

平面激光诱导荧光技术在 液膜厚度波动实验研究中的应用

臧丽叶^{1,2,3}, 田瑞峰^{1,2,*}, 孙兰昕^{1,2}, 朱 蒙^{1,2}, 罗 骞^{1,2}

(1. 哈尔滨工程大学 核科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工程大学 核安全与仿真技术国防重点学科实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

3. 深圳中广核工程设计有限公司 上海分公司, 上海 200241)

摘要:针对传统接触式测量方法探头干扰液膜流动特性导致测量精度难以提高以及传统光学测量方法中光线折射作用限制其应用范围的问题, 提出利用平面激光诱导荧光技术测量膜厚的新方法, 并对该技术的测试原理、实现方式进行了详细的介绍。通过对沿流向不同位置液膜厚度的实时测量, 研究了液膜波动的时序特征及纵向演化规律。结果表明, 液膜厚度的概率密度分布的特征差异可作为诊断液膜波动特性的判据。

关键词:液膜厚度; 波动特性; 演化; 平面激光诱导荧光; 概率密度分布

中图分类号: TL33

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2014)09-1654-06

doi: 10. 7538/yzk. 2014. 48. 09. 1654

Application of Planar Laser-induced Fluorescence Technique in Measurement of Dynamic Film Thickness

ZANG Li-ye^{1,2,3}, TIAN Rui-feng^{1,2,*}, SUN Lan-xin^{1,2}, ZHU Meng^{1,2}, LUO Qian^{1,2}

(1. College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Fundamental Science on Nuclear Safety and Simulation Technology Laboratory,

Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

3. Shanghai Branch, China Nuclear Power Design Co., Ltd. (Shenzhen), Shanghai 200241, China)

Abstract: The probe of contact measurement interferes with the liquid film flow so that the precision is difficult to be improved. The application of the traditional optical method is limited because of the light refraction. In order to solve this problem, a new method was put forward to measure the dynamic film thickness using planar laser-induced fluorescence technique in this paper. The principle and implementation of the technique were introduced in detail. The timing characteristics and vertical evolution of free film were studied based on the real-time measurement along the film flow. The results indi-

收稿日期: 2013-06-25; 修回日期: 2013-08-29

基金项目: 大型先进压水堆核电站重大专项资助项目(2012ZX06004-012); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(HEUCFZ1022); 国家自然科学基金资助项目(50806015)

作者简介: 臧丽叶(1988—), 女, 山东烟台人, 硕士研究生, 核能科学与工程专业

* 通信作者: 田瑞峰, E-mail: tianrui Feng1997@126.com

cate that the probability density distribution of film thickness is different which can be used to diagnose the wave characteristics.

Key words: film thickness; wave characteristic; evolution; planar laser-induced fluorescence; probability density distribution

垂直自由降膜在先进压水堆 AP1000 非能动安全壳冷却系统(PCCS)、核能海水淡化系统、蒸发器汽水分离系统中均有广泛的应用。除具有传热传质系数高、动力消耗小等优点之外^[1],降液膜的非线性流动特征、波动不稳定性及其在热效应或切应力情况下的破断行为会影响工业设备的性能,例如,汽水分离系统的二次携带问题、安全壳冷却系统的局部干涸现象等。因而有必要对自由下降薄液膜的波动特性以及时空演化规律^[2-4]进行深入研究,如何对动态波动液膜的厚度进行精确的实时测量已成为液膜动力学波动特性研究的关键问题。

传统接触式测量受液膜表面张力的影响,所用探头必然会破坏测量点的边界条件以致干扰液膜的流动特性,且测量值仅是较大面积区域内的平均值,精度较低。此外,由于电容式测量系统的输出阻抗高,易受外界干扰影响而产生不稳定现象^[5]。传统的光学方法大多是通过对光线强度的分析来测量液膜厚度。以光吸收方法为例,它对于扰动不大的光滑界面比较有效,但对于表面波动的液膜,可能由于光线在液体内的多次折射而使测量值失真^[6-7]。

1 激光诱导荧光技术的测量原理

平面激光诱导荧光(PLIF)技术是一种新型无干扰流场测试技术,具有高空间分辨率、快速时间响应、高灵敏度、无干扰等优点^[8]。平面激光诱导荧光测试技术的基本原理为:荧光物质经入射激光的照射,吸收特征频率的光子,由基态跃迁至激发态,处于激发态的分子不稳定,立即退激发并发出出射光。这一激发致光过程在瞬间完成,一旦停止入射光照射,发光现象也随即消失,光强不积累。此外,由于激发和发射之间存在着一定的能量损失,出射光的波长要大于入射激光的波长且在可见光波段,这一出射光被称为荧光。利用激发光与荧光波段不同的特点,可采用

滤光片将两者分离,只检测荧光强度以提高测量精度,并利用 CCD 摄像机等设备对荧光信号进行采集^[9]。

在液膜厚度识别中,因拍摄时摄像机和液膜所流经的板壁均是固定的,而变化的只有液膜位置,因而将不同时刻拍摄的液膜实时图像进行记录,并利用数字图像处理软件对采集图像进行分析,可检测出液膜厚度的时序变化。为了精确确定所采集图像中单位像素相应的实物尺寸,首先对图像采集系统进行标定。实验中选用无液体波形板干板壁作为标定图像,则激光入射位置处的瞬时液膜厚度为:

$$\delta = \frac{h}{m}n$$

其中: h 为无液体干板壁的实际厚度, μm ; m 为板壁厚度图像的像素点数; n 为激光入射位置处的某时刻液膜厚度图像的像素点数; δ 为该时刻的瞬时液膜厚度, μm 。

2 实验系统与实验过程

2.1 实验系统

本实验在波形板壁液膜破裂研究的实验台上进行,实验系统如图 1 所示。其中液膜通过侧面储水箱的窄缝漫溢产生。实验选用最大吸收波长为 555 nm 的罗丹明 B 作为荧光剂,并采用波长为 532 nm 的 Nd:YAG 激光器作为激发源,绿色激光连续输出。采用 Photron FASTCAM SA5 高速摄像机进行拍摄,在 CCD 镜头前加装高通滤光片,滤掉强度很大的绿色激光信号,进而只捕获橙色荧光信号。

2.2 光路设计

PLIF 技术测量液膜厚度的光路为正交型,即入射激光垂直于液膜所在平板,并可通过调节激光器的位置来选择所需测量点。CCD 摄像机则在入射激光垂直的平板切线方向进行图像采集,如图 2 所示,实验中 CCD 摄像机从上方进行拍摄,以方便光路垂直度的调节。

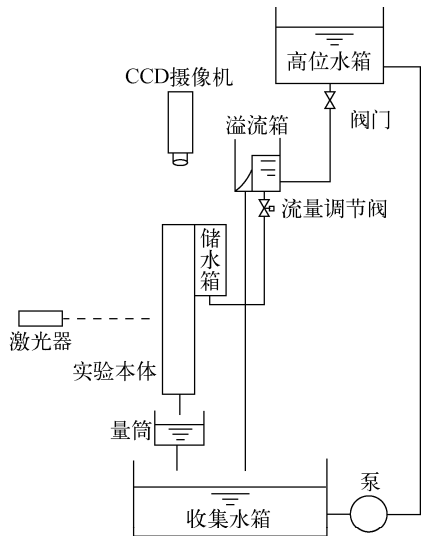


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experiment system

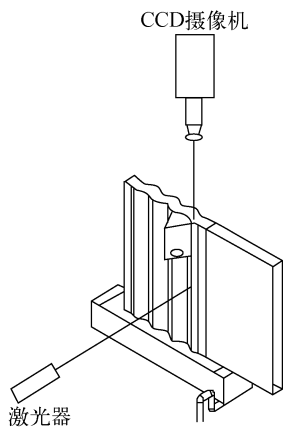


图 2 光路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of light path

提前在实验流体中溶解某种特定分子结构的荧光染料作为荧光剂,如图 3 所示,用一束激光光源垂直照射板壁上的液膜,由于荧光物质的作用,被激光照射位置的液膜呈现橙色,利用高速摄像机在垂直方向进行图像采集,并在 CCD 镜头前加装高通滤光片,由于荧光与激发光的波长差异,滤光片滤掉了强度很大的绿色激光信号,拍摄视野中仅剩橙色荧光信号,如图 4 所示,橙色区域(图中为浅灰色区域)与周围区域的色彩亮度差异很明显,边界清晰可辨,可利用数字图像处理软件实现液膜边界的有效识别。

为了防止板壁侧面的储水箱中液体所发出的荧光对液膜厚度荧光信号产生干扰,实验时

在储水箱上方贴黑色胶布。实验在暗室中进行,可避免其余光线的干扰,提高所捕获图像的清晰度。

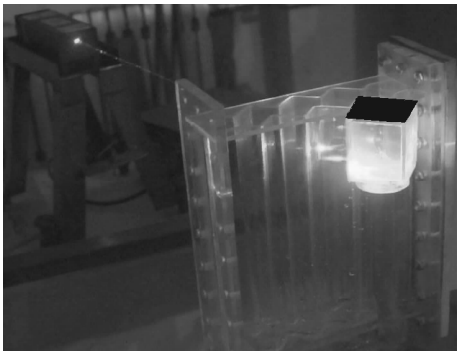


图 3 液膜厚度的激光诱导荧光法测量

Fig. 3 Measurement of film thickness by PLIF

2.3 实验过程

- 1) 调节入射激光和 CCD 摄像机的角度,务必做到入射激光与板壁垂直,相机拍摄方向与板壁相切。
- 2) 用 CCD 对拍摄区域进行对焦,并记录下无介质的实验件图像作为标定图像,此处选择无液体干板壁壁厚作为标定。
- 3) 投入罗丹明 B 并开启液膜生成系统,将液体流量调至预定值,等待 20 min 以保证板壁完全润湿,液膜流动达到稳定状态。采用称重法测量液膜流量。
- 4) 启动激光器激发荧光,利用 CCD 摄影机捕捉液膜图像。本实验采样频率定为 200 Hz,采样时间为 3 s。
- 5) 利用数字图像处理软件进行图像分析。

2.4 数字图像处理

使用 Image-pro plus 数字图像处理软件,进行图像分析。

- 1) 分析图片中的元素,确定能反映测量对象的图像图形

如图 4 所示,线激光垂直照射下的液膜在图像中表现为一个梯形的橙色区域,其色彩及亮度与周围黑色背景形成强烈的反差,有效避免了其余光线在液膜边界形成的阴影,测量精度大幅提高。

- 2) 测量对象的边界检测

在两种不同色彩的边界上,像素点的色彩

与亮度随位置的变化会有一较大的变动,检测这个小范围内亮度与色彩变化的最大值点并将其作为分界点的阈值,利用边界微分的原理对液膜边界进行自动检测与识别。图 4 中梯形状的轮廓线为检测出的液膜边界。

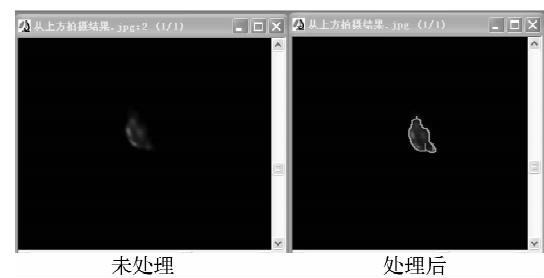


图 4 数字图像处理结果
Fig. 4 Digital image processing result

3) 测量图片中所需图形的测量参数,进而得到测量对象的测量数据

图 4 中梯形的两平行边分别代表了液固边界和气流边界,则两平行边之间的距离即为液膜的厚度。使用 Image-pro plus 数字图像处理软件中的测量工具对两边之间的距离进行长度测量,实际上这里的长度代表液膜厚度的像素点值。以事先捕捉的无液体干板壁图像作为标定图像,则可通过比例尺得到液膜的实时厚度。

3 实验结果分析与讨论

3.1 平均液膜厚度与雷诺数

液膜雷诺数是降液膜流动研究的一个重要参数,Nusselt 首先建立了平衡自由下降液膜的理想层流理论,得到层流假设条件下的液膜厚度平均值^[2]:

$$\bar{\delta} = \left(\frac{3}{4}\right)^{1/3} Re^{1/3} \left(\frac{\nu^2}{g}\right)^{1/3}$$

其中: $\bar{\delta}$ 为平均液膜厚度, μm ; Re 为液膜雷诺数; ν 为运动黏滞系数, m^2/s ; g 为重力加速度, m/s^2 。

本文以采集时间内液膜厚度的算术平均值作为该雷诺数下的平均液膜厚度,即:

$$\bar{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_i}{N}$$

其中: δ_i 为某一时刻的瞬时液膜厚度, μm ; N 为

采样点总数。

为了避免液膜波动对实验结果准确性的影响,选择液膜入口附近 100 mm 处的位置作为测量点,在不同雷诺数条件下对液膜厚度进行了测量,图 5 示出平均液膜厚度与雷诺数的关系,并将实验结果与 Nusselt 理想层流理论模型进行对比,结果表明,在雷诺数小于 400 时,两者吻合较好;当雷诺数大于 400 时,由于液膜表面波数量增多且波动幅度也逐渐增大,使平均液膜厚度增加,测量值要大于层流理论值。

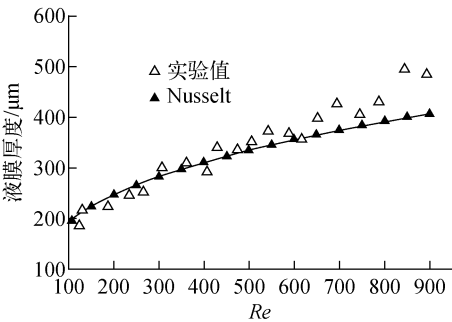


图 5 平均液膜厚度与雷诺数的关系
Fig. 5 Average film thickness
vs. Reynolds number

将实验结果进行拟合,得到液膜平均厚度与雷诺数间的实验关联式:

$$\bar{\delta} = 0.477 Re^{0.445} \left(\frac{\nu^2}{g}\right)^{1/3}$$

图 6 为液膜厚度实验值与拟合值的比较,可认为在 12% 的误差范围内,拟合经验关系式可较好地表示液膜雷诺数与平均液膜厚度的关系。充分证明本实验所采用的平面激光诱导荧

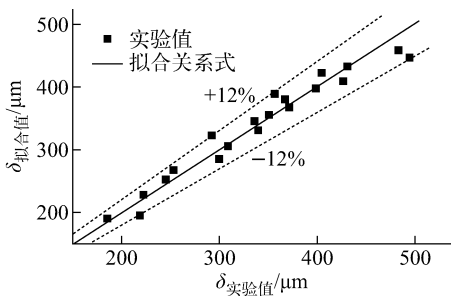


图 6 液膜厚度实验值与拟合值的比较
Fig. 6 Comparison of experimental data and
calculation values of film thickness

光技术在液膜厚度测量应用中的可靠性。

3.2 液膜波动的纵向演化

实验中,液膜厚度的测量点必须能监测液膜沿板面纵向的波动情况,同时也必须避免边缘效应。以液膜入口为起点,在板壁中央沿纵向分别选取 $L_1=100\text{ mm}$ 、 $L_2=130\text{ mm}$ 、 $L_3=180\text{ mm}$ 位置作为液膜厚度的测量点,进行实时记录。

图 7 为液膜雷诺数为 845 时,3 个测量点处液膜厚度的时序变化图与概率密度分布(PDF)曲线^[10-11]。 L_1 位置,表面波的数量很少,波动幅度随时间基本不变。概率分布集中在一较窄的区域,波峰位置近似等于液膜厚度的时均值,波峰高且陡,说明此处液膜的波动很小,液膜厚度的分散性较小。表明 L_1 位置接近于起波线,表面波刚形成,数量还未达到饱和。

L_2 位置的波形很规则,基本接近周期波。结合图 7a 和 b 发现, L_1 和 L_2 表面波波幅基本相同,但 L_2 处的表面波数量却明显增加,说明

从 L_1 到 L_2 ,表面波波长减小,波的传播频率增加。与图 7d 相比,图 7e 概率分布的主峰高度略有下降,在较大的液膜厚度处出现第 2 波峰,说明随着波动的纵向发展,表面波的数量增多使较大液膜厚度(此厚度即为表面波幅值)出现的概率增加,但由于波幅基本一致,其 PDF 特征表现为第 2 波峰状。PDF 的双峰特征是周期拟正弦波动的显著特征,可将其作为鉴别表面波波动特性的一个判据。

L_3 位置,某些波的波幅远大于其余波的,波前很陡且前方分布着一些幅度较小的毛细波,两大幅度波之间的液膜表面较平坦,称为驼峰。与 L_2 表面波数量相比, L_3 驼峰波数量较少,说明孤立波的波长要比周期拟正弦波大得多。概率分布的双峰特征消失,主峰高度大幅降低,曲线宽度明显增大且主要表现在较大的液膜厚度处。这表明 L_3 处液膜出现较大幅度的波动现象,且各表面波的幅度大小不一,从而导致液膜厚度的分散性大幅增加。

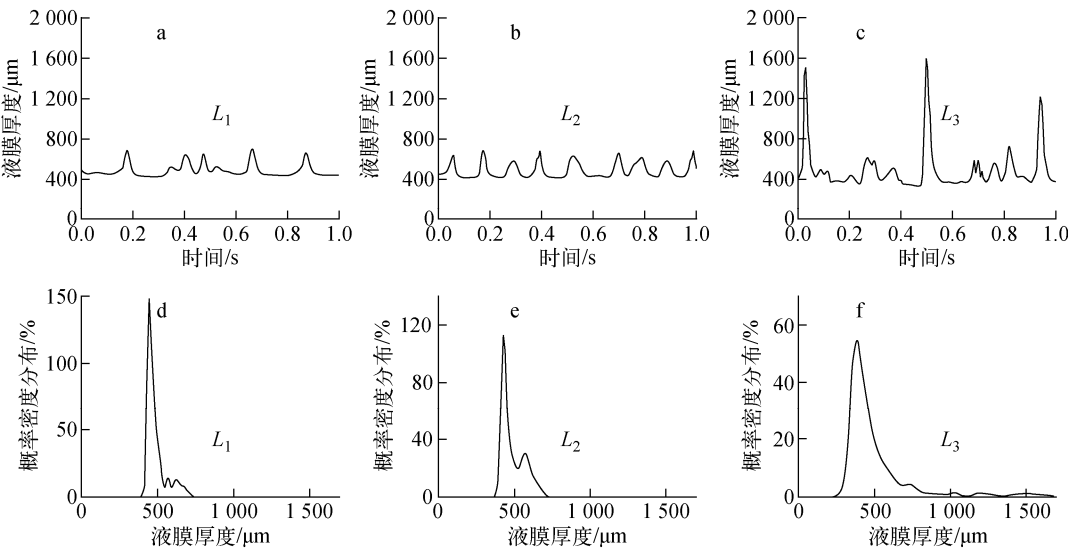


图 7 液膜时序波动与概率密度分布
Fig. 7 Timing characteristics and PDF

4 结论

1) 利用激光诱导荧光技术结合 CCD 高速摄像采集系统得到自由下降波动液膜的实时图像,通过数字图像处理实现了液膜厚度的测量,得到平均液膜厚度的拟合经验关系式。

2) 误差分析表明平面激光诱导荧光技术

的应用有效提高了液膜厚度的测量精度,解决了传统接触式测量方法对流场产生干扰而导致其准确性较差的问题。

3) 通过对液膜波动特性的时序变化及纵向演化分析,发现液膜厚度 PDF 的特征差异可作为诊断液膜的波动特性的判据。例如:起始

小波动的 PDF 曲线波峰高且尖;周期性波动的 PDF 有明显的双峰特征;孤立波动的 PDF 则是在波峰右侧区域明显延长。

参考文献:

- [1] 闫维平,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.
YAN Weiping, LI Hongtao, YE Xuemin, 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 (in Chinese).
- [2] DROSOS E I P, PARAS S V, KARABELAS A J. Characteristics of developing free falling films at intermediate Reynolds and high Kapitza numbers [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2004, 30: 853-876.
- [3] ALEKSEENKO S V, NAKORYAKOV V E, POKUSAEV B G. Wave formation on vertical falling liquid films[J]. Int J Multiphase Flow, 1985, 11(5): 607-627.
- [4] LIU J, PAUL J D, GOLLUB J P. Measurements of the primary instabilities of film flows [J]. Fluid Mech, 1993, 250: 69-101.
- [5] 郭斌,李会雄,郭笃鹏. 水平管外降膜流动液膜厚度的测量及分析[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(1): 71-74.
- GUO Bin, LI Huixiong, GUO Dupeng. Measurement and analysis of the thickness distributions of falling liquid films around horizontal tubes[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(1): 71-74 (in Chinese).
- [6] 古大田. 动态液膜厚度测试技术的研究[J]. 化工学报, 1988(3): 374-377.
GU Datian. A technique for measuring dynamic liquid film thickness[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 1988(3): 374-377 (in Chinese).
- [7] 盛伟,李洪涛. 数字图像技术在液膜厚度测量中的应用[J]. 东北电力技术, 2007(2): 44-47.
SHENG Wei, LI Hongtao. Application of digital imaging technology to film thickness[J]. North-east Electric Power Technology, 2007(2): 44-47 (in Chinese).
- [8] DEMTORDER W. Laser spectroscopy: Basic concepts and instrumentation[M]. Shanghai: World Publishing Corporation, 2008.
- [9] 阮秋琦. 数字图像处理学[M]. 北京:电子工业出版社, 2001.
- [10] 刘会灯,朱飞. MATLAB 编程基础与典型应用[M]. 北京:人民邮电出版社, 2008.
- [11] 克兰德尔 S H. 随机振动[M]. 吴家驹,译. 北京:科学出版社, 1980.