

发射光谱诊断电弧加热器漏水故障的试验研究

林鑫¹, 陈连忠¹, 董永晖¹, 欧东斌^{1*}, 李飞², 余西龙²

(1. 中国航天空气动力技术研究院 电弧等离子应用装备北京市重点实验室, 北京 100074; 2. 中国科学院力学研究所 高温气体动力学国家重点实验室, 北京 100190)

摘要: 电弧加热器是飞行器热防护系统地面考核试验的首选设备。电弧加热器在运行时, 由于其电极工作在高温环境, 普遍采用高压水进行冷却, 试验中存在着由于电极烧穿漏水导致加热器严重烧损的风险。由于高温气流的恶劣环境, 目前尚无有效监测手段。本文作者建立一套以氢原子 H α (656.28nm) 和氧原子(777.19nm) 发射谱线作为目标谱线的发射光谱监测系统, 通过分析电弧加热器故障条件和正常运行下高温流场中的发射光谱特性, 诊断某高焓电弧加热器因烧蚀出现的电极漏水故障, 并在考虑温度误差的前提下对该光谱测量系统测量灵敏度进行评估, 获得了 A、B 两种试验状态下的漏水探测极限: A 状态下约为 1.85 ~ 0.94g/s; B 状态下 2.12 ~ 0.98g/s。试验结果表明, 发射光谱应用于电弧加热器漏水故障诊断是切实可行的。

关键词: 电弧加热器; 氢原子; 氧原子; 发射光谱; 漏水检测

中图分类号: V556.4 文献标识码: A

Experimental study on leak detection of cooling water in arc heater based on emission spectroscopy

Lin Xin¹, Chen Lianzhong¹, Dong Yonghui¹, Ou Dongbin^{1*}, Li Fei², Yu Xilong²

(1. Beijing Key Laboratory of Arc Plasma Application Equipment, China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074, China; 2. State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: High-enthalpy arc heaters play an important role in the development of thermal protection materials and heat shield structures for entry vehicles because they are capable of producing longtime and representative flow environments. Owing to the large heat flux loading on the electrode, the erosion of the electrode is inevitable. Generally, high pressure water is used for cooling of the electrode. The arc heater may suffer serious damage caused by electrode leak, especially for hundreds or even thousands of seconds aerodynamic heating tests. Therefore, it is necessary to develop fast response diagnostic technique to monitor the operating status of the facility and determine the initial time of water leakage to avoid costly arc-heater failure. Because of the extreme conditions inside the arc-heater section, options for measurements of the test gases are limited, and optical spectroscopy-based measurements present a diagnostic opportunity. Optical Emission Spectroscopy (OES) is widely used for measuring gas parameters of high-temperature flow field because it is non-intrusive, high sensitive, and just constituted of simple instruments. In our studies, the 656.28 nm emission spectral line of the atomic hydrogen and the 777.19 nm emission spectral line of the atomic oxygen are utilized for routinely in situ monitoring the operating status and determining the initial time of water leakage at a high-enthalpy arc heater. According to the intensity ratio of the two emission spectral lines, the mass fluxes of the water leakage can be derived, which are 1.85 ~ 0.94g/s and 2.12 ~ 0.98g/s, corresponding to equilibrium temperatures equal to 6000 ~ 8000K and 5500 ~ 7500K under two different test conditions, respectively. The current test results of this study illustrate the feasibility and potential

收稿日期: 2015-12-21; 修订日期: 2016-01-15
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11372329)
* 通信作者 E-mail: oudongbin@sina.com

引用格式: Lin X, Chen L Z, Dong Y H, et al. Experimental study on leak detection of cooling water in arc heater based on emission spectroscopy. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2016, 30(4): 14-19. 林鑫, 陈连忠, 董永晖, 等. 发射光谱诊断电弧加热器漏水故障的试验研究. *实验流体力学*, 2016, 30(4): 14-19.

of the OES technology in high-enthalpy arc heater safety diagnosis, especially on the water leakage diagnosis.

Keywords: arc heater; hydrogen atom; oxygen atom; emission spectroscopy; leak detection

0 引言

电弧加热器是研究飞行器热防护系统在真实高超声速飞行条件下,气动热问题的重要试验平台,其工作状态和气流品质直接决定了试验的可靠性^[1-3]。由于电弧加热器电极工作在高温环境下,普遍采用高压水对电极进行强制冷却。电弧加热器内的高温气体会引发电极外表面的烧蚀,若电极烧蚀量过大导致电极烧穿,高压冷却水会迅速进入电弧加热器,造成加热器内部短路进而导致其烧蚀急速扩大,在没有及时停车的前提下甚至会造成加热器烧毁,这不仅会造成巨大的经济损失,还严重影响了试验的进度^[4]。除此之外,加热器本身冷却水道加工精度不够或者冷却水管堵塞等问题也极易导致加热器局部热烧蚀严重,进而导致加热器烧穿漏水。在上述背景之下,通过有效测量手段对电弧加热器运行状态实时监测,准确判断电极微量漏水时刻从而实现试验系统的快速关停是非常有意义的。分析以往电弧加热器故障的试验数据发现,传统的壁面压力传感器、电流波动监测、流场录像等监测手段由于反应滞后,灵敏度低,对精确判断微量漏水时刻及评估漏水量无能为力,往往是发现漏水为时已晚,加热器已严重烧损。由此可见,电弧加热器试验时急需更为准确、可靠、有效的在线监测手段,而大功率电弧加热器的苛刻运行条件要求非侵入式测量技术,因此各种光谱学测量技术成为首选^[5-8]。

发射光谱具有高灵敏度、高时空分辨率等优点,是国际上诊断高温气流参数最直接有效的方法之一,被广泛地应用于航空发动机、低温等离子体、行星再入等领域^[9-13]。不同于其他的光谱诊断技术,如吸收光谱、相干反斯托克斯拉曼光谱、激光诱导荧光等,发射光谱技术是建立在高温气体分子(原子)自发辐射的基础上,测量核心设备仅为一台光谱仪,光路设计简单,试验中比较容易实现。近十几年,随着高分辨率、高性能光谱测试系统的出现以及光纤耦合技术的长足进步,国外科研人员在应用发射光谱技术测量电弧加热器温度分布及试验模型驻点辐射热流等方面也有所尝试^[14-16]。但将其应用于加热器的健康运行监测,特别是判断电极瞬态漏水方面,由于在系统设计、漏水判据设定,特别是大功率加热器试验调试等方面均较为困难,在国内外均未见相关报道。

本文为发射光谱技术应用于大功率电弧加热器健康诊断、特别是电极漏水判定的初步探索。在电弧加热器运行过程中,弧室内气体静温高达 6000 ~ 9000K,在如此的高温环境下, O_2 完全离解^[4]。当有微量水进入加热器内会瞬间离解生成 H 原子,因此是否探测到 H 原子辐射可作为电极烧穿漏水的直接判据。本文以 O 原子(777.19nm)和 H 原子 H_{α} (656.28nm)发射谱线作为目标谱线,设计一种安装于加热器出口处的新型光学测量夹片收集发光,建立原子发射光谱漏水监测系统。通过分析电弧加热器漏水故障条件和正常运行下高温流场中的发射光谱特性,设定漏水判定条件,诊断某电弧加热器电极漏水瞬态故障,并结合试验状态(总焓、进气量)对该系统的探测灵敏度进行定量分析。以上工作为提高用于电弧加热器漏水诊断的发射光谱技术可靠性及灵敏度奠定基础。

1 试验部分

试验方案如图 1 所示,该试验是在中国航天空气动力技术研究院某电弧风洞上进行。该电弧风洞主要由电弧加热器、喷管、试验段、冷却器和真空系统所组成。试验中所用的电弧加热器由首尾两端电极区的阴极、阳极,以及位于电极区中间数百个具有独立高压冷却水通道及进气通道的压缩片叠加构成。试验中通过调节加载在电弧加热器电极的输入电流、电压以及气体流量来确定加热器的试验状态。

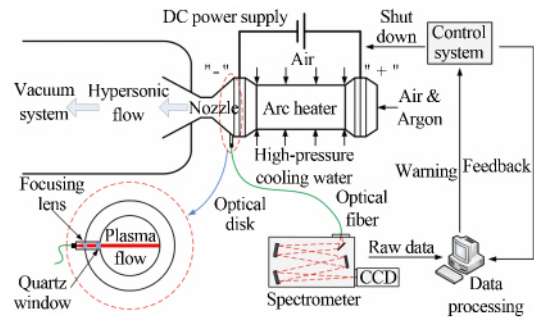


图 1 电弧风洞及发射光谱测量系统布置示意图
Fig. 1 Schematic of the experimental set-up of the arc-heated wind tunnel and the emission spectroscopy measurement system

图 1 左侧给出了该光学测量夹片的细节展示,由图可见,测量夹片安装于喷管喉道上游、紧挨前电极出口位置,中间装嵌一个直径 4.0mm 的石英窗口,窗口后的透镜将高温气体自发辐射发光聚焦于一根

15m长,芯径0.8mm的石英光纤内,光纤将光传导到光谱仪并进行分光测量。在上述的窗口-透镜-光纤的结构下,实际采集的发光为直径4mm,长度为弧室内径的一个圆柱形区域的气体发光,并叠加对面壁面的固体发光。光谱测量采用美国海洋光学公司的QE65PRO型高灵敏度光谱仪,配备1024×58像素的面阵CCD,光谱测量范围为280~980nm,在选用10μm入射狭缝的基础上,光谱分辨率 $\Delta\lambda = 1.3\text{nm}$,Voigt线型。为了实现加热器的实时监测及获得足够的信噪比,光谱仪曝光时间设为20ms,即50Hz的测量频率。该光谱测量系统的波长及强度响应系数在试验前利用一台标准汞灯光源(Ocean optics HG-1)和一台钨灯光源(Oriel 63945)进行标定。发射光谱监测系统采集到的数据由实验室自主研发的软件实时分析处理,当风洞出现异常情况时,便于风洞运行人员及时关停整个试验系统。

需要说明的是:在今后多次试验数据积累,漏水判据逐渐完善的基础上,该分析软件可与电弧风洞的控制系统进行连锁,从而可实现光谱测量系统报警后整个试验系统的自动快速关停(约为0.1s),将加热器损失降到最低。

本文给出2次漏水故障时的光谱测量结果,电弧加热器状态参数如表1所示(试验气体为空气),其中总焓 H_0 由平衡声速流法计算得到^[17];空气流量 G 通过测量集气管压力及对应声速喷嘴尺寸计算得到;总温 T_0 由TN D-4333查表得到^[18]。

表1 试验状态

Table 1 Test conditions

Test condition	Enthalpy $H_0 / (\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	Air flux $G / (\text{g} \cdot \text{s}^{-1})$	Total temperature T_0 / K
A	18	846	7000
B	16	1030	6500

2 试验结果及分析

图2(a)和(b)分别为A、B状态下光谱仪采集到的电弧加热器漏水初始时刻和漏水前正常运行下的原始数据。可见,采集的光谱可认为是线状谱和宽带谱的叠加,其中线状谱为原子谱线,如图中标记的H、N、O和Cu原子谱线等。基线部分的宽带谱为壁面固体发光与等离子体复合产生的宽带辐射光的叠加,为方便比较将原始数据进行归一化处理。

由图2可知,与电弧加热器正常状态下的发射光谱相比,漏水初始时刻有明显的H原子谱线,另外整个基线部分,特别是777.19nm处O原子谱线强度基本没有变化。上述现象说明,在漏水初始时刻,进入

电弧加热器内的水分子在如此的高焓条件下(见表1)瞬间离解生成H原子和O原子,另外由于漏水前期,漏水量非常小,对加热器的运行工况尚未有明显影响(除了基线部分及O原子谱线强度没有明显变化外,该时刻压力及电流参数没有出现异常)。

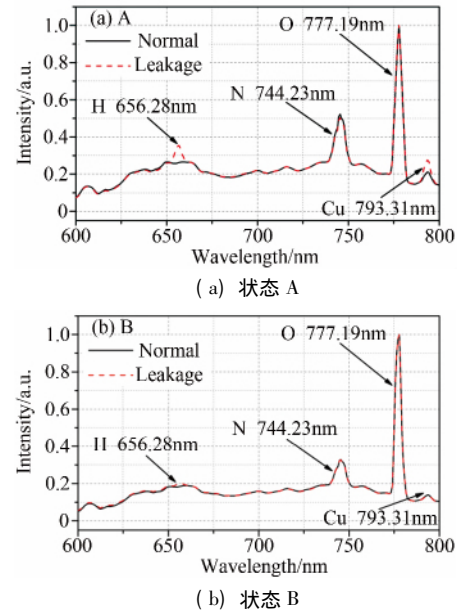


图2 发射光谱原始数据示意图

Fig. 2 Corresponding raw test spectra under two conditions

为了定量分析O原子和H原子谱线强度随时间的变化,需定义其相对强度。在本文数据处理中,对于O原子和H原子相对强度采用了不同的定义方式。对于O原子,由于其整个试验过程中一直存在且辐射强度很强,同时其强度变化也非常直观地反映加热器运行情况,因此试验中将其777.19nm原子谱线辐射强度定义为其相对强度。原子谱线辐射强度为对原始信号进行基线拟合进而求积分获得,结合试验前对光谱函数的标定($\Delta\lambda = 1.3\text{nm}$,Voigt线型),数据处理中采用Voigt线型拟合。

对于H原子,由于其只在电极漏水时出现,因此若采用O原子辐射强度的处理方式是不合理的,此外为了排除背景辐射、电流波动、进气量波动、台阶变换等带来的问题,将H原子相对强度定义为:中心波长是656.28nm宽带光谱强度与邻近背景光谱强度的比值 H_{656}/H_{bg} (积分带宽均为8nm),即 H_{656} 为652.28~660.28nm的光谱强度积分值,背景光谱强度选择不受原子线干扰且与原子谱线相近的宽带光谱区域,根据图2,选择637nm为背景宽带谱中心波长,即 H_{bg} 为634~641nm的光谱强度积分值。图3和4分别为2次试验获得的H原子和O原子相对强度随时间的变化图,由于试验中光谱仪触发和电弧加热器的同步是通过手动触发实现的,因此2次试验触发时间

并不相同,即光谱仪采集到的电弧加热器启动时刻不同。

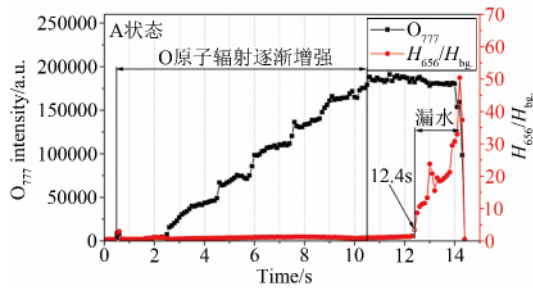


图 3 A 状态下原子谱线相对强度随时间变化
Fig. 3 Evolutions of atomic spectra relative intensities under test condition A

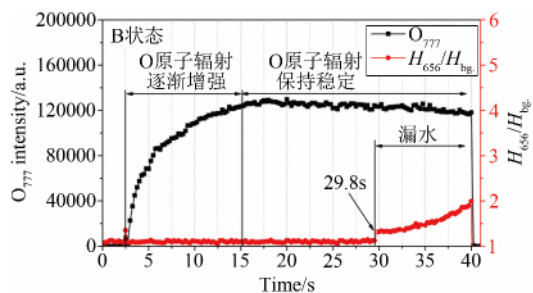


图 4 B 状态下原子谱线相对强度随时间变化
Fig. 4 Evolutions of atomic spectra relative intensities under test condition B

由图 3 可知, A 状态下, 加热器从光谱仪采集时钟的 0.5s 左右开始启动, 2s 左右空气开始进入, 随之 O 原子辐射出现, 伴随着电流和空气进气量的逐渐增大, O 原子辐射逐渐增强, 并于 10.5s 后保持稳定, 一直持续到 12.4s, O 原子辐射没有发生异常现象。对于 H 原子辐射而言, 在 12.4s 之前, 虽然背景辐射逐步增强, 但其 H 原子相对强度基本保持恒定 ($H_{656}/H_{bg} \approx 1.1$), 说明在这个时间段内没有出现 H 原子, 也说明利用该方法可避开加热器启动阶段及台阶切换带来的影响。从 12.4s 到 14s 这个时间段内, H 原子开始出现, 其相对强度随时间增长保持增大, 说明加热器已经开始漏水。而 O 原子相对强度下降趋势不是很明显, 说明该时间段内漏水量非常小, 并没有明显影响到加热器的正常运行。14s 之后, O 原子辐射强度急速减小, 而 H 原子相对强度达到最大值时也迅速减小, 分析发生这种现象的最可能的原因是, 此刻电极烧损比较严重, 漏水量瞬间增大导致加热器电弧熄灭, 内部温度迅速下降引起的。

图 4 为 B 状态下 O、H 原子谱线相对强度随时间的变化。加热器从光谱仪采集时钟的 2.5s 开始, 至 15s 结束。启动时间段内的 O 原子辐射变化趋势与 A 状态略有不同, 主要原因是采用了线性增加的

进气方式, 而非 A 状态下阶梯式进气方式。15s 开始, 电弧加热器进入稳定运行阶段, 一直持续到 29.8s, 该阶段的 O 原子辐射基本保持不变, 这与 A 状态稳定阶段相一致。但是由于 B 状态下焓值较 A 状态低, 光谱仪获得的 O 原子稳定阶段时的相对强度要弱于 A 状态。对于 H 原子, 29.8s 之前, H 原子相对强度保持恒定, 其值基本稳定在 1.1 左右, 与 A 状态时基本一致, 说明采用比值的处理方式不仅可以排除电弧启动阶段及台阶变换带来的影响, 也可以消除由于不同车次下不同试验状态、光路变化等带来的光强变化的干扰。29.8s 之后, H 原子相对强度开始逐渐增大, 并持续至设备关停。与此同时 O 原子相对强度有微弱的下降趋势, 这与 A 状态漏水初始时刻的光谱变化非常类似, 说明在这个阶段同样由于漏水量比较小, 还没对加热器的运行造成严重影响。此外, 在该时间段内 H 原子相对强度的上升速率远低于 A 状态, 初步判断这是由于 B 状态下电极烧损程度较 A 状态轻, 漏水量增长缓慢造成的。在本次试验中, 根据 A 状态时漏水经验, 判断电极已经烧穿漏水, 于 40s 手动关停电弧加热器。

图 5 给出试验后电弧加热器电极烧损试验照片。观察图 5(a), 该电极烧蚀程度比较严重, 存在 3 个较大的漏水孔, 最大孔直径约为 4mm, 此外该电极内壁其他位置也有明显烧蚀痕迹, 这是典型的由于漏水量较大造成加热器内部短路而形成的。观察图 5(b), 加热器电极虽然也已烧漏, 但是烧损程度与 A 状态相比要轻微许多, 这也与前文根据光谱仪推断的结论相一致。

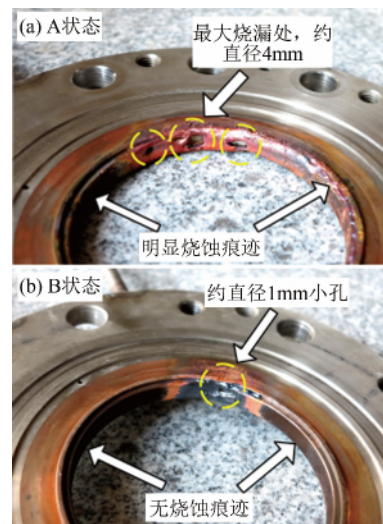


图 5 加热器电极烧损试验照片
Fig. 5 Photograph of damaged arc heater electrodes

3 测量系统灵敏度分析

原子发射光谱强度 I 可表示为(在本文中,高能级均采用“ k ”表示,低能级均采用“ i ”表示):

$$I = h\nu_{ki}A_{ki}n_k \quad (1)$$

式中 h 为普朗克常数 ν_{ki} 为跃迁波数 A_{ki} 为自发辐射爱因斯坦跃迁概率 n_k 为高能级粒子数,若气体介质处于热力学平衡状态,处于各激发态和基态的原子数密度服从麦克斯韦-波尔兹曼分布规律,即

$$n_k = n_0 \frac{g_k}{Q(T)} \exp\left(-\frac{E_k}{kT}\right) \quad (2)$$

式中 n_0 是总的原子数 g_k 为高能级电子简并度 E_k 为高能级能量 k 为波尔兹曼常数, H 原子 656.28nm 谱线和 O 原子 777.19nm 谱线相关光谱常数见表 2。

表 2 H、O 原子相关光谱常数

Table 2 Atomic spectrum constants used in this study						
Atom	ν/nm	$A_{ki}/\mu\text{s}^{-1}$	g_i	g_k	E_i/cm^{-1}	E_k/cm^{-1}
H	656.28	53.88	4	6	82258	97492
O	777.19	36.9	5	15	73768	86631

$Q(T)$ 为配分函数,对于 H 原子, $Q(T) = 2$, 对于 O 原子, $Q(T) = 5 + 3\exp(-228/T) + \exp(-326/T)$ [19]。将式(2)代入到式(1),可得:

$$I = h\nu_{ki}A_{ki}n_0 \frac{g_k}{Q(T)} \exp\left(-\frac{E_k}{kT}\right) \quad (3)$$

根据式(3)得到, H、O 原子发射光谱强度比:

$$\frac{I_H}{I_O} = \frac{n_H A_H v_H g_H Q_O(T)}{n_O A_O v_O g_O Q_H(T)} \exp\left(\frac{E_O - E_H}{kT}\right) \quad (4)$$

在电弧加热器内、即喷管上游,可认为高温气体处于热力学平衡态,由于高温气体流动速度很低,气流静温可近似等于总温。在本文的试验条件下(A、B 状态总温分别为 7000K、6500K),空气中的氧气分子完全离解生成 O 原子。在加热器漏水瞬间,极少量 H_2O 进入电弧加热器,由于该时刻漏水量相对于进气量极低,对电弧加热器运行状态影响微乎其微,电弧加热器总温、总压基本保持不变,在上述高温环境条件下,根据热力学平衡计算可知,1 个 H_2O 分子完全离解生成 2 个 H 原子和 1 个 O 原子。式(4)可改写为

$$\frac{I_H}{I_O} = \frac{2n_{H_2O}}{n_0 + n_{H_2O}} \frac{A_H v_H g_H Q_O(T)}{A_O v_O g_O Q_H(T)} \exp\left(\frac{E_O - E_H}{kT}\right) \quad (5)$$

利用发射光谱测量系统获得的 H、O 原子发射光谱强度比,在已知焓值(即已知温度 T)和进气量的基础上(即已知 n_0)根据式(5),即可得到该时刻漏水

量 n_{H_2O} 。

图 6 为 B 状态时 H、O 原子发射光谱积分强度数据处理示意图,图中黑色空心圆点为原始数据,红色实线为 Voigt 线型的拟合结果,对拟合数据求积分即可获得 H、O 原子发射谱线强度 I_H 、 I_O 。另外,为尽量满足微量漏水的假定条件,以及探讨该光谱测量系统的测量极限,分别给出 A、B 状态下漏水初始时刻的 H、O 原子发射谱线强度比(为图 3、4 中的 12.4s 和 29.8s 处,对应 H 原子的相对强度 H_{656}/H_{bg} ,分别为 1.37、1.31),分别为 0.0054、0.0040。考虑到加热器内平衡温度的测定误差及存在着温度梯度,在根据式(4)计算漏水量时,需给出一定的温度误差范围对漏水量计算结果不确定度进行评估,本文假定平衡温度误差为 $\pm 1000\text{K}$,得到: A 状态下,平衡温度为 6000 ~ 8000K 时,漏水探测极限约为 1.85 ~ 0.94g/s; B 状态下,在平衡温度 5500 ~ 7500K 范围下,漏水探测极限约为 2.12 ~ 0.98g/s。

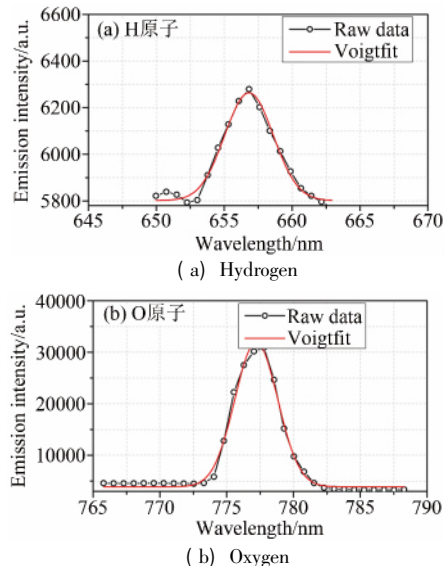


图 6 发射光谱数据处理(B 状态)
Fig. 6 Atomic emission spectra and their curve fits under test condition B

基于上述试验方案及结果,在下一步的工作中,可通过以下途径减小探测极限,提高测量能力。

(1) 采用高分辨率光谱仪

目前试验中使用的光谱仪分辨率较低,较大的仪器展宽降低了试验光谱的测量精度,导致在进行原子光谱相对强度处理时误差的增大,进而降低了整个光谱测量系统的探测灵敏度。未来试验中若采用更高分辨率的光谱仪,相信能大幅度提高探测灵敏度。

(2) 优化光路设计

在目前的测量光路下,实际采集的发光不仅包括加热器内高温气体的发光,还叠加了壁面固体发光。

在本文数据分析方法的条件下,若 H 原子辐射强度一定,壁面固体发光越强,系统探测灵敏度越低。因此在下一步工作中,需要重新设计光学测量夹片,尽量排除壁面固体发光的干扰。

4 结 论

针对电弧加热器电极微量漏水时刻难以准确判断的难题,建立一套基于 $H\alpha$ (656.28nm) 和 O 原子 (777.19nm) 发射谱线的发射光谱监测系统,通过分析电弧加热器正常运行及漏水故障下高温流场辐射特征,提出一种利用 H、O 原子相对强度变化监测电弧加热器漏水故障的处理方法,并将其应用于中国航空气动力技术研究院某电弧加热器。试验结果表明,在本文试验工况和数据分析方法的条件下,利用上述测量方案进行电弧加热器瞬态漏水故障诊断是切实可行的。最后,基于热力学平衡假设对漏水初始时刻漏水量定量分析进而对该测量方案探测极限进行讨论,结合试验数据分析其实际测量能力并提出改进方案。

参考文献:

- [1] Grinstead J H, Porter B J, Carballo J E. Flow property measurement using laser-induced fluorescence in the NASA ames interaction heating facility [R]. AIAA-2011-4091, 2011.
- [2] Splinter S C, Bey K S, Gragg J G, et al. Comparative measurements of earth and Martian entry environments in the NASA Langley HYMETs facility [R]. AIAA-2011-4014, 2011.
- [3] Park C, Raiche G A, Driver D M, et al. Comparison of enthalpy determination methods for an arc-jet facility [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2006, 20(4): 672-679.
- [4] Kim S. Development of tunable diode laser absorption sensors for a large-scale arc-heated-plasma wind tunnel [D]. California: Stanford University, 2004.
- [5] Martin M N, Chang L S, Jeffries J B, et al. Monitoring temperature in high enthalpy arc-heated plasma flows using tunable diode laser absorption spectroscopy [R]. AIAA-2013-2761, 2013.
- [6] Winter P M, Prabhu D K. Radiation transport analysis of emission spectroscopic measurements in the plenum region of the NASA IHF arc jet facility [R]. AIAA-2014-2489, 2014.

- [7] Takayanagi H, Mizuno M, Fujii K, et al. Arc heated wind tunnel flow diagnostics using laser-induced fluorescence of atomic species [R]. AIAA-2009-1449, 2009.
- [8] Inman J A, Bathel B F, Johansen C T, et al. Nitric oxide PLIF measurements in the Hypersonic Materials Environmental Test System (HYMETs) [R]. AIAA-2011-4090, 2011.
- [9] Vancrayenes B, Fletcher D G. Emission spectroscopic survey of graphite ablation in the VKI plasmatron [R]. AIAA-2006-2907, 2006.
- [10] Yalin A P, Laux C O, Kruger C H, et al. Spatial profiles of N_2^+ concentration in an atmospheric pressure nitrogen glow discharge [J]. Plasma Sources Science and Technology, 2002, 11: 248-253.
- [11] Lin X, Yu X L, Li F, et al. Measurements of nonequilibrium and equilibrium temperature behind a strong shock wave in simulated Martian atmosphere [J]. Acta Mechanica Sinica, 2012, 28(5): 1296-1302.
- [12] Lin X, Yu X L, Li F, et al. CO concentration and temperature measurements in a shock tube for Martian mixtures by coupling OES and TDLAS [J]. Applied Physics B: Lasers and Optics, 2012, 110: 401-409.
- [13] Dikalyuk A S, Surzhikov S T, Kozlov P V, et al. Nonequilibrium spectral radiation behind the shock waves in Martian and Earth atmospheres [R]. AIAA-2013-2505, 2013.
- [14] Winter M W, Prabhu D K, Williams W W. Determination of temperature profiles in the plenum region of the NASA IHF arc jet facility from emission spectroscopic measurements [R]. AIAA-2013-3016, 2013.
- [15] Winter M W, Prabhu D K, Taunk J S, et al. Emission spectroscopic measurements in the plenum region of the NASA IHF arc jet facility [R]. AIAA-2010-4522, 2010.
- [16] Winter M W, Prabhu D K, Raiche G A, et al. Emission spectroscopic measurements with an optical probe in the NASA Ames IHF arc jet facility [R]. AIAA-2012-1016, 2012.
- [17] 张志成. 高超声速气动热和热防护 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 261-263.
- [18] Baum G M, Jorgensen L H. Charts for equilibrium flow properties of air in hypervelocity nozzles [R]. NASA TN D-4333, 1962.
- [19] Laux C O. Optical diagnostics and radiative emission of air plasmas [D]. California: Stanford University, 1993.

作者简介:



林 鑫(1986-),男,山东青岛人,工程师。研究方向:高温气体流动光学测量技术。通信地址:北京市 7201 信箱 15 分箱(100074)。E-mail: linxin_bit@163.com

(编辑:张巧芸)