

自由射流台喷管出口参数的吸收光谱诊断

李飞, 余西龙, 李东霞, 陈立红, 张新宇

中国科学院力学研究所, 高温气体动力学国家重点实验室(筹), 北京海淀区 100190

摘要: 超燃自由射流台是极重要的地面模拟试验平台, 它提供模型飞行器的来流气流条件。气流参数的稳定性和空间分布特征反映了试验平台的性能优劣。特别在变马赫数运行时, 急需对实际气流参数进行监测。然而由于缺少静温和组分浓度信息(无法确定气流比热比), 常规的壁面静压和总压靶测量因此无法给出完整的气流参数信息。为解决这一难题, 将可调谐二极管吸收光谱(TDLAS)系统首次用于超燃自由射流风洞诊断。根据喷管出口气流参数特征, 选择适于低温测量的一对相邻吸收谱线(7182.2 cm^{-1} 和 7182.9 cm^{-1}), 并结合光纤光路和位移机构实现对喷管出口气流静温测量。测量结果与 CFD 计算结果进行对比分析, 讨论了沿光程的不均匀性对于测量结果的影响。该实验的成功开展, 验证了 TDLAS 系统在该类型复杂地面模拟试验平台中的应用能力, 为即将开展的自由射流台-多光路多参数诊断奠定基础。

关键词 自由射流台, 可调谐二极管吸收光谱技术(TDLAS), 温度测量

1. 引言

在超燃研究中, 自由射流台是最为重要的地面模拟试验平台, 它能够提供模型飞行器的来流气流条件。试验中, 气流参数的稳定性和空间分布特征反映了试验平台的性能优劣。特别是在未来的变马赫数运行条件下, 需要对实际气流参数进行实时监测。由于缺少静温和组分浓度信息(无法确定气流比热比), 常用的壁面静压和总压靶测量因此无法给出完整的气流参数信息。因此, 有必要发展其他测量技术, 以满足超燃自由射流台日常实验监测的需要。

可调谐二极管吸收光谱诊断技术(TDLAS)具有极强的环境适用性和测温灵敏度, 并已经被证实适用于超燃直连式试验台^[1,2]。它能够同时测量气流静温、组分浓度和气流速度^[3-6], 因此成为自由射流台试验的首选光谱测量手段。虽然 TDLAS 的测量原理已经较为成熟, 然而其在超燃自由射流台中的应用还未见报道, 这主要是因为自由射流台实验条件恶劣, 需克服光纤接入/引出、振动, 开放气流引起的光线偏折等难题, 此外自由射流台的低温低压环境也需要选择更为精细的系统设计和方法优化。

除喷管出口的潜在应用之外, TDLAS 还可以在模型发动机整机效率方法发挥用武之地, 它可同时测量进气道进口和尾喷管出口气流参数, 评估推力。正因为 TDLAS 在自由射流台中的广阔应用前景和不可替代的重要性, 本文尝试将光纤型-TDLAS 系统引入超燃自由射流台应用, 首先用于喷管出口气流静温诊断。该工作在诊断喷管参数的同时, 可为未来的气流速度、马赫数诊断, 以及模型发动机测量打下坚实的基础。

2. 测量系统简介

图 1 为用于超燃自由射流台喷管出口气流静温的 TDLAS 系统示意图。自由射流台为力学所高温气动室超燃推进设备, 其具体构成和设计特点可参阅相关文献^[7], 本文不再论述。本文试验对应的喷管设计马赫数 5.5, 设计加热器总温 1550 K, 总压 34 atm。如图 1 所示, TDLAS 系统可分为发光端、舱内光路、接收端和数据处理四部分。发光端为单光束-单激光器设计, 它包含有一个信号发生器, 一个激光控制器和一个分布反馈式(DFB)二极管激光器。舱内光路包括: 单模光纤接入实验舱(低压, 试验中气压小于 1 kPa)、激光准直器、激光收集器和多模光

纤。其中准直器和收集器放置于一个位移机构上，在实验稳定时间内，该位移机构带动测量光线扫过半个喷管出口高度。于是该 TDLAS 的测量结果为气流的高度方向线的积分温度分布。TDLAS 的接收端包括多模光纤的出舱法兰

盘，准直透镜和一个 InGaAs 探测器，输出的电压信号由数字示波器记录。采集到的电压数据由离线微机进行处理，数据处理程序为自行编写，且已通过早期的超燃直连台实验验证。

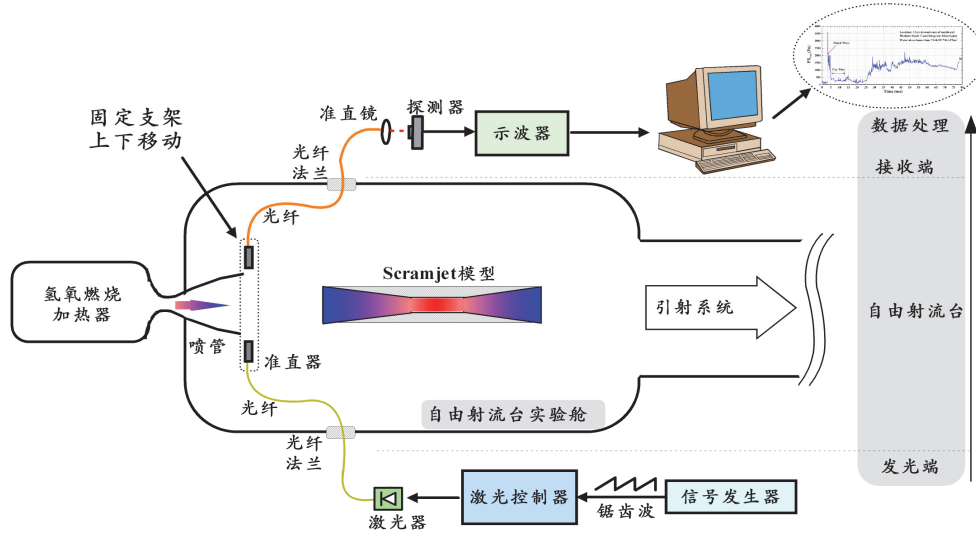


图 1. 用于超燃自由射流台喷管出口静温测量的 TDLAS 系统示意图

在测量系统设计之初，考虑到试验气流静压约为数 kPa，且气流静温 200-300 K 之间，此时吸收线型的 Lorentz 线型不能忽略，因此难以使用线型半宽来计算静温^[8,9]。于是通过谱线筛

选，本文选择了两条相邻的 H₂O 吸收谱线，其光谱参数见表 1，谱线参数取自光谱数据库 Hitran2008。

表 1. 本文所用的吸收双线和其光谱参数

Transition	Frequency ν_0 (cm ⁻¹)	Line strength S (atm ⁻¹ cm ²)	Low-state energy E'' (cm ⁻¹)
1	7182.209	3.82×10^{-2}	42.3717
2	7182.950	9.30×10^{-2}	142.2785

由表 1 可知，本文所用的吸收光线对 (7182.209+7182.950 cm⁻¹) 均为低温吸收线，低能级能量较低，但适于本文的喷管出口低温测量。双线的低能级能量相差仅 100 cm⁻¹，因此该双线系统仅在较小的温度范围内有很高的测温灵敏度^[10]。由于本文为喷管出口静温测量，核心流的温度变化范围较小，因此该双线仍能满足要求。此外双线中 7182.950cm⁻¹ 线的吸收线强较大，约为 7182.209 线的 2.5 倍，这会导致双线的测量信噪比相差较大。不过实际测量中双线的信噪比都较高，且该双线能够满足单激光器测量，有利于简化系统。概况而言，本网用的该双线选择并非自由射流台喷管出口测量的最

佳谱线选择，在下一步的实验设计和 Scramjet 模型测量中，应该进一步优化谱线选择和系统设计。

3. 测量结果与分析

3.1 喷管出口气流的 CFD 计算结果

图 2 为本试验工况下的喷管出口气流静温分布(CFD 结果)。其对应的喷管马赫数 5.5，出口尺寸 180 mm*180 mm。由图 2 可见，核心流的气流静温约为 260 K，核心流的范围约为 140 mm* 140mm。静压和速度分布的 CFD 结果显示，核心流气流静压约为 3.8 kPa，速度约为 1665

m/s。试验中，TDLAS 光线平行于 z 轴方向，位移机构移动方向沿 y 方向。

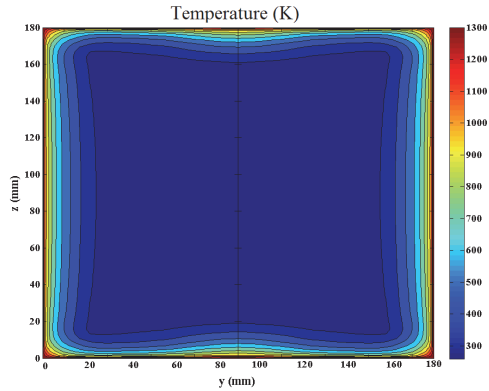


图 2. 喷管出口静温分布的 CFD 计算结果

3.2 TDLAS 原始数据和数据处理简介

TDLAS 测量结果原始数据见图 3 所示，斜坡对应着随着激光电流增加，激光器的波长和光强随之增加。两个“凹坑”对应着两吸收线的吸收精细线型，其中 0.55 ms 处的对应 7182.950 cm^{-1} 线；0.76 ms 处对应于 7182.209 cm^{-1} 。数据首先利用 F-P 干涉仪将横坐标从时间转换为频率，再对数据进行基线拟合，Voigt 线型拟合后能够得到吸收谱线的精细结构和积分吸收率，该数值被认为是一个测量周期(1ms)内的平均值，同一个周期内的两谱线的积分吸收比能定出静温 T 。由于连续采集了 2 前个周期，得到的结果为温度 T 随时间的变化图，而又因位移机构的应用，静温的时间变化图也即为静温的高度方向的变化图(喷管出口气流为准静态)，详细的数据处理和谱线标定参见文献^[10]。

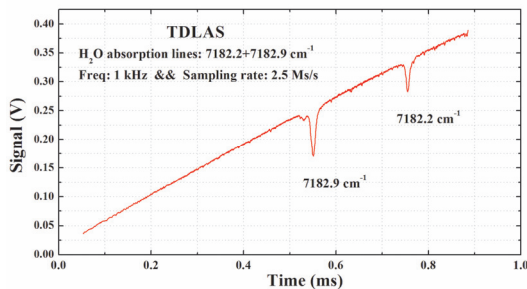


图 3. TDLAS 原始数据图

3.3 TDLAS 温度测量结果及分析

TDLAS 实际测量范围为半个喷管高度 ($y=0-90$ mm)。为分析 TDLAS 测量结果，以图 2 为假想温度分布，计算了两吸收谱线沿着 y 方向的不同积分吸收率，并与测量结果对比，如

图 4 所示。如图所示，测量结果的积分吸收率的高度变化与 CFD 模拟结果趋势相同，核心气流实验和模拟结果非常接近。这说明试验中气流参数的空间分布特征与 CFD 结果较为接近，核心流气流参数应相同。但边界层附近，特别是靠近上壁面的范围(0-15mm)内，双线的积分吸收率均高于 CFD 模拟结果，这说明实际气流静压高于 CFD 结果或气流静温低于 CFD 结果。

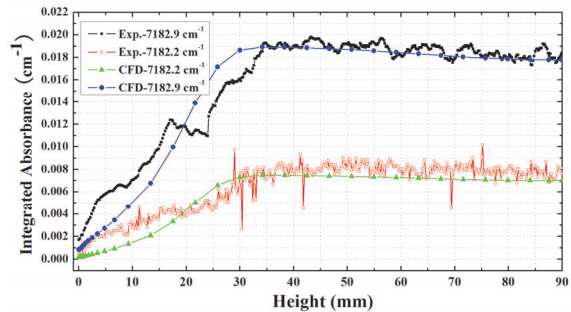


图 4. 双线积分吸收率与 CFD 模拟结果的对比图

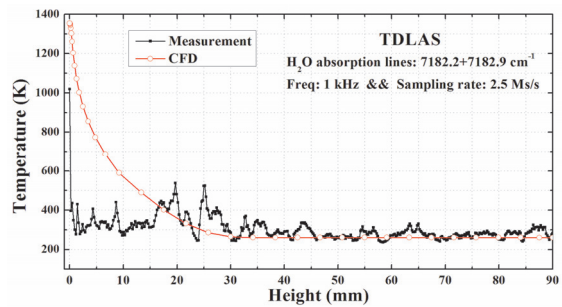


图 5. TDLAS 静温测量结果与 CFD 结果的对比图

TDLAS 测温结果见图 5 所示，类似于积分吸收率，核心流的气流静温的测量结果与 CFD 模拟结果非常接近，说明实际运行状态下核心流的气流参数与模拟结果较为接近。而在边界层内(0-30mm)，TDLAS 测量静温不同于 CFD 结果，在近壁面附近(0-15mm)范围内，气流静温低于测量结果，其可能原因是：

(1) 所选双线均为低温吸收线，近壁边界层的气流静温较高，因此谱线的积分吸收率较小，信噪比低于核心流测量，测量误差相对较大。

(2) 实际气流的边界层内，沿光程(z 方向)的气流分布不同于 CFD 结果，有冷区区域，该 TDLAS 双线对低温吸收远强于高温，因此测量结果温度偏低。

(3) 实际近壁面边界层由于壁面热传导的影响, 气流静温远低于理想边界层(CFD 结果), 因此测量结果低于预想值。

在远离壁面的边界层内(15-30 mm), 气流静温波动较大, 且有很大范围高于 CFD 结果, 这说明在该范围内, 气流静温/静压的均匀性很差, 有可能有压缩波存在, 气流静温的截面分布远复杂于图 2 的 CFD 结果。

4. 总结与讨论

首次利用 TDLAS 技术开展超燃自由射流台应用。测量了喷管出口静温分布的 TDLAS 测量, 结果表明, 核心流气流参数与 CFD 模拟结果相近, 但边界层区域内, 两者相差较大。该光谱测量技术的成功应用, 证明了其在自由射流台内的强适用性, 为下一步多参数测量和整机模型参数诊断打下坚实的基础。

下一步的工作中, 计划利用 TDLAS 同时测量喷管出口的气流速度和静温, 获得的气流 Ma 数可以与总压耙测量结果相互印证。由于 TDLAS 为沿光程的积分测量, 有必要开展沿光程的空间分辨测量和并排除舱内背压气体吸收的干扰。在谱线选择方面应辅以高温吸收线以精确测定边界层内气流参数, 在系统设计方面应进一步提高弱吸收测量的信噪比。

参考文献

- 1 Liu J. T. C., Rieker G. B., Jeffries J. B., Gruber M. R., Carter C. D., Mathur T., and Hanson R. K., Near-infrared diode laser absorption diagnostic for temperature and water vapor in a scramjet combustor, *Appl. Opt.* 44, 6701-6711 (2005).
- 2 Li F., Yu X.L., Chen L.H., et al. Simultaneous measurements of multiple flow parameters for scramjet characterization using tunable diode-laser sensors. *Applied optics.* 2011, Vol. 50.
- 3 Hanson R. K., Applications of quantitative laser sensors to kinetics, propulsion and practical energy systems. *P. Combust. Inst.* 33, 1-40 (2011).
- 4 Philippe L.C. and Hanson R.K. Laser-diode wavelength-modulation spectroscopy for simultaneous measurement of temperature, pressure, and velocity in shock-heated oxygen flows. *Applied optics.* 1993, Vol. 32(30) 6090-6103.
- 5 Klingbeil A.E., Jeffries J.B., Davidson D.F., et al. Two-wavelength mid-IR diagnostic for temperature and n-dodecane concentration in an aerosol shock tube. *Appl Phys B*, 2008, 93: 627-638
- 6 Hanson R.K., Jeffries J.B., Heltsley W.N., et al. Diode Laser Absorption Measurements of Supersonic Flow in an Expansion Tube. AIAA paper 2006-0761.
- 7 Gu H., Chen L., and Chang X., Experimental investigation on the cavity-based scramjet model, *Chin. Sci. Bull.* 54, 2794-2799 (2009).
- 8 Yu X.L., Li F., et al. A compact sensor based on near infrared absorption spectroscopy for flow diagnostics in a low density hydrogen and oxygen combustion driven shock tube. *Lasers in Eng.* Vol.23, pp.1-17, 2012.
- 9 林鑫, 余西龙, 李飞等. 利用 TDLAS 诊断激波风洞自由流的实验研究. 第十五届全国激波管会议, 浙江杭州, 2012.07.
- 10 李飞. 近红外吸收光谱技术在超燃研究中的应用. 博士论文, 北京: 中科院力学所, 2009, 1-141.

STATIC TEMPERATURE MEASUREMENT USING TDLAS IN A FREE-JET SCRAMJET FACILITY

LI Fei, YU Xilong, LI Dongxia, CHEN Lihong, CHANG Xinyu

State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, C A S, No.15 Beisihuanxi Road, Beijing 100190, China

Abstract: Free-jet Scramjet facility is critical for supersonic combustion research. It can provide simulated flow condition for Scramjet model engine. The stability and the uniformity of the flow indicate the ability of the facility. Therefore, it is necessary to diagnose the flow parameter especially at operating of different Mach number. Tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) was first utilized in this kind of facility for static temperature distribution at nozzle exit. Two low-temperature sensitive H_2O absorption lines 7182.2 cm^{-1} and 7182.9 cm^{-1} were used combining with fibers and a motorized precision translation stage for system design. Measurement results were compared with CFD results, and non-uniformity along light path was analyzed. The successful application of TDLAS to free-jet facility demonstrated the potential of this spectroscopy technique.

Key words: free-jet Scramjet facility, tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS), temperature measurements