

基于图像处理技术的补燃室火焰温度场测量

张 龙, 夏智勋, 胡建新

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南, 长沙 410073)

摘 要: 为了测量补燃室火焰温度场, 在直连式试车台上进行二维开窗式固体火箭冲压发动机试验, 应用高速数字摄影仪对补燃室内的火焰进行拍摄。对所获得的火焰图像, 根据基于彩色 CCD 图像的比色测温原理, 求得补燃室火焰的投影温度场。结果表明这种方法简单可靠, 测量精度也满足要求, 可以用来对补燃室火焰温度场进行测量。

关键词: 比色测温法; 补燃室; CCD; 温度场

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2007) 06-0057-05

Flame temperature measurement in secondary combustion chamber based on image processing

Zhang Long, Xia Zhixun, Hu Jianxin

(Inst. of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to measure the temperature field of the flame in the secondary combustion chamber, a test was conducted on a direct-connect test bed for ducted rocket motor which consisted of a secondary combustion chamber with a window. A high-speed photography was used to collect the image data of the flame. Based on colorimetric temperature-measurement method, temperature field of secondary combustion chamber is calculated. The result shows this method is reasonable.

Key words: colorimetric temperature measurement method; secondary combustion chamber; CCD; temperature field

1 引言

温度是固体火箭冲压发动机补燃室的一个重

要参数, 它对于补燃室燃烧状况的判断、预测和诊断, 有着非常重要的意义。补燃室里的燃烧温度很高, 因此补燃室的温度测量属于高温测量的范畴。高温测量可采用高温热电偶, 但热电偶直

收稿日期: 2006-10-26; 修回日期: 2007-01-10。

作者简介: 张龙 (1983-), 男, 硕士, 研究领域为国体火箭冲压发动机设计。

接与燃烧火焰接触,会对燃烧室内部的燃烧及气流流动情况造成影响;而且暴露在高温火焰中的热电偶头很容易被烧熔和吹断,也会影响测量的准确性。红外测温技术近年来得到了越来越广泛的应用,但由于补燃室窗体所用的石英玻璃对红外区的辐射能透过率变化很大,远红外区的透过率降到0.05以下,因此红外测温技术不适合用来对补燃室的火焰温度进行测量。另一种理想的手段是采用激光测量(CARS),但成本昂贵。

采用数字图像处理技术是另一种较为可行的高温测试手段。它通过摄取补燃室内某个时刻的火焰图像,借助光学理论和计算机图像处理技术得出整个燃烧室内部的温度分布情况。该方法设备不复杂,易操作,测量精度也令人满意,是一种新颖的非接触、实时测量手段。本文将具体探讨该技术在固体火箭冲压发动机补燃室火焰温度测量中的应用。

2 试验系统

为了拍到补燃室的火焰图像,在直连式试车台上进行二维开窗式固体火箭冲压发动机试验,利用 Photron FASTCAM-ultimaAPX 高速数字摄影仪对补燃室内的火焰进行拍摄。图1为试验所用到的二维开窗式固体火箭冲压发动机简图。

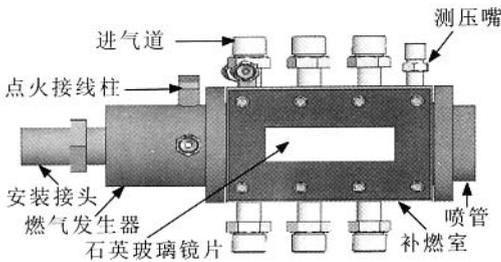


图1 二维开窗式固体火箭冲压发动机简图

Fig.1 2-D view of the combustion ducted rocket model

试验中的二维开窗式固体火箭冲压发动机的设计是一个难点,一是补燃室内压强比较高,必须确保试验系统的密封性;二是补燃室内温度比较高,所以必须确保窗体的抗热性能以及防止高温和颗粒冲刷对镜片的损害;三是在燃烧过程中

为了观察清楚,希望窗口镜面洁净,而在发动机工作过程中,不可避免会产生由燃气发生器进入补燃室的大量固体颗粒形成的烟雾。

3 图像测温原理

根据辐射定律,发射连续光谱的物体的单色辐射强度与它的温度间的关系由 Planck 辐射公式表达

$$E_{\lambda}(T) = \varepsilon(\lambda, T) E_{\text{ba}} \\ = \varepsilon(\lambda, T) \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} \quad (1)$$

式中, $E_{\lambda}(T)$ 为物体的单色辐射强度, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$; E_{ba} 为黑体的光谱辐射强度, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$; λ 为光谱波长, μm ; $\varepsilon(\lambda, T)$ 为物体的辐射率; T 为绝对温度, K ; $C_1 = 3.741832 \times 10^8 \text{W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$, 为第一辐射常数; $C_2 = 1.4388 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$, 为第二辐射常数。

在燃烧火焰辐射可见光波长范围内 ($0.380 \sim 0.780 \mu\text{m}$), 以及温度在 3000K 以下时, $C_2/\lambda T \gg 1$, Planck 辐射定律可由维恩辐射定律代替

$$E_{\lambda}(T) = \varepsilon(\lambda, T) C_1 \lambda^{-5} \exp(-C_2/\lambda T) \quad (2)$$

如果能同时测量到发光火焰同一点发出的不同波长下的单色辐射能,则根据它们的比值即可计算出该点的绝对温度。我们可以充分利用彩色 CCD 本身所具有的特性简单地解决这个问题。

彩色面阵 CCD (电子耦合器件) 摄像器件的色度学基础是 RGB 三基色学说,当它们按不同的比例叠加时,就能模拟不同波长的单色光源。相应地,由 CCD 获取的彩色火焰图像在计算机内是以像素为单位逐点存储的。当用彩色 CCD 观察火焰时,在 CCD 光谱响应函数的作用下得到火焰图像的三刺激值 R, G, B (又称为彩色分量)^[4], 即

$$\left. \begin{aligned} R &= k_R \int_{0.38}^{0.78} r(\lambda) E_T(\lambda) d\lambda \\ G &= k_G \int_{0.38}^{0.78} g(\lambda) E_T(\lambda) d\lambda \\ B &= k_B \int_{0.38}^{0.78} b(\lambda) E_T(\lambda) d\lambda \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中, k_R 、 k_G 、 k_B 为 R, G, B 三个通道的增益系数; $\bar{r}(\lambda)$ 、 $\bar{g}(\lambda)$ 、 $\bar{b}(\lambda)$ 为 R, G, B 三个通道的光谱响应函数, 与镜头、滤色片和摄像器件的特性有关; $E_T(\lambda)$ 为火焰在温度为 T 时的辐射强度, 它是波长 λ 的函数; 对 CCD 光谱响应曲线进行窄带宽的理想化假设, 得到

$$\left. \begin{aligned} R &= k_R \int_{0.38}^{0.78} \bar{r}(\lambda) E_T(\lambda) d\lambda = K_R E_T(\lambda_R) \\ G &= k_G \int_{0.38}^{0.78} \bar{g}(\lambda) E_T(\lambda) d\lambda = K_G E_T(\lambda_G) \\ B &= k_B \int_{0.38}^{0.78} \bar{b}(\lambda) E_T(\lambda) d\lambda = K_B E_T(\lambda_B) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中, $\lambda_R=0.700\mu\text{m}$, $\lambda_G=0.5461\mu\text{m}$, $\lambda_B=0.4358\mu\text{m}$ 分别为在窄带宽的理想化假设条件下, R, G, B 三个通道对应的特征波长; K_R 、 K_G 、 K_B 为窄带宽的理想化假设后 R, G, B 三个通道的增益系数, 它与具体的 CCD 器件有关, 可以通过黑体炉标定得到⁷。

不失一般性, 选取彩色分量 G 、 B 来求解温度。由式 (2)、式 (4) 得

$$T = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_B} - \frac{1}{\lambda_G} \right)}{\ln \frac{G}{B} + 5 \ln \frac{\lambda_G}{\lambda_B} + \ln \frac{K_B}{K_G} + \ln \frac{\varepsilon_{\lambda_B}}{\varepsilon_{\lambda_G}}} \quad (5)$$

其中, ε_{λ_B} 、 ε_{λ_G} 分别为火焰在特征波长 λ_B 、 λ_G 下的辐射率。

对于补燃室的火焰来说, 由于其主要辐射成分是辐射光谱连续的固体颗粒, 可近似看作是灰体, 则式 (5) 简化为

$$T = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_B} - \frac{1}{\lambda_G} \right)}{\ln \frac{G}{B} + 5 \ln \frac{\lambda_G}{\lambda_B} + \ln \frac{K_B}{K_G}} \quad (6)$$

对于确定的 CCD 器件, $\ln(K_B/K_G)$ 是随温度的变化规律可以通过黑体标定得到, 所以只要从补燃室火焰图像上求得某一点的两个彩色分量, 就可得到该点的温度。

用上述方法测量实际物体的温度, 只有当实际物体是黑体或灰体的时候所测到的温度才是实际物体的真实温度。若实际物体不是黑体 (或灰

体), 那么比色法得到的是比色温度。

4 误差分析

在试验过程由于试验环境, 图像采集系统和测温原理所采取的假设, 都会对测量结果带来误差。这里主要讨论窄带宽假设和灰体假设带来的误差。

基于彩色 CCD 图像的比色测温公式是在对 R, G, B 三个通道进行窄带宽假设条件下推导的。实际上由于 R, G, B 三个通道都存在一定的带宽, 这样求解温度会引入测量误差, 因此必须加以考虑。事实上, 由 CCD 的带宽引起的亮度变化归入式 (4) 中的 K_i ($i=R, G, B$) 因子, 可以通过 K_i 校正测量误差。因为 K_i 因子包含了摄像机光路系统以及具体光学系统的作用, 是一个反映测量系统特性的综合参数。通过黑体炉设定不同的温度, 可以较准确地确定测量系统的 K_i 因子, 降低误差的影响。

比色测温法假设火焰是灰体, 即火焰比辐射率为 1, 这时测得的温度为火焰的真实温度。而实际的火焰并不满足这些条件, 则测得的比色温度与真实温度之间必然存在误差。

令 $x = \varepsilon_{\lambda_i} / \varepsilon_{\lambda_j}$, $y = T_j - T$, $C = C_2 \left(\frac{1}{\lambda_j} - \frac{1}{\lambda_i} \right)$, 其中 i 分别取 B, G, R, 与 i 相对应, j 分别取 G, R, B。由式 (5), 式 (6) 可以得出:

$$y = \frac{T^2 \ln x}{C - T \ln x} \quad (7)$$

以 T 作为参量, 按上式做出了不同真温 T 下的 $y-x$ 曲线。图 2 ($x = \varepsilon_{\lambda_G} / \varepsilon_{\lambda_B}$, $y = T_{GB} - T$), 图 3 ($x = \varepsilon_{\lambda_R} / \varepsilon_{\lambda_G}$, $y = T_{RG} - T$), 图 4 ($x = \varepsilon_{\lambda_B} / \varepsilon_{\lambda_R}$, $y = T_{BR} - T$) 分别为采用不同分量计算温度时的测量误差曲线。从图中可以看出, 如果比辐射率为 1, 测量没有误差, 如果偏离 1 较大, 测量误差较大。当火焰温度越高时, 误差曲线斜率越大, 表明误差增加越明显。同时也可以看出, 采用 R, B 两个分量计算得到的温度误差最小。

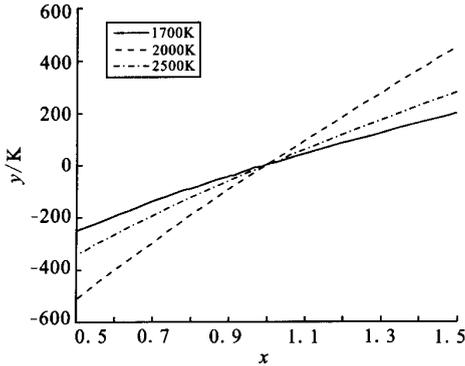


图2 采用 G, B 分量计算温度的测量误差曲线

Fig.2 Error curve of temperature calculated by G and B

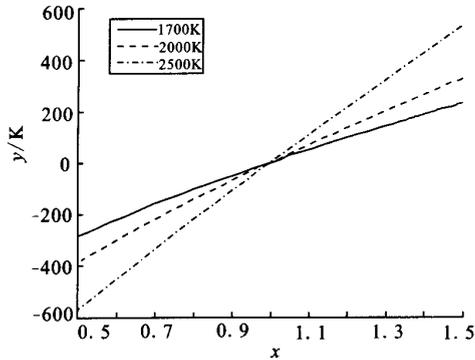


图3 采用 R, G 分量计算温度的测量误差曲线

Fig.3 Error curve of temperature calculated by R and G

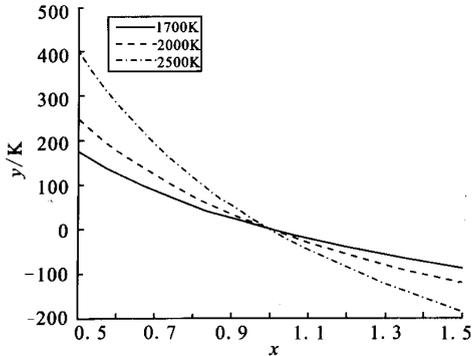


图4 采用 B, R 分量计算温度的测量误差曲线

Fig.4 Error curve of temperature calculated by B and R

5 测量实例

利用如下高速数字摄影仪设置：2000 帧/秒，

单帧曝光时间 0.125ms。但受高速数字摄影仪本身的限制，此时单帧图像的分辨率为 512×512 像素。试验所采用的推进剂为含硼推进剂，具体配方体积质量为：经过 AP 包覆后的 B，30%；Mg，5%；AP，30%；KP，5%；HTPB，30%。选取其中一次试验进行研究。该次试验试验条件如下：前进气道距离头部 35mm，后进气道距离头部 75mm，空燃比为 18。图 5 给出了该次试验一个瞬间补燃室的火焰图像，图 6 分别给出了采用上述方法所求得的火焰温度分布伪彩色图，图 7 分别给出了火焰等温曲线图，为了减小计算误差，采用了 R 和 B 两个分量来进行求解。因为在这一瞬间，火焰并没有充满整个图像，图像中非火焰区域已经不属于图像测温的范围，根据经验设定这些区域温度为 1600K。由火焰原图可以看出，部分区域因为火焰温度较高，辐射能力较强，使得拍到的火焰对应区域已经达到饱和，因此对应区域所计算得到的温度偏差较大。



图5 补燃室的火焰图像

Fig.5 Image of flame in secondary combustion chamber

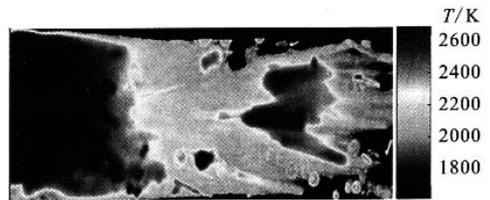


图6 火焰温度分布图

Fig.6 Temperature distribution of the flame

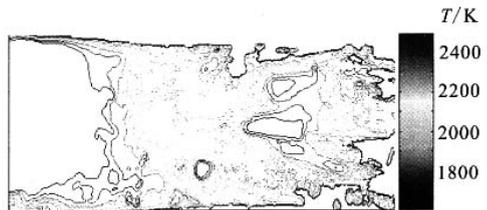


图7 火焰等温线图

Fig.7 Isotherm of the flame

为了更加准确的描述补燃室的燃烧温度水平, 提出了加权平均温度的概念, 所谓的加权平均温度, 是针对火焰图像提出来的。对于某一幅火焰图像, 我们是根据图像某一像素点的 R, G, B 值来求温度的, 加权平均温度是指所有温度与该温度下的像素点数占整个火焰图像像素的百分比乘积之和, 即

$$T = \sum_{i=1}^N T_i \varphi(T_i) \quad (8)$$

其中, $\varphi(T_i)$ 为温度为 T_i 的像素点数所占整个火焰图像像素的百分比; N 为求出的温度个数。图 8 为某一次试验的加权平均温度曲线。从图 8 中可以看出, 在试验开始阶段, 火焰温度已经超过 2400K, 这是因为由于点火药包的作用, 火焰在初始阶段辐射能力非常强, 所拍摄到火焰图像均已饱和, 而且火焰充满了整个图像, 因此所计算出来的温度偏高。之后, 火焰温度一直在 2200K 上下波动, 总体来说比较稳定。

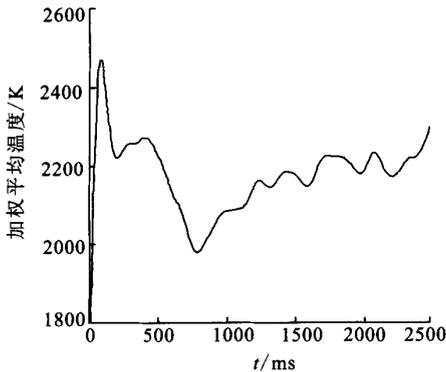


图 8 加权平均温度曲线

Fig.8 Curve of average temperature

冲压发动机试验, 并应用高速数字摄影仪对补燃室内的燃烧现象进行摄影观测。对所获得的火焰图像, 根据基于彩色 CCD 的比色测温原理, 利用火焰图像的彩色分量, 求解得到了补燃室的温度场, 测量精度基本满足要求。

数字摄影仪所拍摄到的火焰图像实际上是补燃室三维火焰在 CCD 靶面的一个二维叠加, 因此所求解得到的温度场实质上是一个“投影”温度场。虽然它不反映空间沿高度方向的温度信息, 但仍然可以获得补燃室重要的燃烧状态信息。

参考文献:

- [1] Byrne S O, Danehy P M. Nonintrusive Temperature and Velocity Measurements in a Hypersonic Nozzle Flow[R]. AIAA 2002-2917.
- [2] 胡建新. 含硼推进剂固体火箭冲压发动机补燃室工作过程研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学.
- [3] 王庆有编著. CCD 应用技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 2000.
- [4] 汤顺青 编著. 色度学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988.
- [5] 盖顿 A G, 伍法德 H G 著, 王方 编译. 火焰学[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1990.
- [6] 孙旋. 基于改进比色测温法的全炉膛火焰监测和燃烧诊断技术研究[J]. 电站系统工程, 2001, 17(6): 366-370.
- [7] 贾涛, 程强, 韩曙东, 等. 一种火焰辐射图像探头的标定方法[J]. 热力发电, 2002, 23(5): 23-25.
- [8] 胡春波, 韩新波, 何洪庆, 等. 固体火箭冲压发动机补燃室冷态流场实验研究[J]. 推进技术, 2004, 25(2): 111-113.

6 结论

在直连式试车台上进行二维开窗式固体火箭

(编辑: 陈红霞)