较准确地测定气体的绝热指数 k 值。通过 k 值的测定, 又能相当准确地将定容热力学参数转换为定压热力学参数。因而, 还可以采用测压量热弹法, 比较简便地测出某些过去只能在发动机上测得的推进剂参数, 如特征速度 C^* 、比冲量 I_{sp} 等。

参 考 文 献

- (1) 格拉斯曼, I., 索耶, R.F., 化学推进剂的能量特性。国防工业出版社, 1979年。
- (2) 热散失修正方法的理论和实验。华东工学院一〇三教研室, 1975年。
- (3) 火炸药手册。兵器工业部二〇四研究所。
- (4) 76-2 推进剂研制报告。华东工学院三〇一教研室, 1982年。