

火焰温度的光学测量

冯 文 澜

一、前 言

美国 Purdue 大学火箭发动机实验室在 J.R.Osborn 教授领导下, 发展了 GDP 及 PEM 模型^[1]。为了研究推进剂的能量特性以及温度和压力敏感度^{[2][3]}, 必须测量推进剂的燃速和火焰温度。为此, 设计和安装了一套伺服调节机构, 使燃烧表面在工作过程中, 自始至终保持在一个固定位置上。这样就可以测量燃烧的瞬时速度。在这同时, 有一套能自动测量和记录的装置用来测量火焰的温度。

二、火 焰 温 度

温度是一个很普通的概念, 但又很难下确切的定义。一般常用的热力学温度是指平动温度或动力学温度, 是气体分子运动平均动能的一个指标。每个质量为 m 的分子的平均动能为 $\frac{3}{2}KT$, 因此 $\frac{1}{2}m\bar{V}^2 = \frac{3}{2}KT$, 其中 $\bar{V}^2$ 为均方速度, K 为 Boltzmann 常数, 等于通用气

体常数 R 与 Avagadro 常数之比。因此平动温度这一宏观物理量 $T = \frac{1}{3} \frac{m\bar{V}^2}{K}$ 是与平均平动动能成正比的, 反映了气体分子运动的剧烈程度。用热电偶测量的温度就是这种温度。

从统计物理学的观点来看, 统计学温度和内能的分配有关。对于每一种能量分配可以定义一个相应的统计学温度, 如旋转、振动或电子温度。只有当系统处于完全热力学平衡(热平衡和化学平衡)时, 任一形式的能量值为统计学常值, 能量在各种可能的运动形式中均分。这时, 所有统计学温度都相同, 而且等于动力学温度。光学方法测量得到的温度往往是统计学温度。在利用光学方法测温时, 经常用到下面四个传热学原理中的基本辐射定律^[4]。

1. **Planck 辐射定律。**激发了的粒子可以在任何方向辐射以释放激发能量, 只要处于热平衡状态下, 也即同时发生各个方向的辐射吸收的话, 这种粒子的辐射总是存在的。这个定律表述了一个黑体在温度 T 时的辐射强度 I_λ (瓦·厘米⁻²·立体角⁻¹·微米) 和波长 λ 之间的关系。

$$I_\lambda = \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} \left\{ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right\}^{-1}$$

其中 $I_\lambda d\lambda$ 是在 $\lambda, \lambda + d\lambda$ 波长范围内辐射能量的容积密度。辐射常数 $C_1 = 1.177 \times 10^{-12}$ 瓦·厘米², $C_2 = 1.4320$ 厘米·度。

2. **Wien 移位定律。**根据上一定律可画出在不同温度 T 时, I_λ 和 λ 之间的关系。在某一波长 λ_m 时 I_λ 达最大值。温度增加, λ_m 趋向小值, 按下列关系变化:

$$\lambda_m T = 2.884 \times 10^7, (\text{\AA} \cdot \text{K})$$

其中 λ_m 为黑体在温度为 T 时, 辐射最大强度时之波长。

3. **Stefan-Boltzmann定律**。黑体在温度 T 时的辐射积分强度(瓦·米⁻²·立体角⁻¹)为

$$I = \sigma T^4$$

其中 σ 为一常数, $\sigma = \frac{2k^4\pi^5}{15h^3c^2}$, h 为Planck常数, C 为光速。

4. **Kirchhoff定律**。一系统处于热力平衡时, 实际(或非黑)物体的发射系数 ϵ_λ 等于其吸收系数 α_λ , 也即 $\epsilon_\lambda = \alpha_\lambda$ 。黑体是辐射能的完全吸收体, 故 $\epsilon_\lambda = \alpha_\lambda = 1$ 。非黑体的辐射强度为黑体的 I_λ 的 α_λ 倍。

三、常用光学测温法

在固体推进剂的燃烧研究中, 火焰温度是一个很重要的参数。火焰释放的能量最能用理论火焰温度来代表。火焰温度主要是由化学反应的能量来控制的, 但温度较高时, 火焰温度不能全部反映反应热的能量, 因为还有热量损失, 一部分能量用来加热燃烧产物和产生解离。火焰的绝热温度是可以计算的, 但必须知道燃气成分, 而燃气成分又决定于火焰温度。计算的结果必须用可靠的测量方法来验证。

温度测量通常归纳为两大类:

(1) 测温计法。这是一种接触式的测温方法, 可将金属丝或热电偶直接插入火焰区内。和热燃气温度平衡后的感头温度可通过电阻或电压的变化来测得, 也可用光学温度计来测量感头的亮度。这种方法得到的温度值往往比真实温度低, 因为有热传导和热辐射损失。此外, 热线表面会发生催化反应的干扰。探头愈大, 这种干扰因素的影响也就越大。现在这种热电偶感头可以用很细的金属丝制成, 例如一种Pt-Pt/Rh和Ir-Ir/Rh的热电偶是用直径为25到75 μm 的细丝制成^[5]。在用水冷的情况下, 热电偶也可用来测量较高的燃气温度。

(2) 光学测温法。这种方法利用热燃气的热辐射原理。在不发光火焰中, 这种辐射来源于激发的粒子, 如碳粒子。如果粒子的粒度很小, 就可以认为粒子和燃气处于热平衡状态。因此, 碳粒子的温度就能代表燃气的温度。传统的测量方法^[6]是用一个温度可标定和可调节的光源代表黑体(见图1)。光源成像靠一个透镜聚焦于火焰上。通过高温计上的物镜又将这两个成像投影到标定过的白炽灯灯丝上, 并可通过单色光滤光镜进行观察。滤光镜的透射度为 $F(\lambda)$ 。如火焰温度低于黑体温度, 观察到的发光强度降低。如提高火焰温度, 使高于黑体温度, 则发光强度增加。如两者相等, 则发光强度不变。此时, 通过单色光滤光镜看到的黑体亮度等于黑体辐射通过火焰及滤光镜后的亮度以及经过滤光镜后的火焰亮度之和。如不计火焰的反射及扩散,

$$\int I_L(\lambda, T_L) F(\lambda) d\lambda = \int [1 - \alpha_F(\lambda, T_F)] I_L(\lambda, T_L) F(\lambda) d\lambda + \int \epsilon_F(\lambda, T_F) I_F(\lambda, T_F) F(\lambda) d\lambda$$

其中注脚L和F分别代表光源和火焰。由Kirchhoff定律, 一个物体的发射强度等于相同温度和相同波长下的黑体的发射强度乘以该物体的吸收系数:

$$\epsilon_F(\lambda, T_F) I_F(\lambda, T_F) = \alpha_F(\lambda, T_F) I_L(\lambda, T_F)$$

所以 $I_L(\lambda, T_L) = I_L(\lambda, T_F)$ 。只当黑体温度 T_L 等于火焰温度 T_F 时上式成立。 T_L 则可由高温计读得。

对于非发光火焰则必须加入一种可激发金属，如钠或锂，这时谱振谱线的辐射强度最大。一般常用的测量方法是钠线转换法，也即在试件中加入食盐。钠会放射出两条黄色的谱振D线，波长各为5890.0及5895.9 Å。光源(也即黑体)通过透镜聚焦在钠盐的黄色谱振谱线上。当照射火焰的光源亮度比谱振线的亮度弱时，可看到在暗淡背景上有较亮的成像。反之，则表现出在较亮的背景上有一暗淡成像。当调节光源的亮度温度和火焰温度完全一致时，钠线因和背景亮度相同而反差消失。所以可改变光源亮度来达到谱线的自蚀，然后用光学高温计来测量背景的亮度温度，即可决定火焰温度。这种方法的钠线辐射来源于钠原子的电子转换，被测温度相当于电子激发温度，只当热燃气达到热力学平衡，这个温度才能用来代表热力学温度。一般认为钠线法接近于热力学平衡，但是尚不能确切证明。

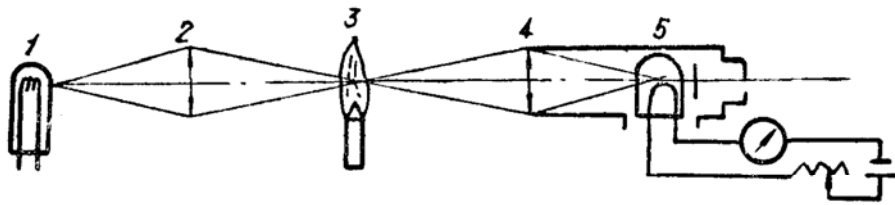


图1 火焰温度测量简图

1.光源 2.透镜 3.火焰 4.透镜 5.白炽灯

四、改良后的测温法

基于上述光学测量火焰温度的基本技术，发展了一种适用于固体推进剂燃烧火焰温度的测量方法。图2及图3表示了光学系统图。光源可以是白炽灯或激光。最常用的光源是钨丝

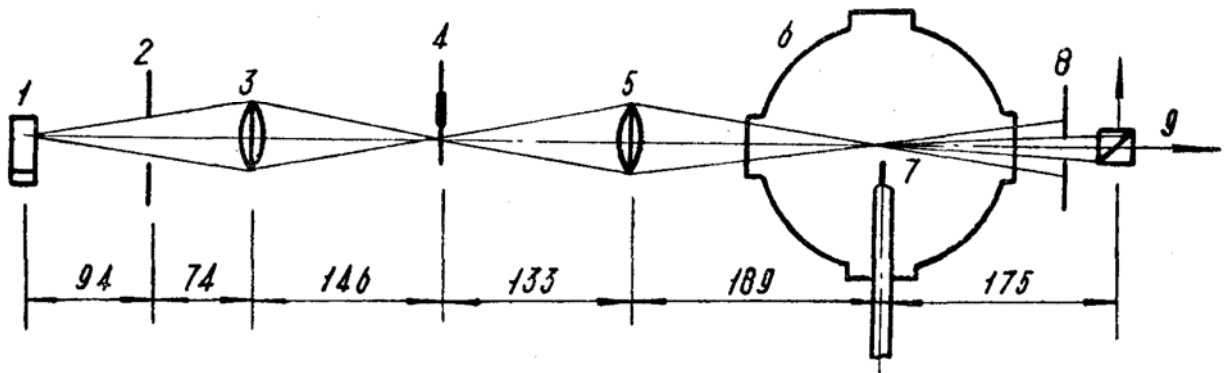
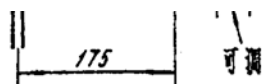


图2 测温火源简图

(图中尺寸为mm)

1.比较用光源(GE18A/TIO/2P) 2.光阑 3.透镜($f=78\text{mm}$, $d=54\text{mm}$, AJaeger No.13E2695) 4.遮光片(450周/秒) 5.透镜(同3) 6.燃烧器 7.推进剂试件 8.光阑 9.分光镜

(片)灯，不单因为它便宜实用，而且对它的性能了解清楚，它的温度可以很方便地用一光学高温计测得，它的输出也可靠改变电流来变化。灯光经一光阑的限制后，使光线全部落到一个透镜上，透镜又将光源映像聚焦到一个旋转遮光片上。遮光片是一钢制薄圆片，靠一微型电机带转。根据遮光频率要求及电机转速，在圆片上铣出若干径向缺口。圆片作匀速旋转



1. 燃烧器 2. 推进剂试件 3. 分光镜 4. 可调透镜($f, f.i. = 216\text{mm}$, $d = 47\text{mm}$, 厚 24mm) 5. 透镜($f, f.i. = 478.8\text{mm}$, $b, f.i. = 474.9\text{mm}$, $e, f.i. = 482.6\text{mm}$, 厚 18mm) 6. 进口狭缝 7. 透镜($f = 300\text{mm}$, $d = 30\text{mm}$) 8. 单色光镜(Gaertner L230型) 9. 出口狭缝 10. 滤光镜(120周/秒) 11. 光电管(RCA IP21)

—26—

射能量强度。辐射电子落到光电阴极上并经几级放大后由阳极输出。加在这几级上的电压必须控制在 $\pm 0.1\%$ 误差范围内。由于光电管不能同时分辨两个不同波长,必须将需要测量强度的各个波长孤立出来。光电管的安排必须使来自出口狭缝的单色光辐射能量最大程度地加以利用,也即使光电阴极面积能拦截全部光束。光电管的输出给交流放大器放大后进入记录系统。高增益的交流放大器比直流放大器容易制造,敏感度高,又比较稳定,但不能处理稳态或低频输入讯号,这就是为什么要在系统中装上遮光片的一个理由。光电管的响应频率很高,所以遮光频率可以很快。放大器调谐后必须和由于遮光而引起的光电流以同一频率变化。频带愈窄,被放大的噪音部分就愈小,检测界限也愈低。这里的检测界限是指为了使光电管产生一个和噪音相等的电讯号所必需的辐射能量输入。光电管的输出随着时间的变化如图4所示。

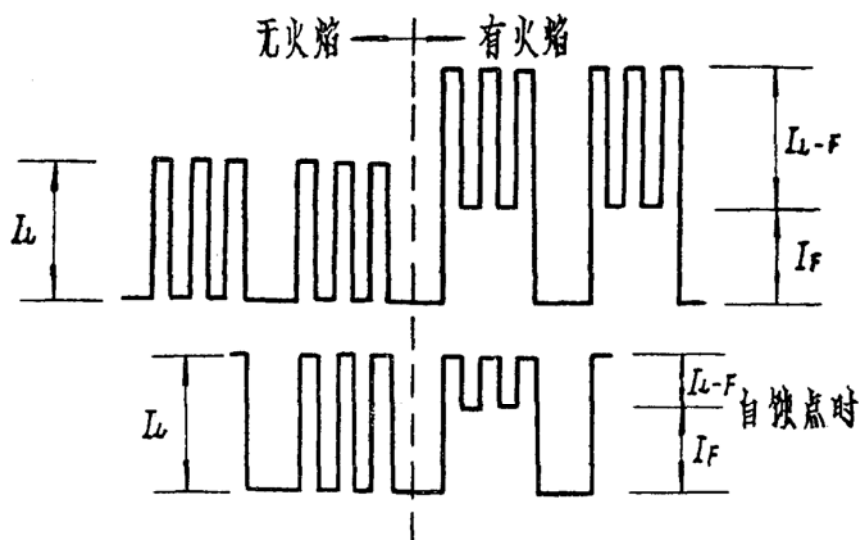


图4 光电管输出

I_F : 只是由于火焰本身在波长为 λ 时的辐射强度所引起的光电管输出。

I_L : 只是由于光源本身在波长为 λ 时的辐射强度所引起的光电管输出。

I_{L-F} : 由于光源光束经火焰后的辐射强度所引起的光电管输出。

根据测量数据 $(I_L - I_{L-F})/I_F$, 如光源温度 T_L 已知, 即可由下式计算火焰温度

$$T_F = \frac{C_2}{\lambda} \left[\ln \left\{ \frac{I_L - I_{L-F}}{I_F} \left[\exp(c_2/\lambda T_L') - 1 \right] + 1 \right\} \right]^{-1}$$

式中 T_L' 为在火焰位置处光源的亮度温度, 它定义为一个黑体在波长为 λ 时的温度, 这个黑体具有和光源在波长为 λ 时相同的辐射能量。 T_L' 可以用光学高温计测得。

光电管的输出是用下式表示的:

$$I_L = \tau_1 \tau_2 \omega_1 A_1 K \int_{\lambda_1 + \delta\lambda}^{\lambda_1} \epsilon_L(\lambda, T_L) J_L(\lambda, T_L) d\lambda$$

$$I_F = \tau_2 \omega_2 A_2 K \int_{\lambda_1 + \delta\lambda}^{\lambda_1} \epsilon_F(\lambda, T_F) J_F(\lambda, T_F) d\lambda$$

$$I_{L-F} = \tau_1 \tau_2 \omega_1 A_1 K \int_{\lambda_1 + \delta\lambda}^{\lambda_1} \left[1 - \alpha_F(\lambda, T_F) \right] \epsilon_L(\lambda, T_L) J_L(\lambda, T_L) d\lambda$$

上述各式中, 黑体发射的辐射能为

$$J(\lambda, T) = c_1 / [\pi \lambda^5 (e^{c_2 / \lambda T} - 1)]$$

光源的实际温度 T_L 和亮度温度 T'_L 之间的关系可由上述热辐射基本定律推导出为

$$\varepsilon_L(\lambda, T_L) (e^{c_2 / \lambda T_L} - 1)^{-1} = (e^{c_2 / \lambda T'_L} - 1)^{-1}$$

其它一些参数为

τ_1, τ_2 : 分别为光源和火焰间以及火焰和光电管之间的光学传送系数。

ω_1, ω_2 : 分别为进入单色光镜的准直透镜时由光源和由火焰内辐射物的辐射立体角。

A_1, A_2 : 由光源和火焰内辐射物质照亮的单色光镜窄缝面积。

适当的光学设计可使 $\frac{\omega_1 A_1}{\omega_2 A_2} = 1$, 故经整理后即可得到上述求火焰温度的公式。为了方便, 也可画成曲线, 如图 5 所示。

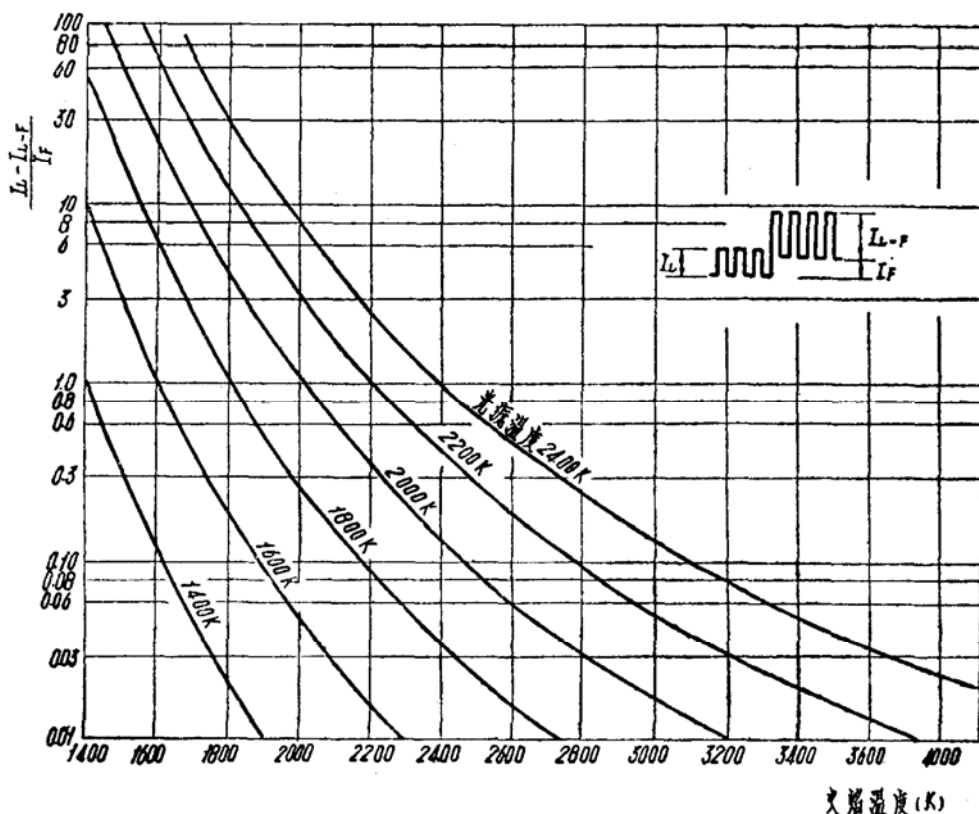


图 5 火焰温度曲线

上述测温法在设计时必须注意下列几点:

1. 火焰中的辐射物质(如食盐)必须和火焰燃气达成热力学平衡。因为被测温度是辐射物质的电子激发温度, 而常用的是热力学温度。只当热力学平衡时, 热力学温度才等于统计学温度。
2. 在被测波长区间内的 ε_L , ε_F 及 α_F 必须为常值。
3. 火焰中如含有其它固体质点时, 会引起火焰内辐射能的辐射、吸收和散射。所以这种方法不适用于含铝量较大的推进剂。
4. 光学系统的设计必须满足 $A_1 \omega_1 = A_2 \omega_2$ 。
5. 光电管的输出必须和辐射能量的输入是线性关系。

由于本方法不适宜用于加铝推进剂, 因此有必要用一个高强度光源(如激光)来代替钨丝灯, 由于粒子散射引起的光源辐射衰减可以用适当的标定方法^[6]来纠正。

使用激光来确定燃气温度的常用方法是Raman散射法^[7]。但是由于讯号较弱及其不相关特性, 所以只限于较干净的火焰。对于烟灰含量多的火焰, 很可能使用很有发展前途的CARS方法^[8]。

参 考 资 料

1. Beckstead, M.W., Derr, R.L. and Price, C.F., A model of composite solid propellant combustion based on multiple flames, AIAA Journal, V 8, NO. 12, Dec. 1970
2. Condon, J.A., Renie J.P. and Osborn, J.R., Temperature sensitivity of propellant burning rate, Combustion and Flame, 30, 1977
3. Renie, J.P. and Osborn, J.R., Temperature and pressure sensitivity of aluminized propellants, AIAA 80-1166
4. Gaydon, A.G. and Wolfhard, H.G., Flames, their structure, radiation and temperature, 4th Edition, Chapman and Hall, London, 1979
5. Chigier, N.A., Measurement in multiphase reacting flows—A review, AIAA 79-0082
6. Mavrodineanu, R. and Boiteux, H., Flame spectroscopy, John Wiley & Sons
7. Greig, J.R., Brit. J. Appl. Phys., 16, 957 (1965)
8. Salzman, J., Determination of gas temperature from laser—Raman scattering, NASA TN D-6336, 1971
9. Eckbreth, A.C., Investigations of coherent anti-Stokes Raman spectroscopy for combustion diagnostics, AIAA 79-0083