

基于可调二极管激光红外吸收的燃烧诊断技术*

范 玮¹, 严传俊¹, 张 群¹, Baldwin J A², Hanson R K²

(1. 西北工业大学 航空动力与热力工程系, 陕西 西安 710072; 2. 美国加州斯坦福大学 机械系, CA94305)

摘 要: 为了发展先进的燃烧诊断技术, 对可调二极管激光红外吸收术用于燃烧多参数测量的原理、方法和测量系统进行了全面的论述, 并将该方法应用于脉冲爆震室中未燃组分、当量比的测量中。因为爆震室中燃料的分布和填充程度决定了脉冲爆震发动机 (PDE) 的性能, 故试验中精心控制燃料填充程度, 以研究爆震管中填充程度对脉冲爆震发动机性能的影响。实验结果表明, 可调二极管激光红外吸收术对于监测 PDE 的性能, 进而对 PDE 的控制和优化极有意义。

关键词: 二极管激光器; 红外吸收术; 燃烧诊断; 脉冲式喷气发动机

中图分类号: V231.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2003) 02-0186-04

Combustion diagnostics by tunable diode laser-based absorption

FAN Wei¹, YAN Chuan-jun¹, ZHANG Qun¹, Baldwin J A², Hanson R K²

(1. Dept. of Aeroengine Engineering, Northwestern Polytechnic Univ., Xi'an 710072, China;

2. Dept. of Mechanical Engineering, Stanford Univ., CA94305, U. S. A.)

Abstract: The principle, means and measurement systems for multi-parameter combustion diagnostics by tunable diode laser-based absorption were extensively overviewed and applied to the measurements of fuel and oxygen concentration in the unburned mixture in pulse detonation chamber. Because fuel distribution in detonation chamber governs the performance of pulse detonation engine (PDE), some controlled fueling experiments were designed to test the effect of partial tube fills on PDE performance. It was demonstrated in these PDE experiments that the diagnostics is rapid and useful. The demonstration proves the utility of the technique for monitoring PDE performance and further, for PDE control and optimization.

Key words: Diode laser; Infrared absorption; Combustion diagnostics; Pulsejet engine

1 引 言

激光诊断技术是一种快速、非接触测量方式, 以其对测量对象的扰动小而见长。早期的燃烧激光诊断技术一般都采用大型激光源, 它们为燃烧理论的建立和发展作出了很大贡献。20 世纪 70 年代出现的可调半导体激光器, 十分小巧而实用, 把强光源和高分辨率分光系统融为一体, 被广泛应用于高分辨率红外光谱的研究中。

红外光谱研究表明, 很多燃烧组分在近红外区都存在能与入射激光频率产生共振的强吸收谱线, 这就为将可调半导体激光红外吸收这种尚处于理论研究

阶段的技术应用到燃烧诊断方面提供了可能。由于光学诊断技术快速准确的特点, 故对高速燃烧系统的控制尤有意义, 可以制成各种小型光学传感器, 安放于飞机的各测点上, 便于监控发动机的状态。一般的商用半导体激光器的波长为 $0.63\mu\text{m} \sim 1.8\mu\text{m}$, 最近可延伸至 $2.1\mu\text{m}$, 可适用于 CO , CO_2 , NO , N_2O , O_2 , CH_4 , C_2H_4 , H_2O 等常用燃烧组分的检测, 但该技术应用于燃烧诊断领域在国内尚未见诸报道。

本文旨在介绍将可调二极管激光红外吸收术用于燃烧多参数测量的有关问题, 并将该方法应用于脉冲爆震室中未燃组分、当量比的测量中, 以研究爆震管中燃料填充程度对 PDE 性能的影响。

* 收稿日期: 2002-05-16; 修订日期: 2002-09-06。基金项目: 国家自然科学基金 (50106012)、航空科学基金 (00C53019) 和教育部回国启动基金、人事部回国人员择优项目资助。

作者简介: 范 玮 (1966—), 女, 博士后, 教授, 研究领域为脉冲爆震发动机、激光诊断技术、燃烧学。

2 测量装置及原理

可调二极管激光应用于燃烧的诊断系统如图1所示。它主要包括一组与所测各组分共振频率相同的可调半导体激光源以及相应的温控器、注入电流控

制或用于激光调制的信号发生器、多光束组合光纤、激光多次往返吸收池以保证吸收系数很小的组分也能获得足够强的吸收光谱、标准具、检测器、A/D转换器、快速采样系统等,这样便可实现燃烧流场的多组分多参数的实时连续测量。

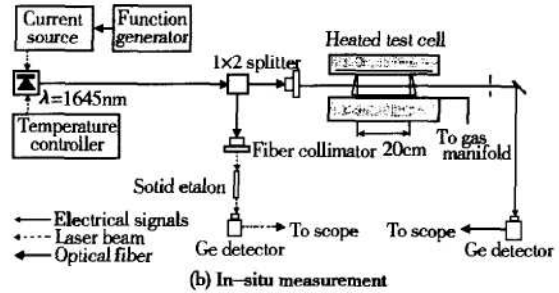
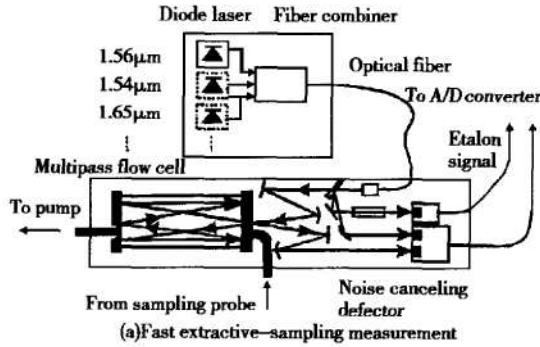


Fig.1 Examples of diode laser sensor systems used for combustion diagnostics

根据 Beer-Lambert 定律,频率为 ν 的激光通过长度为 L (吸收路径,单位为 cm) 的均匀介质后的透射分数为

$$T_\nu = I_\nu / I_\nu^0 = \exp(-k_\nu L) \quad (1)$$

式中 k_ν 是光谱吸收系数,单位为 cm^{-1} , I_ν^0 是入射光强, I_ν 是透射光强。光谱吸收系数 k_ν 可用下式表示

$$k_\nu = Sp_i \phi_\nu = Sp x_i \phi_\nu \quad (2)$$

式中 S 是谱线强度,单位为 $\text{cm}^{-2}/\text{MPa}$; p_i 是吸收介质分压力,单位为 MPa; ϕ_ν 是与频率相关的谱线形状函数,单位为 cm ; p 是总压; x_i 是吸收组分的摩尔分数。

对于同种组分的两个不同的吸收能级,其光谱吸收系数之比仅为温度的函数:

$$R(T) = \frac{k_{\nu_1}}{k_{\nu_2}} = \left(\frac{S_1}{S_2} \right)_{T_0} \exp \left[- \frac{hc(E_1 - E_2)}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (3)$$

式中 T_0 是任意选定的参考温度, E_i 是跃迁 i 的基态的总能量,单位为 cm^{-1} , hc/k 是光谱学常数,其值等于 $1.44 \text{ cm} \cdot \text{K}$, $S_i(T_0)$ 可从数据库中查得, T 是所测的气流温度。因此通过分析两束频率不同的激光穿过燃烧流场前后的吸收光谱,找出吸收前后的光强比,进而求得光谱吸收系数之比,便可求出燃气的温度。

将式(2)代入式(1),并考虑谱线形状函数 ϕ_ν 的定义,它在整个频域上的积分为1,即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \phi_\nu d\nu = 1$$

可得计算燃烧组分的摩尔分数的公式如下:

$$x_i = - \frac{1}{SpL} \int_{-\infty}^{+\infty} \ln(I_\nu / I_\nu^0) d\nu \quad (4)$$

根据谱线的压力加宽(即碰撞加宽)机理可得碰撞线宽(单位为 cm^{-1})

$$\Delta\nu_c = p \sum_i x_i 2\gamma_i \quad (5)$$

式中 γ_i 是碰撞系数,可在数据库中查得。根据吸收前后的光强比,依据下式可求得压力场为

$$p = A^2 / (2S \cdot \Delta\nu_c L) \quad (6)$$

式中 $A = \int (1 - T_\nu) d\nu$, 单位为 cm^{-1} 。知道压力场和温度场后,便可依据状态方程获得密度场的瞬态信息。

利用多普勒加宽机理,可知多普勒线宽(单位为 cm^{-1})与谱线中心频率 ν_0 有如下关系

$$\Delta\nu_D = \nu_0 7.17 \times 10^{-7} (T/M)^{1/2} \quad (7)$$

式中 M 是摩尔分子量,单位是 g/mole ; T 是温度,单位为 K; ν_0 是谱线中心频率,单位为 cm^{-1} 。由测得的吸收前后谱线的多普勒线宽 $\Delta\nu_D$, 可由上式算出吸收前后谱线的中心频率 ν_0 , 从而可算出吸收前后谱线中心频率的频移量 $\Delta\omega$ (多普勒频移), 便可依据下式计算出流场内该点的速度:

$$V = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \frac{c}{(\cos\theta_1 - \cos\theta_2)} \quad (8)$$

式中 ω_0 是未频移的谱线中心频率, $\Delta\omega$ 是谱线中心频率的频移量, c 是光速, θ_1, θ_2 是通过流场的两激光束与流动方向的夹角。

3 应用实例

脉冲爆震发动机(PDE)的性能很大程度上取决于点火时发动机中的燃料和氧化剂的分布。因此研制了测试 PDE 填充特性的光学传感器,以了解 PDE 的性能,从而优化 PDE。诊断主要是测试燃料和氧的浓度,因为大多数感兴趣的燃料蒸气在波长 $3.39\mu\text{m}$ 处都有很强的吸收谱线,所以将波长 $3.39\mu\text{m}$ 的 He-Ne 激光器用作燃料蒸气诊断,将此 He-Ne 激光束穿过采用 $\text{C}_2\text{H}_4/\text{O}_2$ 作为爆震反应物的斯坦福大学的 PDE 的爆震室,该爆震室内径为 3.8cm 。同时,在同一处通过爆震室的还有另一快速可调的由 VCSEL 激光器(Vertical cavity surface emitting laser)射出的波长约为 760nm 的激光束,用于检测空气中氧的浓度,如图 2 所示。在多个测点上同时监测燃料蒸气和氧的浓度要采用适当的光分技术和器件,图 2 中示出的是其中之一。VCSEL 激光器的快速可调性使通过扫描获得如图 3 所示的吸收谱线成为可能。对于仅包含谱线 RQ(9,10)的微小波长区域进行再次扫描,可得一条在原处的样本线形,用以确定 O_2 的摩尔浓度为 0.21,如图 4 所示。通过监测填充时每个激光器的透射情况,可以用 Beer-Lambert 关系式确定 C_2H_4 和 O_2 的摩尔分数 $X_{\text{C}_2\text{H}_4}$ 和 X_{O_2} ,测量所需的光谱学数据可见文献[3, 4]。在斯坦福的 PDE 上,填充温度保持定值,为 300K 。如果对于填充温度在变化的情况,测量燃气温度时就要采用对氧的多条吸收谱线的扫描方法。

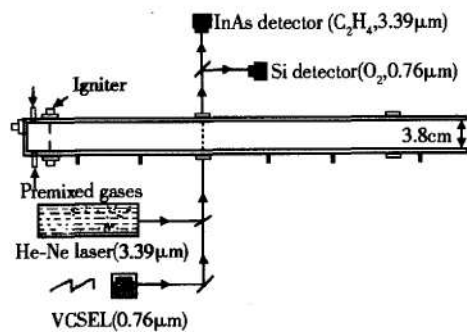


Fig.2 Stanford PDE with fuel vapor and oxygen sensor attached

图 5 表示在一个简单填充过程中燃料蒸气和氧的浓度随时间的变化,设用氮气清除上一爆震循环后燃料和空气阀门打开之时为计时起点 $t = 0\text{ms}$ 。由测量结果提供的定时信息和浓度量值对 PDE 的优化和控制非常有用。测得的在点火时当量比 ϕ 随爆震室

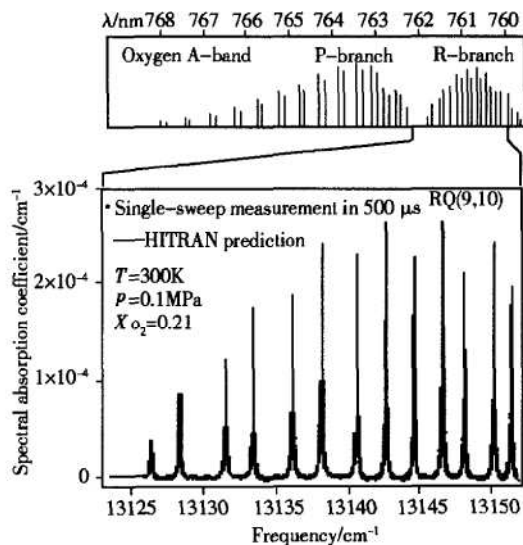


Fig.3 VCSEL measurements of O_2 A-band absorption demonstrating rapid tunability

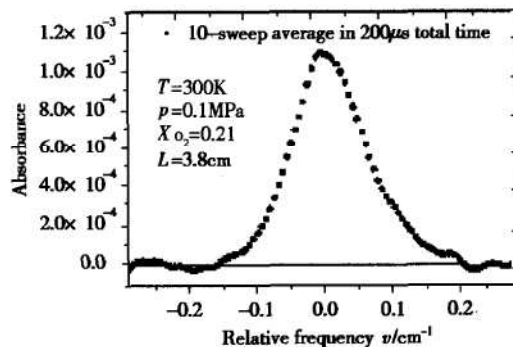


Fig.4 Sample measurement of RQ(9,10) O_2 absorption lineshape measured in Stanford PDE

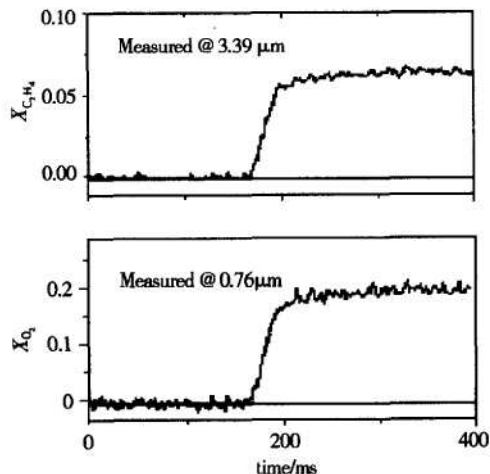


Fig.5 Fill histories measured in Stanford PDE

轴向位置的变化情况示于图 6 中。

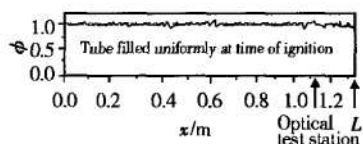


Fig.6 Measured fill distribution along the tube length at time of ignition

为了测试管中填充度对 PDE 性能的影响,设计了一系列受控填充试验,试验分别填充 1.35m 管长的

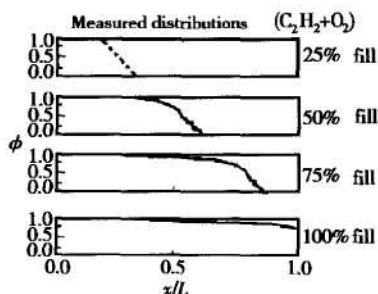


Fig.7 Measured the distribution of equivalence ratio ϕ along the tube length at four different partial fills at time of ignition

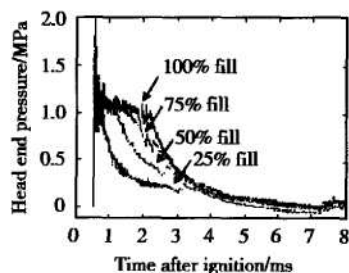


Fig.8 Measured head end pressure histories for partial tube fills

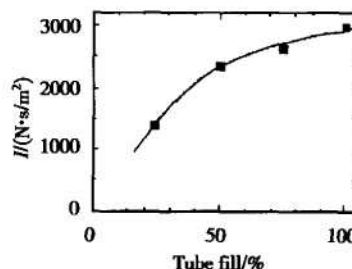


Fig.9 Measured total impulse per square meter for partial tube fills

4 结论

利用二极管激光诊断系统测量了 PDE 中未燃气流中燃料蒸气浓度和氧的浓度,并测试了各种填充程度下当量比 ϕ 随管中位置的分布。表明对于监测 PDE 的性能,进而对进行 PDE 的控制和优化极有意义。

致谢:本文工作是在本文第一作者在斯坦福大学进行博士后研究工作的基础上进行的,再此向斯坦福大学的导师和同事们表示感谢。

参考文献:

- [1] Jenkins T P, Fan W, Hanson R K, et al. Diode laser-based

25%, 50%, 75% 和 100%。图 7 表示在点火时这四种填充度下当量比 ϕ 随管中位置的分布情况。图 8 示出的是在各填充度下,用压电晶体压力传感器测得的爆震后推力壁上压力随时间的变化情况。可以看出,填充程度越大,推力壁压力平台越明显,可得平均推力越大。图 9 表示的是将它们对时间积分,所得的总冲量随填充程度的变化。由图可以看出,部分充满比全充满有更大的潜在优点:全充满比半充满费油一倍,但总冲量只增加了 1.3 倍,而不是两倍。

sensors for pulse detonation engine flows[A]. *The Proceedings of the 1st International Colloquium on Control of Detonation Processes*[C]. 4-7 July, 2000, Moscow, Russia.

- [2] 范 玮, Jenkins T P, Sanders S T, 等. 激光诊断技术在脉冲爆震发动机研究中的应用[J]. 推进技术, 2001, 22(4).
- [3] Olson D B, Mallard W G, Gardiner W C, et al. High temperature absorption of the $3.39\mu\text{m}$ He-Ne laser line by small hydrocarbons[J]. *Applied Spectroscopy*, 1978, 32.
- [4] Brown L R, Plymate C. Experimental line parameters of the oxygen a band at 760nm [J]. *Journal of Molecular Spectroscopy*, 2000, 199.

(编辑:王居信)