

# 双波长动态液膜厚度与温度同步测量系统

杨荟楠\*, 邓豪, 蒋永, 张月星, 苏明旭

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093

**摘要** 基于半导体激光吸收光谱(DLAS)技术,研制了双波长动态液膜厚度与温度高精度同步测量系统。利用标准具对该系统的测量精度进行验证。结果表明,该系统的液膜厚度和温度的平均测量误差分别为4.58%和1.34%。在此基础上,利用该系统对水平石英玻璃板上的液膜蒸发过程进行研究。结果表明,液膜的平均蒸发速率为 $0.34 \mu\text{m/s}$ ,蒸发速率随液膜温度的升高而增大,且DLAS与图像法和热电偶测得的结果吻合良好。利用该系统对通道中的动态液膜进行研究,在不同液膜温度(308,315,323 K)下,液膜平均厚度基本一致且在1 s内波动11次,液膜温度几乎保持恒定。

**关键词** 测量;光谱技术;半导体激光吸收光谱;液膜;厚度;温度

中图分类号 TK31

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0404011

## Simultaneous Measurement System of Thickness and Temperature of Two-Wavelength Dynamic Liquid Film

Yang Huinan\*, Deng Hao, Jiang Yong, Zhang Yuexing, Su Mingxu

School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

**Abstract** A simultaneous measurement system based on the diode-laser absorption spectroscopy (DLAS) technique is developed to simultaneously measure the thickness and temperature of a dynamic liquid film with high accuracy. The measurement accuracy of this system is validated by a calibration tool and the results show that the average measurement errors of film thickness and temperature are 4.58% and 1.34%, respectively. On this basis, this system is employed to study the evaporation process of the liquid film on a horizontal quartz glass plate and the results indicate that the average evaporation rate of this liquid film is  $0.34 \mu\text{m/s}$  and the evaporation rate increases with the increase of film temperature. Moreover, the results by DLAS, imaging method and thermocouple are well consistent. In addition, the system is applied to the dynamic liquid film in a flow channel and the results disclose that under different film temperatures of 308, 315 and 323 K, the average thicknesses of the liquid film are basically consistent and they fluctuates for 11 times within one second, while the film temperature is almost constant.

**Key words** measurement; spectroscopy technique; diode-laser absorption spectroscopy; liquid film; thickness; temperature

**OCIS codes** 120.6780; 300.6260

## 1 引言

液膜的形成、蒸发和流动现象广泛地存在于各种工业过程中,如热能工程、空调制冷、航空航天、石油化工等相关领域。例如,垂直管式蒸发器中降膜的形成和蒸发<sup>[1]</sup>、泡腾雾化器表面液膜的形成<sup>[2]</sup>、硬盘磁头与磁片表面润滑液膜的流动<sup>[3]</sup>、冷却塔中降膜的流动和冷却<sup>[4]</sup>,以及汽车尾气脱硝的选择性催

化还原系统中尾气排放管上尿素水溶液液膜的形成<sup>[5]</sup>。总之,液膜多参数(厚度、温度等)的同步测量对于设计和优化相关的工业过程至关重要。传统的温度测量方法,如热电偶法,虽然操作简单、价格低廉,但会对被测对象造成干扰,不适用于较薄液膜的测量。液膜厚度的测量方法通常分为两类:接触式和非接触式。接触式测量方法,如电容法和电导法,测量精度和测量范围易受液膜电导率、液膜表面形

收稿日期: 2018-12-18; 修回日期: 2019-01-09; 录用日期: 2019-01-18

基金项目: 国家自然科学基金(51676130,51776129,51306123)

\* E-mail: yanghuinan@usst.edu.cn

状和探针结构参数等因素的影响<sup>[6-7]</sup>。非接触式测量方法主要包括图像法和光学法等。图像法可以利用高分辨率的 CCD (Charge-Coupled Device) 相机采集液膜图像, 将拍摄的图像进行二值化后获得液膜厚度<sup>[8-9]</sup>。然而, 由于相机的景深有限, 拍摄的图像可能会出现离焦模糊, 从而影响测量精度<sup>[10]</sup>。光学法主要基于光的全反射<sup>[11-12]</sup>和激光光谱法, 具有无干扰、高灵敏度和高精度等优点<sup>[13]</sup>。如 Porter 等<sup>[14]</sup>提出了一种双波长中红外激光吸收法同步测量气相燃料的摩尔分数和液体燃料膜厚度。Mignot 等<sup>[15]</sup>基于吸收光谱技术测量了热力学条件下安全壳在发生严重事故时的液膜厚度。Schmidt 等<sup>[16]</sup>开发了一种基于吸收光谱技术的测量系统, 用于测量 150~400 μm 范围内的动态液膜厚度。Pan 等<sup>[17-18]</sup>研制了一种多波长半导体激光吸收光谱 (DLAS) 测量系统, 分别测定了 NaCl 水溶液和尿素水溶液的静态液膜蒸发过程中液膜的厚度、温度和溶质浓度, 但这三个参数中其中一个参数(温度和浓度)必须为已知数。此外, Pan 等<sup>[19]</sup>结合 1412 nm 和 1353 nm 两个波长的半导体激光器测量了已知温度下非透明表面上的液膜蒸发过程中液膜的厚度变化。Yang 等<sup>[20]</sup>通过结合 4 个波数 (6714.57, 7082.89, 7185.59, 7390.13 cm<sup>-1</sup>) 的半导体激光器, 基于 DLAS 技术同步测量了纯水液膜蒸发过程中液膜厚度、温度及液膜上方水蒸气温度。然而, 由于液膜蒸发后期存在剧烈的光束转向现象, 穿过液膜后的透射光无法完全被探测器接收, 从而影响测量精度。上述 DLAS 系统<sup>[17-20]</sup>均不能追踪静态液膜整个蒸发过程中液膜厚度的变化, 并且也无法对动态液膜进行研究。

本文研究了基于双波长-DLAS 技术的动态液膜厚度和温度同步测量系统, 通过采用积分球以避免剧烈的光束转向现象, 从而实现对动态液膜的高精度测量。首先利用已知液膜厚度和温度的标准具对该系统的测量精度进行验证。在此基础上, 对水平放置的石英玻璃板上静态液膜的蒸发过程和不同液膜温度下流道中的动态液膜的流动过程进行研究。

## 2 基本原理

根据比尔-朗伯定律, 波数为  $\nu_i$  的激光  $i$  穿过液膜后的透射率  $\tau(\nu_i)$  为

$$\tau(\nu_i) = (I_{t_i}/I_{o_i}) = \exp(-n)\sigma(\nu_i, T_1)d_1, \quad (1)$$

式中:  $I_{t_i}$  和  $I_{o_i}$  分别为透射光和入射光的强度;  $T_1$  为

液膜温度;  $d_1$  为液膜厚度;  $\sigma(\nu_i, T_1)$  为光谱红外吸收截面。以纯水为研究对象,  $n$  为液态水的物质的量浓度, 可表示为

$$n = \frac{\rho(T_1)}{M}, \quad (2)$$

式中:  $M$  为液态水的摩尔质量;  $\rho(T_1)$  为液态水的密度, 且液态水的密度大小随温度的变化而变化。液态水的密度随温度的变化函数<sup>[21]</sup>为

$$\rho(T_1) = 0.73694 + 0.0019T_1 - 3.73881 \times 10^{-6} T_1^2. \quad (3)$$

综上, 透射率仅取决于两个特定波数下的液膜厚度和温度。因此, 选用两个波长来确定两个未知参数。

由于氢键作用<sup>[22]</sup>, 液态水在近红外区域存在一个宽带的吸收光谱。Yang 等<sup>[23]</sup>测得了在 5500~8000 cm<sup>-1</sup> 范围内不同温度下 (25~75 °C) 的液态水高分辨率的吸收光谱图。在此选用实验室目前可用的激光器 1 (6718.2 cm<sup>-1</sup>) 和激光器 2 (7040.8 cm<sup>-1</sup>)。在不同温度下, 激光 1 和 2 的光谱红外吸收截面  $\sigma(\nu_i, T_1)$  以及与温度的线性拟合如图 1 所示。 $\sigma(\nu_i, T_1)$  的表达式为

$$\sigma(\nu_i, T_1) = a_i + b_i T_1, \quad i = 1, 2, \quad (4)$$

式中:  $a_i$  和  $b_i$  为对应的拟合系数, 如表 1 所示。结果表明, 当波数为 6718.2 cm<sup>-1</sup> 和 7040.8 cm<sup>-1</sup> 时,  $\sigma(\nu_i, T_1)$  与  $T_1$  的线性拟合的决定系数  $R^2$  分别为 0.9950 和 0.9996。由此可见, 红外吸收截面与温度之间存在较好的线性关系。

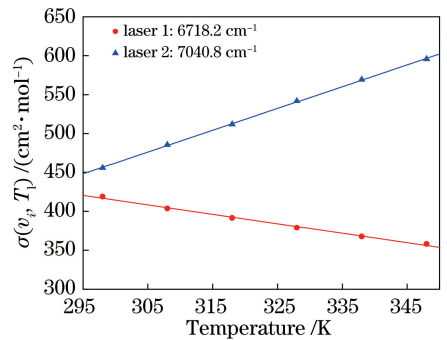


图 1 激光 1 和 2 的红外吸收截面  $\sigma(\nu_i, T_1)$  随温度的变化  
Fig. 1 Infrared absorption cross sections  $\sigma(\nu_i, T_1)$  of lasers 1 and 2 versus temperature

表 1 两个选定波数的液态水吸收截面的拟合参数  
Table 1 Fitting parameters of liquid water absorption cross sections at two selected wavenumbers

Laser	Wavenumber /cm <sup>-1</sup>	$a_i$	$b_i$	$R^2$
1	6718.2	779.21	-1.22	0.9950
2	7040.8	-377.42	2.80	0.9996

通过联立(1)~(4)式,可见透射率仅是关于  $T_1$  和  $d_1$  的函数。

令  $R$  为两个波数对应的透射率的对数比,即

$$R = \frac{\ln[\tau(\nu_1)]}{\ln[\tau(\nu_2)]} = \frac{\ln(I_{t_1}/I_{o_1})}{\ln(I_{t_2}/I_{o_2})} \quad (5)$$

所提双波长液膜测量系统对温度测量的灵敏度取决于  $R$  关于  $T_1$  导数( $dR/dT_1$ )的绝对值。如图 2 所示,随着液膜温度从 298 K 升高到 348 K,灵敏度下降为 1/1.7。在进一步工作中,将通过选择其他波数进一步优化测量系统,提高测量灵敏度和测量精度。通过对  $R$  求导可得

$$dR/dT_1 = \frac{d\sigma_2/dT_1 \times \sigma_1 - d\sigma_1/dT_1 \times \sigma_2}{\sigma_2^2} \quad (6)$$

将(4)式代入(5)式,可得液膜温度  $T_1$  为

$$T_1 = \frac{a_1 - a_2 R}{b_2 R - b_1} \quad (7)$$

若液膜温度  $T_1$  已知,将(7)式代入(5)式可得

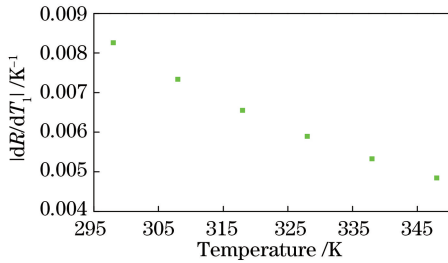


图 2 激光器 1 和激光器 2 的  $|dR/dT_1|$  随温度的变化  
Fig. 2  $|dR/dT_1|$  of lasers 1 and 2 versus temperature

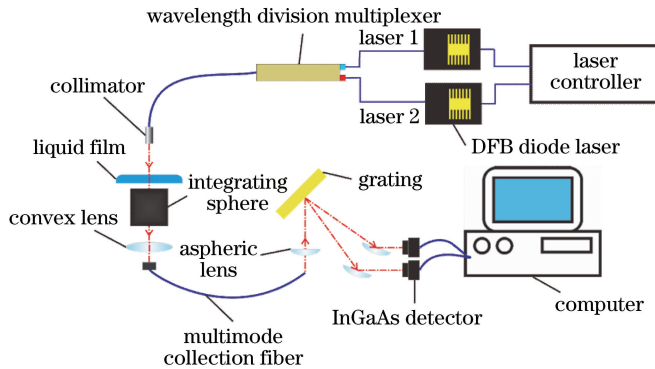


图 3 双波长 DLAS 液膜测量系统示意图

Fig. 3 Schematic of two-wavelength DLAS liquid film measurement system

### 3.2 标准具验证

利用标准具<sup>[23]</sup>对双波长 DLAS 液膜测量系统的测量精度进行验证。当标准具已知液膜厚度(即两水平石英玻璃板间距)为 200, 400, 600, 800, 1000  $\mu\text{m}$ , 液膜温度为 308, 315, 323 K 时, 进行三次重复测量, 结果如图 4 所示。图中实心符号表示

液膜厚度  $d_1$  为

$$d_1 = \frac{\ln[\tau(\nu_1)]}{-(a_1 + b_1 T_1) \cdot \rho(T_1)/M} \quad (8)$$

## 3 实验装置和结果

### 3.1 测量系统

双波长 DLAS 液膜测量系统如图 3 所示。通过激光控制器(PRO8000, Thorlabs, 美国)控制两个分布式反馈(DFB)半导体激光器(NLK1S5GAAA, NEL, 日本)的温度和电流, 使之保持恒定以确保输出激光波数分别为 6718.2  $\text{cm}^{-1}$  和 7040.8  $\text{cm}^{-1}$ 。利用波分复用器(WLF-FC-PC, AIRXUN, 中国)耦合的两束激光通过准直器(F280APC-C, Thorlabs, 美国)聚焦后穿过液膜。在透射光路上放置积分球(IS200, Thorlabs, 美国), 积分球的内壁涂有在近红外区域反射率高于 98% 的聚四氟乙烯基高反射物质。由于积分球的入口直径为 12.5 mm, 穿过液膜后的透射光可以被积分球全部接收, 从而可以避免剧烈的光束转向现象。从积分球出来的光经过凸透镜(CN18080815-01, Union Optic, 武汉)的会聚进入多模光纤(BFL37-400, Thorlabs, 美国), 再经过非球面镜(F230FC-C, Thorlabs, 美国)准直后利用光栅(54851, Edmund, 美国)分开被耦合的两束激光, 两个 InGaAs 光电探测器(PDA10CS-ES, Thorlabs, 美国)用来接收光。该系统采样率为 1 kHz, 数据采集和后处理均由自编的 LabVIEW 程序完成。

DLAS 测得的液膜温度, 空心符号表示 DLAS 测得的液膜厚度, 虚线表示热电偶(TC)测得的液膜温度。验证结果表明, 随着液膜厚度的增加, 热电偶测得的液膜温度略微升高, DLAS 测得的液膜温度与之类似。这可能是由液膜还未与周围环境达到热平衡就开始测量造成的。三次重复测量中, 当已知液

膜温度为 315 K 时,液膜厚度测量值的平均标准偏差最大,为 1.6  $\mu\text{m}$ ,且当已知液膜厚度为 1000  $\mu\text{m}$  时,液膜厚度测量值的标准偏差最大,为 3.6  $\mu\text{m}$ 。与此同时,当已知液膜温度为 308 K 时,液膜温度测量值的平均标准偏差最大,为 1.1 K,且当已知液膜厚度为 400  $\mu\text{m}$  时,液膜温度测量值的标准偏差最

大,为 1.5 K。此外,液膜厚度和温度的测量值和相应的已知参数均吻合良好,DLAS 测量得到的液膜厚度和温度平均误差分别为 4.58% 和 1.34%,这与前文所述文献[17-18,20]中提出的测量系统的精度相似。然而,前期工作中的测量系统均无法避免剧烈的光束转向现象。

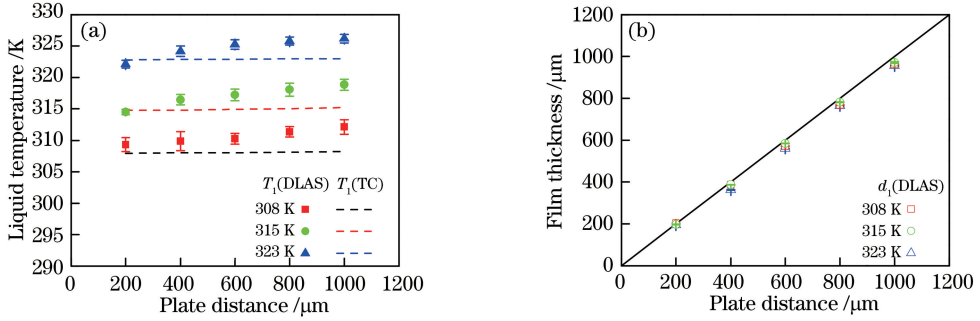


图 4 标准具验证实验结果。(a)液膜温度;(b)液膜厚度

Fig. 4 Experimental results of validation by calibration tool. (a) Liquid film temperature; (b) liquid film thickness

### 3.3 静态液膜研究

利用该测量系统研究水平石英玻璃板上的液膜蒸发过程,同时采用图像法和热电偶分别测量液膜厚度和温度,并与 DLAS 测得的结果进行比较。其中,DLAS 的测点设置在水平石英玻璃板中心,图像法采用的 CCD 相机的像素为 1.30 万(XF-MT 0.8 $\times$ 110,IMI TECH,韩国),K 型热电偶的直径为 0.1 mm,通过热风枪(AT-A882D,ATTEN,深圳)(出口温度  $T_0$  为 340 K)对水平石英玻璃板底部中心,即 DLAS 测点位置进行加热。为了避免热电偶对液膜形状的影响,将热电偶置于距离 DLAS 的测点 30 mm 处。

图 5 为激光 1 和 2 在液膜蒸发过程中的透射光强 ( $I_{t1}$  和  $I_{t2}$ ) 和室温下的入射光强 ( $I_{o1}$  和  $I_{o2}$ ) 变化

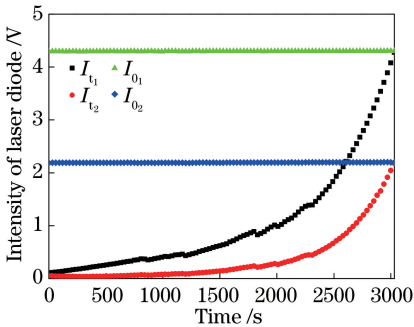


图 5 激光 1 和 2 在液膜蒸发过程中的透射光强和室温下的入射光强

Fig. 5 Time-dependent transmitted intensities during liquid film evaporation process and incident intensities at room temperature for lasers 1 and 2

图。结果表明,在蒸发过程中透射光强不断增大,根据(5)、(7)、(8)式,可以计算得到液膜厚度和温度。噪声对液膜厚度和温度测量精度造成的影响分别为 1.8  $\mu\text{m}$  和 0.2 K,因此在此不考虑噪声的影响。

图 6 为液膜蒸发过程中采用不同方法测得的液膜厚度随时间的变化情况,可见该测量系统能追踪静态液膜整个蒸发过程中液膜厚度的变化。为了避免该图数据过载,将 DLAS 测得的数据以每 30 s 一个数据点显示。蒸发过程初期(0~600 s),蒸发速率较低(0.29  $\mu\text{m}/\text{s}$ ),液膜温度从室温逐渐升高到 313.4 K 左右。蒸发过程中期(600~3600 s),蒸发速率略微增加(0.34  $\mu\text{m}/\text{s}$ ),液膜温度达到一个平均温度为 317.9 K 的平台。由于液膜收缩,液膜厚度

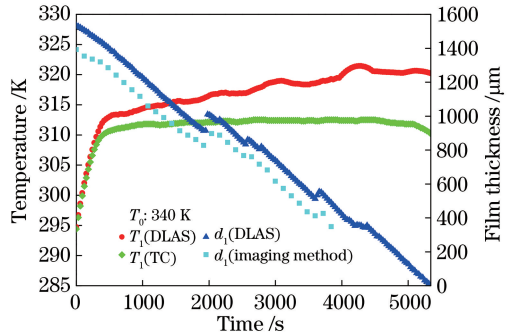


图 6 液膜蒸发过程中不同方法测得的液膜厚度和温度随时间的变化

Fig. 6 Time-resolved measurements of liquid film temperature and liquid film thickness during liquid film evaporation process obtained by different methods

和温度存在一定的波动。液膜收缩是由于表面张力的影响引起了液膜表面积减小。液膜厚度的急剧上升是由短时间内表面积减小、液膜体积恒定导致的。液膜温度的波动是由 DLAS 测点附近的温度分布不均匀以及收缩引起的液膜重新排布导致的。此外,由热电偶获得的液膜平均温度为 312.1 K,其与 DLAS 测得的液膜温度的平均偏差为 5.8 K。这可能归因于两种测量方法的测点位置不同,且热风枪的出口温度不均匀。蒸发过程末期(3600 ~ 5340 s),由于液膜急剧收缩,液膜温度波动剧烈,蒸发率达到最大( $0.39 \mu\text{m/s}$ )。综上所述,DLAS 测得的整个蒸发过程的液膜平均蒸发速率为  $0.34 \mu\text{m/s}$ ,

并且蒸发速率随着液膜温度的升高而增加。

图 7 为在液膜蒸发过程中 4 个选定时刻(960, 2280, 3000, 3600 s)的阴影图像,其中白色水平线表示水平石英玻璃板和液膜的界面,灰点表示 DLAS 系统的测点,  $t$  表示拍摄图像的时间。如图 7 所示,厚度小于  $300 \mu\text{m}$  的液膜不能被测量,并且 DLAS 和图像法测得的液膜厚度的平均偏差为  $105.8 \mu\text{m}$ 。这是由于为了拍摄清晰的底板图像,将相机的焦平面设置在水平石英玻璃板的边缘,并且位于玻璃板中心的液膜的垂直中心线不在相机的景深区域中,从而引起离焦模糊。因此,图像法采用的相机景深有限会影响其测量范围和精度。

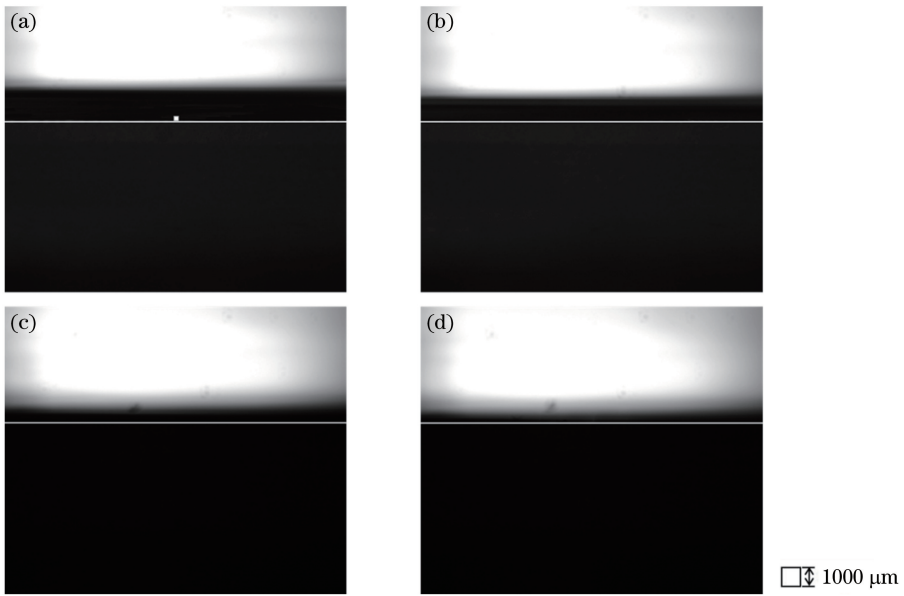


图 7 液膜蒸发过程中的 4 个特定时刻的阴影图像。(a)  $t=960 \text{ s}$ ; (b)  $t=2280 \text{ s}$ ; (c)  $t=3000 \text{ s}$ ; (d)  $t=3600 \text{ s}$

Fig. 7 Shadow graphs at four specific instants during liquid film evaporation process. (a)  $t=960 \text{ s}$ ; (b)  $t=2280 \text{ s}$ ; (c)  $t=3000 \text{ s}$ ; (d)  $t=3600 \text{ s}$

### 3.4 动态液膜研究

进一步利用双波长 DLAS 测量系统研究不同温度下流道中动态液膜的液膜厚度和温度的变化,实验装置如图 8 所示。流道的入口通过塑料管(直径为  $0.5 \text{ cm}$ )与蠕动泵(流速为  $60 \text{ mL/min}$ )相连接。为了能在整个流道中形成液膜,在距离入口  $30 \text{ mm}$ 处设置凸块,此外,DLAS 系统的测点距离入口  $120 \text{ mm}$ 。出口端设有引流装置,以提供稳定的流动。为了避免热电偶对流动液膜的流型影响,该实验没有采用热电偶对流动液膜温度进行同步测量。装有定量纯水的恒温水箱位于流道出口的下方,可以通过改变恒温水箱的温度( $T_w = 308, 315, 323 \text{ K}$ )来控制液膜温度。恒温水箱的出口连接蠕动泵的入口,蠕动泵出口与流道入口相连接以形成

循环流动。

图 9 为在三个不同液膜的温度下( $308, 315, 323 \text{ K}$ )DLAS 测得的流道中液膜厚度(实线)和温度(虚线)随时间的变化图。如图所示,液膜厚度的变化呈正弦分布,这归因于蠕动泵转动时泵头里的两个转辊子之间的一段泵管会形成枕形流体,从而使泵在运作时产生正弦形的脉冲流。DLAS 测得三个温度下的液膜平均厚度分别为  $624.9, 628.6, 625.7 \mu\text{m}$ 。在  $1 \text{ s}$  的时间内,液膜厚度的波动约为 11 次,液膜厚度的平均波动振幅分别为  $62.7, 66.3, 71.2 \mu\text{m}$ ,且最大波峰处对应的波动幅值分别为  $79.8, 74.9, 85.9 \mu\text{m}$ ,最大波谷处对应的波动幅值分别为  $-78.6, -81.0, -91.9 \mu\text{m}$ 。DLAS 测得三个温度下的液膜平均温度分别为  $306.9, 313.4,$

321.2 K,与恒温水箱的温差分别为 1.1,1.6,1.8 K,这可能与水从恒温水箱出口流到流道入口的热量损失有关。在三个温度下,1 s 时间内的液膜温度几乎

保持恒定,这可能与短时间内由热量损失引起的液膜温度的下降不明显有关。

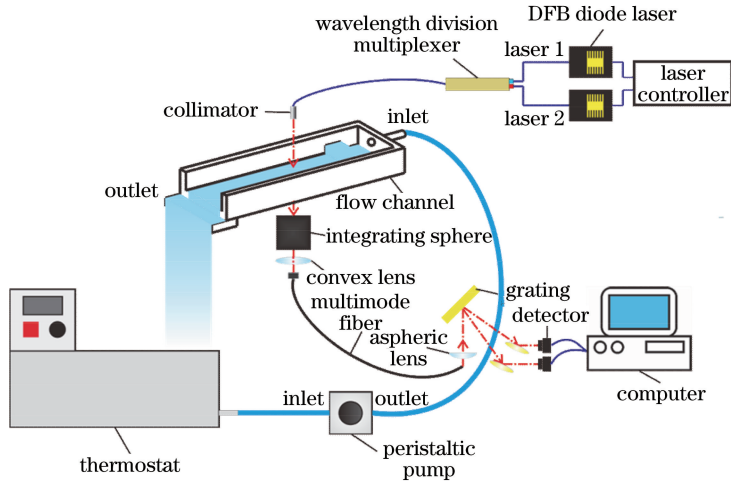


图 8 流道中动态液膜测量实验装置图

Fig. 8 Experimental setup of dynamic liquid film measurement in flow channel

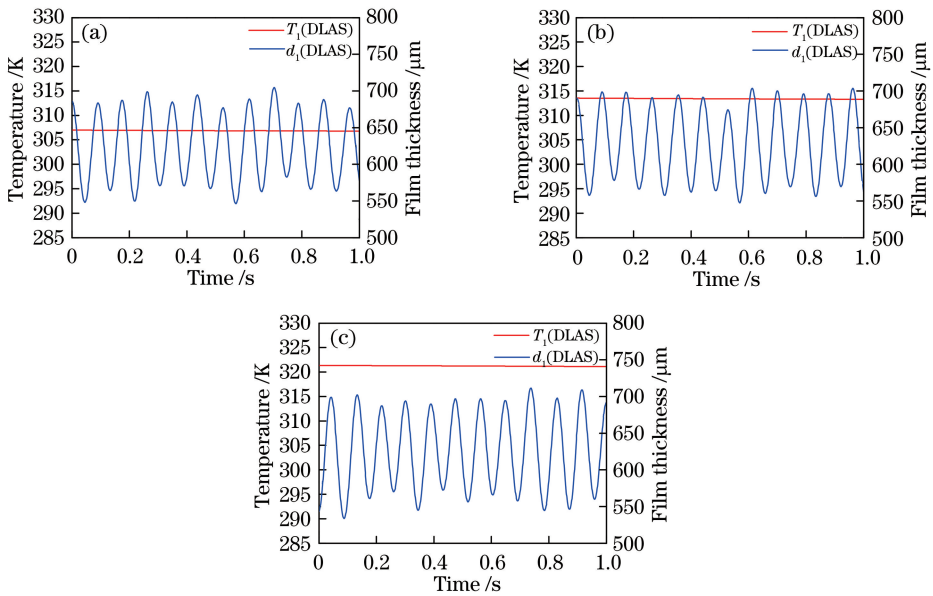


图 9 不同液膜温度下流道中液膜厚度和温度随时间的变化。(a)  $T_w=308$  K; (b)  $T_w=315$  K; (c)  $T_w=323$  K

Fig. 9 Liquid film thickness and temperature in flow channel versus time for different liquid film temperatures.

(a)  $T_w=308$  K; (b)  $T_w=315$  K; (c)  $T_w=323$  K

## 4 结 论

通过结合两个不同波数 ( $6718.2\text{ cm}^{-1}$  和  $7040.8\text{ cm}^{-1}$ ) 的半导体激光器,研究了一种基于 DLAS 的测量系统,进行同步测量液膜厚度和温度。采用积分球以避免剧烈的光束转向现象,实现了对动态液膜的高精度测量。利用已知液膜厚度和温度的标准具验证系统的测量精度,其结果表明,该系统测得的液膜厚度和温度与相应的已知参数之间的平

均误差分别为 4.58% 和 1.34%。在此基础上,利用该测量系统研究水平石英玻璃板上静态液膜的蒸发过程,并采用图像法和热电偶对 DLAS 测量结果进行验证。结果表明,该系统可以追踪静态液膜整个蒸发过程中液膜厚度的变化。在热风枪出口温度为 340 K 的条件下,液膜的平均蒸发速率为  $0.34\text{ }\mu\text{m/s}$ ,液膜的蒸发速率随液膜温度的升高而增大,且 DLAS 与热电偶和图像法测得的液膜温度和厚度的变化趋势一致,结果良好吻合。此外,利用该

测量系统研究不同温度下流道中动态液膜的液膜厚度和温度。结果表明,当液膜温度为 308, 315, 323 K 时, 1 s 时间内液膜厚度有 11 次波动, 液膜温度几乎保持恒定。由此可见, 该测量系统在动态液膜研究中也表现出良好的性能。

## 参 考 文 献

- [1] Bu X B, Ma W B, Huang Y F. Numerical study of heat and mass transfer of ammonia-water in falling film evaporator[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2012, 48(5): 725-734.
- [2] Alizadeh Kaklar Z, Ansari M R. Numerical analysis of the internal flow and the mixing chamber length effects on the liquid film thickness exiting from the effervescent atomizer[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2018: 1011-1019.
- [3] Liu Q Q, Yan F, Guo Y. Dynamic observation of nanometer-thick lubricant films based on improved ellipsometric microscope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0812003.  
刘卿卿, 严飞, 郭颖. 基于改进椭圆偏振显微镜的纳米润滑薄膜动态观测[J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0812003.
- [4] Petruichik A I, Solodukhin A D, Fisenko S P. Simulation of cooling of water droplet and film flows in large natural wet cooling towers[J]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2001, 74(1): 62-68.
- [5] Grout S, Blaisot J B, Pajot K, *et al.* Experimental investigation on the injection of an urea-water solution in hot air stream for the SCR application: evaporation and spray/wall interaction[J]. *Fuel*, 2013, 106: 166-177.
- [6] Ambrosini W, Forgione N, Oriolo F. Statistical characteristics of a water film falling down a flat plate at different inclinations and temperatures[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2002, 28(9): 1521-1540.
- [7] Wang W W, Li C G, Wang X J, *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] Karimi G, Kawaji M. Flooding in vertical counter-current annular flow[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2000, 200(1/2): 95-105.
- [9] Yan W P, Li H T, Ye X M, *et al.* A study of the transient non-contact measurement of vertical free-falling liquid-film thickness[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2007, 22(4): 380-384.  
周维平, 李洪涛, 叶学民, 等. 垂直自由下降液膜厚度的瞬时无接触测量研究[J]. *热能动力工程*, 2007, 22(4): 380-384.
- [10] Zhou W, Hu J R, Cai X S. Measurement of multi-parameters for dilute granular phase in pipes using image method [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2015, 36(3): 541-544.  
周骛, 胡嘉睿, 蔡小舒. 管道内稀疏颗粒相图像法多参数测量[J]. *工程热物理学报*, 2015, 36(3): 541-544.
- [11] Hurlburt E T, Newell T A. Optical measurement of liquid film thickness and wave velocity in liquid film flows[J]. *Experiments in Fluids*, 1996, 21(5): 357-362.
- [12] Shedd T A, Newell T A. Automated optical liquid film thickness measurement method[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1998, 69(12): 4205-4213.
- [13] Nie W, Kan R F, Yang C G, *et al.* Research progress on the application of tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(9): 0911001.  
聂伟, 阚瑞峰, 杨晨光, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱技术的应用研究进展[J]. *中国激光*, 2018, 45(9): 0911001.
- [14] Porter J M, Jeffries J B, Hanson R K. Mid-infrared laser-absorption diagnostic for vapor-phase fuel mole fraction and liquid fuel film thickness[J]. *Applied Physics B*, 2011, 102(2): 345-355.
- [15] Mignot G, Dupont J, Paranjape S, *et al.* Measurement of liquid films thickness in a condensing and re-evaporating environment using attenuation of near infrared light[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2018, 336: 64-73.
- [16] Schmidt A, Kühreich B, Kittel H, *et al.* Laser based measurement of water film thickness for the application in exhaust after-treatment processes[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2018, 71: 288-294.
- [17] Pan R, Jeffries J B, Dreier T, *et al.* Measurements of liquid film thickness, concentration and temperature of aqueous NaCl solution by NIR absorption spectroscopy[J]. *Applied Physics B*, 2016, 120: 4.
- [18] Pan R, Jeffries J B, Dreier T, *et al.* Measurements of liquid film thickness, concentration, and temperature of aqueous urea solution by NIR absorption spectroscopy[J]. *Applied Physics B*, 2016, 122(1): 4.
- [19] Pan R, Brocksieper C, Jeffries J B, *et al.* Diode

- laser-based standoff absorption measurement of water film thickness in retro-reflection[J]. Applied Physics B, 2016, 122: 249.
- [20] Yang H, Greszik D, Wlokas I, *et al.* Tunable diode laser absorption sensor for the simultaneous measurement of water film thickness, liquid- and vapor-phase temperature [J]. Applied Physics B, 2011, 104: 21.
- [21] Lide D R. CRC handbook of thermophysical and thermochemical data [M]. Boca Raton: CRC Press, 1994.
- [22] Hale G M, Querry M R. Optical constants of water in the 200-nm to 200- $\mu\text{m}$  wavelength region[J]. Applied Optics, 1973, 12(3): 555-563.
- [23] Yang H, Greszik D, Dreier T, *et al.* Simultaneous measurement of liquid water film thickness and vapor temperature using near-infrared tunable diode laser spectroscopy[J]. Applied Physics B, 2010, 99(3): 385-390.