

氢/氮电弧加热发动机内壁面温度分布测量

黄河激, 潘文霞, 孟显, 吴承康

中国科学院力学研究所 等离子体与燃烧中心, 北京
北京市海淀区北四环西路 15 号, 100190

Email: huang@imech.ac.cn

关键词: 电弧加热发动机, 热辐射, 温度测量

摘要: 电弧加热发动机喷管温度对发动机伏安特性、推力性能均有明显影响。然而低功率电弧加热发动机喷管尺寸通常较小, 喷管内部过程涉及复杂的传热与流动问题, 对其内部参数进行实验测量需将固壁、电弧以及羽流的相互干扰分离, 难度较大。本文采用滤光成像的方法, 测量了 1kW 级氢/氮电弧加热发动机内壁面温度分布, 并分析了该方法的适用条件和可能的误差来源。

1 引言

电弧加热发动机 (Arcjet) 在比冲、推力、技术实现难度以及可靠性等方面具有优异的综合性能^[1], 是适合执行卫星姿态控制、位置保持、轨道转移等任务的一类发动机, 在国际上已经得到了较为广泛的应用。推力效率是星载发动机的重要指标之一。电弧加热发动机的效率与发动机内部的复杂传热与流动以及能量转换过程密切相关, 而发动机喷管正是完成该复杂过程的核心部件。一方面, 喷管通常兼做阳极, 用于产生直流电弧来加热气态推进剂, 形成最高温度达一万度以上的高温部分电离气体 (等离子体)。另一方面, 由收缩段、喉道、扩张段构成的喷管通过喷截面积的变化把等离子体流从亚声速加速到超声速, 气流在膨胀降温的同时提高喷出速度和推力。因此, 喷管的通道结构以及喷管周围所涉及的流动与传热问题, 对于提高电弧加热发动机效率起着重要作用。然而, 低功率电弧加热发动机喷管尺寸很小, 涉及复杂的传热与流动问题, 对其内部参数进行实验测量需将固壁、电弧以及羽流的相互干扰分离, 实施难度较大。通常采用数值模拟计算研究喷管内部的传热与流动, 但计算结果的可信度依赖于实验测量给出的边界条件。

前期研究发现, 电弧加热发动机喷管温度对发动机伏安特性、推力性能均有明显影响^[2]; 喷管内壁面温度分布能从一定程度上反映电弧与喷管相互作用机理。同时, 前期工作中初步验证了滤光拍照法测量喷管内壁面温度的可行性^[3]。本文进一步深入分析了滤光成像测喷管内壁面温度方法的适用条件以及喷管扩张半角等因素对该方法测量结果带来的误差。

2 滤光成像测温方法及初步实验结果

由普朗特黑体辐射定律, 黑体在某一波长的辐出度 $M_{b\lambda}$ 仅与黑体的温度相关:

$$M_{b\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (1)$$

式中 h 为普朗克常数, k 为波尔兹曼常数, c 为光速, λ 为特征波长, T 为黑体温度。理论上只需准确测量黑体的辐出度即可获得黑体的温度。滤光成像测温方法与常用的红外测温原理类似, 即是选用合适的干涉滤光片, 用相机拍摄物体发光照片, 建立物体温度 \rightarrow 物体辐亮度 \rightarrow 照片强度之间的联系, 采用图像分析的方法由照片强度反推出物体的温度分布。当用相机拍摄实际物体时, 图像上所获得的强度 $M_{b\lambda}$ 与实际物体的辐射系数、物体结构带来的有效辐射系数变化、光路损失、成像传感器灵敏度等相关。将这些参

数用 $K(\epsilon, L)$ 表示, 则实际获得的图像强度 M_λ 可简单表示为:

$$M_\lambda = K(\epsilon_\lambda, L)M_{b\lambda} \quad (2)$$

在同样光路上, 将已知温度的同样辐射系数物体与图像强度进行标定, 即可建立物体温度与图像强度的对应关系。对于温度均匀的平板状被测物体, 利用上述方法可以简单准确快速地测量物体温度。而对于低功率电弧加热发动机的喷管而言, 该方法所需考虑的问题则要复杂一些。

我们在中科院力学所空天等离子体动力学实验平台上搭建了滤光成像喷管测温系统, 如图 1 所示。通过喷管出口下游 45° 放置的水冷铜镜, 将发动机工作时喷管内部情况反射出真空腔体, 通过选定的合适波长滤光片, 用长焦摄像机拍摄喷管内部的单波长热辐射信号图像。所用的电弧加热发动机喷管结构和尺寸示于图 2。采用圆锥形喷管, 喷管喉道直径为 0.7 mm, 扩张半角为 15° , 出口直径为 11.25 mm。通过摄像机拍摄获得的照片是图 2 中的 A-A 视图, 包括阴极尖 o, 喉道轮廓圆 c 以及喷管边缘 d 和 e。

当喷管内壁面为非漫反射表面时, 多次定向反射会导致拍摄获得的照片中各区域强度显著不同, 且难以定量修正。因此, 使用滤光成像测温法时必须首先要求被测物体应是朗伯漫辐射源。我们所使用的喷管内壁面采用放电加工, 符合漫反射源的基本要求。但同时, 即便是漫辐射源, 扩张段凹腔内壁面某一点辐射出的能量也会被喷管内部其他地方多次均匀反射和吸收, 也会导致内壁面有效辐射系数增大。这一现象通常被用于制造黑体辐射源。因此, 即便喷管温度恒定, 实验获得的图像强度在凹腔内部以及喷管外壁面也会有所区别。W.A. Hoskins 等^[4]采用类似的滤光成像测温方法, 初步测量了 10 kW 氢电弧加热推力器的喷管内壁面温度, 结果显示喷管出口内壁面温度约比喷管端面温度高 200 K 左右。这一结果我们认为正是由于文献[4]中未考虑喷管形状对有效辐射系数的影响。

对简单形状凹腔(球、圆柱、圆锥)内部有效辐射系数的计算, Gouffe 理论^[5]可以比较准确地估算。Gouffe 给出的有效辐射系数 (ϵ_a) 公式为:

$$\epsilon_a = \frac{\epsilon_0 \left[1 + (1 - \epsilon_0) \left(\frac{\Delta S}{S} - \frac{\Delta \Omega}{\pi} \right) \right]}{\epsilon_0 \left(1 - \frac{\Delta S}{S} \right) + \frac{\Delta S}{S}} \quad (3)$$

式中, ϵ_0 为腔内壁材料的辐射系数, S 为腔内壁面积(包括开孔面积), ΔS 为开孔面积, $\Delta \Omega$ 为开孔面积对应的立体角。本文中利用该式对喷管的辐射系数进行修正。图 3 (a) 给出了根据 (3) 式计算得到的 ϵ_0 不同时, 有效辐射系数 ϵ_a 随喷管扩张半角 (θ) 变化的影响。当为 90° 时, 对应平板物体, 此时有效辐射系数 ϵ_a 等于材料本身的辐射系数 ϵ_0 。从图中可以看出, 材料本身辐射系数越大, 喷管扩张半角对有效辐射系数的影响越小。在喷管的不同轴向位置, 其投射角不同, 因此喷管轴线位置不同处的壁面有效辐射系数也不相同。图 3 (b) 给出了当为 ϵ_0 为 0.46 时, 不同喷管扩张半角条件下, 有效辐射系数在喷管不同轴向位置的变化规律。从图中可以看出, 喷管扩张半角越小, 有效辐射系数在喷管轴线上的变化越大, 但相比于喷管扩张半角的影响来说, 轴线位置的变化对有效辐射系数的影响较小。

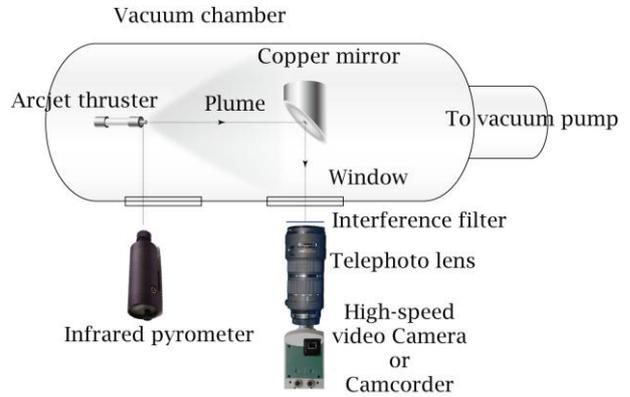


图 1 实验系统示意图

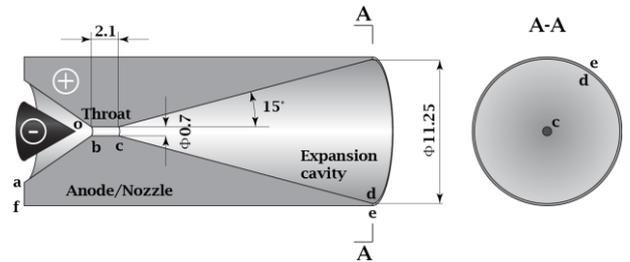


图 2 喷管尺寸和结构示意图

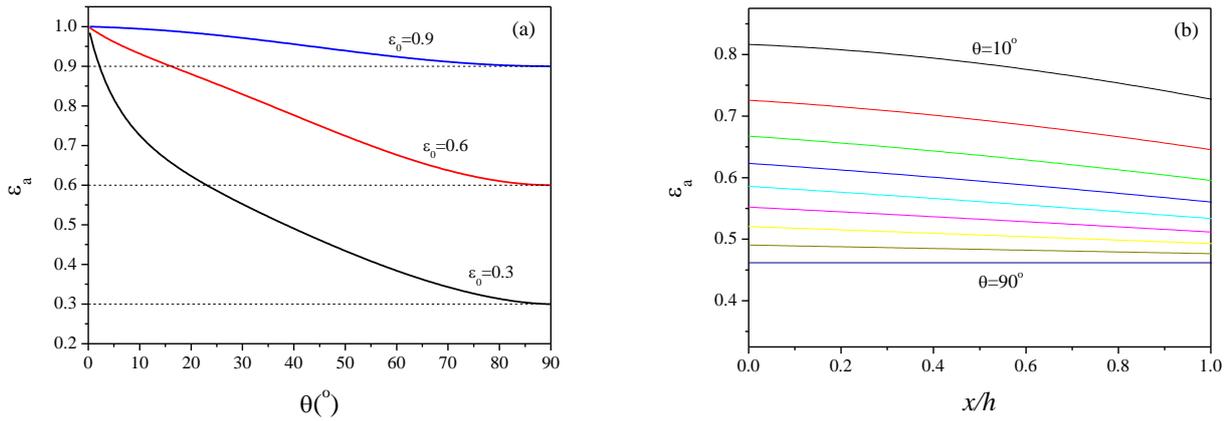


图3 喷管结构对有效辐射系数的影响规律。(a) 扩张半角的影响；(b) 轴向位置的影响

除物体本身的辐射系数修正外，在图1所示的实验系统中还必须考虑光路损失和修正。光路损失主要包括如下方面：气体吸收和散射，铜镜反射，滤镜、镜头损失以及相机传感器感光效率影响。光路损失对测温结果的影响较小，这是因为一方面，光路中气体、铜镜本身吸收率很低；另一方面，由于标定和实验采用同一光路，可以将该部分影响扣除。

实验中电弧加热推力器以氢-氮混合物为推进剂。为了实时测量喷管内壁面温度的变化情况，需要摒除等离子体羽流以及电极烧损物的干扰。等离子体辐射以线谱为主，其连续谱辐射来源主要为韧致辐射，强度很低，在本研究中可以忽略。因此，实验中主要需要摒除等离子体线谱的影响。图4给出了NIST数据库中各推进剂组元的主要辐射线谱。从图中可以看出，700 nm附近没有明显的干扰线谱。因此，本实验选择在长镜头前加装698 nm的干涉滤光片，以使热辐射信号通过并由相机成像。实验中为了获得喷管内壁面温度随时间的变化，采用摄像机代替相机，从而连续得到喷管内部影像。所用摄像机为SONY PD 198，其感光元件为CMOS，感光范围在300-1100 nm，在700 nm左右具有良好的量子效率。

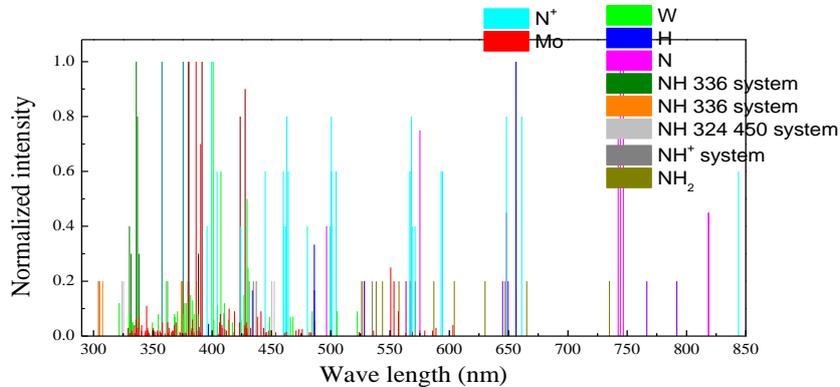


图4 等离子体羽流及电极烧蚀产物的主要辐射线谱

为了建立图像强度与物体温度的对应关系，首先对系统进行了标定。由于电弧加热发动机喷管外壁裸露，容易采用其他测温手段获得温度，且其材质与喷管内壁相同。因此，首先在同一光路下同时拍摄不同温度喷管外壁面照片，并与通过标定的红外测温仪测温数据进行对比，建立图像强度与物体温度的对应关系。图5为获得的图像强度与温度的对应关系。按(1)式和(2)式对该关系进行拟合，可以得到：

$$T = \frac{10608}{\ln\left(\frac{20600}{I - 5.05} + 1\right)} \quad (4)$$

该式中 I 为图像强度， T 为物体温度。由于选用698 nm滤光片，式(1)中 $hc/\lambda kT$ 等于20600，而式(4)中图像强度 I 减去的5.05与拍摄时的背底噪声强度吻合良好。上述结果说明，本研究所用的滤光成像系统可获得与物理规律吻合良好的实验结果。普朗特定律揭示的物体温度及其辐射强度之间的关系对于

通过测量强度反推温度的测温方法而言是有利的。该指数关系决定了测量时，被测信号（温度）的轻微变化会导致输出信号（图像强度）出现较大变化，这意味着该测量方法敏感度较高，同时从输出信号反推被测量时误差较小。图 6 给出了当 $\Delta I/I$ 为 50% 和 100% 时，被测量的误差估计。从图中可以看出，当图像正常曝光时，哪怕由于光路损失/干扰以及其他原因造成图像强度有 100% 偏差时，测得的温度偏差也在 20% 以下。

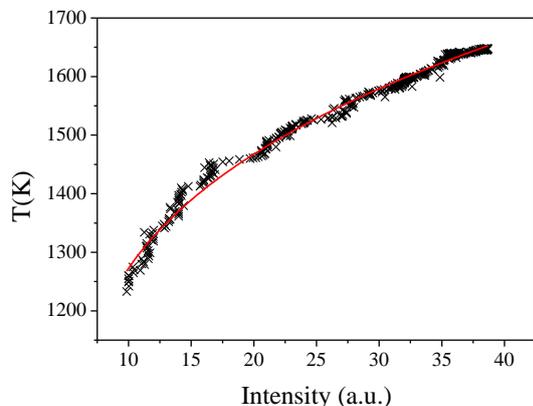


图 5 图像强度与喷管温度的标定关系

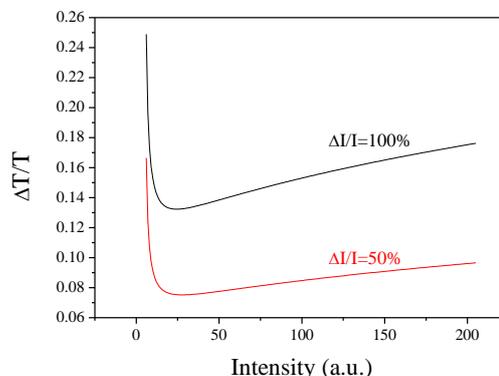


图 6 温度偏差和图像强度偏差的对应关系

采用该方法，并经过有效辐射系数修正，得到了体积混合比为 2: 1 的氢-氮混合气为推进剂时，千瓦级电弧加热发动机喷管内壁面的温度分布（图 7）。图中虚线为喉道出口边缘位置。从图中可以看出，阴极尖处温度最高。从喉道出口到扩张段出口，内壁面温度先略有升高，然后逐渐下降。喉道下游的温度高点与电弧弧根在扩张段内壁面的贴附有关。弧根处由于电子密度高，产生的焦耳热使得其贴附处的壁面温度升高。因此，用这种方法可定性判断电弧加热发动机工作时的弧根贴附位置。

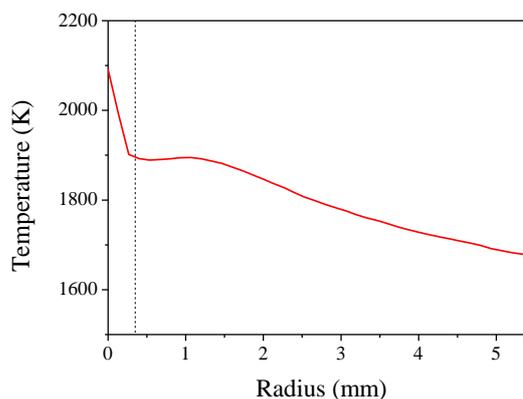


图 7 氢/氮电弧加热发动机稳态工作时的内部径向温度分布

3 结论

本文分析了利用滤光成像的方法测量电弧加热发动机喷管内壁面温度的适用条件和误差来源。实验结果表明，通过标定，采用该方法可以比较方便地获得小尺寸喷管内壁的温度分布情况，从而为深入分析电弧加热发动机内部能量转换以及传热传质过程提供参考。

参考文献

- [1] 汤海滨, 张正科, 刘宇, 等. [J]. 推进技术, 2001, 22(3): 233~236
- [2] Pan W. X., Huang H. J., Wu C. K. [J]. Plasma Sci Tech, 2010, 12(4): 473~477.
- [3] 黄河激, 潘文霞, 吴承康. [J]. 2011, 32(7): 1185~1187.
- [4] Hoskins W. A. A Comparison of Regenerative and Conventional Arcjet Performance. In: 30th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference [C]. Indianapolis USA, 1994. AIAA-94-3124.
- [5] Gouffe A. [J]. Rev. Opt., 1945, 24: 1~10

附注:

[作者简介] 黄河激 (1976-), 男, 四川省成都市人, 副研究员, 研究方向为应用等离子体力学。

[基金项目] 国家自然科学基金项目 (50836007, 10921062)。