文章编号:

利用 TDLAS 诊断激波风洞自由流的实验研究

林鑫^{1,2},余西龙¹,李飞¹,陈宏¹,张新宇¹

(1. 中国科学院力学研究所,北京 100190; 2. 北京理工大学,北京, 100081)

第 要:利用一套基于直接吸收-扫描波长法的可调谐二极管激光器吸收光谱系统(TDLAS),对中科院力学所国家重点实验室双爆轰激波风洞运行的实验状态进行诊断。利用 HITRAN2008 光谱数据库,选取 1343nm 和 1470nm 附近两组 H₂O 吸收线。首先利用 1470nm 附近一对吸收线:6804.40cm⁻¹ 和 6804.34cm⁻¹,分别为低温、高温吸收线,结合风洞相关设计参数,初步判断气流温度和压力信息,并通过多峰拟合方法,对试验舱外空气中水 蒸 气 及 试验 舱 内 残 余 水 蒸 气 的 影响进行 评估。根据以上实验结果,采用 H₂O 的 1343nm (7444.35cm⁻¹+7444.37cm⁻¹)高温吸收线对气流参数进行诊断,根据吸收线型的多普勒宽展,得到 M6 喷管出口 15cm 处气流静温和水蒸气分压。

关键词: 激波风洞; 可调谐二极管吸收光谱技术 (TDLAS); 温度测量; 浓度测量

0 引 言

激波风洞是用来模拟和研究高温气体流动的 主要研究设备,对高超声速流动的研究有着不可 替代的作用。在以爆轰或者燃烧驱动的激波风洞 中,喷管出口气体温度和组分浓度作为实验中的 重要参数急需有效测量。传统的热电偶和采样电 针等接触式测量手段由于响应慢,并会干扰流场, 在日常的风洞监测中具有一定的局限性,因此这 种大型风洞进行模拟实验需要非接触光学测量手 段用于诊断流动和化学反应特征参数。相对于其 他光谱诊断技术而言,可调谐半导体激光器吸收光 谱(TDLAS)技术作为一种高灵敏度、高频率响 应的线平均测量手段,非常适合于上述风洞设备。 国外在这一领域已经进行了广泛的研究,从1977 年斯坦福大学的 Hanson 首次使用半导体激光器 测量燃烧气体开始^[1],以可调谐二极管激光器吸收 光谱诊断 高焓流动,距今已经有二十多年的历 史。近十几年来随着半导体激光器的发展和光纤 耦合技术的进步,基 于近红外波段半导体激光器 的吸收光谱技术得到飞速发展,TDLAS 已经被成 功的应用于激波管内温度、浓 度、速度、流量和 压力的测量^[2-4]。国内在吸收光谱的高温诊断方面 虽然起步较晚,但到目前位置也已经有 了长足的 进步^[5-7]。

在以氢气或碳氢化学物为驱动气体的激波风 洞实验中,H₂O 是重要的燃烧产物。故本文的二 极管激光 吸收光谱(TDLAS)测量系统就是以H₂O 作为目标组分,用于诊断力学所爆轰燃气激波风洞 运行状态、有 效运行时间等参数,结合实验数据 分析其实际测量能力和潜在的应用前景。实验主 要分为两个部分:首先 为了更加精确的对风洞自 由流参数进行测量,结合风洞相关设计参数(喷管 前P5 温度4000K,总压5atm**首**先选用1470nm 附近

374

的一对吸收线: 6804.40cm⁻¹ 和 6804.34cm⁻¹,分别 为低温、高温吸收线,结合激波到 达测量位置前 后数据,对空气中及试验舱中水蒸气的影响进行详 细分析,并对基于以上吸收线 TDLAS 系 统进 行评估。第二部分:根据1470nm 附近吸收线测量 结果结合HITRAN2008 光谱数据库,选取吸收线 强度更高的1343nm(7444.35cm⁻¹+7444.37cm⁻¹)高 温吸收线进行诊断,通过分析吸收线线型的多普勒 线宽, 得到M6 喷管出口自由流气流静温,进而 得到气流中水蒸气分压。

1 **原理简介**

与传统吸收光谱技术不同,TDLAS 采用激 光二极管光源,其线宽远小于传统光源线宽和气 体吸收谱线 的展宽。应用较广的分布反馈式 (DFB)半导体激光器的线宽一般小于10MHz, 远小于被测气体单吸收谱 线宽度,其频率调制扫 描范围也仅包含被测气体单吸收谱线,这样可以 避免气体交叉干扰。

在吸收测量中,激光辐射强度和透射强度被精 心测定。气体吸收量依赖于能吸收这特定波长的粒 子数 目(低能态粒子数)。而处于低能态的粒子数 是由气体静温和浓度决定的。当一束频率为 v 的激 光通过流场,其出射光强 I 和入射光强 I₀ 满足 Beer-Lambert 关系式:

$$(I / I_0)_v = \exp(-K_v \times L)$$
 (1)

其中, K_v为吸收系数, L 为吸收长度。其中吸 收系数 K_v是静压 P, 水蒸气组分浓度 X_{H2O}, 吸收 谱线线强度 S(T), 线型函数 Φ(v)的函数: K_v=PX_{H20} S(T) Φ(v) (2)

其中线型函数满足归一化条件, ∫ø(v)dv ≡ 1。 事实上, 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。在我们的实验条件下,由于 多普勒效应引起的多普勒展宽为几个 GHz,比其他 机制引起的 谱线展宽高 2 个量级以上,因此这里 我们仅考虑多普勒展宽,其谱线线型为高斯(Gauss) 线型,其线型函数表达式为:

$$\phi_D = \frac{2}{\Delta \nu_D} \left(\frac{\ln 2}{\pi} \right)^{1/2} \exp \left(-4 \ln 2 \left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta \nu_D} \right)^2 \right) \quad (3)$$

式中 ν_0 为谱线中心频率, $\Delta \nu_D$ 为多普勒展宽的半宽,根据气体分子热运动可推到出其计算公式如下:

$$\Delta v_D = 2 \times \frac{v_0}{c} \left(\frac{2KT \ln 2}{m}\right)^{1/2} = 7.1623 \times 10^{-7} v_0 \sqrt{\frac{T}{M}}$$
(4)

式中, c 为光速, m 为分子质量, k 为波尔兹 曼常量, M 为分子摩尔质量, T 为温度。对于选定 的分子 而言, 多普勒展宽仅仅与气体的温度有关, 温度越高, 谱线展宽越大, 因此只要能够准确测定 多普勒线型 的半宽即可由公式(4)得到气体的温 度, 进而由公式(2)可以获得水蒸气的分压。

2 谱线选择

吸收系统的建立中,谱线的选择是至关重要 的。根据爆轰风洞实验相关参数,本文选择了 6804.34 cm⁻¹、6804.40cm⁻¹、7444.35cm⁻¹和 7444.37cm⁻¹四条吸收线并对吸收率进行计算, 所用光谱参数都是取自光谱数据库 HITRAN2004。6804.40cm⁻¹和6804.34cm⁻¹两条 吸收线分别为低温、高温吸收线,用来初步诊断 风洞参数,主要用来评估空气中和试验舱中水蒸 气的干扰,从而对基于这两条吸收线的TDLAS 系统进行评估并进行改进;7444.35cm⁻¹和 7444.37cm⁻¹ 两条高温吸收谱线近似重合,且他 们的低能级能量十分接近,因此将它们的叠加作 为一条吸收谱线应用。



图 2 6804.34 cm⁻¹ + 6804.40 cm⁻¹ 水蒸气双线在试验舱中的吸收率 (计 算条件: T = 296 K, P = 100Pa, L = 200 cm, XH20 = 40%) Fig. 2 Calculated spectra of H20 absorption near 6804.4 cm⁻¹ in the vacuum chamber: T = 296 K, P = 100 Pa, L = 200 cm, X_{H20} = 40%

图 1 为 6804.40cm⁻¹ 和 6804.34cm⁻¹ 两条 吸收线在假定实验条件下的吸收率;图 2 为这 两条吸收线在试验舱处于真空状态下的吸收率, 所用光谱参数都是取自光谱数据库 HITRAN2008。由图 1 可见 6804.34cm⁻¹这条高温 吸收线在假定实验条件下吸收率小于 1%, 而波 长扫描-直接吸收的方法探测极限就约为 1%, 因 此6804.34cm⁻¹ 这条高温吸收线可能不能胜任喷 管出口气流的精细测量。6804.40cm⁻¹ 吸收线是 一条低温吸收线,在室温下即使压力很低,试验 舱处于真空状态(压力为 100Pa),见图 2,依 然有很强吸收;而 6804.34cm⁻¹ 高温吸收线在舱 内吸收极弱,峰值吸收率不到 0.15%,因此实验 中我们首先利用这两条吸收线进行初步探测,并 根据实验结果优化实验系统及重新选择谱线。





条件: T = 1000 K, P = 700 Pa, L = 60 cm, XH20 = 35%) Fig. 3 Calculated spectra of H20 high temperature absorption line 7444 cm⁻¹ under assumed experimental conditions: T = 1000 K, P = 700 Pa, L = 60 cm, X_{H20} =35%



296 K, P = 100 Pa, L = 200 cm, XH20 = 40%)

Fig. 4 Calculated spectra of H_2O high temperature absorption line 7444 cm⁻¹ in the vacuum chamber: T = 296

K, P = 100 Pa, L = 200 cm, $X_{H20} = 40\%$

图 3 和图 4 为 7444cm⁻¹ 高温吸收线在假定 实验条件下和试验舱处于真空状态下的吸收率计 算,由图 3 可见,7444cm⁻¹ 高温吸收线在假定实 验条件下峰值吸收率比 6804.34cm⁻¹ 高温吸收线 至少高 6 倍,显著的提高了信噪比,除此之外, 7444cm⁻¹ 谱线在室温下的吸收极弱,因此该线不易 受到试验舱内水蒸气的干扰,除此之外,空气中水 蒸气对该线的影响也不是很大但不能忽略,在光路 布置和试验中要予以重视。

3 实验设备

该实验是在中科院力学所双爆轰燃气激波风洞 上进行[8],其中实验气体为空气,驱动气体是乙炔 和氧 气,使用火花塞+点火管装置点火,本文所有 的爆轰风洞实验条件均为: P5 总压 5atm, 温度 4000K。图 5 为此 TDLAS 测量系统示意图, 其主 要由激光器、激光控制器、信号发生器、探测器、 光纤和示波器等组成。激激光器在实验前已经被 F-P 腔和光谱仪精确标定,确定输出频率的激光所 需的控制器温度和电流, 在实验中固定这两个参 数,通过信号发生器输出锯齿波(500Hz)调制控 制器输出电流来改变激光器波长,并使其扫过整个 吸收线线型。将激光器输出激光导入一根单模光纤 中,此光纤输出端为准直器,输出光束有效直径小 于 1mm,将光线调节穿过试验舱两侧的石英窗口, 并用一个反射镜将光线反射一次用于提高吸 收率, 为使加倍长度不会改变原来的测量区间,反射镜入 射和反射光的夹角应该尽可能小,本实验中约为1°。 最终输出光束由一个透镜聚焦收集后分别由探测器

探测、示波器记录。





4 实验结果及分析

本节给出部分典型的实验结果作为延时,并简 要分析该测量系统的测量能力及潜在的应用。图 6 为实 验中激波到达测量位置前和有效实验时间内 的 6804.40cm⁻¹ 和 6804.34cm⁻¹ 水蒸气双线吸收, 这里涉及到空 气中水蒸气的吸收、舱内真空状态下 残余水蒸气的吸收以及有效实验时间内来流中水蒸 气的吸收,因此需 要同时考虑以上三种不同条件下 的水的吸收,在这里我们对数据进行多峰拟合。由 图 6(a)可以看出,室 温下空气下 6804.40cm⁻¹ 低 温吸收线的吸收率约为 4.3%, 而此时光路暴露在 室温空气中的长度约为 60cm, 这个吸收率与室温 292K,相对湿度 40%吻合的很好。在激波到来之 前,通过分析 6804.40cm⁻¹ 舱内吸收率 及半宽, 可以得到在抽真空状态下,舱内气体的静温约为 290K,根据压力传感器获得舱压约为 100Pa(每 次 实验略有不同),得到水蒸气含量约为 43.5%,这 个与环境温度和湿度基本一致,也说明了多峰拟合 数据 非常准确。





Fig. 6 Single-scan absorption data taken at 500 Hz at the experiment: (a) absorbance before the arriving of the shock wave, (b) absorbance during the experimental time

通过多峰拟合分析在实验有效时间内的吸收信 号,见图 6(b),可知室温下空气下 6804.40cm⁻¹ 低 温吸 收线的吸收率约为 4.3%,这与激波到来之前 测得结果一致。在实验的有效时间内,6804.40cm⁻¹ 吸收线的峰 值吸收率约为 11%,6804.34cm⁻¹ 高温 吸收线的吸收率约为 1.3%,结合前面图 2 可知, 有效时间内 6804.40cm⁻¹ 吸收线的吸收主要是由 于舱内气体中 H₂O 的吸收引起的,并不是 P5 膨 胀过来的实验气流;而 6804.34cm⁻¹ 的吸收主要是 实验气流中高温 H₂O 的吸收。因此,通过直接吸 收可以判断实验气流中 H₂O 的吸收是 6804.34cm⁻¹ 高温吸收线,它在有效时间内的吸收率约为 1%, 但此时信噪比比较低,带来的实验误差比较大,那 接下来的工作就是利用具有更高吸收强度 H₂O 的 7444cm⁻¹ 高温吸收线进行诊断,结果见图 (7),其 中图 7 (a)为通过吸收线的 Gauss 半宽获得的随 时间变化的静温,图 7 (b)为由积分吸收率和静温 得到的 水蒸气的分压。由图 7 可知,0 时刻为触 发信号,TDLAS 系统开始检测,3ms 后 P5 破膜 激波到达测量位 置,接着舱内背压被激波压缩,温 度和压力有阶跃性的升高,随后 P5 的气流到达测 量位置,并逐渐进入到 稳定的运行时间,图中为 6-13ms 处,再后来膨胀波和驱动气体到达,舱内的

静压大增。因此,在有效时间 内的测量位置平均静 温越为 1000K,舱内水蒸气分压为 250Pa,按照计 算所得 P5 中水蒸气分压 35%计算, 气流的静压 约为 715Pa。





5 结 论

本文详细介绍了对力学所爆轰燃气激波风洞进 行诊断的一套基于直接吸收-波长扫描的 TDLAS 测量系 统。它可以同时定量测量喷管出口气流静温 和水蒸气分压随时间的变化,结合其结构相对简单, 造价低廉等优点,可以方便的用来诊断风洞日常运 行状态、有效运行时间等参数。该实验为也下一步 针对该风洞不 同运行状态改进 TDLAS 测量系统 奠定了基础。

参考文献:

- Hanson R K, Kuntz P A and Kruger C H. High-resolution spectroscopy of combustion gases using a tunable IR diode laser. Applied optics. 1977, Vol. 16.
- [2] Mattison D W, BROphy C M and Sanders S T. Pulse detonation engine characterization and control using tunable diode-laser sensors. Journal of propulsion and power. 2003, Vol. 19.
- [3] 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.
- [4] Oehlschlaeger M A, Dacidson D F, and Jeffries J B. Temperature measurement using ultraviolet laser absorption of carbon dioxide behind shock waves. Applied optics. 2005, Vol. 44.

- [5] 余西龙,李飞,张少华,陈立红,张新宇,利用可调谐二极管激 光吸收光谱诊断超声速流动,第二届高超会议,黄山,2009,11.
- [6] Fei Li, Xilong. Yu, and Xinyu. Chang Simultaneous measurements of multiple flow parameters for scramjet characterization using tunable diode-laser sensors. Applied optics. 2011, Vol. 50.
- [7] 林贞彬,郭大华,竺乃宜等 JF-10 氢氧爆轰驱动激波风洞自由流的测量和诊断.流体力学实验与测量.2000,14 (3): 12-17.
- [8] 陈宏、冯珩,俞鸿儒. 用于激波管/风洞的双爆轰驱动段. 中国科学 G 辑:物理学、力学、天文学. 2001,34 (2): 183-191.

Experimental study on the free stream in a shock tunnel using TDLAS

Lin Xin^{1,2}, Yu Xi-long¹, Li Fei¹, Chen Hong¹, Chang Xin-yu¹

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190. China: 2. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China) **Abstract:** In order to diagnose the hypersonic flow parameters and operating status of the double detonation shock tunnel in State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics. CAS. A tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLA S) system was designed and constructed using direct absorption wavelength scanned method. In this paper, two H₂O absorption features near 1343 nm (6804.40 cm⁻¹ + 6804.34 cm⁻¹) and 1470 nm (7444.35 cm⁻¹ + 7444.37 cm⁻¹ (combined)) were selected based on spectrum database HITRAN2004. First, 6804.40 cm⁻¹ and 6804.34 cm⁻¹ absorption lines were used to probe the flow parameters and assess the impact of water vapor in air and the residual water vapor of the test chamber by multi-peak fitting method. Based on the above experimental results. the 7444 cm⁻¹ high temperature lines were selected to diagnose the hypersonic flow parameters. According to the Doppler half-width, the distribution of temperature and water vapor concentration were obtained simultaneously at the 15 cm downstream of the M6 nozzle exit.

Key words: shock tunnel: tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS): temperature measurement ; concentration