



CSTAM 2009-0043

利用可调谐二极管激光吸收光谱诊断超声 速流动

余西龙, 李飞, 张少华, 陈立红, 张新宇

中国科学院高超声速科技中心

中国科学院力学研究所高温气体动力学重点实验室

第二届高超声速科技学术会议

2009年11月2-4日 安徽·黄山

利用可调谐二极管激光吸收光谱 诊断超声速流动

余西龙^{1,2}, 李飞^{1,2}, 张少华^{1,2}, 陈立红^{1,2}, 张新宇^{1,2}

(1 中国科学院高超声速科技中心 北京海淀区 100190)

(2 中国科学院力学研究所高温气体动力学重点实验室, 北京海淀区 100190)

摘要 本文利用建立的 TDLAS 测量系统, 应用于氢氧燃烧驱动 $\Phi 800$ 低密度激波管, 进行了高超声速气流诊断实验。由于激波管 $\textcircled{3}$ 区的气流速度, 温度和水蒸气组分分压等参数和超燃燃烧台尾喷管出口气体状态较为接近。因此对激波管 $\textcircled{3}$ 区水蒸气的测量模拟了对超燃台尾喷管气流的吸收诊断。

关键词 可调谐二极管激光吸收光谱, 高超声速流动, 非接触测量

1 简介

低密度激波管的运行时间, 边界层效应, 激波波面的弯曲程度, 非平衡辐射特性等参数也已经被有效诊断。上述实验都是使用经过巧妙设计的金膜热探头和电探针组合来进行的。但这些接触式测量手段, 不方便用于日常的风洞监测。这种大型风洞进行模型实验需要非接触光学测量手段诊断流动和化学反应特征参数[3-5]。这种脉冲式试验设备(有效运行时间在毫秒量级或者更低)对测量手段的时间响应要求很高, 同时这些风洞都具有很好的二维特性, 对空间分辨率要求很低, 适合于线平均测量的吸收光谱法。另一方面吸收法对光学窗口, 光路布置要求很低, 适合于这种低压风洞的密封和设备安装。

以吸收光谱诊断高焓流动, 已经有二十余年的发展历史, 而以可调谐二极管激光器为基础的测量方法也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[1-15, 17, 20, 21]。大多数的 TDLAS 都采用直接吸收法, 而扫描记录整个吸收线型限制了其频响一般低于 10kHz, 对于上述的脉冲式激波风洞和激波管, 这个频率是不够的。因此大多数的脉冲式风洞 TDLAS 测量都是基于固定波长法。固定波长法理论上可以达到实时测量, 但是很容易受到辐射、光路偏折、镜子污渍等因素的影响, 因此上述文献中的快速测量都是结合了波

长调制光谱法(1f), 而这使得频响下降到 100kHz 以下, 并且大大增加了测量系统的复杂性和费用, 不适合风洞的日常测量。对于低密度风洞, 吸收线线宽很窄, 因此高扫描频率的波长扫描法仍可以实现。

本实验使用建立的 7168.437cm^{-1} 和 7185.597cm^{-1} 线组成的分时直接吸收 TDLAS 测量系统, 单线实现 100kHz 的扫描频率。测量系统的总周期为 $22\ \mu\text{s}$, 对应约 45kHz。

2 $\Phi 800$ 低密度激波管和实验系统简介

使用氢氧燃烧或爆轰驱动的高马赫数-高温低密度激波管、激波风洞是研究高温气体反应动力学和反应速率常数测定的重要设备[19], 同时又是高温非平衡气体辐射特性的研究的方便手段。它具有操作简单, 运行经济等优点。力学所高温气动室的 $\Phi 800$ 高温低密度激波管就是其中之一, 这个设备已经建成很多年, 可以稳定运行, 性能优异, 具有很好的重复性。此激波管为不锈钢圆形直激波管, 总长 20m, 其装置图见图 1。高压段 1.6m, 内径 223mm; 低压及实验段内径 800mm; 低压段和高压段之间有一直扩张段, 铝制膜片位于低压段最后, 点火方式为电火花点火。激波管使用氢氧燃烧驱动, 驱动压力 30~80atm, 低压段的初始压力 1.33~133Pa, 可产生的激波速度范围 2.5~7km/s(Ma=8~20)。光学测量窗口距膜片有效

距离为 14m。在测量窗口前有三个电

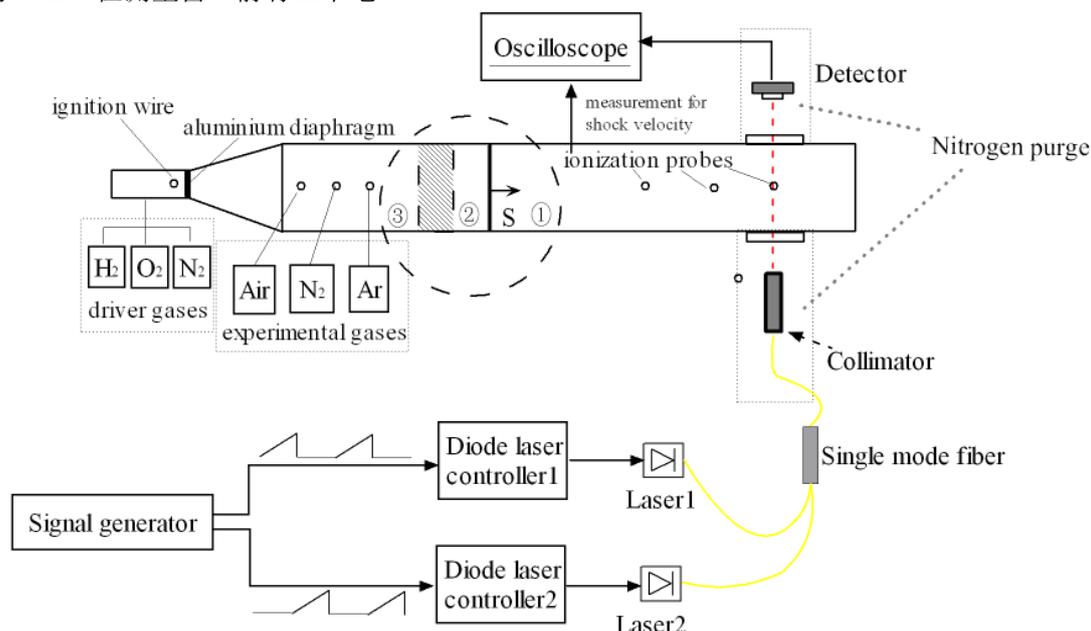


图 1. 测量系统布置图

探针，从左至右依次为电离探针 1，2，3。其中 3 号探针与光学窗口位于激波管同一横截面上。探针的作用是监测激波运行速度，同时也可以用来鉴别混合分界区与③区的交接面。

按照激波管理论，对管内流动状态进行分区：激波前区域为①区；波后被驱动气体为②区；其后是驱动气体为③区。在真实激波管中②③区之间存在一个很长的湍流混合区——分界区，图中用阴影表示。它满足速度和压力匹配。

本文实验中高压段充入不同量的 O_2 ， N_2 ， H_2 ，且燃烧前总压 0.38MPa 固定， O_2 分压为 0.04MPa。低压段气体为空气，有 $P_1=13.3Pa$ 、 $40.0Pa$ 、 $133.3Pa$ 三种工况。通过改变高压段 N_2 含量和低压段初压改变激波速度。

测量系统是将前文的双线 TDLAS 系统 [18]。实验前需经波长计仔细标定，确定输出频率的激光所需的控制器温度和电流，实验中固定这两个参数。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，输出光束直径小于 1mm。将光线调节穿过激波管的两侧石英窗口，并用感光面 $\varnothing 2mm$ 的 InGaAs 探测器(响应波段为 900-1700nm 光谱范围)采集透射光信号，使用示波器记录探测器输出信号。

3 激波管运行参数和测量策略选择

3.1 运行参数

分析激波管典型运行参数：①区为空气，压力 $P_1=0.1Torr$ ，温度 300K。高压段燃烧前 O_2 ：0.4atm， H_2 ：3.4atm，总压 3.8atm，由 Gaseq 计算(绝热定容)：上述氢氧气体燃烧后的参数： $T=2408K$ 、 $P=27.3atm$ 这与实验设计的破膜压力 30atm 很接近。此后的计算中使用参数：高压段气体的总压 27.3atm，总温 2408K。燃烧后的高压段内的气体组分浓度(完全燃烧)为： H_2 ：0.765， H_2O ：0.235，燃烧完高温气体的比热比为 1.265，摩尔质量 5.78。

破膜后的高压段膨胀气流不能使用等熵关系式计算，因为高压段到低压段有尺度很大的扩张段，气流由此扩张段加速后要进入大管中，角度变化剧烈，会有较强的斜激波和膨胀波串的组合，是一个非等熵过程。

在此运行状态下的典型参数为 $Ma=15.5$ ，由非平衡气体效应的激波管参数表可知：则②区的温度约 5250K， $P_3=P_2=0.041atm$ ， $U_3=U_2=4.86 km/s$ 。由绝热流能量方程计算高压燃烧后气体的膨胀，可计算得到 $T_3=650 K$ 。

可以看出， $P_3=0.041atm$ ， $U_3=4.86 km/s$ ， $T_3=650 K$ ， $X_{H_2O}=23.5\%$ 的气体状态参数与超燃模型发动机尾喷管出口的参数比较接近。应该

说侦测激波管③区的气流参数可以模拟尾喷管出口的参数测量。

3.2 测量策略选择

3.2.1 线型分析

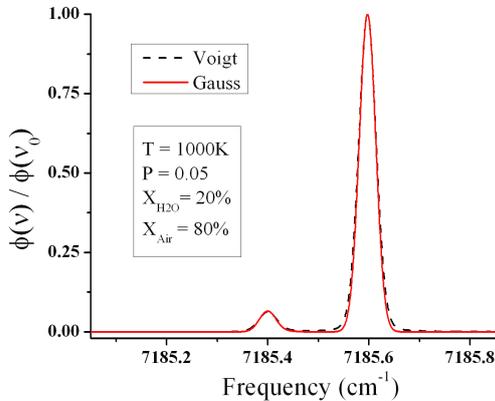
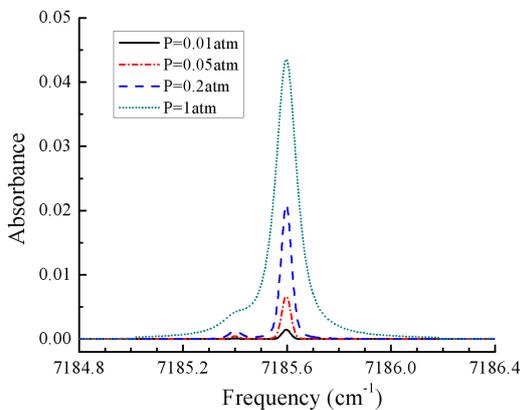


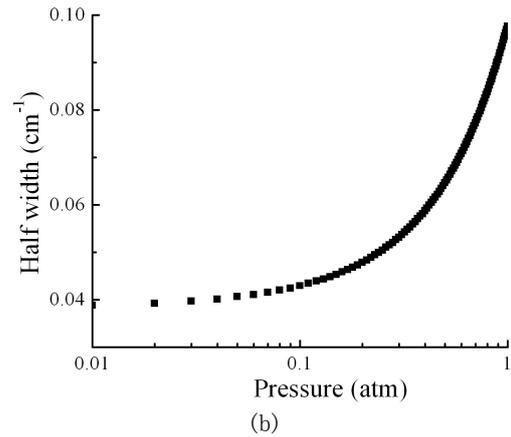
图 2. 7185.6 cm^{-1} 附近水蒸气吸收线 Voigt 线型和 Gauss 线型的模拟。计算条件 $T=1000K$, $P=0.05atm$, $X_{H_2O}=20\%$, $X_{Air}=20\%$ 。吸收线光谱参数取自 HITRAN2004^[16]。

吸收线的线型描述非常重要，它含有压力、组分浓度、温度等众多气流参数信息。线型加宽机制主要有两个部分：热运动加宽：Gauss 线型，碰撞加宽：Lorentz 线型。实际线型是它们的卷积，通常用 Voigt 线型描述。而在低压下，碰撞加宽很小，Gauss 线型占其主导地位。如图 2 所示，在低压下，Voigt 线型趋近于 Gauss 线型，在图形所绘制的条件下 ($P=0.05atm$, $X_{H_2O}=20\%$, $T=1000K$)，7185.597 cm^{-1} 线的 Gauss 线型半宽与 Voigt 线型半宽的差小于 5%。

3.2.2 波长扫描法的测量频率



(a)



(b)

图 3. (a)不同压力下的，7185.597 cm^{-1} 水蒸气吸收线的线型模拟；(b) 7185.597 cm^{-1} 线的半宽随着压力的变化趋势 ($T=1000K$, $X_{H_2O}=20\%$, $X_{Air}=80\%$)

图 3(a)是不同压力下，7185.597 cm^{-1} 线的 Voigt 线型。计算条件：20%水蒸气，其余为空气，温度 $T=1000K$ ，吸收长度 $L=80cm$ 。在压力在 0.2atm 以上的时候，吸收谱线会被边上的较弱吸收线(高温下，主要是 7185.401 cm^{-1} ，低能级能量：1474.981 cm^{-1})干扰，增加了数据处理的复杂性。

使用波长扫描法，需要激光器的快速扫描范围至少是吸收谱线半宽的 15 倍。图 3(b)为 7185.597 cm^{-1} 水吸收线的 Voigt 线型半宽随压力的变化。由图可知，在 $P=0.05atm$ 时，线型半宽大约 0.04 cm^{-1} ，即需要约 0.6 cm^{-1} 的激光扫描范围。而在 1atm 下，线半宽约 0.1 cm^{-1} ，这需要激光器快速扫描范围 1.5 cm^{-1} 以上。不同谱线对应的压力加宽系数不同，因此有些谱线可能会要求更宽的激光器快速扫描范围。

激光器的快速扫描范围可以通过 F-P 干涉仪标定得出，F-P 典型信号图见图 4-17，通过统计波长扫描过程中的 F-P 信号的峰值数目与自由光谱区的乘积即为扫描范围。图 4 为不同调制频率下的激光器快速可调谐范围。标定实验中所用激光器为 NEL 公司 DFB 蝶形封装激光器。扫描通过连续改变激光控制器的输入电流来调制激光器出光频率。所用激光控制器为 ILX Lightwave 3700B 型，扫描对应的吸收线为 7185.597 cm^{-1} 。随着调制频率的增加，快速调制的范围减小。10kHz 以下的调制频率，激光器可以实现 2 cm^{-1} 以上的快速扫描范围，这对于 1.5atm 压力下的谱线测量是可行的。而在

100kHz 频率扫描频率下, 快速扫描范围减少到 0.85cm^{-1} , 只能满足低压测量, 而当压力不断升高, 扫描波长法就无法获得整个吸收线的吸收线型, 这时只能采用固定波长或波长调制法。

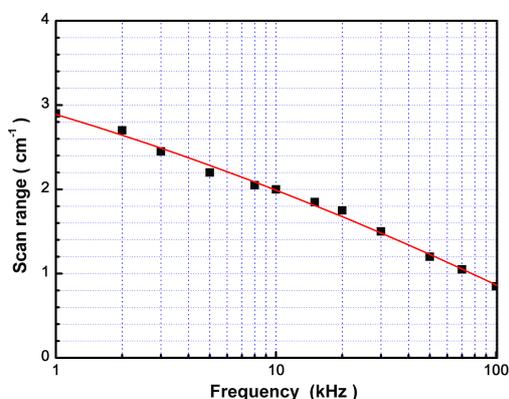


图 4. 为不同调制频率下的激光器快速可调谐范围。

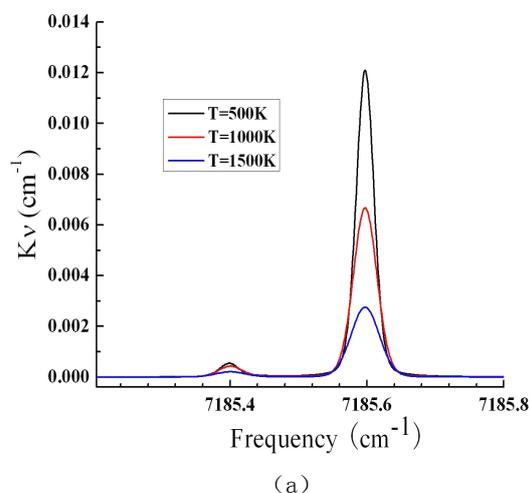
综合上述的讨论, 可以总结成这样的结论: 激光器的快速电流调制特性和待测流场的参数(压力、温度、组分及不同组分的碰撞加宽系数不同)限制了波长扫描-直接探测方法的最大扫描频率。在其他参数相同的情况下, 压力越小, 最大扫描频率越大, 而对于本文的低密度激波管(波后压力 $P_2=0.05\text{atm}$ 量级), 可实现的最大扫描频率为 100kHz。

3.2.3 吸收线对的低压线型分析

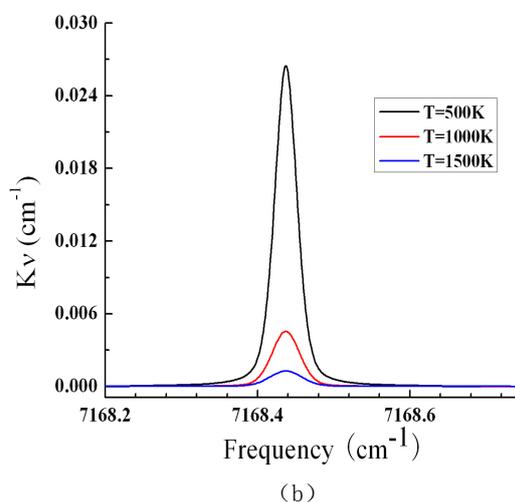
我们使用验证过的吸收谱线线对: 7168.437cm^{-1} 和 7185.597cm^{-1} , 两线的一个大气压下的吸收线线型已经有详细分析^[18], 本节分析在激波管③区气流参数下的两线线型的特点。经初步分析, 激波管中波后压力在 0.03-0.1atm 之间; 膨胀后驱动气体温度 500-1500K; 水蒸气组分浓度 20%左右; 吸收长度 80cm。

由图 5 可见, 两线都具有很好的孤立线型。不同于一个大气压下的线型状况, 低压下两线周围没有其他吸收线干扰, 7185.597cm^{-1} 线边上的弱吸收线也已经分开, 不会对吸收线有干扰, 同时激波管实验中没有 CH_4 存在, 因此 7168.437cm^{-1} 线周围不会出现任何干扰吸收线, 这种状况非常适于波长扫描吸收。在我们关心的温度范围内, 两线具有较为接近的线强度, 因此两线会有相似的信噪比(如图 4-3(b)所示)。在实验中, 由于吸收长度很长, 温度适

中, 两线吸收率在很长时间内都大于 0.5, 因此线对有很高的信噪比。这种情况下可以充分发挥波长扫描法的优势。



(a)



(b)

图 5. 不同温度下两线的吸收线型: (a) 7185.597cm^{-1} 线 (b) 7168.437cm^{-1} 线

4 实验及结果分析

典型的原始数据图如图 6 所示, 每个周期有两个锯齿波型的信号, 幅度较小的一个对应 7168.437cm^{-1} 线(L1)扫描, 幅度较大的对应为 7185.597cm^{-1} 线(L2)扫描, 两个锯齿波的中间即为上面提到的平台-无光区域。用来扫描波长的电压信号幅度是相同的, 但是不同控制器温度下, 单位电流引起的激光器功率变化值并不同。因此相同的半锯齿波振幅会产生一大一小的光强锯齿波信号。此图恰好是②区结束, 分界区到来的时刻。由图可看出, 吸收不断增强, 这说明水蒸气越来越多。

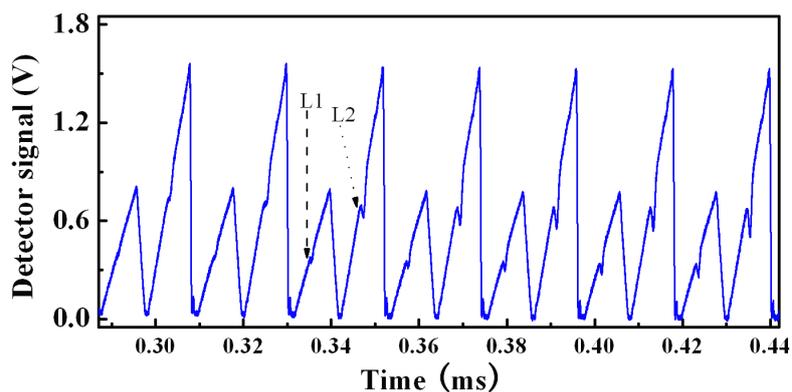


图 6. 典型的波长扫描-分时直接探测吸收原始数据图

对锯齿波光强信号中的吸收信号进行拟合, 如图 7 所示。为了简化数据处理过程, 将基线和吸收信号同时拟合, 这和其他文献中的先截断、取基线、基线拟合、差值拟合吸收的复杂过程是不同的。其中未吸收的基线均采用三次多项式, 正如前文所述, 在高温低压 ($P \ll 1 \text{atm}$) 情况下, Voigt 线型趋近于 Gauss 线型, 于是本文中的吸收信号采用 Gauss 线型拟合代替 Voigt 线型进行拟合。经分析由于忽略了 Lorentz 加宽的影响, 会引入的误差小于 3%。整个数据处理程序是用 Matlab 语言编写, 可以连续拟合每个吸收周期, 并记录每个周期吸收峰的积分吸收率, 这大大缩短了数据处理时间。为将吸收光谱测量推广成为低压激波管、风洞的日常测量手段奠定了基础。

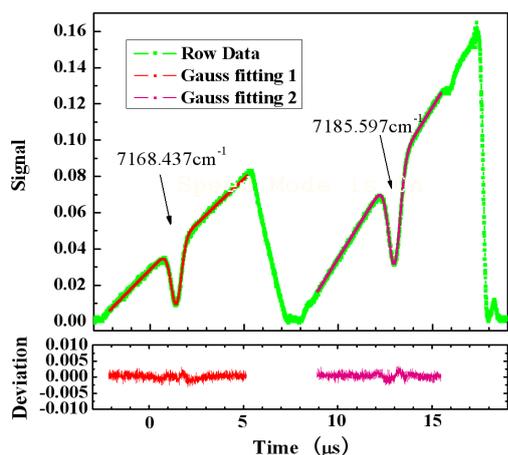
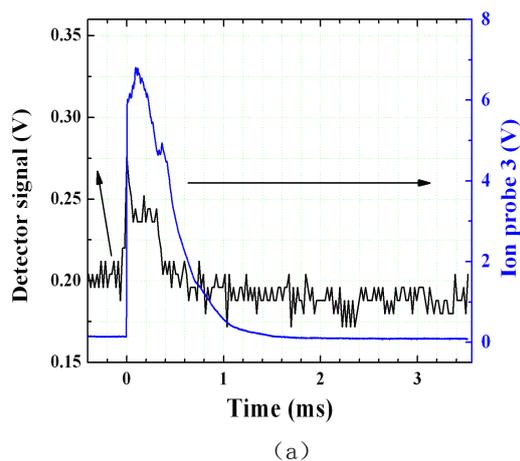


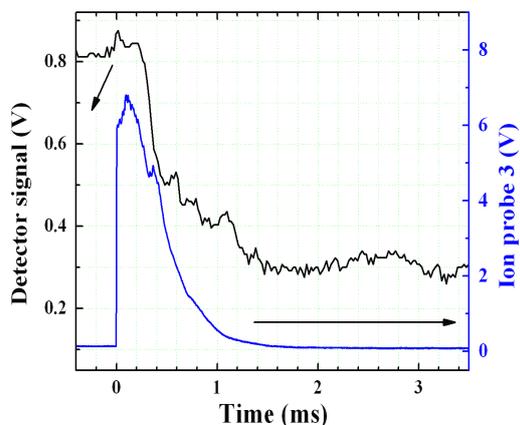
图 7. 同时拟合基线和吸收线型: 上图为原始信号和拟合数据; 下图为拟合误差

如图 8 所示, 对分时直接探测的原始数据的进一步分析还可以得到更多的信息: 分析每

扫描周期中的未吸收频率位置, 可以得到探测器感受到的辐射信号。若对吸收线的中心频率 (吸收最大值) 处每周期提取, 则可得到固定波长吸收的数据图。其中右侧坐标轴数据为 3 号电探针数据, 其上升沿对应着激波波面的到达时间, 并以这个时刻为零时刻。



(a)



(b)

图 8. 从扫描信号得到的更多数据: (a) 辐射信号, (b) 固定波长吸收信号

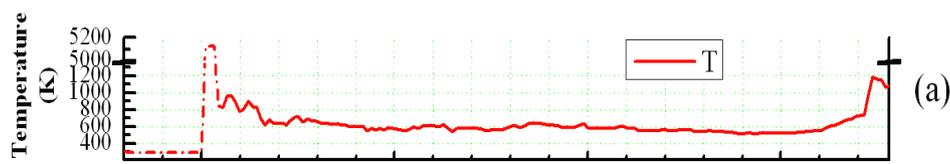


图 9. 典型的 TDLAS 测量结果图

波长扫描吸收可以得到众多信号，这对于风洞诊断是十分有利的。辐射可用于分析高 Ma 数激波后的非平衡辐射和非平衡迟豫过程。固定波长信号可以得到②区的有效时间，即当辐射和固定波长吸收信号迅速减少的时候，标志着驱动气体的到来，即分界面开始，②区结束。根据固定波长吸收信号可以定性理解激波管的运行，并准确测量有效运行时间。

由上述数据处理过程可知，分析记录每个周期吸收线型的积分吸收率可得到积分吸收比随时间的变化，从而得到不同时刻的气体温度，由温度和任一吸收线的吸收率可以计算 H₂O 分压，进而得到 H₂O 的分子数密度，见图 9。图 9(a)为测量位置处气体温度随时间的变化；(b)为水蒸气分压图；(c)为分子数密度图；(d)为最大吸收频率处的光强变化图(固定波长吸收图)；(e)为 3 号电离探针信号。

图 9 对应的实验参数为： $P_1 = 0.0975 \text{ Torr}$ ， $U_s = 5.19 \text{ km/s}$ 。此试验中，高压段并未充入氮气，点火前高压段内的氧气和氢气含量分别是 0.4atm，3.4atm。按照高马赫数激波管参数关系： $P_2/P_1 = 280$ ，波后压力：

$$P_3 = P_2 = 0.1/760 * 280 = 0.0359 \text{ atm} ,$$

②区温度 $T_2 = 5130 \text{ K}$ ，

$U_3 = U_2 = 4.59 \text{ km/s}$ ；若按照完全燃烧计算，H₂O 含量： $P_{H_2O} = 0.0084 \text{ atm}$ ，比测量值 0.0067 稍大(图 9(b)中 1ms 处)；按照绝热计算可得到驱动气体的温度： $T_3 = 560 \text{ K}$ ，这与实验中的测量值 575K(图 9(a)中 1ms 处)很接近。正如文献中的论述，由于流动参数的不确定性，比如边界层效应和二维流动效应的影响，测量误差很难定量分析。

由于②区内是高温电离后的空气，不含 H₂O，因此②区内无 H₂O 吸收，即针对 H₂O 吸收的 TDLAS 系统对于②区是无能为力的，直到分界面到来，有驱动气体中的 H₂O 到达光束面，才有吸收产生，才能得到正确的温度、压力信号。(a)图中的②区温度数据是由激波关系计算得到(点虚线)。

结合电离探针信号和固定波长信号可以得到②区的有效时间，而从②区以后的温度和压

力信号可以看出分界面和其后三区的运行状态。

总体来讲分界面中 H₂O 逐渐增加，这也反应了②③区的湍流混合，正是因为这个湍流混合，会进一步减少②区的有效运行时间。同时②区的高温电离空气与驱动气体混合，分界面温度也会逐渐下降。由图可以看出，在 1.0ms 以后，温度，压力都趋近平衡值，这个范围是③区。直到最后由于驱动气体的过度膨胀，会有稀疏波从高压段传来，进一步降低温度和压力。最后在 3.3ms 时刻，反射激波到达，压力温度都会上升。由于这个反射激波会被激波管内实验固定架干扰变形，因此反射激波并不是理想正激波面，压力和温度增加的并不规律。很难给出定量分析。

对于较低 Ma 数，高压段反射的稀疏波和小驱大段的过渡段存在速度，压力匹配问题产生的二次波会很快赶上分界面，于是③区、分界面运行状态很难用理想激波管理论分析。需要 CFD 数值模拟，而本实验的测量结果刚好可以为数值模拟提供有力的验证。

5 讨论

本实验建立起的吸收光谱测量系统将来可以用于此类脉冲设备的日常诊断。对于实验气流中没有水蒸气的设备，可以通过更换测量系统的激光器，通过扫描测量氧气、氧原子、氮原子等吸收谱线的方法实现。实验中的高马赫数脉冲激波管的有效运行时间在数百 μs ，现在测量周期 22 μs 还有些勉强。若对于 Ma 数稍低的，运行时间在毫秒量级的炮风洞、激波风洞，这种扫描波长的测量方法更为合适。

对于本实验低密度状况，Gauss 线型足以胜任数据拟合，但对于较高压力的风洞，需要考虑碰撞加宽的影响，使用 Voigt 线型。在实验中需要降低波长调制频率以增加激光器的快速扫描范围；在数据拟合时，使用 Voigt 线型作为拟合的目标函数。

对于低压测量环境，很容易使用一台激光器扫描两条吸收谱线，这会使得测量设备更加简化并进一步简化数据处理，同时可以使测量

频率提高一倍。这是低密度设备吸收光谱诊断技术的一个发展方向。

致谢

感谢国家自然科学基金（10525212）和（10772188）的资助。

参考文献

- 1 Allen MG. Diode laser absorption sensors for gas-dynamic and combustion flows. *Measurement Science and Technology* 1998;9 (4):545 - 62
- 2 Docquier N, Candel S. Combustion control and sensors: a review. *Progress in Energy and Combustion Science* 2002;28(2):107-50
- 3 Philippe LC, Hanson RK. Laser-diode wavelength-modulation spectroscopy for simultaneous measurement of temperature, pressure and velocity in shock heated oxygen flows. *Applied optics* 1993; 32(30):6090-103
- 4 Bryner EB, Diskin GS, Goyne CP, McDaniel JC, Krauss RH, Slate TA. Water vapor concentration measurement in high enthalpy flows using infrared absorption. *AIAA-2003 - 4580*, 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Huntsville, Alabama, July 20-23, 2003
- 5 Chen SJ, Silver JA, Bomse DS. Combustion species sensor for sramjet flight instrumentation. *AIAA 2005-3574*, 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Tucson, Arizona, July 10-13, 2005
- 6 Liu X, Jeffries JB, Hanson RK, Hinckley KM, Woodmansee MA. Development of a tunable diode laser sensor for measurements of gas turbine exhaust temperature. *Appl. Phys. B*, 2006;82(3):469 - 78
- 7 Richter D, Lancaster DG, Tittel FK. Development of an automated diode-laser-based multicomponent gas sensor. *Applied Optics* 2000; 39(24):4444 - 50
- 8 Teichert H, Fernholz T, Ebert V. Simultaneous in situ measurement of CO, H₂O and gas temperatures in a full-sized coal-fired power plant by near-infrared diode lasers. *Applied Optics* 2003; 42(12):2043 - 51.
- 9 Farooq A, Jeffries JB, Hanson RK. CO₂ concentration and temperature sensor for combustion gases using diode-laser absorption near 2.7um. *App. Phys.B* 2008;90(3-4):618-28
- 10 Sanders ST, Mattison DW, Jeffries JB, Hanson RK. Time-of-flight diode-laser velocimeter using a locally seeded atomic absorber: Application in a pulse detonation engine. *Shock Wave* 2003; 12(6): 435-41
- 11 Upschulte BL, Sonnenfroh DM, Allen MG. Measurements of CO, CO₂, OH, and H₂O in room temperature and combustion gases using a broadly current-tuned multi-section InGaAsP diode laser. *Applied Optics* 1999; 38(9): 1506-12
- 12 LI H, Farooq A, Jeffries JB, Hanson RK. Near-infrared diode laser absorption sensor for rapid measurements of temperature and water vapor in a shock tube. *Appl. Phys. B* 2007;89(2):407-16
- 13 Arroyo MP, Langlios S, Hanson RK. Diode-laser absorption technique for simultaneous measurements of multiple gasdynamic parameters in high-speed flows containing water vapor. *Applied Optics* 1994;33(15): 3296-307
- 14 Cavolowsky JA, Newfield ME, Loomis MP. Laser absorption measurements of OH concentration and temperature in pulsed facilities. *AIAA Journal* 1993; 31(3):491-98
- 15 Zhou X, Liu X, Jeffries JB, Hanson RK. Development of a sensor for temperature and water vapor concentration in combustion gases using a single tunable Diode Laser. *Measurement Science and Technology* 2003;14(8): 1459-68
- 16 Rothman LS, Jacquemart D, Barbe A, Benner D, Birk M, Brown LR, Carleer MR, Chackerian CJ, Chance K, Coudert LH, Dana V, Devi VM, Flaud JM, Gamache RR, Goldman A, Hartmann JM, Jucks KW, Maki AG, Mandin JY, Massie ST. The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database,

- Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 2005;96(2):139-204
- 17 Zhou X, Jeffries JB, Hanson RK. Development of a fast temperature sensor for combustion gases using a single tunable diode laser, Appl. Phys. B 2005; 81: 711-722.
- 18 Yu XL., Li F, Chen LH, Chang XY. A tunable diode-laser absorption spectroscopy(TDLAS) thermometry for combustion diagnostics. AIAA-2008-2657, 15th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, Dayton, Ohio, Apr. 28-1, 2008
- 19 Zhu NY, Yang QS, Zhang HL, Yu XL, Huang LS. Investigation on nonequilibrium radiation and relaxation phenomena in shock tubes. ACTA MECHANICA SINICA 2003;19(1):46-51
- 20 Liu JTC., Rieker GB, Jeffries JB, Gruber MR, Carter CD, Mathur T, Hanson RK. Near-infrared diode laser absorption diagnostic for temperature and water vapour in a scramjet combustor. Applied Optics 2005;44(31)6701-11

21 Griffiths AD, Houwing AFP. Diode laser absorption spectroscopy of water vapour in a scramjet combustor. Applied Optics 2005;44(31):6653-59

Hypersonic Flow Measurement By Means of TDLAS

YU Xilong^{1,2}, LI Fei^{1,2}, ZHANG Shaohua^{1,2}, CHEN Lihong^{1,2}, ZHANG Xinyu^{1,2}

(1 Hypersonic Research Center CAS, No.15 Beisihuanxi Road, Beijing 100190, China)

(2 Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, CAS , No.15 Beisihuanxi Road, Beijing 100190, China)

Abstract A tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) measurement system was established and used to measure the hypersonic stream in a $\Phi 800$ low density hydrogen-oxygen combustion driven shock tube. The parameters in the third zone of the shock tube, including velocity, temperature, and concentration of water vapor, are close to that at the nozzle exit of the supersonic combustion test facility. Therefore, the measurement of the water vapor in the third zone of the shock tube is a simulation to that at the nozzle exit of the supersonic combustion test facility.

Key words TDLAS, hypersonic flow, non-intrusive diagnostics