

基于激光吸收光谱法的自由水面蒸发研究

莫小宝¹ 向柳¹ 黄志² 胡雪蛟^{1,3}

¹武汉大学动力与机械学院, 湖北 武汉 430072

²北京科技大学机械工程学院, 北京 100083

³水力机械过渡过程教育部重点实验室, 湖北 武汉 430072

摘要 蒸发是自然界和工程领域广泛存在的物理现象,直接测量蒸气在蒸发过程中运移与分布的规律具有重要意义。选择水蒸气在 1370 nm 附近的吸收谱线,在不同风速情况下,利用可调谐半导体激光吸收光谱技术(TDLAS),对自由水面蒸发时水蒸气分压沿垂直水面的高度方向进行了原位、非接触测量。测量结果表明,水蒸气运移和水分压垂直水面分布符合相似理论的预测,偏差在 4% 以内。

关键词 测量; 水分压分布; 吸收光谱; 蒸发; 边界层

中图分类号 TK314

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1015003

Study on Evaporation from a Free Water Surface Using Laser Absorption Spectroscopy

Mo Xiaobao¹ Xiang Liu¹ Huang Zhi² Hu Xuejiao^{1,3}

¹School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China

²School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

³Key Laboratory of Hydraulic Transients, Ministry of Education, Wuhan, Hubei 430072, China

Abstract Evaporation is ubiquitous in nature and engineering. The direct measurements of vapor transport during evaporation are of great importance. A tunable diode laser emitting at around 1370 nm is used to in situ detect the water evaporation from a free water surface subject to crossing wind at various velocities. Results show that the observed profiles of water vapor partial pressure agree with the prediction of the similarity principle, with overall deviation less than 4%.

Key words measurement; vapor pressure profile; absorption spectroscopy; evaporation; boundary layer

OCIS codes 300.6260; 300.1030; 140.2020; 120.5475

1 引言

蒸发过程不仅在自然界中广泛存在,如全球水循环、生物蒸腾和气候变化等,也广泛存在于化工过程、原子能技术和光电子加工等各个工程领域。蒸发过程是典型的气液两相相变传质过程,涉及到相变界面附近液相和气相两种不同传质行为。对于蒸发过程中的液相行为,已有许多研究者展开了相关研究。比如, Yang 等^[1-2]利用非接触式的光学测量手段研究了蒸发时液膜的厚度和接触角及其对传热传质的影响。Smith 等^[3]利用拉曼光谱研究了液滴的蒸发,证明了高能态分子更加容易蒸发。Innocenzi 等^[4]利用红外光谱观测了液滴在不同温度情况下的蒸发过程。不同的固体表面对液体蒸发的影响也已为很多学者关注^[5-6]。但是关于蒸发过程中气相行为的研究,除了 Yang 等^[1,7]对气液界面附近的气体温度进行了测量,直接测量数据仍然

收稿日期: 2015-03-09; 收到修改稿日期: 2015-05-04

基金项目: 国家自然科学基金(50906064)、教育部博士点基金(20100141110022)、教育部留学回国人员科研启动基金资助项目

作者简介: 莫小宝(1987—),男,博士研究生,主要从事激光测量诊断及传热传质研究。E-mail: mxh@whu.edu.cn

导师简介: 胡雪蛟(1975—),男,教授,博士生导师,主要从事传热传质及热物性光学测量等方面的研究。

E-mail: xjhu@whu.edu.cn(通信联系人)

很少见。部分原因在于蒸发过程中气相组分往往比较复杂,而且大都无色透明,观察和测量困难。

可调谐半导体激光吸收光谱技术(TDLAS)是近年来兴起的一种高精度的气相分析测量手段,其利用激光的窄线宽,在扫描波长时可以精细地分辨出每一窄波段上的吸收强度,进而根据比尔-朗伯定律得到被测气体组分的浓度、温度等物理参数,已经在许多方面有所应用^[8-11]。本文利用TDLAS技术测量自由水表面蒸发时的水蒸气运移规律,研究自由水表面沿垂直水面方向的高程水分压变化情况,以希望为相关研究和工程应用提供一种新的测量方法及更为精细的基础数据。

2 TDLAS基本原理

气体分子的内在结构决定了其特有的自然振动频率。当入射光束刚好满足待测气体分子的自然振动频率时,该分子便会吸收入射光束的能量。

当具有一定强度 $I_0(\nu)$ 的光束通过吸收池时,由于微量气体介质的吸收作用,光束会产生衰减,如图1所示。根据比尔-朗伯定律^[12-13],其透射强度 $I(\nu)$ 可以表示为

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp[-PS(T)\phi_\nu LX], \quad (1)$$

式中 ν 为激光频率,单位为 cm^{-1} , P 为总压强,单位为 atm ($1 \text{ atm} = 0.1 \text{ MPa}$), L 为光程,单位为 cm , $S(T)$ 为谱线的线强度,单位为 $\text{cm}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}$,表征了该谱线的吸收能力,是温度的单值函数, ϕ_ν 为线型函数,单位为 cm ,且 $\int_{-\infty}^{+\infty} \phi_\nu d\nu = 1$, X 为组分分子浓度。当其他参数确定后,气体浓度只与吸收曲线的面积 A 呈正比,即

$$X = \frac{A}{PS(T)L}, \quad (2)$$

式中 $A = -\int_{-\infty}^{+\infty} \ln \left[\frac{I(\nu)}{I_0(\nu)} \right] d\nu$, 为吸收曲线的面积。

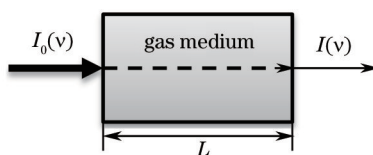


图1 激光吸收光谱测量原理示意图

Fig.1 Schematic of laser absorption spectroscopy measurements

3 实验研究

3.1 实验装置

实验系统如图2所示,主要由半导体激光器、探测器、激光控制器、数据采集卡、准直透镜、盛水容器、升降台、风扇、前置放大器和计算机组成。这里选择发射功率为 10 mW 、中心波长为 1370 nm 的半导体激光器进行实验测量。激光控制器的温度控制模块精密控制激光器的温度^[14],使激光器中心辐射波长稳定在 1370.967 nm ,驱动模块输出频率为 4 Hz 的锯齿波扫描电流驱动激光器工作。激光器发出的光经过准直透镜后通过水表面上一定高度处,再被探测器所接收。探测器将光信号转换为电信号,经过前置放大后,通过数

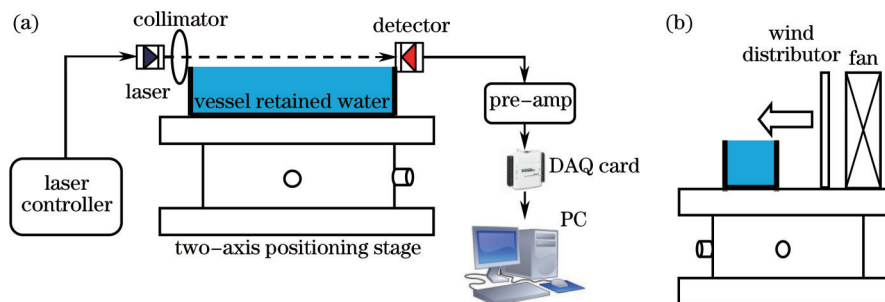


图2 实验系统简图。(a) 正视图;(b) 侧视图

Fig.2 Schematic illustration of experimental setup. (a) Front view; (b) side view

据采集卡将信号送入计算机进行数据处理。

容器中盛满去离子水,再利用升降台调节容器高度。具体做法是调节升降台使液面从下往上升高,当显示激光强度值出现降低时,说明已经有部分激光被液面遮挡,此时激光的位置当作液面的起始高度。开启风扇,通过供电电压调节风速,在风扇前面利用布风器使风速分布均匀,利用风速仪进行风速的测量。待容器中水分蒸发稳定后,开始测量水蒸气分压。调节升降台使液面下降,改变测量点离水面的高度继续测量,依此重复下去。为了提高信噪比,十次扫描信号进行平均得到一次测量结果,每个高度位置连续测量五次,再将五次结果进行平均。如此测量在不同的风速下,水蒸气分压沿高度的变化情况。

这里利用环境水分压和环境温度对应的饱和分压对系统进行标定,标定时采用了 testo 608-H1 型号的温湿度计,其温度测量精度为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿度测量精度为 $\pm 3\%$ 。测量得到的水分压 P 跟吸收曲线面积 A 之间的关系可以表示为

$$P = \frac{A - A_2}{A_1 - A_2}(P_1 - P_2) + P_2, \quad (3)$$

式中 A_1 、 A_2 分别为环境温度对应饱和分压和环境水分压的吸收曲线面积, P_1 、 P_2 分别为环境温度对应饱和分压和环境水分压。

3.2 实验结果与分析

盛水容器长 15 cm、宽 4 cm,位于容器中心处的激光沿容器长边穿过水面。利用温湿度计(testo 608-H1)测出环境温度为 26.6 $^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 38.2%(对应空气中饱和水分压为 3484.4 Pa),整个实验装置置于大气环境中,总压强为 1 atm。图 3 所示为环境中的吸收信号曲线,具有明显的吸收峰,且噪音小,可直接采用该波长吸收信号进行计算。在图 3(b)中,测量结果的信噪比约为 13.2,当信噪比为 1 时,系统达到其测量下限,因此,根据已知条件,可以得到系统的测量下限为 100.8 Pa。同时,系统能够在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内正常工作。

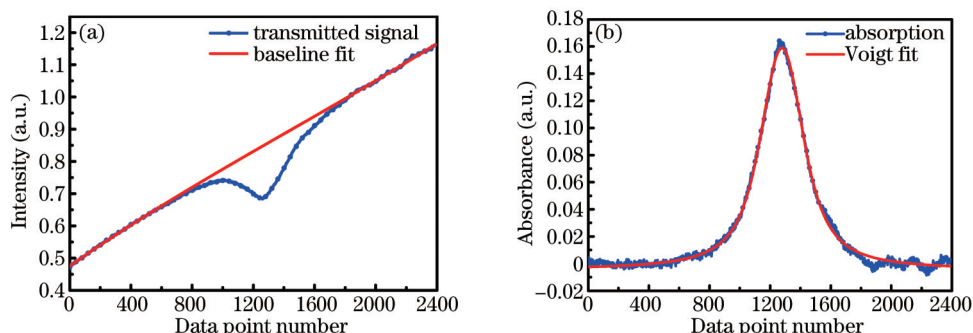


图 3 实验获得的水蒸气直接吸收信号(十次采样平均后的结果)。(a) 透射信号和拟合基线; (b) 吸收光谱和 Voigt 拟合

Fig.3 Direct absorption results of water vapor (averaged over ten scans). (a) Transmitted signal and baseline fit; (b) absorption spectra and Voigt fit

图 4 中离散点为水蒸气分压沿高度方向分布的测量结果。总的测量高度距水面约为 22.5 mm,在水面处,水分压最大,随着距离增加,分压降低。当风速由 0.2 m/s 增加到 2.1 m/s 时,整个水蒸气传递的浓度边界

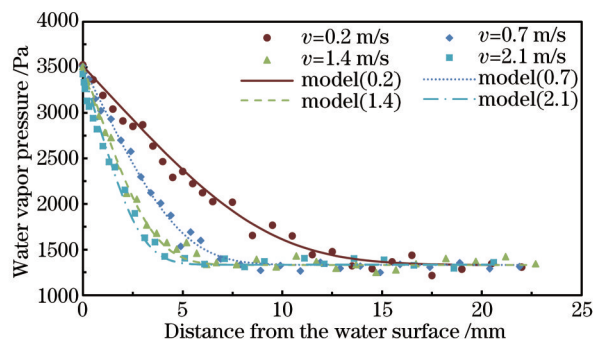


图 4 水蒸气分压沿高程分布情况

Fig.4 Water vapor profile

层也迅速变小。图4中曲线为理论预测结果。

3.3 理论分析

基本假设：

- 1) 蒸发速率比较小,在测量过程中水面下降以及蒸发对流动的影响均可以忽略不计。
- 2) 整个物理场处于稳态,环境压力为 1 atm,没有压力梯度。

于是,物理模型可以简化为横掠平行平板的流动和蒸发过程,如图5所示,图中 δ 和 δ_c 分别为速度边界层厚度和浓度边界层厚度。

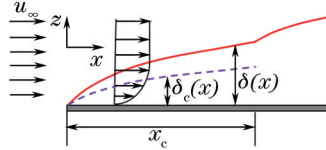


图5 边界层的发展

Fig.5 Development of the boundary layer

根据实验中已知条件,当风速最大为 $u_\infty=2.1$ m/s,在距离容器边沿 2 cm 处,雷诺数为 $Re=2625$ (临界雷诺数 $Re_c=5\times 10^5$),整个流动处于层流区,因此边界层方程式可以简化为

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial z} = \nu_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}, \quad (5)$$

$$u \frac{\partial P}{\partial x} + v \frac{\partial P}{\partial z} = D \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}. \quad (6)$$

(4)~(6)式分别为连续性方程、动量方程和分压方程,其中 ν_v 为运动粘性系数, D 为组分的质量扩散系数。利用布拉修斯方法^[15],速度分量用流函数 $\psi(x,y)$ 定义,即

$$u \equiv \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad v \equiv \frac{\partial \psi}{\partial x}. \quad (7)$$

动量方程根据相似性可以简化为一个三阶的常微分方程

$$2 \frac{d^3 f}{d\eta^3} + f \frac{d^2 f}{d\eta^2} = 0, \quad (8)$$

式中 $f(\eta) = \frac{\psi}{u_\infty \sqrt{\nu_v x / u_\infty}}$, $\eta = z \sqrt{u_\infty / (\nu_v x)}$,适用边界条件为

$$\left. \frac{df}{d\eta} \right|_{\eta=0} = f(0) = 0, \quad \left. \frac{df}{d\eta} \right|_{\eta \rightarrow \infty} = 1. \quad (9)$$

由(7)式和(8)式可以解出速度边界层的分布情况,知道速度边界层的情况,就可以求解分压方程。设定无量纲压力 $P^* = (P - P_s) / (P_\infty - P_s)$,其中 P_s 为气液界面处水分压, P_∞ 为主流区水分压。分压方程(5)式可以简化为一个二阶常微分方程

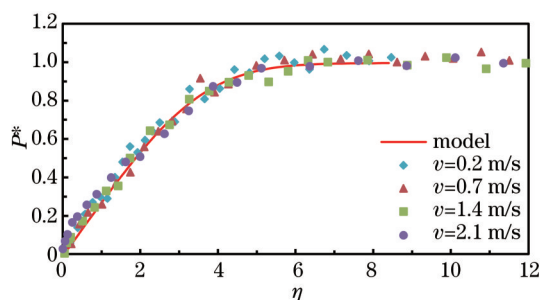
$$\frac{d^2 P^*}{d\eta^2} + \frac{S_c}{2} f \frac{dP^*}{d\eta} = 0, \quad (10)$$

式中 S_c 为施密特数,适用边界条件为

$$P^*(0) = 0 \text{ and } P^*(\infty) = 1. \quad (11)$$

将(7)式和(8)式的求解结果代入(9)式,再根据边界条件可以解出组分分压在边界层的分布情况。根据以上分析,可以求解出无量纲分压 P^* 随无量纲高度 η 的变化关系,如图6所示。图中曲线为相似理论模型计算所得,数据点为在不同风速下的测量结果。可以看出,无量纲压力与无量纲高度的关系不随风速变化而变化,测量结果符合相似理论的预测。

结合实验中的具体参数,可以求出水面水分压沿高程的分布情况,如图4中曲线所示,从图中可以看出,在不同的风速情况下,理论结果与实验测量结果吻合较好。

图6 无量纲水分压 P^* 随无量纲高度 η 变化关系Fig.6 Dependence of dimensionless water vapor P^* on dimensionless height η

4 结 论

本文利用TDLAS方法对不同风速情况下自由水面蒸发过程的气相传质规律进行了原位测量和分析研究。结果表明,随着风速的增加,水分浓度边界层变薄,气相传质加速,水蒸气分压沿水面垂直高度方向的变化规律与相似理论的预测吻合。此外值得注意的是,TDLAS方法具有原位测量和非接触的特点,能够用来揭示蒸发过程中传统方法很难观测的细节,有望成为多组分气相传质和相变过程研究的有效实验手段。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 D Zhou, T Gambaryan-Roisman, P Stephan. Measurement of water falling film thickness to flat plate using confocal chromatic sensing technique[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2009, 33(2): 273-283.
- 3 J D Smith, C D Cappa, W S Drisdell, *et al.*. Raman thermometry measurements of free evaporation from liquid water droplets[J]. J Am Chem Soc, 2006, 128(39): 12892-12898.
- 4 P Innocenzi, L Malfatti, M Piccinini, *et al.*. Water evaporation studied by in situ time-resolved infrared spectroscopy[J]. J Phys Chem A, 2009, 113(12): 2745-2749.
- 5 Z Huang, Y Lu, H Qin, *et al.*. Rapid synthesis of wettability gradient on copper for improved drop-wise condensation[J]. Adv Eng Mater, 2012, 14(7): 491-496.
- 6 Y S Yu, Z Wang, Y P Zhao. Experimental and theoretical investigations of evaporation of sessile water droplet on hydrophobic surfaces [J]. J Colloid Interface Sci, 2012, 365(1): 254-259.
- 7 F Duan, C A Ward. Investigation of local evaporation flux and vapor-phase pressure at an evaporative droplet interface[J]. Langmuir, 2009, 25(13): 7424-7431.
- 8 Li Ning. Research on Gas Detection and 2D Distribution Reconstruction by Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy Technique [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
李 宁. 基于可调谐激光吸收光谱技术的气体在线检测及二维分布重建研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- 9 Yuan Song, Kan Ruifeng, He Yabai, *et al.*. Tunable diode laser spectroscopy system for carbon dioxide monitoring[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1208003.
袁 松, 阚瑞峰, 何亚柏, 等. 基于可调谐半导体激光光谱大气CO₂监测仪[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1208003.
- 10 Yang Huinan, Guo Xiaolong, Su Mingxu, *et al.*. Liquid-water film-thickness on line measurement in a flow channel by TDLAS[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1208010.
杨荟楠, 郭晓龙, 苏明旭, 等. 基于TDLAS技术在线测量气流道内液膜动态厚度[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1208010.
- 11 Kan Ruifeng, Liu Wenqing, Zhang Yujun, *et al.*. Tunable diode laser absorption spectrometer monitors the ambient methane with high sensitivity[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(9): 1217-1220.
阚瑞峰, 刘文清, 张玉钧, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱法监测环境空气中甲烷的浓度变化[J]. 中国激光, 2005, 32(9): 1217-1220.
- 12 Jia Zhen'an, Wang Junfeng, Zhou Hong, *et al.*. Research on optical fiber hydrogen sulfide gas detection with absorption system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(7): 073001.

- 贾振安, 王俊锋, 周 红, 等. 吸收型光纤硫化氢气体检测研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(7): 073001.
- 13 Chen Jiuying, Liu Jianguo, He Yabai, *et al.*. Scanning frequency optimization of laser absorption spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0230003.
- 陈玖英, 刘建国, 何亚柏, 等. 激光吸收光谱技术中扫描频率的选择[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0230003.
- 14 Wei Min, Liu Jianguo, Kan Ruifeng, *et al.*. Study on detection of greenhouse gases based on quantum cascade laser[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1230003.
- 魏 敏, 刘建国, 阚瑞峰, 等. 基于量子级联激光器的温室气体测量方法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1230003.
- 15 F P Incropera. Fundamentals of Heat and Mass Transfer[M]. New York: John Wiley & Sons, 2011: 247-251.

栏目编辑: 何卓铭