

垂直自由下降液膜厚度的瞬时无接触测量研究

阎维平¹, 李洪涛², 叶学民¹, 谷根代³

(1. 华北电力大学 电站设备状态监测与控制教育部重点实验室, 河北 保定 071003;

2. 沈阳工程学院 动力系, 辽宁 沈阳 110136; 3. 华北电力大学 数理学院, 河北 保定 071003)

摘 要: 在垂直自由下降液膜试验台上, 利用 CCD (Charge Coupled Device) 的图像快速采集功能, 获得了不同雷诺数下自由下降液膜流的瞬时流态图像, 并用图像处理方法对这些原始图像进行计算机数字化处理。研究了某一区域内瞬时液膜厚度沿流向演化特征和某一位置上液膜厚度随时间的演化特征, 并给出了不同雷诺数下平均液膜厚度和雷诺数间的实验关联式。实验结果表明: 在雷诺数小于 4000 时测量精度较准, 在雷诺数大于 4000 时, 由于采样设备的影响, 误差较大。本文实现了液膜流动特征的无接触测量, 为数字图像处理技术应用到薄膜流动特性研究方面做出了有益的尝试。

关 键 词: 无接触测量; 液膜; 厚度; 演化特征; 关联式

中图分类号: TK124 文献标识码: A

引 言

薄降液膜的贴壁流具有很强的热质交换能力, 因而在化工、核能、动力、制冷等领域得到广泛的应用^[1-6]。降液膜的平均厚度约为 0.5 mm, 流动平均速度为 1~2 m/s, 雷诺数 Re ($Re=4\Gamma/\mu$, Γ 为单位周长质量流量, μ 为动力粘度) 为 10~10 000, 其换热强度及传质强度是同等流动条件下层流流动的几倍。如将其应用于吸收器、蒸发器等热交换设备, 可使这类设备的体积大大缩小, 节省材料和资源(能源、水), 提高设备的效率。

由于液体薄膜流具有小流量、小温差、高传热传质系数、高热流密度、结构简单且动力消耗小等独特优点, 现已成为国际传热传质科学与工程界的一个十分活跃的研究领域, 其潜在的技术应用领域将非常广泛。正是由于实际应用的重要性, 深入了解液体薄膜的水动力特性成为近年来引人注目且富有挑战性的研究课题。

准确地测量液膜厚度对于控制液膜厚度、强化

薄膜传热、预测与防止液膜破断等流体的时空演化特征, 具有重要学术与实际工程意义; 而且, 基于实测的液膜厚度, 还可借助数值计算技术准确模拟液膜表面波内部的流体动力学和传热特性, 揭示其高传热传质特性的内在机理。但由于液膜厚度很薄, 且流动速度相对较快, 因此如何准确捕获实时液膜厚度成为研究液膜特性的关键所在。目前已有的测量方法多数为接触法测量, 受液膜表面张力影响及对流动的干扰, 精度难以提高。

本文利用 CCD 的图像快速采集功能得到自由下降液膜流的实时图像, 通过数字图像处理的方法获得下降液膜的厚度的经验公式。实现了无接触测量, 解决了接触法标定和使用不方便, 以及对流动具有干扰的弊病, 从而为数字图像处理技术应用到研究薄膜动力学特性做出了有益的尝试。

1 实验台系统和实验过程

1.1 实验台系统

本文作者建立的实验台如图 1 所示。实验系统主要包括实验件、给水系统和数据采集系统。

实验件采用不锈钢管, 直径为 20 mm×1 mm, 有效长度为 1 100 mm。在实验件底部装有长度为 120 mm 的有机玻璃套管, 用于大流量时防止实验介质外溢。实验件顶部装有流量配流器, 其结构为收缩型喷嘴, 工作水经过收缩型喷嘴间的环形空间, 自配流器流出, 以薄层液膜形式沿着实验外表面向下流动。收缩型喷嘴可使液膜在竖直管壁上分配比较均匀, 减少流体在周向上因流量不均造成的误差。实验件壁面上共对称布置 9 对直径为 1 mm 的镍铬—镍硅铠装热电偶(K 型, 1 级), 嵌入在实验件的外表面, 然后将其表面打磨、抛光, 保持表面的光洁度

收稿日期: 2006-10-12; 修订日期: 2007-01-29

基金项目: 华北电力大学博士学位教师科研基金资助项目(2003J211)

作者简介: 阎维平(1955-)男, 北京人, 华北电力大学教授, 博导

及与圆管表面齐平的圆弧度,减少壁面粗糙度对形成均匀液膜的影响。第一对热电偶距离实验件入口 50 mm,从第二对热电偶开始,间距均为 100 mm。在实验件的入口和出口处各布置 1 对热电偶,用于监测入口和出口工质温度。

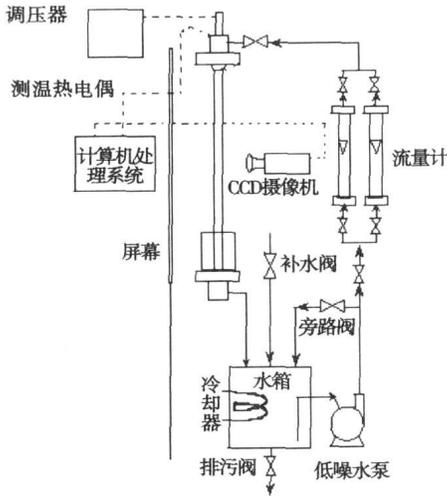


图1 实验台简图

实验台的水循环回路为:主水箱的介质经给水泵输送,经过转子流量计,球阀以及收缩型喷嘴配流器和实验段形成的环形空间,然后,沿竖直管壁表面均匀地流出,形成均匀的降膜。介质自实验件表面流出后,经出水口进入主水箱。实验中,多余的介质经旁路系统返回主水箱。

在数据采集系统中:图像采集板采用德国 Basler 公司的 DH-CG410 高性能彩色图像采集卡, A/D 转换精度 10 bit,可得到 8 bit 低噪声数据;单幅图像捕捉时间,单场小于 40 ms,单帧小于 60 ms; CCD 摄像机采用 DH-HV 1300UC 彩色高分辨率数字摄像机,帧率 30 帧/s(640×480)。

CCD 摄像机的定位采用滑动块,固定在与屏幕相距 70 cm 的另一支架上,该滑动块的上下位置可调整,为了观测到充分发展的液膜流态,将定位 CCD 摄像机的滑动块置于距进口位置 725 mm 处。在实验中,由于高速摄影法对于光线的影响较为敏感,应当在暗室中进行,用一稳定面光源直射实验件,减少光线对试验数据的影响。

1.2 实验过程

首先,用 CCD 记录下没有介质的实验件图像作为标定图像,再通过补水阀对水箱进行补水,当达到额定水位后,停止补水;然后将溢流管路上的阀门开

至最大,把测量管路的阀门关闭,启动水循环泵;水循环泵运行后,缓慢开启测量管路上的阀门,同时关小溢流管路,注意观察实验件上的水流,保证阀门调节范围不会超过液体的飞溅的最大流量,保持蒸馏水在此流量下循环 20 min 左右,以使管壁完全被润湿;之后进入实验采集阶段,投入高锰酸钾试剂并将流量调至预定值,维持 3~5 min,此时,自由液膜已处于稳定状态。接着启动液膜厚度采集系统,采样时间由软件控制。对于滚动波区域,界面波频率大约为 15 Hz,所以本实验其采样频率定为 30 Hz,采样时间为 10 s。

在不同流量下对液膜的流动特性进行测量,每测量一种流量后,停止液膜厚度采集系统,重新记录标定图像,然后调整液体的流量达到下一测量值,维持稳定流动 3~5 min 后,再次启动液膜厚度采集系统。重复以上步骤就可获得不同流量下的液膜的流动特性。

1.3 图像数据处理步骤^[7]

(1) 由 CCD 摄像机得到不存在液体的标定图像和存在液体的待测图像;

(2) 进行灰度转换,保证标定图像和待测图像为 0~255 的灰度图像;

(3) 待测图像和标定图像实施差影算法;

(4) 实施差影算法后的图像采用 $\frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$

模板进行线性平滑滤波;

(5) 采用 Sobel 边缘算子对线性平滑滤波后的图像进行边缘检测;

(6) 对边缘检测后的图像进行坐标转换,得到液膜的厚度;

(7) 对单幅图像进行逐行扫描得到某一区域内瞬时自由下降液膜厚度沿流向演化特征;

(8) 对连续的且具有相同时间间隔的待测图像与标定图像进行(2)~(6)步,即可得到液膜厚度在时间域内的波形分析。

2 实验结果分析

2.1 某一区域内瞬时自由下降液膜厚度沿流向演化特征

图 2~图 5 准确地测绘出在距进口 $L=700\sim 750$ mm 段, $Re=545, 1\ 072, 2\ 590, 4\ 513$ 时,瞬时表面波波形的沿流向的分布。由经过处理后的液膜厚度

数据,可以清楚地观测到:随着雷诺数的增大,液膜厚度的变化幅度变大,即液膜的振幅变大,但由于 CCD 摄像头测量的范围有限,并没有能够观察到液膜流动的一个完整周期,所以在某一区域内瞬时自由下降液膜厚度沿流向演化特征实验中没能观察到孤立波的出现。

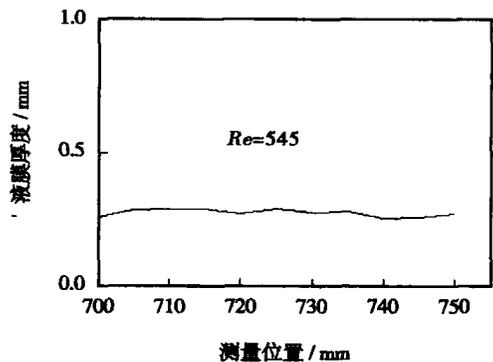


图 2 雷诺数 545 时液膜厚度沿流向演化特征

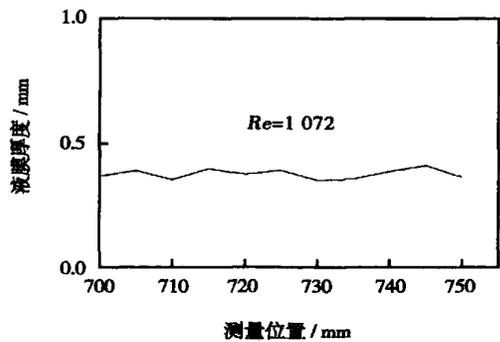


图 3 雷诺数 1 072 时液膜厚度沿流向演化特征

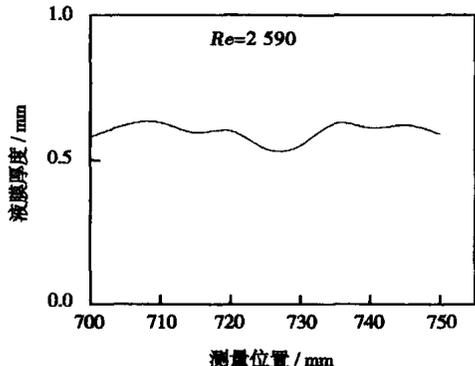


图 4 雷诺数 2 590 时液膜厚度沿流向演化特征

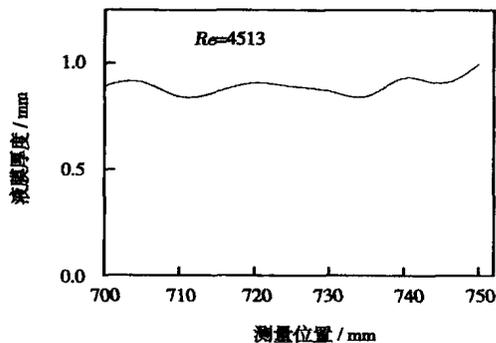


图 5 雷诺数 4 513 时液膜厚度沿流向演化特征

2.2 某一位置上液膜厚度随时间域内的演化特征

在上述的液膜流动的瞬时图像中不能准确地反映出液膜真实的流动状态,因此有必要根据奈奎斯特采样定理对某一位置上液膜厚度随时间域内的演化特征进行实验研究^[8],图 6~图 9 给出了距离进口 725 mm 处,液膜厚度长时间尺度和微时间尺度的变化值。从图中可以清楚地看到:当 $Re=545$ 时,表面波形类似正弦分布;当液膜 $Re=1\ 072$ 、 $Re=2\ 590$ 出现单峰孤立波,孤立波的出现频率随雷诺数的增大而增加;当雷诺数达到很大的值时,液膜波动得更无规律,因此孤立波变得不是那么明显。波峰与波谷厚度之比可达 2~5 或更高,但由于摄像头的采样频率有限,在高雷诺数下没有出现文献[2]的所提及的双峰现象。

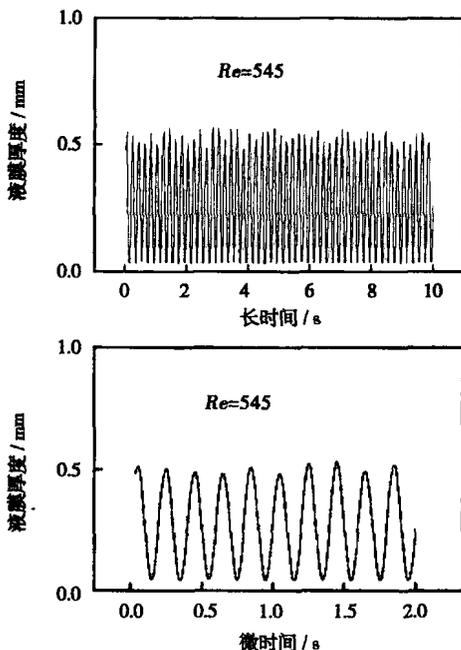


图 6 雷诺数 545 时液膜厚度的长时间和微时间尺度的演化

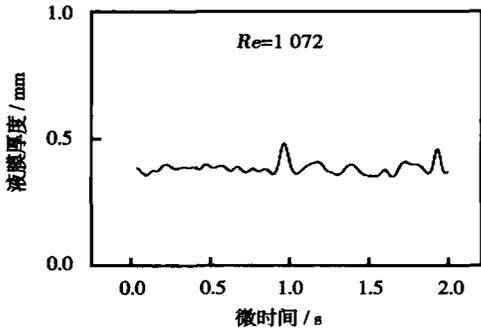
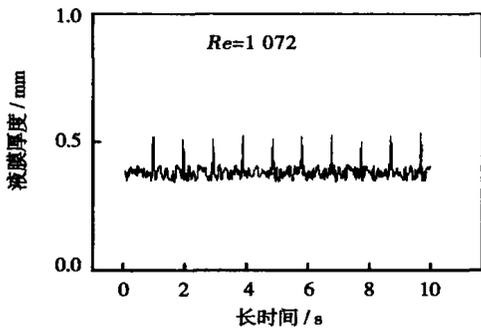


图 7 雷诺数 1 072 时液膜厚度的长时间和微时间尺度的演化

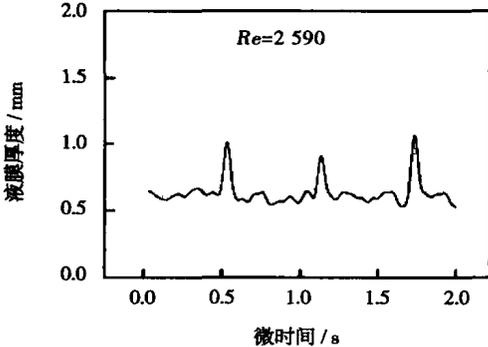
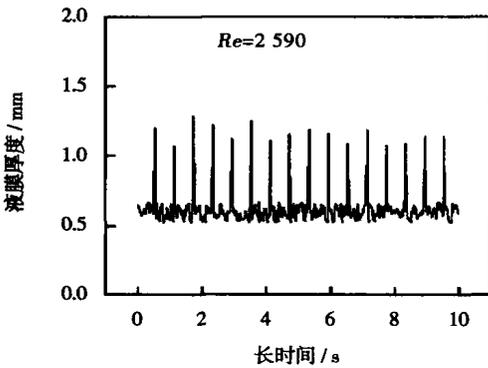


图 8 雷诺数 2 590 时液膜厚度的长时间和微时间尺度的演化

究的基础, 由图 2~图 9 可以看出: 自由下降液膜表面呈现出规则的波形, 液膜厚度不仅沿流向发生变化, 而且随着时间发生变化, 且都不规则。在对界面波还没有一个准确可行的描述方法之前, 对于薄膜厚度与雷诺数之间的关系, 利用统计学方法(见式 1), 对离散的液膜厚度的随机信号 $h(n)$ 求其平均值:

$$\bar{h} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N h(n) \quad (1)$$

其中: \bar{h} —平均液膜厚度, mm; $h(n)$ —某一位置瞬时液膜厚度; N —数据采样点总数。

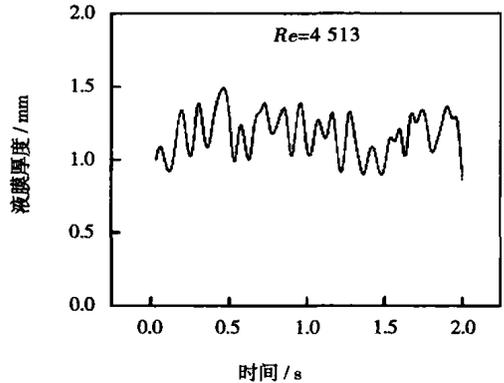
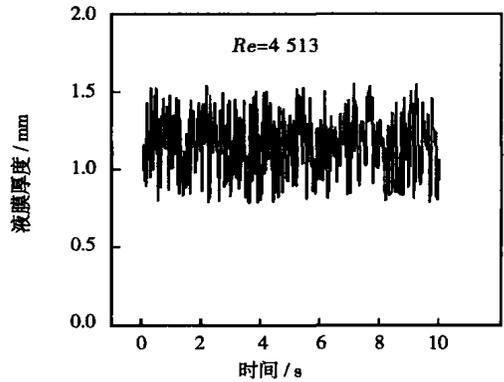


图 9 雷诺数 4 513 时液膜厚度的长时间和微时间尺度的演化

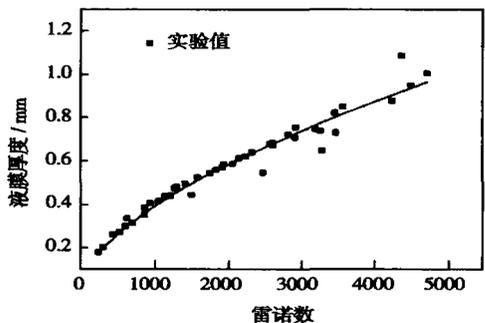


图 10 平均液膜厚度与雷诺数的实验关联式

2.3 液膜平均厚度和雷诺数间的实验关联式

气液两相流中液膜的平均厚度是进行两相流研

测量图片记录了液膜厚度随时间的变化值,对其液膜厚度求其时均值,得到液膜平均厚度。在不同雷诺数下,对液膜厚度进行测量。然后将液膜平均厚度与雷诺数的关系绘制在图 10 中,并用 Origin 7.0 对两者进行拟合,得到液膜平均厚度和雷诺数间的实验关联式:

$$\bar{h} = 1.44Re^{0.586}(\nu^2/g)^{1/3} \quad (2)$$

由图 10 可以看出:平均液膜厚度与雷诺数的关系按式(2)进行拟合,基本分布在拟合线的周围,在雷诺数小于 4000 时测量精度较准,在雷诺数大于 4000 时,可能由于采样设备的影响,误差较大。为了验证试验结果的正确性和可靠性,与其它学者的数据进行了比较,表 1 中给出了包括 Nusselt 在内的

表 1 平均液膜厚度的实验数据关联式

研究者	表达式	参考文献
Present	$\bar{h} = 0.144Re^{0.586}(\nu^2/g)^{1/3}$	本文
Nusselt	$\bar{h} = 0.909Re^{1/3}(\nu^2/g)^{1/3}$	[9]
Gimbutis	$\bar{h} = 0.136Re^{0.583}(\nu^2/g)^{1/3}$	[10]
Karapantios	$\bar{h} = 0.214Re^{0.538}(\nu^2/g)^{1/3}$	[11]
Takahama	$\bar{h} = 0.228Re^{0.526}(\nu^2/g)^{1/3}$	[12]
Härkönen	$\bar{h} = 0.218Re^{0.53}(\nu^2/g)^{1/3}$	[13]
Jiangzhangyan	$\bar{h} = 0.295Re^{0.498}(\nu^2/g)^{1/3}$	[14]

的交点为 $Re \approx 1500$ 。由于 Nusselt 关联式只适合层流,当雷诺数逐渐变大时,本文的关联式与 Nusselt 关联式差异越大,与其它关联式吻合效果较好。

3 结 论

利用 CCD 获取了自由降膜的实时图像,并通过数字图像处理技术得到了自由降膜的流动特征。实验数据表明:自由下降液膜表面呈现出不规则的波形,液膜厚度不仅沿流向发生变化,而且随着时间发生变化,且都不规则。本研究拟合出平均液膜厚度和雷诺数间的实验关联式: $\bar{h} = 0.144Re^{0.586}(\nu^2/g)^{1/3}$,为数字图像处理技术应用到研究薄膜动力学特性做出了有益的尝试。

参考文献:

[1] CHU K J, DUKLER A E. Statistical characteristics of thin, wavy films: part III structure of large wave and their resistance to gas flow[J]. AIChE J, 1975, 21(3): 583-593.

[2] 叶学民, 阎维平. 蒸发、等温或冷凝液膜二维表面波的通用时空稳定性方程[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 200-205.

[3] 师晋生, 施明恒. 平壁上等温层流液膜的破裂特性[J]. 东南大学学报 1997, 27(3): 131-135.

[4] 蒋章焰, 宋金田. 外自由降膜流的破断特性[J]. 工程热物理学报, 1995 16(2): 199-204.

[5] MARTTI HÄRKÖNEN, ARI AULA, ANTERO AITTONÄKI. Heat transfer and hydrodynamics of falling films[J]. Acta Polytechnica Scandinavica Mechanical Engineering, 1994, 15: 312-318.

[6] KOICHI TAKEMORI, ISAO ISHIHARA, RYOSUKE MATSUMOTO, et al. Behavior of condensate of carbon dioxide and heat transfer in subcritical region //ICOPE-03, D214 C]. Japan; JSME, 2003. 2-329.

[7] 阮秋琦. 数字图像处理学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.

[8] 应怀樵. 信号和频谱分析与随机数据处理[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983.

[9] NUSSULT N. Die oberflächenkondensation des wasserdampfes[J]. Z Ver Dt Ing, 1916 60: 541-569.

[10] GIMBUTIS G J Heat transfer in film heat exchangers //Proc 14th Int Congress of Refrigeration[C]. Moscow, 1975. 1-7.

[11] KARAPANTSIOS T D, PARAS S V, KARABELAS A J. Statistical characteristics of free falling films at high reynolds numbers[J]. Int J Multiphase Flow, 1989, 15(1): 1-21.

[12] TAKAHAMA H, KATO S. Longitudinal flow characteristics of vertically falling liquid films without concurrent gas flow[J]. Int J Multiphase Flow, 1980, 6(2): 203-215.

[13] HÄRKÖNEN M, AULA A, AITTONÄKI A. Heat transfer and hydrodynamics of falling films[R]. Helsinki; Acta Polytechnica Scandinavica Mechanical Engineering Series. 1994.

[14] JINAG ZHANGYAN, YAN WEIPING. Experimental studies on surface wave characteristics of free-falling liquid films //Proc 4th Int Sym on Heat Transfer[C]. Beijing: High Education Press. 1996. 200-205.

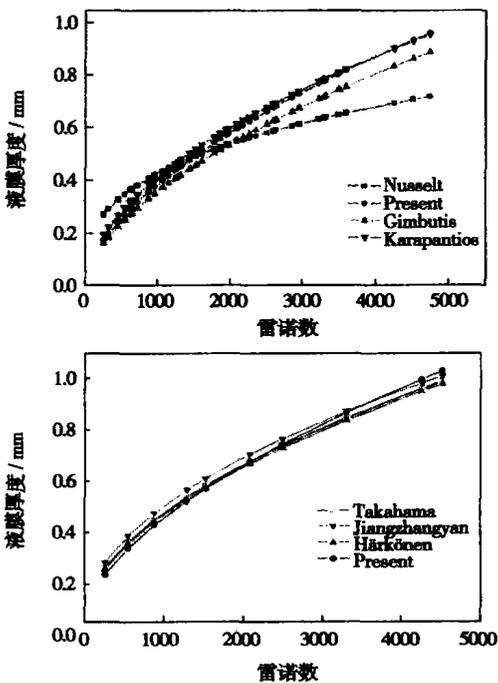


图 11 平均液膜厚度实验关联式比较

研究者得出的不同雷诺数下平均液膜厚度和雷诺数间的关联式,图 11 表明本文给出的关联式与 Nusselt

(编辑 何静芳)

By adopting Level Set method and a Navier-Stokes equation coupled with a surface tension model and in combination with ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) numerical algorithm, a direct numerical simulation was conducted of the rising process of two neighboring air bubbles inside a vertical channel. The emphasis was put on the study of the effect of 8 mm diameter air bubbles arranged at different spatial positions on the rear wake flows and their interactions. The numerical simulation can accurately reproduce the deformation, attraction and repellent action of the air bubble pairs. The calculation results of air bubble rising speed are in good agreement with those obtained by using an empirical formula. The simulation results show that the wake flows after the two air bubbles and their interaction determine the behavior of the rising air bubble pair. An air bubble pair rising side by side does not coalesce due to their wake zones being separated by a jet flow. When the air bubbles following the vertically rising air bubble pair have over 50% of their projection area entering the wake zones of their ahead air bubbles, however, a coalescence phenomenon will occur. **Key words:** air bubble pair, wake flow, Level Set method, direct numerical simulation

垂直自由下降液膜厚度的瞬时无接触测量研究 = A Study of the Transient Non-contact Measurement of Vertical Free-falling Liquid-film Thickness [刊, 汉] / YAN Wei-ping, YE Xue-min (Education Ministry Key Laboratory on Condition Monitoring and Control of Power Plant Equipment under North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003), LI Hong-tao (Power Engineering Department of Shenyang Engineering College, Shenyang, China, Post Code: 110136), GU Gen-dai (Department of Mathematics, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(4). — 380 ~ 384

On a vertical free-falling liquid-film test rig, by employing the image rapid-acquisition function of a CCD (Charge Coupled Device), the transient flow-pattern images of a free-falling liquid-film flow at different Reynolds numbers were obtained and then digitally processed on a computer by using an image processing method. Studied were the evolution characteristics of the transient liquid-film thickness along the flow direction in a certain zone and the time-dependent evolution characteristics of the above thickness at a certain location. Also given was an experimental formula showing the correlation of the average liquid film thickness with Reynolds numbers under the condition of different Reynolds numbers. The test results show that the measurement accuracy is comparatively high when the Reynolds number is less than 4000 and the measurement error is relatively big when the Reynolds number is over 4000 due to the influence of sampling facilities. The authors have undertaken a non-contact measurement of flow characteristics of liquid films, initiating a useful attempt for applying digital image processing technology to the study of thin-film flow characteristics. **Key words:** non-contact measurement, liquid film, thickness, evolution characteristics, correlation formula

激冷室内气体穿越液池过程气液固三相的数值模拟 = A Gas-liquid-solid Three-phase Numerical Simulation of the Syngas Passing Through a Cistern in a Quench Chamber [刊, 汉] / WU Xuan, XIE Han-yan, LI Tie, et al (Education Ministry Key Laboratory on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology, College of Energy Source and Environment under the Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(4). — 385 ~ 390

A syngas passing through a cistern in the quench chamber of a coal slurry gasifier pertains to a sophisticated gas-liquid-solid three-phase flow process, which functions to further cool the syngas and capture and collect the slag contained therein. By combining the Euler method with Lagrange one, the authors have calculated particle collisions by using a direct simulation Monte Carlo's (DSMC) method and employing VOF model to track the gas-liquid interface. A numerical simulation was conducted of the gas-liquid-solid three-phase flow process of slag-laden syngas passing through a cistern. An exploratory study has been performed of the influence of the following factors on the gas-liquid flow field and separation of solid particles: particle diameter, gas flow velocity and submerged depth of the downcomer at the outlet. The research results show that the syngas undergoes an abrupt change in flow direction after it leaves the downcomer and the formation of gas and liquid exhibits a periodic wave-shaped flow pattern. The dust-laden gas, when it passes through the cistern, features a relatively high particle-capture efficiency. An increase in particle diameters can also enhance the particle capture efficiency. With an increase of gas flow velocity and submerged depth of the downcomer at the outlet, the perturbation of the liquid intensifies, producing more liquid drops and contributing to an enhancement of particle-capture efficiency. The influence of gas flow velocity and submerged depth of the downcomer on the particle-capture efficiency, however, will be gradually weakened. **Key words:** gasifier, quench chamber, gas-liquid-solid three-phase, capture efficiency, direct simulation