

电弧加热器高温流场激光吸收光谱诊断

曾 徽¹, 陈连忠¹, 林 鑫^{1,2,*}, 欧东斌¹, 董永辉¹

(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, 北京 100090)

摘要: 气流温度和组分粒子数密度是定量评估电弧加热器运行参数和流场品质的关键, 常规测试手段难以适应电弧加热器内高温气流的恶劣环境, 电弧加热器等离子体气流诊断研究一直缺乏有效手段。本研究应用激光吸收光谱技术, 选用原子 O(777.19nm) 谱线, 基于局部热化学平衡等离子体假设, 对电弧加热器内高温离解空气 (>5000K) 试验气流进行在线诊断。试验测得了总焓 $H_0 = 15.8, 17.4 \text{ MJ/kg}$ 2 组工况下, 电弧加热器内等离子体气流温度和原子 O 粒子数密度。2 组工况获得平均气流温度分别为 5843 和 6047K, 对应高温平衡气流表获得气流温度为 5950 和 6335K。测得加热器运行稳定后 2 组工况的原子 O 总粒子数密度在 $(1.1 \sim 1.2) \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 之间, 低能级 $^5\text{S}_2^o$ 粒子数密度在 $(1.0 \sim 1.6) \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 之间, 2 组工况原子 O 总粒子数密度的差异与 NASA-CEA 平衡计算结果一致, 验证了电弧加热器气流局部热力学平衡假设的有效性。本研究验证了激光吸收光谱技术可作为高焓电弧加热器常规诊断手段。

关键词: 激光吸收光谱; 电弧加热器; 等离子体流场诊断; 原子氧粒子密度; 气流温度
中图分类号: V556.4 文献标识码: A

Laser absorption spectroscopy diagnostics in the arc-heater of an arcjet facility

Zeng Hui¹, Chen Lianzhong¹, Lin Xin^{1,2,*}, Ou Dongbin¹, Dong Yonghui¹

(1. Beijing Key Laboratory of Arc Plasma Application Equipment, China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074, China; 2. Institute of Mechanics, China Academy of Science, Beijing 100090, China)

Abstract: Gas temperature and species number density are the key parameters to quantitatively assess the arc-heated wind tunnel operation and flow quality. Conventional techniques meet great challenge in high enthalpy flow diagnostics for arc-heated facilities under prolonged operation at high temperatures. Based on the local thermodynamic equilibrium plasma assumption, this paper presents in-situ diagnostics for the dissociated air (>5000K) in the arc heater by using laser absorption spectroscopy of atomic oxygen at the wavelength of 777.19nm. The gas temperature and the number density of atomic oxygen are measured under two operation conditions of $H_0 = 15.8 \text{ MJ/kg}$ and 17.4 MJ/kg , respectively. The average temperatures are 5843K and 6047K, corresponding to 5950K and 6335K from charts for high temperature equilibrium flow properties of air. The number density of atomic oxygen is within $(1.1 \sim 1.2) \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ and is in consistency with the calculation via NASA-CEA program, while the number density of atomic oxygen ($^5\text{S}_2^o$) is within $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. This work demonstrates that the laser absorption spectroscopy is applicable for high enthalpy flow diagnostics in the arc-heated wind tunnel as a new technique.

Keywords: laser absorption spectroscopy; arc heater; plasma flow diagnostics; number density of atomic oxygen; gas temperature

收稿日期: 2016-11-25; 修订日期: 2017-01-03

* 通信作者 E-mail: linxin_bit@163.com

引用格式: Zeng H, Chen L Z, Lin X, et al. Laser absorption spectroscopy diagnostics in the arc-heater of an arcjet facility. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2017, 31(4): 28-33. 曾 徽, 陈连忠, 林 鑫, 等. 电弧加热器高温流场激光吸收光谱诊断. *实验流体力学*, 2017, 31(4): 28-33.

0 引言

高焓电弧加热器可以复现高超声速飞行器再入飞行时的主要热参数(焓,热流),依托空气为介质的电弧风洞地面试验可以有效地进行地球大气再入飞行器耐热材料的筛选和考核,是目前各国进行热防护的主要地面试验设备^[1-3]。地面模拟试验的关键问题之一是获得准确的电弧加热器气流运行参数,由于电弧加热器内离解空气温度高于 5000K,等离子体平动-转动-振动激发和气流组分(N_2, N, NO, O_2, O)的离解复合,传统接触式测量手段难以对高温流场进行准确定量,限制了飞行器耐热材料及耐热结构研究的发展。近年来,以激光吸收光谱技术为代表的非接触式光谱测量方法因具备对流场多参数实时诊断的能力和对流场无干扰的优点,成为了国际上高温、高超设备流场诊断技术的发展热点^[4]。

国内外开展激光吸收光谱技术对大功率电弧加热器诊断的应用较晚,在近 10 年才有相关研究结果发表。Stanford 大学的 Suhong Kim 等选用 O, N, Ar, Cu 等原子谱线,对 NASA Ames IHF 60MW 电弧加热器内和试验舱内气流进行了在线诊断,在国际上首次获得了加热器气流温度^[5]。该研究小组应用外腔半导体激光器,选用 777.19nm 附近原子 O 谱线获得了该加热器在不同焓值下加热器截面不同位置的气流温度,并与相关数值计算结果对比,获得了良好的一致性^[6]。日本东京大学的 Makoto Matsui 等基于 777.19 nm 原子 O 谱线,对高频感应风洞(ICP)内气流进行了诊断,基于测量的温度结果计算获得了气流总焓,与其他接触式手段测量结果一致^[7]。在国内,中国航天动力技术研究院欧东斌等利用原子 O 激光吸收光谱技术,对某电弧风洞试验舱内平头圆柱体模型脱体激波后气体温度和氧原子数密度进行了测量^[8],填补了国内在电弧风洞气流诊断研究方面的空白。

基于前期激光吸收光谱(LAS)流场诊断技术在电弧风洞试验舱内对高温超声速气流与平头圆柱模型相互化学作用过程的定量诊断,本文应用原子 O-LAS 吸收诊断技术,进一步开展了对中国航天空气动力技术研究院 FD-04 电弧风洞加热器弧室等离子体气流的在线诊断研究,测量得到了不同工况下弧室气流温度和原子 O 总粒子数密度和低能级 3S_2 粒子数密度,获得评估电弧加热器运行状态的定量流场参数,光学测量结果与接触式测量结果一致。结合 NASA-CEA^[9]平衡计算验证了弧室局部热平衡等等

离子体假设的有效性,本研究工作验证了激光吸收光谱技术在高焓电弧设备的应用前景,本研究通过对光学测量系统的优化设计和测量方法的改进,大大降低 LAS 吸收光谱技术对大型电弧风洞设备复杂环境(电磁干扰,机械干扰,气流非均匀性和非平衡特性等)的应用难度,LAS 光谱诊断技术可作为高温流场诊断的成熟测试手段。

1 激光吸收光谱(LAS)

1.1 基本原理

激光吸收光谱的基本理论已经得到研究人员的深入研究^[10-11]。其基本原理可以归纳为:一束频率为 ν 的单色激光通过待测流场,激光光子被待测组分吸收,入射光强和出射光强满足 Beer-Lambert 定律:

$$\frac{I}{I_0} \Big|_{\nu} = \exp(-\alpha_{\nu}) \quad (1)$$

其中 I_0 为入射光强, I 为出射光强, α_{ν} 表示谱线吸收率,其满足:

$$\alpha_{\nu} = -\ln\left(\frac{I}{I_0} \Big|_{\nu}\right) = S_{lu} n_l \phi_{\nu} L \quad (2)$$

$$S_{lu} = \frac{\lambda_0^2}{8\pi c} A_{ul} \frac{g_u}{g_l} \left[1 - \exp\left(-\frac{hc}{\lambda_0 k_B T_{ex}}\right)\right] \quad (3)$$

S_{lu} 表示吸收谱线的线强度, $\text{cm}^{-1}/(\text{molecule} \cdot \text{cm}^2)$; n_l 表示低能级粒子数密度, cm^{-3} ; L 表示吸收光程长度, cm ; λ_0 表示跃迁谱线波长, nm ; A_{ul} 表示爱因斯坦系数, s^{-1} ; g_u, g_l 分别表示上下能级简并度; k_B 表示 Boltzmann 常数, m/s ; $\phi(\nu)$ 表示线型函数, cm , 且 $\phi(\nu)$ 满足 $\int \phi(\nu) d\nu = 1$ 。在理想状态下,不同能级的跃迁对应着分子内部总能量的变化,这个能量变化对应着一个确定的频率(无限窄),在实际的吸收或发射光谱中谱线都是有一定展宽,谱线在此确定中心频率周围的一小段频率范围内的强度分布即为线型函数。导致谱线展宽的机制有多种,主要为均匀展宽和非均匀展宽 2 种,可以用 Lorentz 加宽和 Gauss 加宽分别表述。本实验中电弧加热器运行状态下,其基本参数为:弧室压力范围为 $(3.1 \sim 3.2) \times 10^5 \text{ Pa}$,气流温度范围为 $5800 \sim 6500 \text{ K}$ 。此状态下 Gauss 加宽和 Lorentz 加宽对谱线加宽的影响是相当的,谱线吸收线型需要选用耦合这两种加宽机制的 Voigt 线型对吸收信号进行拟合,Voigt 线型函数有如下形式:

$$\phi_{\nu}(\nu) = \frac{\ln 2}{\pi^{3/2}} \cdot \frac{2a}{\Delta\nu_D} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-y^2}}{a^2 + (\xi - y)^2} dy \quad (4)$$

$$y = \frac{2\sqrt{\ln 2}\nu}{\Delta\nu_D}, \xi = \frac{2\sqrt{\ln 2}(\nu_0 - \nu)}{\Delta\nu_D}, a = \frac{\sqrt{\ln 2}\Delta\nu_L}{\Delta\nu_D}$$

其中 $\Delta\nu_D, \Delta\nu_L$ 分别表示 Gauss 半高全宽和 Lorentz 半高全宽,对谱线吸收率积分,获得积分吸收率 A :

$$A = \int \alpha_\nu d\nu = S_{lu} n_l L \quad (5)$$

基于电弧加热器内热平衡等离子体假设,通过获得待测谱线的积分吸收率可以获得待测粒子的数密度^[6]。表 1 给出了本实验所选原子 O 谱线的光谱基本参数。

表 1 原子 O 吸收跃迁 ($^5P_3 \leftarrow ^5S_2^o$) 光谱参数
Table 1 Fundamental spectroscopic data for the O ($^5P_3 \leftarrow ^5S_2^o$) transition

λ_0 /nm	A_{ul} / $10^6 s^{-1}$	E_l /cm ⁻¹	E_u /cm ⁻¹	g_l	g_u
777.2	36.9	73768	86631	5	7

1.2 热平衡等离子体

电弧加热器通过电加热的方式升温获得高焓气流,对于高压低速气流,可以认为加热器内等离子体处于局部热平衡,相关的研究结果验证了这一假设^[12]。

基于局部热平衡等离子体假设,氧原子低能级粒子数密度和总粒子数密度满足 Boltzmann 分布:

$$\frac{n_l}{n_o} = \frac{g_l}{Q_o} \exp\left(-\frac{E_l}{k_B T}\right) \quad (6)$$

Q_o 表示原子 O 配分函数,它反映吸收跃迁对应低态粒子数占总粒子数的比值,可以用经验公式^[13]表示:

$$Q_o = 5 + 3 \exp\left(-\frac{228}{T}\right) + \exp\left(-\frac{326}{T}\right) \quad (7)$$

同时,总粒子数密度 n_o 满足道尔顿分压定律:

$$n_o = \frac{pX_o}{k_B T} \quad (8)$$

基于 NASA 平衡计算程序 CEA^[9],图 1 给出了 $2 \times 10^5 Pa$ 和 $6 \times 10^5 Pa$ 压力下空气平衡等离子体主要组分(N, NO, N₂, O, O₂)摩尔分数随温度(4000~10000K)的变化趋势。基于公式(5)和(6)迭代求解,可以获得气流温度。

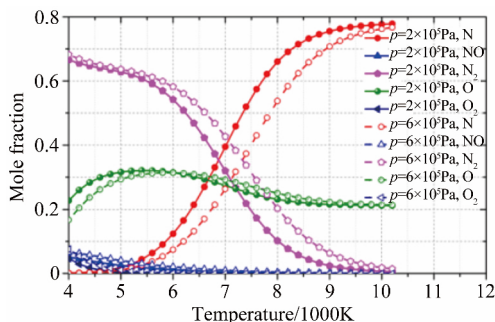


图 1 $(2, 6) \times 10^5 Pa$ 压力下空气平衡等离子体组分浓度随温度的变化

Fig. 1 Equilibrium gas composition for air plasma at different temperatures and at 2 and 6 atmospheric pressures

2 试验部分

本实验是在中国航天空气动力技术研究院 FD-04 高焓电弧风洞上进行。如图 2 所示,该电弧风洞主要组成部分包括:电弧加热器、喷管、试验段、冷却器和真空系统。光学测量布置于电弧加热器下游、喷管收缩段上游的位置,通过一套与电弧加热器匹配安装的光学测量夹片进行吸收测量,图 2 左下角是光学夹片的简要示意图。通过在光学夹片对向设计通孔,并设计一体安装的石英窗口和透镜,保证入射激光的聚焦和透射激光被准确接收。光学夹片两侧水冷设计满足试验过程中光学系统安装和实验气密要求,保证电弧加热器长时间运行时光学夹片正常工作。

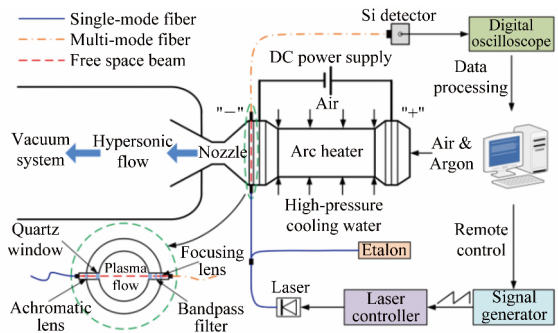


图 2 电弧风洞及 LAS 光路系统示意图

Fig. 2 Schematic of the experimental setup of the arc-heated wind tunnel and the LAS system

图 2 同时给出了激光吸收测量部分的示意图。LAS 光学系统主要由 2 部分构成:(1) 光学发射端;(2) 光学接收端。光学发射端由外腔半导体激光器、激光控制器、信号发生器、单模光纤及准直透镜组成,激光控制器通过温度控制和电流控制来调谐激光器腔长,改变激光器输出波长,试验中通过信号发生器输出 100Hz 锯齿波信号来进行电流调谐。光学接收端由多模光纤、探测器,示波器组成。试验中采用 Si 探测器获得激光光谱,由多通道 Tek 示波器接收。试验获得的吸收信号是基于时域的结果,需将其转换为频域分布。通过 F-P 腔精确标定,可以获得时域-频域的转换关系。

需要强调的是,电弧加热器运行面临电磁、机械干扰的问题,因此光学元件需要进行电磁屏蔽处理,光学测量平台远离风洞试验台,通过长距离光纤进行激光传输。同时在光路安装调试过程中,为避免风洞机械振动引起的光路偏离,引起吸收信号信噪比的下降,要进行专门的防振处理。图 3 给出了电弧加热器某一工况运行条件下获得的原始吸收信号,局部放大图给出了单个吸收扫描周期内的吸收信号,显示出较

高的信噪比。在整个 24s 的采集周期内, $t=0.5\text{s}$ 之前, 风洞未启动运行, 之后随氦气起弧, 吸收信号有一个很短的延迟, 之后光谱吸收率逐渐增加并稳定, 显示电弧加热器达到稳定的运行状态。

本试验针对电弧加热器运行的 2 个状态进行光学测量, 电弧加热器的运行工况如表 2 所示(总焓来自于平衡声速法^[14], 压力来自于试验测量, 总温来自于高温平衡气流表^[15]):

表 2 电弧加热器运行工况
Table 2 The operation conditions for the arc heater

Test condition	Bulk enthalpy $H_0/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	Chamber pressure $p/10^5 \text{ Pa}$	Total temperature T_0/K
59-A	17.4	3.2	6335
59-B	15.8	3.1	5950

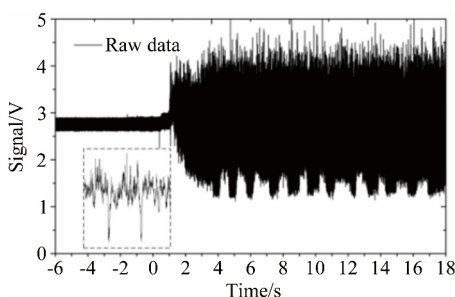


图 3 单一工况下原始吸收信号, $H_0=15.8\text{MJ/kg}$
Fig. 3 Raw absorption signal under an operation condition, $H_0=15.8\text{MJ/kg}$

3 试验结果与分析

直接吸收光谱的关键在于获得准确的基线通过吸收信号(透射光强)与基线(入射光强)之比获得扫描周期内的吸收信号。本试验采用的外腔式激光器, 其输出特性随调谐电流的变化呈现非单调、非线性的变化趋势, 因此以往通过提取单个扫描周期内非吸收位置的数据进行多项式拟合来获取基线已不适用。试验通过记录试验前常温空气的背景吸收信号(吸收率为 0), 以此为参照, 通过背景吸收信号与目标周期信号光强之比获得当前周期实际的背景基线, 通过此方法处理得到当前周期的光谱吸收率, 能减少光谱后处理过程中引入的人为误差, 得到信噪比高的结果。同时, 通过 FP 标准具标定单个吸收周期内时域与频域关系, 可获得基于频域的吸收结果。如图 4 所示, 对采用上述方法获得的单周期内吸收率结果, 采用 Voigt 线型对吸收信号进行拟合, 可以获得单周期内谱线的积分吸收率, 通过进一步处理可获得气流的温度和原子 O 的粒子数密度。

图 5 给出了电弧加热器 2 组工况下测量位置处等离子体气流静温随时间的变化。如图 5 所示, 在电

弧加热器起弧阶段, 气流静温迅速上升并建立平衡。对于 59-A 工况, 稳定后气流平均静温为 6057K, 对应表 2 中总温为 6335K; 对于 59-B 工况, 稳定后气流平均静温为 5843K, 对应表 2 中总温为 5950K。

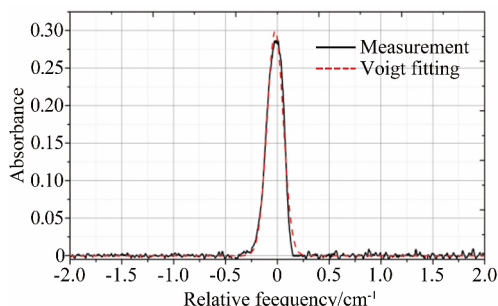


图 4 单个周期吸收信号及拟合结果
Fig. 4 Results of absorbance and Voigt fitting in one period

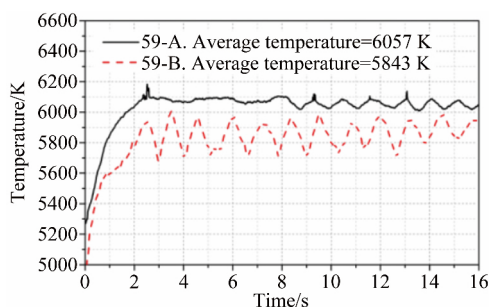
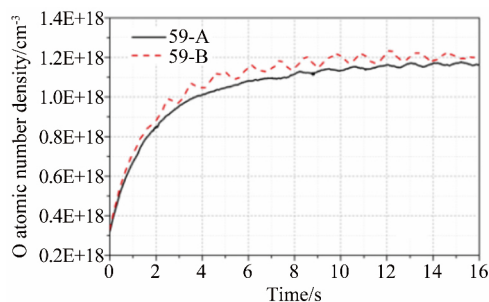
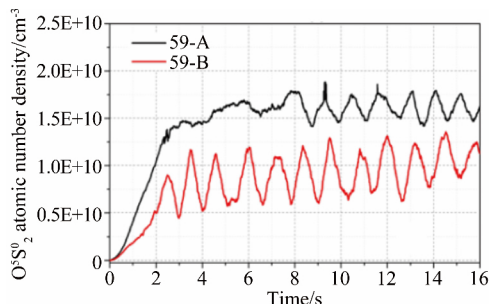


图 5 2 组工况下测得的弧室等离子体气流温度
Fig. 5 Measured temperature in the arc heater under two operation conditions

图 6(a)和(b)分别给出了电弧加热器 2 组工况下测量位置处原子 O 总粒子数密度和低能级粒子数密度随时间的变化。如图 6(a)所示, 加热器启动后, 原



(a) 总粒子数密度



(b) 低能级粒子数密度

图 6 2 个工况下测得的弧室原子 O 粒子密度
Fig. 6 Measured number density of atomic oxygen in the arc heater under two operation conditions

子 O 粒子数密度迅速上升,并迅速达到稳定,2 组工况下原子氧数密度的数量级在 $(1.1 \sim 1.2) \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。比较 2 组工况,在测量周期内,较低焓值、压力的 59-B 工况的原子 O 低能级粒子数密度要高于较高焓值、压力的 59-A 工况,这与图 1 中平衡计算的结果是一致的。59-A、59-B 工况静温在 5800~6100K 之间,在此温度区间内,原子 O 的浓度随温度、压力的增加而下降,进而引起 O 原子总粒子数密度的减少。图 6 (b) 中 2 典型工况下电弧加热器启动,原子 O 低能级粒子数密度迅速升高,并逐渐平衡。59-A 工况原子 O 低能级粒子数密度在 $1.6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 左右,59-B 工况原子 O 低能级粒子数密度在 $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 左右,较高焓值下出现更高密度的原子 O 低能级粒子数密度跃迁。

对于 59-A 和 59-B 2 组工况,气流稳定后,温度和原子氧粒子数密度结果均出现小幅、规律性的周期振荡,振荡频率约为 1Hz,与图 3 中原始吸收信号一致。分析此振荡的原因:光学夹片采用切向进气的方式进入弧室,经逐步加热升温至稳定,因此在光学夹片内侧形成局部不稳定的薄冷流区,局部冷流区内气流温度低于弧室核心流,因而当此区域冷气通过光路时,激光光谱沿光路线积分平均测量的特性引起实际测量值被拉低,待冷气逐渐升温稳定,温度又重新升高,出现周期振荡的规律。同时,对于 59-A 较高焓值的运行工况,温度振荡幅度低于 59-B 较低焓值的状态,其原因在于 59-A 工况光学夹片处冷流区要小于 59-B 工况,与不同工况下光学夹片的进气量相关。

4 结 论

本研究将激光吸收光谱技术(LAS)应用于高焓电弧风洞弧室内等离子体气流诊断。针对总焓 15.8MJ/kg 和 17.4MJ/kg 2 组典型工况,获得了弧室内等离子体气流温度和原子 O ($^5\text{s}^0$) 低能级粒子数密度,获得如下结论:

(1) 本研究验证了激光吸收光谱对大功率电弧加热器的准确定量能力。利用 LAS 测量技术获得了 59-A、59-B 2 组工况的气流平均静温,分别为 5843K 和 6057K,对应高温平衡气流表获得的总温分别为 5950K,6335K;

(2) 激光吸收光谱技术验证了弧室热平衡等离子体假设的可靠性。59-A、59-B 2 组工况测得了原子粒子数密度,对比基于 NASA-CEA 局部热平衡假设的计算结果,2 组工况的粒子数密度差异吻合。

(3) 本研究工作说明激光吸收光谱诊断电弧加

热器流场具有非常高的测量灵敏度。59-A、59-B 工况状态接近 ($\Delta H_0: 1.6 \text{ MJ/kg}$, $\Delta P: 0.1 \text{ atm}$, $\Delta T_0 < 400 \text{ K}$), 光谱测量结果准确地获得 2 工况参数(温度、粒子密度)的差异,与平衡计算和接触式测量结果基本一致。

本研究验证了 LAS 光谱方法对高焓电弧加热器气流参数的在线诊断能力,该测量结果可以直接应用于对风洞运行参数的评估,同时为相关数值计算提供数据支撑,激光吸收光谱技术可作为电弧加热器和风洞试验舱高温等离子体气流诊断的常规测量手段。下一步工作将应用多光路-激光吸收光谱技术对电弧加热器截面气流参数进行诊断,获得弧室截面的二维定量信息。此外,该光谱诊断技术将扩展应用于高频感应风洞等其他类型的高焓电弧设备的多组分(O, CO, NO 等)流场诊断。

参考文献:

- [1] Calomino A, Bruce W, Gage P, et al. Evaluation of the NASA Arc Jet Capabilities to Support Mission Requirements [R]. NASA/SP-2010-577, 2010.
- [2] Lu F K. Advanced hypersonic test facilities[M]. AIAA, 2002.
- [3] Bugel M, Reynier P, Smith A. Review of European aerodynamics and aerothermodynamics capabilities for sample return missions[C]//Proceedings of the 6th European Symposium on Aerodynamics for Space Vehicles, 2008.
- [4] Bolshov M A, Kuritsyn Y A, Romanovskii Y V. Tunable diode laser spectroscopy as a technique for combustion diagnostics [J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2015, 106: 45-66.
- [5] Kim S. Development of tunable diode laser absorption sensors for a large-scale arc-heated-plasma wind tunnel[D]. Stanford University, 2004.
- [6] 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[C]. 44th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, 2013.
- [7] Matsui M, Komurasaki K, Herdrich G, et al. Enthalpy measurement in inductively heated plasma generator flow by laser absorption spectroscopy [J]. AIAA Journal, 2005, 43 (9): 2060-2064.
- [8] 欧东斌, 陈连忠, 董永晖, 等. 电弧风洞中基于 TDLAS 的气体温度和氧原子浓度测试[J]. 实验流体力学, 2015, 29(3): 62-67.
Ou D B, Chen L Z, Dong Y H, et al. Measurements of gas temperature and atomic oxygen density in the arc-heated wind tunnel based on TDLAS [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2015, 29(3): 62-67.
- [9] Gordon S, McBride B J. Computer program for calculation of complex chemical equilibrium compositions and applications[M]. NASA, 1994.
- [10] Baer D S, Nagali V, Furlong E R, et al. Scanned- and fixed-wavelength absorption diagnostics for combustion measurements using multiplexed diode lasers[J]. AIAA Journal, 1996, 34(3): 489-493.

- [11] Nagali V, Chou S I, Baer D S, et al. Tunable diode-laser absorption measurements of methane at elevated temperatures [J]. Applied Optics, 1996, 35(21): 4026-4032.
- [12] Branch R F E. Measurements of gas temperature in the arc-heater of a large scale arcjet facility using tunable diode laser absorption[C]. 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2005.
- [13] Laux C O. Optical dignostics and radiative emission of air plasmas[D] California; Stanford University, 1993.
- [14] 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.
- [15] Jorgensen L H, Baum G M, Charts for equilibrium flow properties of air in hypervelocity nozzles[M]. NASA, 1962.

作者简介:



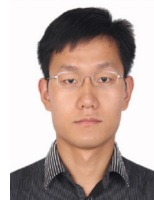
曾 徽(1989-),男,湖南益阳人,工程师。研究方向:气动热试验分析、吸收光谱、发射光谱燃烧诊断。通信地址:北京市云岗西路17号中国航空气动力技术研究院(100074)。E-mail: zenghuiked@outlook.com

(编辑:张巧芸)

(上接第27页)

- Tan X Z, Ding Z S, Chen S S, et al. Experiment study of aerodynamic interactions of projectile with jet from its forebody[J]. Journal of Huaiyin Teachers College (Natural Science Edition), 2004, 3(3): 206-209.
- [16] 黄勇, 姜裕标, 沈礼敏, 等. 低速风洞推力转向试验技术研究[C]. 2003空气动力学前沿研究研讨会论文集. 北京: 中国空气动力学会, 2003: 245-251.
- Huang Y, Jiang Y B, Shen L M, et al. Low speed wind tunnel thrust vectoring test technology research[C]. 2003 Aerodynamic Cutting-edge Research Seminar, 2003: 245-251.
- [17] 徐筠, 朱涛, 许晓斌, 等. 某新型侧向喷流试验技术研究[C]. 第9届全国实验流体力学学术会议论文. 2013: 48-53.
- Xu Y, Zhu T, Xu X B, et al. Experimental technique investigation on a novelty lateral jet in $\phi 1\text{m}$ hypersonic wind tunnel [C]. 9th National Experimental Fluid Mechanics Conference, 2013: 48-53.
- [18] 贾毅, 郑芳, 黄浩, 等. 低速风洞推力矢量试验技术研究[J]. 实验流体力学, 2014, 28(6): 92-97.
- Jia Y, Zheng F, Huang H, et al. Research on vectoring thrust test technology in low-speed wind tunnel[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2014, 28(6): 92-97.
- [19] <http://www.bvmjets.com/pages/p200sx.htm>

作者简介:



张 超(1987-),男,陕西西安人,工程师,博士。研究方向:飞行控制、飞行器管理、自抗扰控制、推力矢量建模与控制等。通信地址:陕西省西安市阎良区航空工业第一飞机设计研究院(710089)。E-mail: zhangchao.thucs@gmail.com

(编辑:杨 娟)