

电弧风洞中基于 TDLAS 的气体温度和 氧原子浓度测试

欧东斌¹, 陈连忠¹, 董永晖¹, 林 鑫^{1,*}, 李 飞², 余西龙²

(1. 中国航天空气动力技术研究院, 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: 电弧风洞是对防热材料/结构进行地面考核的关键设备, 其流场参数是评估设备性能和品质的关键数据。由于高温气流的恶劣环境, 尚无有效诊断手段。本文使用可调谐二极管吸收光谱技术(TDLAS), 针对气流中氧原子, 选用氧原子特征吸收谱线($\lambda=777.2\text{nm}$), 测量了电弧风洞中水冷平头圆柱体模型脱体激波后的气体温度和氧原子数密度, 试验测量与工程计算结果较为一致。试验显示出 TDLAS 具有高温电弧风洞应用的潜在优势。

关键词: TDLAS; 电弧风洞; 流场参数; 气体温度; 氧原子浓度

中图分类号: V556.4 文献标识码: A

Measurements of gas temperature and atomic oxygen density in the arc-heated wind tunnel based on TDLAS

Ou Dongbin¹, Chen Lianzhong¹, Dong Yonghui¹, Lin Xin^{1,*}, Li Fei², Yu Xilong²

(1. 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: Large-scale, high-enthalpy arc heated wind tunnels are the most reliable ground test facilities to test thermal protection materials and heat shield structures for space vehicles. Flow conditions in the facility need to be monitored. Currently, the facility conditions are defined using either the anticipated surface temperature with an assuming emissivity or the expected heat flux level. While this is useful to evaluate relative performance of the facility, it is not sufficient for quantitative measurement of the flow conditions. Temperature is one of the most important thermodynamic quantities in determining arc heated wind tunnel because it is a key parameter in determining arc-heater operating status and chemical reactions. Therefore, the development of accurate quantitative diagnostic techniques is necessary for better understanding the complex physics involved in the arc heated wind tunnel. The design of a tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) system to probe gas parameters during a bow shock wave ahead of a water cooled copper cylinder is presented in this paper. TDLAS is an effective method for measuring gas temperature and concentration in many fields due to its advantage of non-intrusive, high sensitivity, gas-specific and quick response. In our studies, an atomic oxygen absorption line near 777.2nm is utilized for detecting the arc-heated plasma using scanned-wavelength direct absorption mode with 100Hz repetition rate. The value of temperature is inferred directly from the Doppler broadening component of the absorption lineshape. Moreover, the number density of atomic oxygen is also determined through the integrated absorbance assuming local thermal equilibrium conditions. The agreement of the experimental observations and theoretical calculations shows that the thermal equilibrium assumption is valid. The current experimental results of this study illustrate the high potential of TDLAS measurements for routine and economical monitoring of arc heated wind tunnel operating status (gas temperature) as well as the time-resolved flow conditions in front of the model.

收稿日期: 2014-06-25; 修订日期: 2014-12-20

* 通信作者 E-mail: linxin_bit@163.com

引用格式: 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. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2015, 29(3): 62-67. 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. *实验流体力学*, 2015, 29(3): 62-67.

Keywords: Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS); arc heated wind tunnel; flowfield parameter; gas temperature; number density of atomic Oxygen

0 引言

高超声速飞行器再入大气层时,由于气流的强激波压缩和粘性滞止,激波后的气体被急剧加热。如飞行器在大气中间层(50~80km)中以 10km/s 速度再入时,激波后气体温度接近 7000K,这将导致飞行器周围的空气离解或电离成等离子体。等离子体热力学状态(包括平动、转动、振动、电子温度和密度等热力学参数)的变化和气体组分(O₂、N₂、O 和 N)的离解、复合和电离等真实气体效应都对飞行器耐热设计带来极大困难。电弧加热设备可以模拟长时间高焓气动加热条件,且能提供较真实的空气化学组分,因此成为耐热材料和耐热结构地面考核的重要手段。电弧风洞中温度、原子浓度等参数是评估模拟状态的关键参数,需要进行准确测量^[1-3]。

由于电弧加热器内部工作条件恶劣,传统的接触式测试分析手段难以应用,利用非接触方法诊断高焓气流是诊断技术的发展方向。光谱法是非接触测试方法的重要分支,也是等离子体诊断的主要方法。它利用等离子体发射或吸收光谱,测量温度、密度和化学组分。20 世纪 50 年代初, H. 迈克等人提出这一方法,其最初应用于天体物理和基础试验研究,后来又应用于航天环境模拟、化工冶炼、热加工和能源等方面^[4-5]。在 60 年代中后期,激光器发明之后,开始用激光光谱诊断法(吸收光谱法、荧光光谱法、拉曼光谱法等)对等离子体状态和输运性质进行试验研究。可调谐二极管激光吸收光谱技术(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS),利用窄线宽二极管激光器(带宽<10MHz)扫描谱线的精细结构,避开辐射及其它吸收的干扰,极大提高了测量信噪比,除此之外,它还具备环境适用性强、响应速度快、可靠性高等优点。在数据提取中,它利用吸收谱强度随温度变化特性实现温度测量,利用吸收率的绝对强度获取气体浓度信息,是一种极具应用前景的新型光谱技术^[6-7]。美国 Suhong Kim^[8]在 NASA Ames IHF(60MW)进行了 O(777.2nm)和 N(844.6nm)的吸收光谱测量,在假设热平衡条件下,由测得的 O 和 N 原子的摩尔分数比推算电弧加热器温度,测量温度范围 5000~9000K,压力范围 1.5~6bar;日本 Hiroki Takayanagi^[9]在氩气等离子炬中,利用 Ar 吸收线(842.5nm)测量 Ar 原子数密度。在国内,TDLAS

技术也得到广泛应用。中科院李飞等利用 H₂O 吸收谱线测量了超燃冲压发动机的燃烧室入口、燃烧室内和燃烧室出口气流静温、浓度和速度^[10-11];林鑫利用 CO 吸收谱线,测量了激波管中激波波后的 CO 浓度等^[12]。然而国内对于 TDLAS 在电弧风洞中的应用尚未见报道。

本文利用 TDLAS 技术,选择 O(777.19nm)吸收线对电弧风洞中水冷平头圆柱体模型脱体激波后气体温度和氧原子浓度进行测量并取得初步试验结果,试验测量与工程计算结果较为一致,验证了吸收光谱方法应用于电弧风洞的可行性。

1 TDLAS 测量基本原理

当频率为 ν 的激光通过一个沿光程准均匀的待测流场时,入射光强 I_0 和透射光强 I 满足 Beer-Lambert 公式^[13-14]:

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-S \cdot n_i \cdot L \cdot \phi(\nu)) \quad (1)$$

$$\text{即} \quad S \cdot n_i \cdot L \cdot \phi(\nu) = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (2)$$

式中: S 为吸收线强度, n_i 为低能级 i 的粒子数密度, L 为吸收长度, $\phi(\nu)$ 为吸收谱线线型函数,其满足归一化条件 $\int \phi(\nu) d\nu = 1$ 。实际中,光谱谱线在频率坐标上并不是无限狭窄的,而是具有一定频率宽度,线型函数是一个描述谱线展宽的物理量。试验中通过扫描激光波长,可获得目标吸收谱线的真实线型,从而计算积分吸收率 $\int \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) d\nu$,进一步通过 S 和 L 计算得到低能级 i 的粒子数密度 n_i ,低能级粒子数密度是总粒子数密度 n 和平衡态温度 T 的函数。

本文是从谱线的线型信息中提取温度 T 。线型函数的描述形式主要有 2 种: Lorentz 线型和 Gauss 线型。Lorentz 线型是由粒子之间的互相碰撞引起的,不仅依赖于压强,而且还依赖于分子的碰撞截面; Gauss 线型只依赖于温度 T 。在低压情况下,多普勒展宽占优势,而在压强很高的情况下吸收线碰撞展宽(Lorentz 线型)占优势^[15]。在本文的测量环境中(总温 6000~8000K,静压 2~3kPa),虽然 Gauss 线型半宽是 Lorentz 半宽的数倍,但不能以单纯的 Gauss 线型来拟合吸收线,而应当考虑复合线型 Voigt 线型,它为 Gauss 和 Lorentz 2 种线型函数的卷积:

$$\phi_V(v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \phi_D(v) \phi_L(v-v') dv' \quad (3)$$

$$\text{令 } y = \frac{2\sqrt{\ln 2} v'}{\Delta v_D}, \xi = \frac{2\sqrt{\ln 2}(v_0 - v)}{\Delta v_D}, a = \frac{\sqrt{\ln 2} \Delta v_L}{\Delta v_D}$$

, 则:

$$\phi_V(v) = \frac{\ln 2}{\pi^{3/2}} \times \frac{2a}{\Delta v_D} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-y^2}}{a^2 + (\xi - y)^2} dy \quad (4)$$

式中: Δv_D 为 Gauss 线型半宽, Δv_L 为 Lorentz 线型半宽, v_0 为谱线中心频率(已知), v' 是卷积自变量(中间参数, 积分后消失)。因此实际的 Voigt 线型的 $\phi_V(v)$ 是 Δv_D 和 Δv_L 的函数, 当吸收测量的信噪比很高时, 理论上可以通过寻优的方法通过实测的吸收线型信息推导出最可能的 Δv_D 和 Δv_L 。即可以通过吸收线的线型拟合得到 Δv_D , 利用该值计算出热运动温度(平动温度) T :

$$\Delta v_D = 2 \times \frac{v_0}{c} \cdot \sqrt{\frac{2kT \ln 2}{M}} = 7.1623 \times 10^{-7} v_0 \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (5)$$

式中: M 为吸收组分的分子量, c 为光速, k 为玻尔兹曼常数, T 为气流静温。在准平衡条件下, 原子能级的分布符合玻尔兹曼分布^[8], 因此利用温度 T 测量结果结合低能级粒子数密度 n_i 与总粒子数密度 n 的关系, 进而获得 n 。

2 电弧风洞中 TDLAS 的应用

试验在 FD04 电弧风洞中进行。该风洞是一座压力-真空式高超声速电弧风洞, 主要由电弧加热器、喷管、试验段、扩压器、冷却器和真空系统组成。试验采用超声速自由射流驻点试验技术, 在锥形喷管出口中心轴线上, 距离喷管出口一定距离的位置放置平头圆柱模型, 模型采用紫铜制作, 利用高压水进行循环冷却, 以减少烧蚀产物和表面温度对流场光谱的干扰, 试验布局示意如图 1 所示。

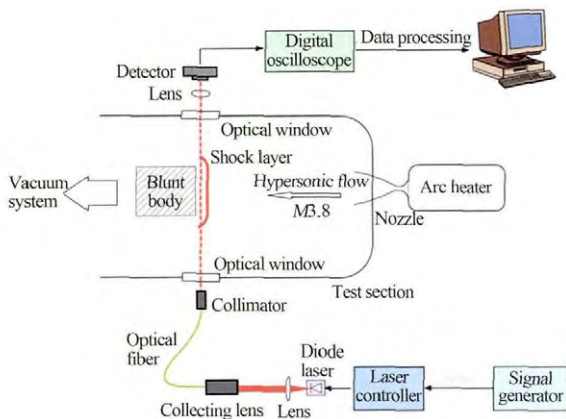


图 1 电弧风洞及 TDLAS 系统布置示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental set-up of the arc-heated wind tunnel and the TDLAS system

谱线选择是 TDLAS 系统设计的关键。针对氧原子谱线[引用 NIST]和商用窄线宽半导体激光器的波长范围, 本文选取了 777.19nm 吸收线, 该线的高低能级分别为 $2s^2 2p^3 (^4s^*) 3s$ 和 $2s^2 2p^3 (^4s^*) 3p$, 对应能量分别为 73768.2cm^{-1} 和 86631.454cm^{-1} , 该吸收线也是国际常用的氧原子吸收线^[3,9]。图 1 的中间部分对应为电弧风洞试验设备, 上下 2 部分为 TDLAS 整套系统。吸收策略为波长扫描-直接吸收方法, 信号发生器产生 100Hz 的锯齿波调制激光控制器的输出电流大小进而调节激光器波长使之扫过氧原子 777.2nm 吸收谱线进行测量。激光器 (Top-tics, 777nm) 的发射光由准直透镜收集到光纤中引导到远处试验舱的窗口处, 光纤输出激光由准直器进行准直, 再入射到试验舱内, 这部分是试验硬件系统的关键: 光强/光功率的大小决定了原始信号的信噪比; 光束直径决定了 TDLAS 的空间分辨能力。

由于本文所用的近红外激光器并非尾纤输出, 风洞附近的强电磁干扰不允许激光器安装于风洞设备旁边, 因此将激光传输到试验舱时需要使用光纤耦合。试验中使用了长度 10m, 芯径 0.6mm 的多模石英光纤进行激光耦合和传输。使用较粗芯径主要是为了尽可能地提高耦合效率, 增加探测光强以提高信噪比。激光准直的效果决定了模型表面附近的光束直径, 由于使用多模光纤传输激光, 且试验舱较大(直径 2m), 这极大的增加了光纤准直的难度, 试验中尝试了数组 3~15mm 焦距的准直镜, 最佳的准直效果是, 到达钝头处的激光光束直径约为 6~7mm。在未来的试验中应设法改进激光器的光学耦合, 使用 760nm 单模光纤进行激光耦合和长距离激光传输, 并且改善光学准直系统, 以期尽量减小光束直径。穿过流场后的激光光束由透镜聚焦后照射在硅探测器上。光信号转为电信号后由示波器记录(采样频率 250kS/s), 最后由计算程序进行数据处理。

试验中光路的具体位置如图 2 所示。由于到达钝头处的激光光斑直径为 6~7mm, 有约 2mm 的光斑被钝头体挡住, 未能到达对面的探测器。不过由于模型为平头圆柱体, 脱体激波也应该是近似平面激波, 光路前后方向的密度梯度不大, 不存在严重的光线偏折现象。

试验进行了 2 个状态, 其状态参数如表 1 所示, 其中总焓 H_0 由总压流量法计算得到, 总温 T_0 由 TD-1333 查表获得, 总压 p_0 为弧室压力, 由压力传感器测量得到, 静压 p_1 、 p_2 分别为激波前后的气流静压, 由等熵关系式得到。

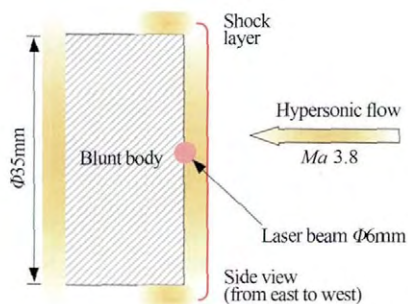


图 2 试验中光路位置图
Fig. 2 Schematic diagram of the optical path

表 1 试验状态
Table 1 Test conditions

状态	总焓 H_0 /(MJ · kg ⁻¹)	总压 p_0 /MPa	静压 p_1 /kPa	静压 p_2 /kPa	总温 T_0 /K
00CH1	22.0	0.25	2.85	33.00	7500
03CH1	18.0	0.22	2.51	29.59	7000

3 试验结果

图 3 为 00CH1 工况下原始数据及局部放大图。放大后的原始数据可以明显看到每个扫描周期后段对应的吸收。在试验设计和光谱标定中,吸收谱线应位于扫描波长的中间位置,而具体试验中由于压力频移,吸收峰位置偏移,偏向锯齿波的后半段,总体而言,吸收线型基本完整,能够完成测量。值得注意的是,每个周期的峰值吸收率(下降幅度)并不完全相同,从图 3(a)可看到周期性吸收的趋势,这一现象的具体原因有待未来更多试验和进一步分析。

逐个周期提取原始信号,进行基线拟合后可以得到吸收率信号,对该信号可进行线型拟合,如图 4 所示。结合前文关于拟合线型的分析,对此数据分别进行 Gauss 拟合和 Voigt 线型拟合。可见,Voigt 线型在两翼和峰值处均优于 Gauss 线型,使用 Voigt 线型拟合更能吻合实际的吸收线线型。从该 Voigt 线型拟合可以分别得到 Lorentz 和 Gauss 半宽(平动温度 T 信息)。而拟合后的积分吸收率能够用于计算低能级氧原子数密度 n_i 。

利用 Gauss 半宽和式(4),可得到钝头体前平动温度 T ,如图 5 所示。工况 00CH1 的平均温度为 7873K,03CH1 的平均温度为 6675K。在 0~2s 间,2 次试验的测量温度都较高,这可能是风洞启动阶段加热器空气量较少,极高的来流总温所致。在试验稳定运行状态中,也存在温度的波动,这应该是半宽拟合误差所致。在未来的试验中,尝试采用其它光谱测量手段,例如原子发射光谱双线法或多线波尔兹曼图斜率法等,与吸收光谱测量结果相互对比及分析。

利用每个周期的积分吸收率,可以计算处于低能级的氧原子数密度,其结果如图 6(a)所示。利用该低能级数密度和图 5 的温度测量结果(先拟合得到平滑温度分布,再计算 n),根据准平衡假设,可用波尔兹曼分布计算气流中总的氧原子数密度,如图 6(b)所示。

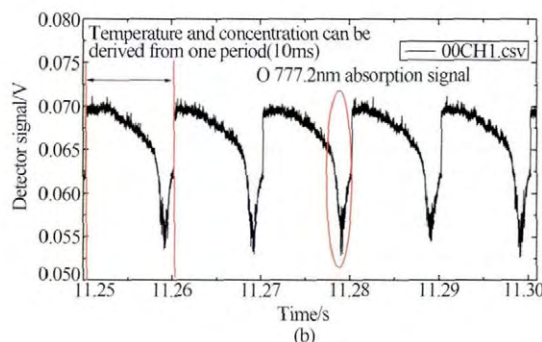
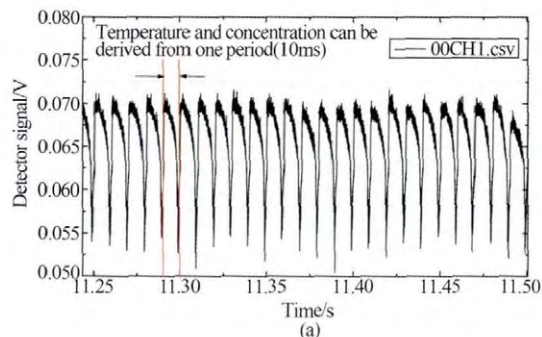


图 3 原始吸收数据及局部放大图
Fig. 3 Corresponding raw absorption signal versus time under 00CH1 condition

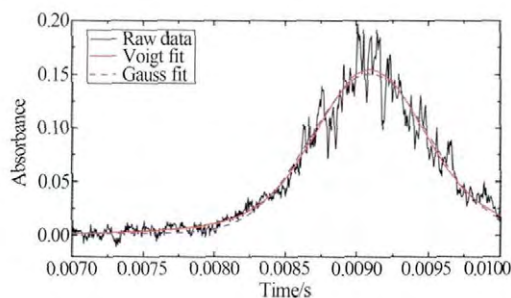


图 4 原始数据的线型拟合
Fig. 4 Best-fit Voigt/Gauss profile for single-scan absorption data

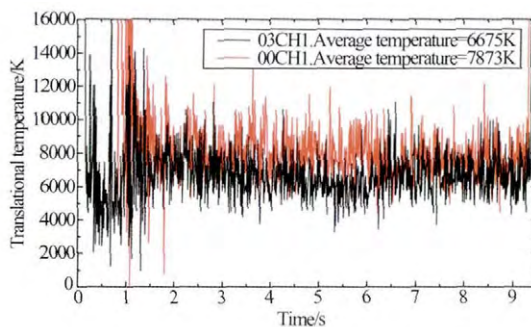


图 5 流场温度随时间的分布曲线
Fig. 5 Evolution of the temperatures under two test conditions

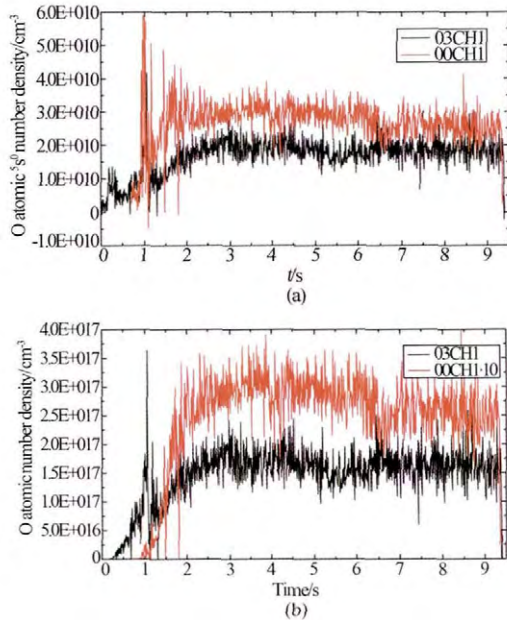


图6 氧原子数密度随时间的分布曲线
Fig. 6 Evolution of the Oxygen number densities under two test conditions

4 分析和讨论

采用等熵关系式和正激波关系式对上述的测试结果进行验证^[16],并利用式(6)计算氧原子数密度,得到的钝头体波后温度 T_2 和氧原子数密度 n ,与TDLAS试验测量结果进行比较,如表2所示。

$$n = X_i \cdot \frac{N}{V} = X_i \cdot \frac{N_A \cdot \frac{m}{M}}{V} \\ = X_i \cdot N_A \cdot \rho \frac{R}{\hat{R}} = X_i \cdot N_A \cdot \frac{1}{\hat{R}} \cdot \frac{p_2}{T_2} \quad (6)$$

式中: p_2, T_2 分别为正激波后气流压力和温度, n 为氧原子数密度, X_i 为氧原子摩尔比数, N_A 为阿伏伽德罗常数, \hat{R} 为通用气体常数(8.314J/(mol·K))。

表2 试验与计算结果对比
Table 2 Experiment and calculation results

状态	T_2/T_0	T_2/K		p_2 /kPa	X_i	n/cm^{-3}	
		计算	测试			计算	测试
00CH1	0.988	7410	7873	33	0.24	7.8×10^{16}	2.8×10^{16}
03CH1	0.985	6895	6675	29.6	0.28	8.7×10^{16}	1.4×10^{17}

可见试验值和计算的气流温度较为接近,两者相差6.2%(00CH1)和3.2%(03CH1)。氧原子数密度的测量和计算值相差稍大,测量值是计算值的0.36倍(00CH1)和1.61倍(03CH1)。其可能原因有以下几个方面:

(1) 吸收长度不准确

如式(1)所示,试验中的吸收光程 L 使用的是钝

头体的直径(35mm),而实际中,钝头前的激波范围大于钝头体截面积(见图2),因此有效吸收长度大于35mm,这会导致测量值偏大。

(2) 流向温度和密度梯度

如图2所示,试验中的光斑直径6~7mm,仅有2mm被钝头体遮挡。这说明实际光斑在流向方向有4~5mm宽带。因此,测量值实际上是钝头体前4~5mm厚度内的气流参数平均值。该平均值与理论计算值会存在一定偏差。

(3) 非平衡特性

高焓气流中,激波波后存在强烈非平衡特性。其主要特征是:平动温度(TDLAS测量结果)、转动温度,远高于振动温度和电子温度,也高于平衡后的温度;该非平衡性随着远离激波波面而快速减弱。因此,随着测量光束靠近激波或远离钝头体,非平衡特性影响的可能性较大。本文中TDLAS测量光束直径较大,很可能受到非平衡气流影响,导致温度和浓度测量不准确。

(4) 测温误差

本文使用Voigt线型拟合,推导Gauss半宽进而计算温度。这种方法受到信噪比的影响较大,如图4所示,本文试验状况下,原始信号的信噪比约为8。此时半宽拟合误差约为5%,温度测量误差约10%。在7500K温度下,温度误差约为750K。根据玻尔兹曼分布计算的浓度误差约为300%。因此,浓度测量误差的主要来源应是温度误差。

5 结论

针对大功率、大尺度电弧风洞气流参数难以定量测量的难题,搭建一套基于O原子吸收谱线的TDLAS系统并将其成功应用于电弧风洞中气流参数诊断。利用O原子谱线777.19nm的谱线半宽获得气流平动温度,利用积分吸收率获得低能级O原子($^5s^0$)数密度,结合温度结果计算总的O原子数密度。在总焓22MJ/kg和18MJ/kg 2个典型工况下,测量水冷紫铜模型脱体激波后的温度和O原子数密度。与计算结果对比,温度相差分别为6.2%和3.2%,氧原子数密度的测量值是计算值的0.36和1.61倍。结果验证了TDLAS在电弧风洞中的气流参数动态诊断能力,为下一步的电弧混合室气流参数测量奠定基础。

参考文献:

[1] Cipullo A, Filippis F D, Zeni L. Temperature measurements of air

- plasma flow using optical emission spectroscopy[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2011, 25(3): 354-360.
- [2] Filippis F D, Purpura C, Viviani A, et al. Chemical species and nonequilibrium temperatures for airflows in a plasma wind tunnel[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2012, 24(2): 271-280.
- [3] Takayanagi H, Matsui M, Komurasaki K, et al. Arc wind-tunnel flow diagnostics by cavity-enhanced absorption spectroscopy[J]. AIAA Journal, 2009, 47(5): 1195-1198.
- [4] 岳斌. 非平衡电弧等离子体光谱学诊断方法的研究[D]. 绵阳: 中国空气动力研究与发展中心, 2003.
Yue Bin. Investigation of spectroscopy diagnostic methods for the non-equilibrium arc plasma[D]. Mianyang: China Aerodynamics Research and Development Center, 2003.
- [5] 赵文华, 沈岩, 陈黎明. 电弧加热发动机尾流的光谱诊断[J]. 光谱学与光谱分析, 2004, 24(8): 897-901.
Zhao Wenhua, Shen Yan, Chen Liming. Spectrum diagnostic of arcjet[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2004, 24(8): 897-901.
- [6] Hanson R K. Applications of quantitative laser sensors to kinetics, propulsion and practical energy systems[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011(33): 1-40.
- [7] 李飞, 余西龙, 陈立红, 等. TDLAS 测量甲烷/空气预混平面火焰温度和 H_2O 浓度[J]. 实验流体力学, 2009, 23(2): 40-44.
Li Fei, Yu Xilong, Chen Lihong, et al. Temperature and water vapour concentration measurements of CH_4 /air premixed flat flame based on TDLAS[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2009, 23(2): 40-44.
- [8] Kim S, Jeffries J B, Hanson R K. Measurements of gas temperature in the arc-heater of a large scale arcjet facility using tunable diode laser absorption[R]. AIAA-2005-900.
- [9] Takayanagi H, Matsui M, Komurasaki K, et al. Development of high sensitive laser absorption spectroscopy for arc-heater flow diagnostics[R]. AIAA-2006-3447.
- [10] Li F, Yu X L, Gu H B, et al. Simultaneous measurements of multiple flow parameters for scramjet characterization using tunable diode-laser sensors[J]. Applied Optics, 2011, 50(36): 6697-6707.
- [11] 余西龙, 李飞, 陈立红, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱诊断燃烧参数[J]. 空气动力学学报, 2009, 27(z1): 95-100.
Yu Xilong, Li Fei, Chen Lihong, et al. Combustion diagnostics by using tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2009, 27(z1): 95-100.
- [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, 2013, 100: 401-409.
- [13] Matsui M, Komurasaki K, Arokawa Y. Sensitivity enhancement of laser absorption spectroscopy for atomic oxygen measurement in microwave air plasma[J]. Vacuum, 2009, 83: 21-24.
- [14] Chao X, Jeffries J B, Hanson R K. Absorption sensor for CO in combustion gases using $2.3\mu m$ tunable diode lasers[J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20: 115201.
- [15] Riek G B. Wavelength-modulation spectroscopy for measurements of gas temperature and concentration in harsh environments[D]. Stanford: Stanford University, 2009.
- [16] 潘锦珊, 单鹏. 气体动力学基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1995.
Pan Jinshan, Shan Peng. Fundamentals of gasdynamics[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 1995.

作者简介:



欧东斌(1979-),男,四川阆中人,高级工程师。研究方向:气动热试验研究。通信地址:北京市7201信箱15分箱(100074)。E-mail:oudongbin@sina.com

(编辑:张巧芸)