

发射光谱测量电弧加热发动机羽流温度*

沈 岩, 赵文华, 石 泳, 陈黎明

(清华大学 工程力学系, 北京 100084)

摘 要: 为了研究玻耳兹曼图法和谱线绝对强度法对测量结果的影响, 讨论了电弧加热发动机羽流的光谱诊断方法, 并建立了一套光谱诊断系统。以氩气为工质, 利用此系统在真空室中进行了光谱诊断, 分别用玻耳兹曼图法和谱线的绝对强度法得到了羽流的温度, 这两种方法测得的结果有 20% ~ 30% 的偏差。实验中氩气流量为 42.1 mg/s, 功率约为 200W。试验结果表明, 在试验工况下, 由于羽流处在热力学非平衡态, 采用玻耳兹曼图法和谱线的绝对强度法得到的结果是不同的, 应该根据具体的工况选择测量方法。

关键词: 电弧喷射发动机; 光谱分析; 羽流; 温度测量

中图分类号: V439 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2005) 01-0072-04

Temperature measurement of arcjet plume with emission spectrum

SHEN Yan, ZHAO Wen-hua, SHI Yong, CHEN Liming

(Dept. of Engineering Mechanics, Tsinghua Univ., Beijing 100084, China)

Abstract To determine the difference of the measurement results from different measuring methods, diagnostic principle for arcjet plume was discussed and a set of spectral diagnostic system was established. With this system, spectrum diagnostic was executed for Argon propellant with the flow-rate of 42.1 mg/s and the input power about 200W, and the temperature was deduced with Boltzmann diagram method and absolute intensity method respectively. There is a 20% to 30% discrepancy in the temperature values of the two methods. The experimental result shows that Boltzmann diagram method and absolute intensity method may lead to different temperature because of the appearance of thermal non-equilibrium. Therefore, actual working condition should be considered to specify the measurement method.

Key words Arcjet engine; Spectrum analysis; Plume; Temperature measurement

1 引 言

针对电弧加热发动机羽流的结构和特性, 前人采用了静电探针方法、发射光谱方法、激光诱导荧光法、气动方法等, 分别得到了羽流的各种温度、速度、粒子数密度以及压力等^[1, 2]。其中, 发射光谱法是一种非接触式测量方法, 对射流没有干扰, 常常被用来测量羽流的激发温度。

在真空环境下工作的电弧加热发动机的羽流往往处在热力学非平衡态下。当测量对象处在热力学非平衡态时, 理论上玻耳兹曼图法与绝对强度法^[3~5]测得的温度可能是不同的^[6]。本文对电弧加热发动

机的羽流进行了光谱诊断, 采用玻耳兹曼图法和谱线的绝对强度法测得了温度值, 分析了这两种方法的合理性及其对测量的影响。

2 诊断原理和实验系统的建立

等离子体羽流的发射光谱是由一系列分离的谱线和微弱的连续谱组成的。谱线的发射系数 ϵ_ν 和相应的激发温度 T 的关系可以表示为^[6]

$$\epsilon_\nu = \frac{h\nu}{4\pi} A_{ul} g_u \frac{n}{Z(T)} \exp\left(-\frac{E_u}{kT}\right) \quad (1)$$

式中 h 是普朗克常数, ν 是谱线频率, A_{ul} 是相应的跃迁几率, g_u 是统计权重, $Z(T)$ 是配分函数, n 粒子数

* 收稿日期: 2004-01-30 修订日期: 2004-04-16

基金项目: 清华大学机械工程学院研究基金 (0330024)。

作者简介: 沈 岩 (1978—), 男, 博士生, 研究领域为电弧加热推进技术, 等离子体的诊断、喷涂技术, 光谱测温技术等。Email: peterparson99@mails.tsinghua.edu.cn

密度, k 是玻耳兹曼常数, E_u 高位能量。因而 ϵ_v 的值可以反映羽流的激发温度。

光谱诊断系统探测到的信号是谱线强度 I_v 。在羽流光学薄的假设下, I_v 等于在 ϵ_v 探测方向上的积分。 ϵ_v 通过对 I_v 的分布进行 Abel 转换得到。

本文针对电弧加热发动机羽流的光谱诊断建立了一套实验系统。该系统包括为此试验专门设计的电弧加热发动机试验样机、真空设备、高速多通道光谱诊断系统和数据采集系统, 如图 1 所示。

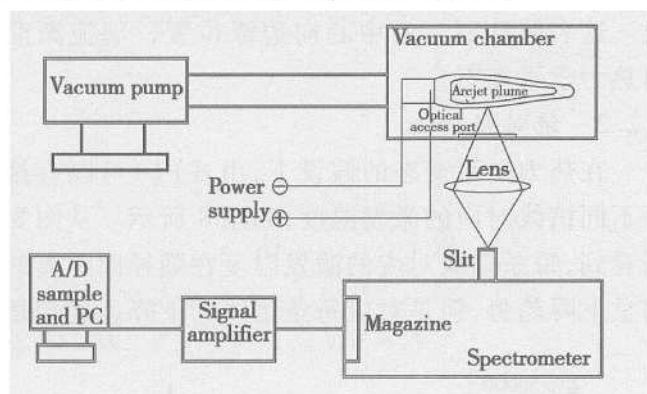


Fig 1 Spectral measurement system of arcjet

真空设备由真空机组和一个圆柱形真空室组成。真空室长为 1000mm, 直径为 800mm。在氩气的质量流量为 42 lmg/s 时, 使用此真空机组, 真空室内的气压保持在 8Pa 左右。真空室壁面上有光学观察窗, 可在真空室外接收电弧加热发动机羽流的光谱信号。

本实验中使用的电弧加热发动机是一个低功率的实验样机, 如图 2 所示。这个电弧加热发动机的外壳由不锈钢制成, 阴极和阳极均由钨合金制成, 采用氧化铝和氮化硼作为绝缘体的材料。以漩流方式输入工质, 以稳定电弧。阳极同时也是工质的喷出口, 其收缩段的直径为 0.4mm。

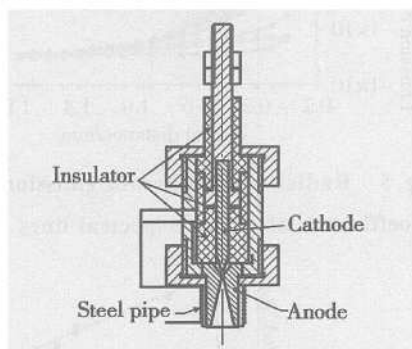


Fig 2 Structure of arcjet thruster

光谱诊断系统由一个 1m 长、光栅常数为 1200gr/mm 的光栅光谱仪, 光谱调节和定位装置, 光学透镜和光电转换装置构成。光电转换装置安装在光谱仪出口平面处的暗箱里, 用于接收光谱信号。光

谱调节定位装置用于调节谱线在光谱仪出口平面上的位置。羽流的辐射通过真空室壁面上的光学观察窗, 由光学透镜成像在光栅光谱仪的入口狭缝上。光栅光谱仪把羽流的发射光谱展开, 在出口平面上形成按照波长排列的分离的谱线和微弱的连续谱信号。

通过转动光谱调节定位装置, 在光栅光谱仪出口平面上, 光谱信号连续扫过光电转换装置, 光信号就转化为电信号。光电转换装置输出的电信号经过放大后输入到 A/D 转换器中, 然后用 PC 对 A/D 转换器输出的数字信号进行记录和处理。整个光谱诊断系统用标准钨带灯进行校准, 该钨带灯的绝对辐射强度数据由中国测量技术研究院提供。

电弧加热发动机固定在置于真空室内的三维坐标仪上, 用安装在水平坐标轴上的电机在真空室外控制电弧加热发动机水平运动, 从而实现对羽流的径向扫描。利用位移传感器读出发动机的径向位置。

3 实验结果和讨论

3.1 典型信号

以氩气为工质, 用前文所述的光谱诊断系统采集了羽流的光谱信号。采样过程中, 氩气流量为 42 lmg/s 电弧电流为 10A, 此时真空室内的压力为 10Pa 电弧电压为 22~24V。采集到的典型的原始信号如图 3(a) 所示, 在羽流的其它位置采集到的信号与之类似。图中的尖峰为谱线信号, 其底部则是系统的噪音和连续谱信号。图 3(a) 中我们也可以看到, 一些谱线的轮廓非常清晰, 最强的谱线信号强度为 850 左右, 而连续谱和噪音的信号强度约为 5 左右, 比谱线信号弱得多。因此, 在数据处理中不考虑连续谱和噪音的影响。图 3(b) 给出了 NIST (National Institute of Standards and Technology) 的氩光谱数据。显然, 图 3(a) 与图 3(b) 的谱线位置是一致的。

在流量为 42 lmg/s 电弧电流为 10A 时, 还测量了在不同径向位置的光谱强度。图 4 为距离发动机出口 1mm 处, 在不同的径向位置的光谱强度信号。显然光谱强度随着径向位置的变化而变化, 羽流中心位置的光谱整体上强于边缘位置。在不同的径向位置上, 不同谱线的相对强度也不同。这表明不同谱线的发射系数沿半径方向上的衰减曲线是不同的。

假定电弧加热发动机的羽流稳定、轴对称和光学薄, 对采集到的谱线强度信号进行 Abel 转换可以得到谱线发射系数的值。图 5 为对光谱强度进行 Abel 转换得到的发射系数衰减曲线。

3.2 羽流温度

3.2.1 玻耳兹曼图法

式(1)可以写为如下形式

$$\log \left| \frac{\epsilon_v}{A_{ul} g_u} \right| = -\frac{E_u}{kT} + D \quad (2)$$

式中 $D = \log \left| \frac{h}{4\pi} \frac{n(T)}{Z(T)} \right|$

D 中包含的参数与选择的谱线无关。所以,如果已经知道一些谱线的跃迁几率,我们可以用 E_u 为自变量,做出函数 $y = \log(\epsilon_v / A_{ul} g_u)$ 的直线,由直线的斜率 $1/kT$ 可以得到温度 T 。这就是所谓的玻耳兹曼图法。图6中给出了本实验中不同径向位置上的玻耳兹曼图,图7是这些玻耳兹曼图对应的温度。

从图6中可以看出,不同谱线在玻耳兹曼图中对应的点并不是恰好落在拟合直线上,而是分散地分布在直线的两侧。这表明了在本文的工况下电弧加热

发动机的羽流处在热力学非平衡态下^[7]。从图6中也可以看到,如果选用不同的谱线,它们在图中对应点的位置以及偏离拟合直线的距离也是不同的,因而用玻耳兹曼图法得到的温度值也会有所不同。这是由于在热力学非平衡态下,不同谱线所对应的激发温度是不同的,等离子体羽流的温度无法用一个统一的值来描述。从图6中还可以看到,在羽流的中心位置处,不同谱线对应的点比较分散;而在羽流的边缘,不同谱线对应的点渐渐趋近于拟合直线。这表明从羽流的中心向边缘位置,羽流渐渐趋向热力学平衡态。

3.2.2 绝对强度法

在热力学平衡态的假设下,由式(1)可以直接求得不同谱线对应的激发温度,如图8所示。从图8可以看到,每条谱线对应的激发温度在随径向距离的增加呈下降趋势,但是对应每条谱线的下降速度却是不

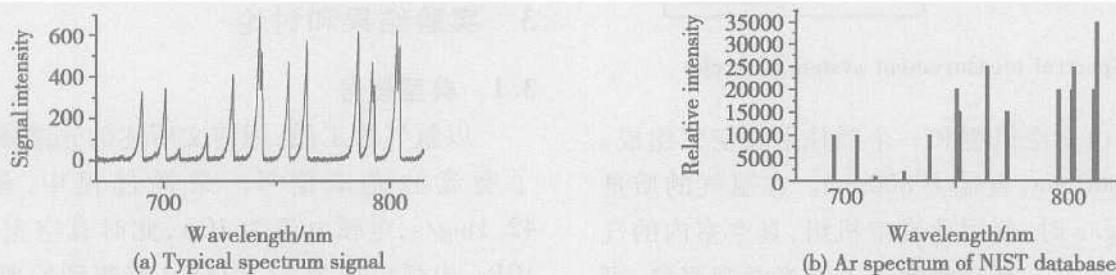


Fig. 3 Comparison of typical spectrum signal and the Ar spectrum of NIST atomic spectra database

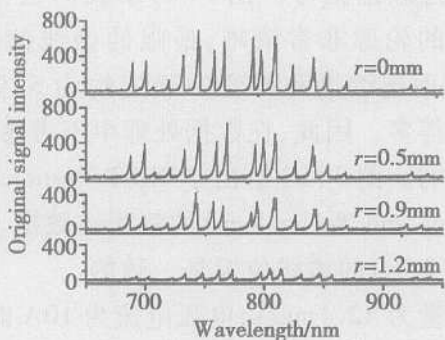


Fig. 4 Comparison of spectral intensity at various radial positions

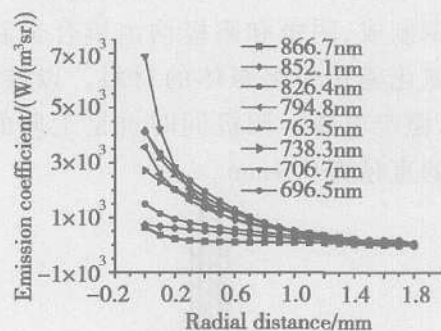
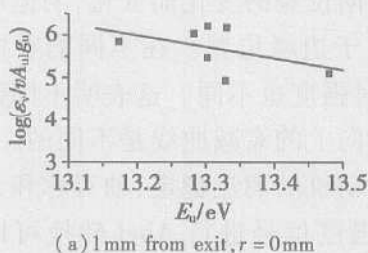
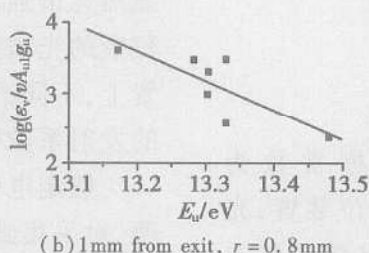


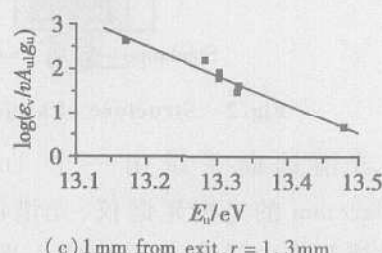
Fig. 5 Radial distribution of emission coefficients of various spectral lines



(a) 1mm from exit, $r=0\text{mm}$



(b) 1mm from exit, $r=0.8\text{mm}$



(c) 1mm from exit, $r=1.3\text{mm}$

Fig. 6 Boltzmann graph of the plume

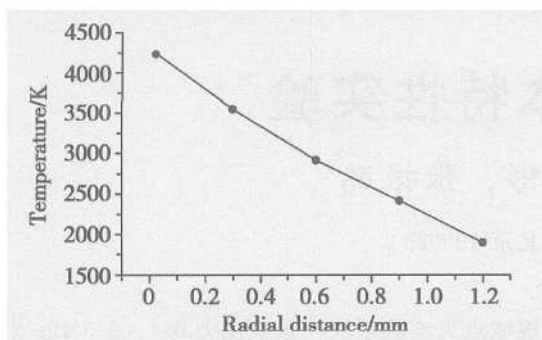


Fig 7 Average excitation temperature of the plume

同的。此外,同一径向位置上,对应不同谱线的激发温度也是不同的。这也表明了在本文的工况下羽流处在热力学非平衡态^[7]。从图 8 中还可以看到,如果测量对象处在热力学非平衡态下,采用谱线的绝对强度法时,必须明确测量的是哪一条谱线对应的激发温度,测量结果才是有意义的。

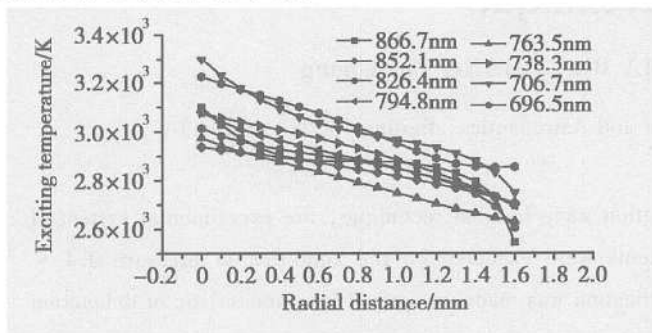


Fig 8 Radial distribution of excitation temperature

3.2.3 讨论

对比图 7 和图 8 发现,在本文的工况下,采用玻耳兹曼图法和谱线的绝对强度法得到的结果相比有 20% ~ 30% 的偏差。这是由两方面的原因造成的。首先,在热力学非平衡态下,由玻耳兹曼图定义的温度和谱线的绝对强度法得到的温度是不同的。而且,每条谱线对应的激发温度也是不同的,羽流不能用一个统一的温度来描述。从图 8 中可以看到,即使同是采用谱线的绝对强度法,在同一位置上测得的温度也有 350 ~ 400 K 的偏差。其次,在本文的玻耳兹曼图法中,由于谱线选择的限制,选择的谱线较少(7 条),各条谱线的高位能量 E_u 相差不是很大,这从一定程度上限制了玻耳兹曼图法测温的精度。

在热力学平衡态下,绝对强度法是一种比较精确的测温方法,但是对于处于热力学非平衡态的系统,它的精度与系统偏离热力学平衡的程度密切相关,对于偏离热力学平衡程度很大的系统,得到的结果不能客观的反映物理过程。采用玻耳兹曼图法时,尽管要

同时得到足够多的谱线比较困难,但是由于采用了较多的谱线的信息,因而能更全面的反映系统的真实温度。因此测量热力学非平衡系统的温度时,在条件允许的情况下,应优先采用玻耳兹曼图法。

4 结论

本文讨论了电弧加热发动机羽流的光谱诊断方法,建立了一套高信噪比的光谱诊断实验装置。使用这套实验装置,以氩气为工质进行了光谱诊断,得到了不同谱线的发射系数,分别用玻耳兹曼图法和谱线的绝对强度法得到了羽流的温度。

玻耳兹曼图显示在实验工况下羽流处在热力学非平衡态下,无法用一个统一的温度来描述,如果选择不同的谱线,得到的温度也会不同。谱线的绝对强度法也显示在本文的实验条件下,羽流处在热力学非平衡态,采用不同的谱线得到的温度也是不同的。用谱线的绝对强度法时,选用的各条谱线得到的温度相差 350 ~ 400 K,用玻耳兹曼图法和谱线的绝对强度法得到的结果相比则相差 20% ~ 30%。本文认为这一方面是由于热力学非平衡态的出现,另一方面是在玻耳兹曼图中由于谱线选择的限制带来的误差。

参考文献:

- [1] 廖宏图, 吴铭岚, 汪南豪. 电弧喷射推力器内部工作过程研究综述 [J]. 推进技术, 1999, 20(3). (LIAO Hong-tu, WU Ming-lan, WANG Nan-hao. Survey of internal process studies on arcjet thrusters [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1999, 20(3).)
- [2] 陈黎明, 赵文华, 党道远. 电弧加热发动机参数的测量技术 [J]. 应用基础和工程科学学报, 2001, 9(4).
- [3] Zube Dieter M, Messerschmid Ernst W. Spectroscopic temperature and density measurements in a low power arcjet plume [R]. AIAA 94-2744
- [4] Zube D M, Auweter-Kurtz M. Spectroscopic arcjet diagnostic under thermal equilibrium and nonequilibrium conditions [R]. AIAA 93-1792
- [5] Horisawa H, Kimura I. Very low-power arcjet testing [J]. *Vacuum*, 2000, 59: 106 ~ 117.
- [6] 过增元, 赵文华. 电弧和热等离子体 [M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [7] Venugopalan M. Reactions under plasma conditions [M]. John Wiley & Sons Inc., 1971.