

# 基于 TDLAS 技术在线测量气流道内液膜动态厚度

杨荟楠<sup>1,2</sup> 郭晓龙<sup>1,2</sup> 苏明旭<sup>1,2</sup> 蔡小舒<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093  
<sup>2</sup> 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093)

**摘要** 在液膜厚度测量时,通过选取液态水吸收截面不同的两个波长可消除除液态水吸收以外的其他信号衰减所造成的影响,如轻微的光束转向现象。但该方法仍较难消除在液膜蒸发过程后期由于液膜收缩所造成剧烈光束转向现象的影响。基于双波长可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术测量透明石英玻璃板上液膜蒸发过程中膜厚的变化,并同时用图像法追踪液膜形状的变化,对剧烈光束转向现象进行研究。在此基础上,通过在光电探测器前放置积分球,对已有的 TDLAS 液膜测量系统进行优化,以消除剧烈光束转向现象对膜厚测量的影响,并利用该系统分别测量了气流道内液膜形成过程和蒸发过程中液膜的厚度变化。

**关键词** 测量;液膜厚度;TDLAS;气流道;蒸发过程;图像法

中图分类号 TK31 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.1208010

## Liquid-Water Film-Thickness Online Measurement in a Flow Channel by TDLAS

Yang Huinan<sup>1,2</sup> Guo Xiaolong<sup>1,2</sup> Su Mingxu<sup>1,2</sup> Cai Xiaoshu<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China  
<sup>2</sup> Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, Shanghai 200093, China

**Abstract** Probing the liquid film at two wavelengths with different absorption cross-sections allows eliminating the effect of additional broadband signal losses, e. g., minor beam steering. However, severe beam steering effects due to the shrinking of the liquid film at the end of the evaporation process can not be avoided. The effect is studied by measuring the film thickness on quartz plate during film evaporation process with two-color tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) method, and shadowgraphy images are simultaneously taken to track the change of film shape. Severe beam-steering effects are reduced in the developed two-line TDLAS film-measurement sensor by using an integrating sphere in front of the detector. The sensor is then applied to obtain the film thickness variation in the flow channel during the film build-up by impinging of water droplets and the evaporation of liquid film.

**Key words** measurement; film thickness; TDLAS; flow channel; evaporation process; shadowgraphy images

**OCIS codes** 310.6870; 300.6360; 140.2020

## 1 引 言

液膜的形成与蒸发现象广泛地存在于各种工业应用中,例如在直接喷射火花点火发动机中活塞头上油膜的形成<sup>[1]</sup>,在端口喷射式汽油发动机中入口

处内壁油膜的形成<sup>[2]</sup>,灭火应用中水膜的形成<sup>[3]</sup>,降膜冷却<sup>[4]</sup>,以及在柴油发动机尾气后处理系统中尿素水溶液液膜的形成<sup>[5]</sup>。对液膜厚度进行定量分析,不仅可以设计和优化这些工业过程,也能为仿真

收稿日期: 2014-07-24; 收到修改稿日期: 2014-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(51306123),博士点基金新教师类(20133120120008),上海高校青年教师培养资助计划(ZZSLG13002)

作者简介: 杨荟楠(1983—),女,博士,讲师,主要从事激光光谱测量方面的研究。E-mail: yanghuinan@usst.edu.cn  
本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

模拟提供确切可信的数据。液膜厚度的测量方法可分为接触式与非接触式两类,其中接触式电学测量方法如电容法与电导法,其测量准确度易受到平板表面液膜覆盖情况和探针结构参数等的影响<sup>[6-7]</sup>;非接触式光学测量方法主要基于光的全反射<sup>[8-9]</sup>和光谱法<sup>[10-12]</sup>等,则具有高精度、高灵敏度及无干扰等优点。国内外学者已基于吸收光谱法对液膜厚度的测量进行了一定的研究。Monza 等<sup>[11]</sup>利用 635 nm 的激光器测量了低至 1 mm 的掺杂亚甲蓝的水膜厚度;Porter 等<sup>[12]</sup>发明了一种双波长中红外激光吸收测量技术用于同时测量气态燃料的摩尔分数和油膜厚度;Schagen 等<sup>[13]</sup>通过磷光衰减时间和荧光强度测量了湿壁上降膜的厚度(0.4~2.5 mm)和温度;Hidrovo 等<sup>[14]</sup>通过发射-再吸收激光诱导荧光光谱技术测量了 5~400  $\mu\text{m}$  范围内的液膜厚度,其测量精度为 1%。本文所采用的可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术在液膜厚度测量方面也较具优势,因其具有响应快、灵敏度高、结构紧凑和操作相对简便等特点<sup>[15-24]</sup>。

在前期工作中,已经研制出一种新型的 TDLAS 液膜测量系统<sup>[25-26]</sup>,可对液膜蒸发过程中液膜厚度、温度及液膜上方水蒸气温度等三个参数同时进行测量。通过电流调谐半导体激光器快速扫描水蒸气窄带吸收峰,可将气态水窄带吸收、液态水宽带吸收和其他因素所造成激光光强衰减分离,该系统测得的液膜在 5~1000  $\mu\text{m}$  范围内厚度误差小于 5%,温度的误差小于 1%。前期研究表明,在液膜蒸发过程后期测量数据有着强烈的波动且不具有物理意义。原因在于液膜蒸发过程后期,由于液膜的质量减少和表面张力使液膜收缩且形状发生变化,从而造成了剧烈的光束转向现象。这样穿过液膜后的激光光束不能被接收光纤接收,从而造成了强烈的数据波动。本文利用已有的 TDLAS 液膜测量系统和图像法同时观测透明石英玻璃板上液膜的蒸发过程,研究液膜蒸发过程后期剧烈的光束转向现象;通过在光电探测器前放置积分球对已有的 TDLAS 液膜测量系统进行优化以消除剧烈的光束转向现象;并利用改进后的 TDLAS 测量系统研究气流道内喷射水滴所形成的水膜蒸发过程中膜厚的动态变化过程。

## 2 研究背景

根据比尔-朗伯定律,波数为  $\nu_i$  的激光穿过介质

后的透射率  $\tau(\nu_i)$  为

$$\tau(\nu_i) = \left( \frac{I_t}{I_0} \right) = (1 - u) \exp(-n\sigma_i d_1), \quad (1)$$

式中  $I_t$  和  $I_0$  分别是透射光和入射光的强度, $d_1$  是吸收介质的长度(即本文中的液膜厚度), $\sigma_i$  是光谱红外吸收截面,可以通过傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)直接测得<sup>[25-26]</sup>, $n$  是介质的摩尔浓度, $u < 1$  表示其他因素造成的光强衰减,如液膜表面反射,光的不完全采集,光的散射,轻微的光束转向等。液膜的厚度可以由透射率的比值表示,从而可以消除其他光强衰减造成的影响:

$$d_1 = \frac{\ln[\tau(\nu_1)/\tau(\nu_2)]}{(\sigma_2 - \sigma_1) \cdot n}. \quad (2)$$

## 3 剧烈的光束转向现象研究

### 3.1 实 验

为了研究透明石英玻璃板上液膜蒸发过程后期剧烈的光束转向现象对液膜测量结果的影响,本文利用已有的 TDLAS 液膜测量系统对液膜蒸发过程中膜厚的动态变化进行测量,同时采用图像法记录蒸发过程中液膜的形状变化。用玻璃吸管在直径为 10 cm 的透明石英玻璃板的中间滴一滴水,并轻微搅动使之展开形成液膜。在石英玻璃板的底部加热空气使液膜进行加热并蒸发。如图 1 所示,在图相法实验装置中,利用波长为 632.8 nm 激光的 He-Ne 激光器作为激发光源,激光在通过一个凹透镜( $f=80$  mm)后直径增大为 40 mm,激光穿过液膜表面后被一个与水平方向呈 45°角的平面镜反射,并照射到毛玻璃屏上,最后用 ICCD 相机进行图像采集。

TDLAS 液膜测量系统的实验装置在文献<sup>[25-26]</sup>中已有详细描述。两个分布反馈(DFB)半导体激光器(1392 nm 和 1353 nm)输出激光通过一个光纤耦合器进行耦合,耦合后的激光以与玻璃平面垂直线呈 2°角穿过液膜表面,被一个水平呈 45°角的平面镜反射后,通过钢砷化镓(InGaAs)探测器(Thorlabs, PDA10CS-EC)进行接收,发射光纤头在液膜上方 10 cm 处。本文采用固定波长吸收光谱法与波长时分法,即激光器的波长被固定在所选用的特定波长上,两个激光器每隔 25 ms 分别开/关一次。实验的控制、数据的采集(采样频率 20 Hz)和处理过程均用 Labview 进行控制。

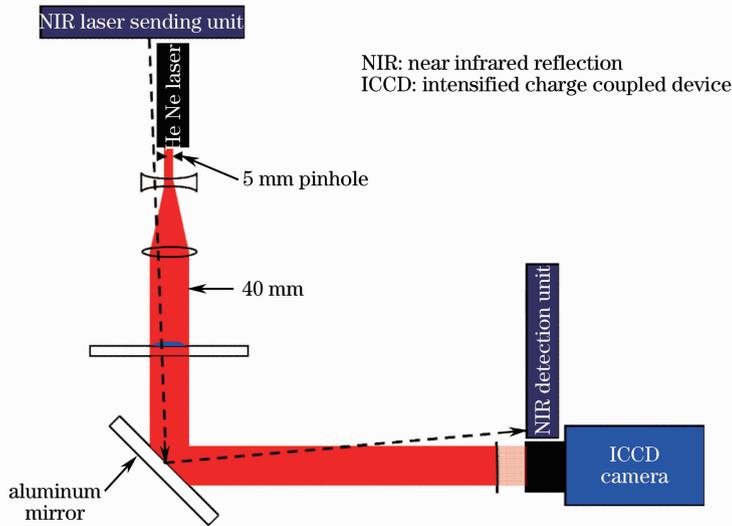


图 1 TDLAS 液膜测量系统和图像法测量液膜厚度实验装置

Fig. 1 Experimental Setup for TDLAS and shadowgraphy measurements on a liquid-water film

### 3.2 结果和讨论

已有的 TDLAS 液膜测量系统的测得的液膜厚度随时间变化值如图 2 所示,液膜厚度在实验开始的前 1800 s 单调递减,之后的数据呈现较大的波动,且不具有物理意义[由图 2(b)中 1700~2600 s 的放大图可知]。在图 2(b)中选出八个特定时刻(用绿点标出),对图像法记录的相对应时刻的图像进行分析如图 3 所示,图 3 中用黑点标记的位置是 TDLAS 激光光束穿过的位置。在 1750~1980 s (时刻 1 和 2)液膜已发生收缩但是形状未发生变

化,因此并没有明显影响 TDLAS 的测量结果。从 2050 s(时刻 3)开始,液膜开始大幅度收缩,直到 2341 s(时刻 6),TDLAS 激光光束位于液膜的边缘,透过液膜后的激光由于光的折射超出准直器透镜的接收角度,因此测得的液膜厚度具有较大的波动。在 2449 s(时刻 7),TDLAS 激光光束穿过的位置液膜完全蒸发,TDLAS 所测得的液膜厚度为零。分析可见,剧烈的光束转向现象将对 TDLAS 膜厚测量结果造成影响。

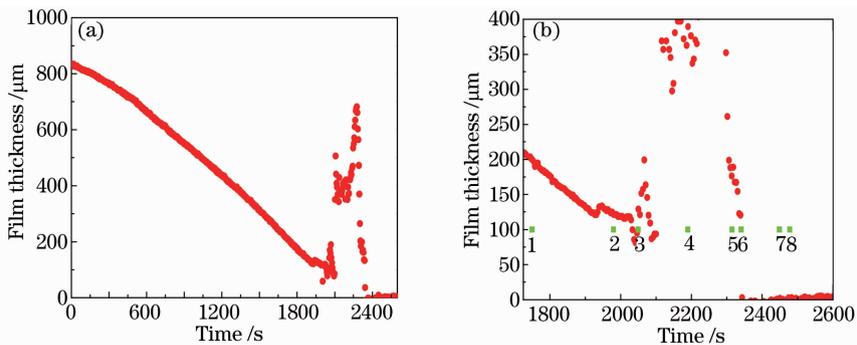


图 2 (a) TDLAS 测得液膜的蒸发过程中膜厚变化; (b) 蒸发过程后期 1700~2600 s 的放大图及八个对应时刻

Fig. 2 (a) Film thickness variation measured by TDLAS during the liquid-film evaporation process;

(b) enlarged area at the end of the evaporation process and the eight corresponding instances

本文在已有的 TDLAS 液膜测量系统中的探测器前放置一个积分球用于消除剧烈的光束转向现象,从而建立优化的 TDLAS 液膜测量系统。激光穿透液膜后,被一个入口直径为 12.5 mm 的积分球接收(Thorlabs, IS210C),积分球距离窗口的距离

为 10 cm。积分球内表面镀有一层以 PTFE 为主的高反射率物质,这些物质在近红外区域内的反射率高达 98%。钢砷化镓探测器(Thorlabs, PDA10CS-EC)位于积分球的另一个直径为 12.5 mm 的开口处,它与激光光束入口轴呈 90°。

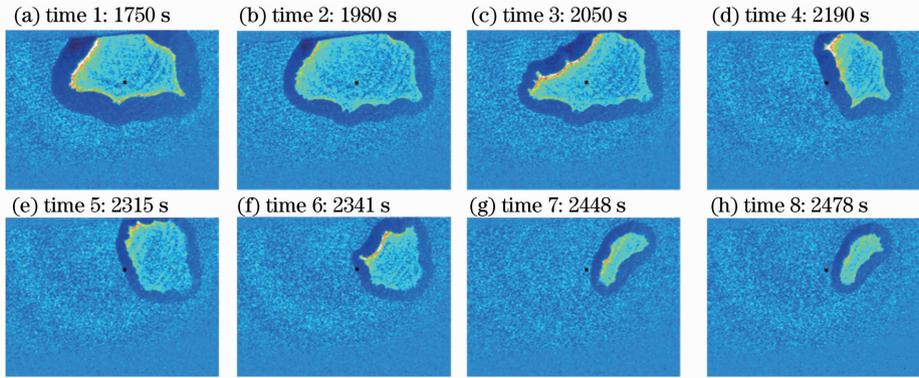


图 3 液膜蒸发过程中 8 个特定时刻(即图 2 中的绿点)的阴影图相

Fig. 3 Shadowgraphy images at the eight specific instants in time (marked as green dots in Fig. 2) during film evaporation

图 4 为利用优化后的 TDLAS 液膜测量系统对透明石英玻璃板上的水膜蒸发过程进行研究获得的结果。由图可见,液膜呈单调递减趋势直至液膜蒸发完全。如图 2 可知,在液膜蒸发过程后期,当出现剧烈的光束转向现象时,已有的 TDLAS 液膜测量系统测得的液膜厚度结果存在较大的波动且不具有物理意义,而采用优化的 TDLAS 液膜测量系统可对液膜蒸发的全过程进行研究,可见优化后的系统可进一步应用到有剧烈光束转向现象影响的环境中。

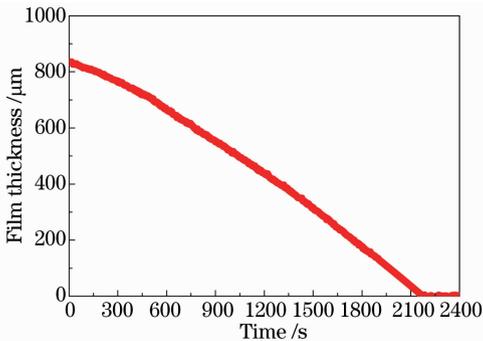


图 4 优化的 TDLAS 系统获得的液膜蒸发过程中膜厚变化

Fig. 4 Film thickness variation measured by improved TDLAS sensor during the film evaporation process

## 4 气流道内液膜厚度测量

### 4.1 实验

前期工作<sup>[25-26]</sup>是在液膜上方无流动空气的情况下进行膜厚测量的,然而在实际应用中如文献[5],测量液膜上方有空气流动的膜厚更为重要。因此,本文利用优化后的 TDLAS 液膜测量系统对横截面为正方形(50 mm×50 mm)的气流道内的液膜厚度进行研究,该流道最大气流速度为 7.5 m/s。实验装置如图 5 所示。铝制的流道被分成四段,两侧的流道长度为 21 cm,中间两段长为 31 cm 且四

周均设有透明石英玻璃窗口。嵌在气流道上壁面的三孔喷嘴用于水滴喷射以在下壁面上形成液膜,在下壁面处放置一个热吹风用于加速液膜蒸发。

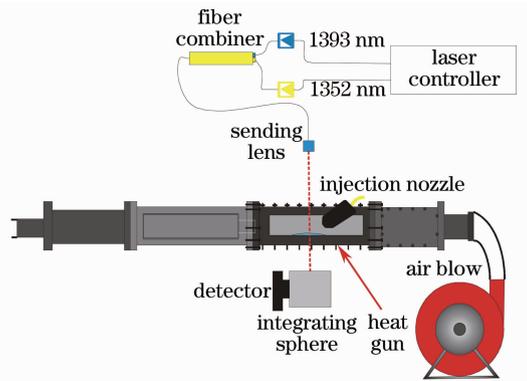


图 5 气流道内液膜厚度测量的实验装置

Fig. 5 Experimental setup for film thickness measurements in a flow channel

### 4.2 结果和讨论

本文对气流道内液膜上方有/无空气流动两种情况进行研究。由于实验中采用的是一个三孔喷嘴,水滴喷射后,气流道下壁面的石英玻璃板上会形成三个独立的液膜,而本文只对其中一个液膜的动态厚度进行研究,但在液膜蒸发过程后期,由于液膜收缩引起形状改变,它将会与相邻的两个液膜组合,这种现象也可通过肉眼观察到。

在实验数据开始采集前,将水滴喷射前激光光强记录为入射光强。图 6 为气流道内无空气流动和有空气流动时液膜形成及蒸发过程中膜厚的变化。如图 6(a)所示,在 0.5 s 内液膜厚度由 0 增加到 800  $\mu\text{m}$  之后液膜厚度主要呈线性减小趋势,但三个时间点例外(130/160/210 s)。这主要是由于三个液膜重新组合或运动所造成的,在约 275 s 所测得的液膜厚度为零。对于液膜上方有空气流动的情况,膜厚变化记录在图 6(b)中。在这种情况下,在 0.5 s 内,

液膜厚度迅速从 0 增加到 1000  $\mu\text{m}$ 。但是与图 6(a) 相比较,膜厚值表现出强烈的波动,在 1 min 内,最大的波动值超过 100  $\mu\text{m}$ ,这是由液膜形成阶段液膜内含有气泡所造成的。在 140 s 也由于液膜重新组合或运动出现了液膜厚度的增加现象。空气流动有利于液膜的蒸发,液膜大约在 180 s 后蒸发结束,所

用的时间约是液膜上方无空气流动时所需时间的 65%。由此可见,采用优化的 TDLAS 液膜测量系统,液膜厚度在整个过程中的动态变化均能被测量到,同时喷嘴喷水以及液膜蒸发过程后期所带来的剧烈的光束转向现象的影响均能被消除。

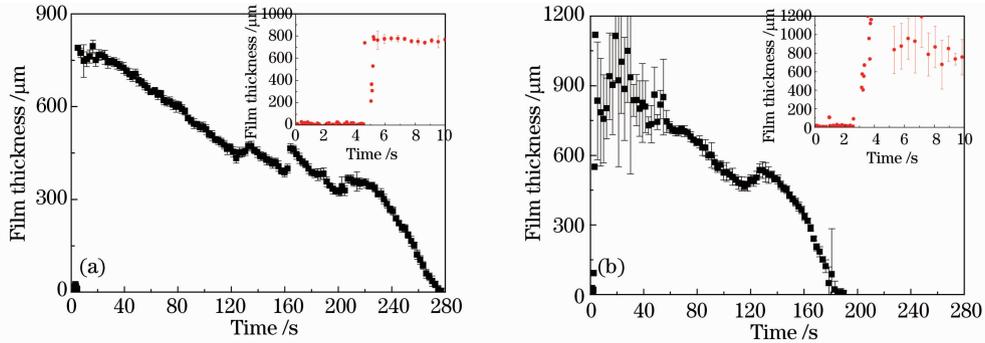


图 6 (a) 气流道内无空气流动时液膜随时间变化情况; (b) 气流道内有空气流动时液膜随时间变化情况  
插图:最开始 10 s 膜厚变化情况

Fig. 6 (a) Temporal variations of the film thickness without active air flow in the flow channel; (b) temporal variations of the film thickness with active air flow in the flow channel. Insets: variation of film thickness within the first 10 s

## 5 结 论

利用 TDLAS 技术与图像法研究液膜蒸发过程后期液膜收缩引起形状变化导致的剧烈光束转向现象,并通过在探测器前放置积分球对已有的 TDLAS 液膜测量系统进行优化,优化后的系统可消除剧烈的光束转向现象带来的影响,并利用该系统研究气流道内液膜上方有空气流动和无空气流动两种情况下液膜的形成与蒸发过程。研究可见,在液膜上方有空气流动时,液膜蒸发速度更快。

## 参 考 文 献

- 1 M C Drake, T D Fansler, A S Solomon, *et al.*. Piston Fuel Films as a Source of Smoke and Hydrocarbon Emissions from a Wall-Controlled Spark-Ignited Direct-Injection Engine [R]. SAE Technical Paper, 2003. 2003-01-0547.
- 2 W Hentschel, A Grote, O Langer. Measurement of Wall Film Thickness in the Intake Manifold of a Standard Production SI Engine by a Spectroscopic Technique[R]. SAE Technical Paper, 1997. 972832.
- 3 J R Mawhinney, J K Richardson. A review of water mist fire suppression research and development[J]. Fire Technol, 1996, 33(1): 54-90.
- 4 A I Petruichik, S P Fisenko. Simulation of cooling of water droplets and film flows in large natural wet cooling towers[J]. J Eng Phys Thermophys, 2001, 74(1): 62-68.
- 5 J Gieshoff, M Pfeifer, A S Sindlinger, *et al.*. Advanced Urea SCR Catalysts for Automotive Applications[R]. SAE Technical Paper, 2001. 2001-01-0514.
- 6 Song Jian, Wei Shongjie, Yu Yiqi, *et al.*. Evaluation of capacitance method for water-film thickness measurement[J]. Measurement Technique, 2011, (9): 15-18.

宋 建, 韦胜杰, 于意奇, 等. 竖直平板上电容法测量水膜厚度方法评价[J]. 测量与设备, 2011, (9): 15-18.

- 7 Wang Wenwu, Li Chunguo, Wang Xinjun, *et al.*. A study on measurement of thickness of thin liquid film on metal surfaces[J]. Dongfang Turbine, 2010, (1): 21-25.
- 王文武, 李春国, 王新军, 等. 金属表面流动液膜厚度的电导法测量技术研究[J]. 东方汽轮机, 2010, (1): 21-25.
- 8 E T Hulburt, T A Newell. Optical measurement of liquid film thickness and wave velocity in liquid film flows[J]. Exp Fluids, 1996, 21(5): 357-362.
- 9 T A Shedd, T A Newell. Automate optical liquid film thickness measurement method [J]. Rev Sci Instrum, 1998, 69 (12): 4205-4213.
- 10 E Kull, G Wiltafsky, W Stolz, *et al.*. Two-dimensional visualization of liquid layers on transparent walls[J]. Opt Lett, 1997, 22(9): 645-647.
- 11 A A Monza, N A Vlachos, S V Paras, *et al.*. Measurements of liquid film thickness using laser light absorption method[J]. Exp Fluids, 2000, 28(4): 355-359.
- 12 J M Porter, J B Jeffries, R K Hanson. Mid-infrared laser-absorption diagnostic for vapor-phase fuel mole fraction and liquid fuel film thickness[J]. Appl Phys B, 2011, 102(2): 345-355.
- 13 A Schagen, M Modigell. Local film thickness and temperature distribution measurement in wavy liquid films with a laser-induced luminescence technique[J]. Exp Fluids, 2007, 43(2-3): 209-221.
- 14 C Hidrovo, D Hart. Emission reabsorption laser induced fluorescence (ERLIF) film thickness measurement[J]. Meas Sci & Technol, 2001, 12(4): 467-477.
- 15 C Schulz, A Dreizler, V Ebert, *et al.*. Combustion Diagnostics [M]. Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics, 2007. 1241-1315.
- 16 T Dreier, V Ebert, C Schulz, *et al.*. Laser-Based Combustion Diagnostics[M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2000.
- 17 V Ebert, C Schulz, H R Volpp, *et al.*. Laser diagnostics of combustion processes: from chemical dynamics to technical

- devices[J]. *Isr J Chem*, 1999, 39(1): 1–24.
- 18 M G Allen. Diode laser absorption sensors for gas dynamic and combustion flows[J]. *Meas Sci & Technol*, 1998, 9(4): 545–562.
- 19 V Ebert, J Wolfrum. *Absorption Spectroscopy in Optical Measurements-Techniques and Applications* [M]. Heidelberg: Springer, 2001. 227–265.
- 20 J A Silver, D J Kane. Diode laser measurements of concentration and temperature in microgravity combustion[J]. *Meas Sci & Technol*, 1999, 10(10): 845–852.
- 21 E R Furlong, D S Baer, R K Hanson. Combustion control using a multiplexed diode-laser sensor system[J]. *Proc Comb Inst*, 1996, 26(2): 2851–2858.
- 22 He Ying, Zhang Yujun, Wang Liming, *et al.*. Laser technology for CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O on-line detection in large-scale region[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(1): 0115003.  
何 莹, 张玉钧, 王立明, 等. 大尺度区域 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 的激光在线检测技术[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0115003.
- 23 Qu Dongsheng, Hong Yanji, Wang Guangyu, *et al.*. Measurements of gas temperature and component concentration based on calibration-free wavelength modulation spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1230001.  
屈东胜, 洪延姬, 王广宇, 等. 基于免标定波长调制光谱技术的气体温度和组分浓度测量[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1230001.
- 24 Yuan Song, Kan Ruifeng, He Yaba, *et al.*. Laser temperature compensation used in tunable diode-laser absorption spectroscopy[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0515002.  
袁 松, 阚瑞峰, 何亚伯, 等. 可调谐半导体激光吸收光谱中激光器温度补偿[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0515002.
- 25 H Yang, D Greszik, T Dreier, *et al.*. Simultaneous measurement of liquid water film thickness and vapor temperature using near-infrared tunable diode laser spectroscopy[J]. *Appl Phys B*, 2010, 99(3): 385–390.
- 26 H Yang, D Greszik, I Wlokas, *et al.*. Tunable diode laser absorption sensor for the simultaneous measurement of water film thickness, liquid- and vapor-phase temperature[J]. *Appl Phys B*, 2011, 104(1): 21–27.

栏目编辑:何卓铭