

基于红外热像的气液两相 分层流液膜厚度非介入测量

龚金海¹, 梁法春^{1,2}, 刘德绪¹, 燕慧¹

(1. 中原石油勘探局 勘察设计研究院, 河南 濮阳 457001;

2. 中国石油大学 储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266555)

摘要:对于输送高压、易燃易爆、强腐蚀性介质的气液两相流管道,电导探针等传统的介入式液膜厚度测量方法不适用。针对这种情况,提出了通过红外热像测量气液两相分层流液膜厚度的新方法:在管道外壁敷设加热带,通过施加恒定热流密度来增加气液相温差,通过采集红外图像识别气液界面获得液膜高度。在建立VOF多相流模型模拟恒定热流密度条件下管截面上温度分布特征基础上,实验在气液两相流环道上进行,采用热像仪采集管壁红外图像,真实液膜厚度由介入式电容探针测量,在试验范围内红外方法液膜厚度测量最大误差8.2%。

关键词:红外热像;气液两相分层流;液膜;温度模拟;非介入测量

中图分类号:O359

文献标志码:A

Gas-liquid two phase stratified flow liquid film height non-invasive measurement based on infrared imaging technique

GONG Jin-hai¹, LIANG Fa-chun^{1,2}, LIU De-xu¹, YAN Hui¹

(1. Survey and Design Inst., Zhongyuan Petroleum Exploration Bureau, Puyang 457001, China;

2. College of Pipeline and Civil Eng., China Univ. of Petroleum, Qingdao 266555, China)

Abstract: Traditional invasive liquid film measurement method such as conductance probe technique is not suitable for the gas-liquid two-phase flow system with high pressure, flammable, combustible and corrosivity medium. A novel method was proposed based on infrared imaging for gas-liquid two phase stratified flow liquid film height measurement. In order to improve the measurement accuracy, a heating belt was applied to improve the temperature difference between the gas and liquid, the film height was obtained using infrared imaging to distinguish gas-liquid interface. A VOF multiphase flow model was used to simulate the temperature distribution of the pipe section under constant heat flux, based on this, the experiments were carried out at an air-water two-phase flow loop and the infrared image were obtained using an infrared camera. The gas-liquid interface position was determined according to the temperature gradient characteristics. The measurement results were compared with capacitance probe method. It showed during the experimental range, the maximum measurement error was 8.2%.

收稿日期:2011-12-08

基金项目:国家科技重大专项(2008ZX05017)

作者简介:龚金海(1963—),男,湖南省华容县人,中原石油勘探局高级工程师,主要研究方向为油气集输及腐蚀防护。

Key words: infrared imaging; gas-liquid two phase stratified flow; liquid film; temperature simulation; non-invasive measurement

0 引言

分层流是气液两相流管道中的一种常见流型,通常在气、液两相流速较低条件下发生.在重力作用下,液相在管线底部流动,气相在管线上部流动,气液相之间存在明显分界面^[1].气液界面距离管底部高度即液膜厚度,是分层流的关键参数,其测量方法主要有快关阀门法、电导或电容探针法、射线衰减法、高速摄像法^[2-5]等.快关阀门通过对气液两相流管路进行瞬时截断,通过测量封闭在两阀门间的液体质量来获得液膜高度,一般只能用于实验室测量;电容或电导探针方法是一种介入式测量方法,要求被测管道为绝缘材料,对于输送高压、危险介质的气液两相流管道,一般采用非介入式监测,以降低泄漏风险;射线衰减方法根据射线衰减程度与射线穿透液膜厚度有关这一原理进行测量,可能存在与辐射有关的安全问题;红外热像方法具有非接触性优点,已逐渐应用于材料损伤监测、泄漏监测等领域^[6],但常规红外热像方法受环境背景温度影响较大,且在流动过程中,由于气、液相热交换以及管壁间的热传导,气液相温差很小,从而导致测量误差增大.因此,本文拟在模拟气液分层流温度场分布特性的基础上,提出在管外壁敷设电加热膜以改变气液相温度分布,通过增加气液相温差来提高分层流液膜厚度测量精度的新方法.

1 分层流液膜厚度红外测量原理

红外液膜测量系统由红外热像仪、图像处理计算机、电加热带等组成.电加热带覆盖在被测气液两相流管道外壁、加热管壁及管内介质.红外热像仪用于记录管外壁红外图像,图像处理计算机用于分析红外图像和识别液膜高度.在经过一定时间的运行达到热平衡后,管道内的气、液相温差很小,管壁处气液界面上下温度也基本一致.为提高气液相温差,采用加热外管壁方式,在管外壁敷设加热膜给以恒定的热流密度 q ,热量通过管壁传给管内的气和水.由于比热容较大的水可从管壁吸收更多的热量,而比热容较小的气体从管壁上吸收的热量相对较少,所以当加热一定的时间后,气液界面上下2部

分的管壁温度差异性将逐渐显现,使用热成像仪测量管道表面温度分布时,根据管道外壁温度分布特征即可判断管内液膜的高度(即厚度).

2 恒定热流密度下气液两相分层流管截面温度场分布特征模拟

2.1 VOF 多相流模型

Fluent是目前处于世界领先地位的商业CFD软件包之一,已广泛应用于单相及多相流的速度场、温度场和压力场计算.VOF(volume of fluid)多相流模型通常用于描述气液两相分离流动的流场特性,因此本文采用VOF多相流模型模拟固定热流密度作用下气液两相分层流动管截面温度分布.其守恒方程如下.

1) 体积分数连续性方程

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + v_q \nabla \alpha_q = 0$$

2) 动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla[\mu(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + F$$

3) 能量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla[\vec{v}(\rho E + p)] = \nabla[k_{eff} \nabla T] + S_h$$

2.2 分层流管截面温度分布特征

实验条件:模拟管道外径200 mm,管壁厚度15 mm,介质分别为空气和水,分层流液膜高度60 mm,初始温度为300 K,外部施加固定的热流密度 $q = 14\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$.采用速度入口边界条件,出口设为充分发展.

图1为加热100 s时管道截面处的温度场分布,其纵、横坐标分别代表管道截面垂直和水平方向的尺寸.从图1可以看出,对于气液两相分层流,经过一段时间加热,管道截面上气液相分布呈现明显的不均匀性,管壁顶部温度大于底部温度.这主要是因为水的比热容远大于对应的气相,在吸收相同热量条件下液相升温慢,而气相热容量较小,升温较快.

图2为不同加热时间管道外壁温度分布特征对

比图. 由于管壁为金属材料,热传导很快,所以管道外壁温度也呈现上部分温度高、下部温度低的特性. 随着加热时间的延长,管壁外部上下部温差逐渐增加,温度随距离管底部距离变化呈S型曲线,随着与管顶距离的增大,管壁温度逐渐降低,在气液相界面附近温度变化梯度最大. 当加热时间为 50 s 时,由于传热时间较短,气相尚处于升温阶段,气液相温差较小. 随着加热时间的延长,当加热 100 s 或 150 s 后,气液相温差增大,红外图像分辨率也随之增大. 因此,可以选择加热 100 s 后再采集红外图像,以提高测量精度.

3 实验系统

实验在气液两相流实验环道上进行,气相介质为空气,液相介质为水,实验系统示意图见图 3. 来

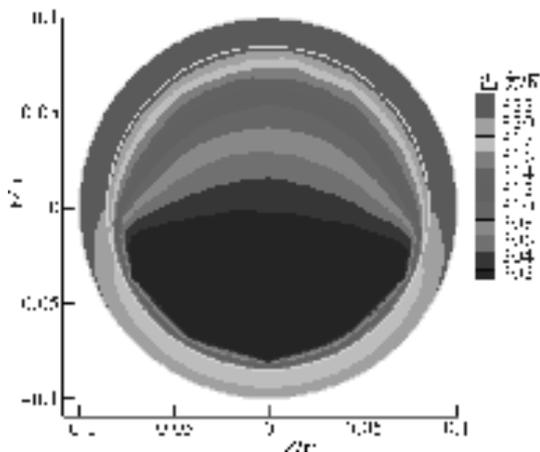


图1 加热 100 s 管道横截面处的温度分布

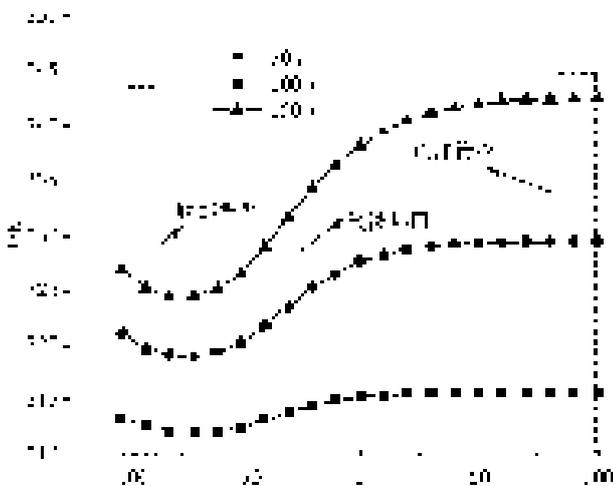
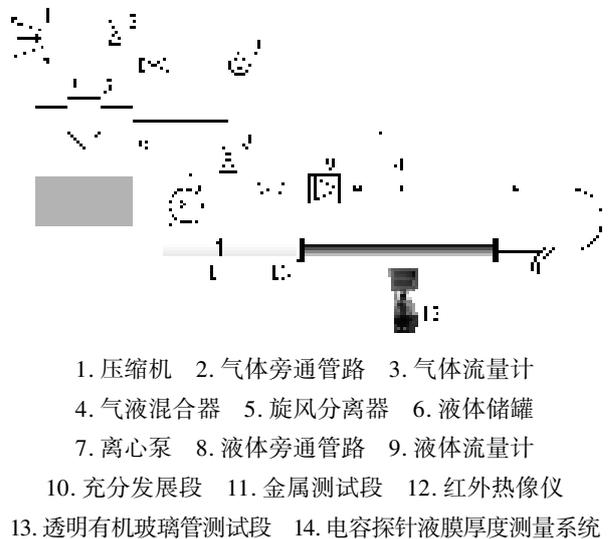


图2 加热 50 s,100 s,150 s 后管外壁温度分布对比图

自压缩机的气相和循环水泵的液相经计量后在气液混合器中混合,随后经过充分发展段进入测试段. 调节气液相流量大小,实验流型保持为分层流. 测试段由不锈钢管段和透明有机玻璃管段 2 部分组成. 不锈钢管段金属管道位于上游,其上布置有红外液膜厚度测量系统. 为便于对测量结果进行对比,在下游的透明有机玻璃管上布置有单丝电容探针测量系统(电容探针是两相流测量中一种常用的测量液膜厚度方法,其精度和可靠性已获得广泛认可,本文将电容探针测量值作为标准液膜高度). 红外图像测量采用 TP8 红外热像仪,温度分辨率为 0.08 ℃,加热时间为 100 s,即 100 s 后立即撤除电加热膜,采用红外热像仪记录管壁热像图.



- 1. 压缩机 2. 气体旁通管路 3. 气体流量计
- 4. 气液混合器 5. 旋风分离器 6. 液体储罐
- 7. 离心泵 8. 液体旁通管路 9. 液体流量计
- 10. 充分发展段 11. 金属测试段 12. 红外热像仪
- 13. 透明有机玻璃管测试段 14. 电容探针液膜厚度测量系统

图3 实验系统示意图

4 结果与分析

将采集的红外图像转化为二维数字矩阵. 为消除加热膜边缘效应,取图像中间部分作为分析计算区域. 对图像矩阵同一行的温度求和,并向 Y 轴投影,结果如图 4 所示(左图是原始图像,右图是温度向 Y 轴投影后的图像). 为了方便观察,每隔 20 行画 1 条黑色的水平线,并在水平线两侧用红色数字标注黑色水平线所处的行. 投影的曲线中出现拐点,拐点上斜率大;液体的热容大,升温慢,因此拐点下方的斜率小,拐点的位置即对应气液分界面. 确定红外图像上拐点距离底部像素个数 N_h 的大小,即可计算液膜厚度

$$h = \frac{N_h D}{N_D}$$

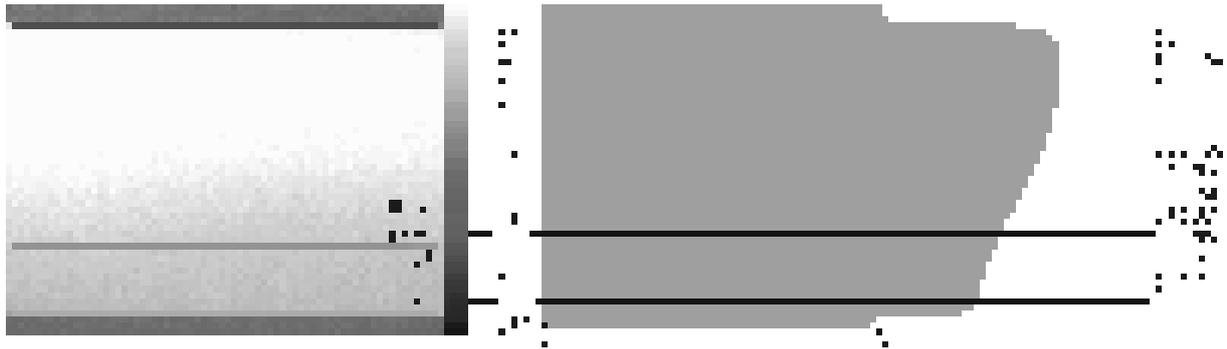


图4 气液界面检测

式中, N_d 为红外图像上管顶部距离管底部像素个数, D 为管道直径/mm.

表1为红外图像测量结果与电容探针测量结果对比,可见试验范围内,二者吻合良好,最大误差为8.20%.

表1 液膜厚度检测结果

液位/mm	气体流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	检测结果/mm	检测误差/%
30.2	2.0	29.3	-3.97
30.5	4.0	28.3	-8.20
29.3	6.0	26.7	-6.90
30.4	8.0	27.5	-7.89
60.3	2.0	60.5	-0.50
60.7	4.0	58.7	-2.80
59.5	6.0	58.1	-2.52
62.0	8.0	58.1	-6.45
85.0	2.0	86.6	2.35
83.5	4.0	85.2	1.80
84.5	6.0	83.8	-0.59
86.0	8.0	83.0	-3.49

5 结论

1)采用红外热像法可准确测量气液两相分层流的液膜厚度,在恒定热流密度作用下,由于气液相比热不同,温升速度不同,顶部气相区温度较高,下部液相区温度较低,因此管外壁温度呈现S型分

布特征,气液界面处温度梯度变化最大.

2)用热像仪采集管壁红外图像并转换为数字矩阵,通过寻找红外图像温度梯度变化最大的拐点,即可实现液膜厚度的准确测量,在试验范围内红外热像法液膜厚度测量的最大误差为8.2%.

3)实际工程应用中,由于需要对管外壁进行加热,因此需要去除包覆在管道外壁的PE防腐层.

参考文献:

- [1] 林宗虎. 能源动力中多相流热物理基础理论与技术研究[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [2] Hewitt G F. Measurements of Two Phase Flow Parameters [M]. London: Academic Press, 1978.
- [3] Kang H C, Kim M H. The development of a flush wire probes and calibration method for measuring liquid film thickness[J]. Int J Multiphase Flow, 1992, 18(3): 423.
- [4] Salgado C M, Pereira C M N A, Schirrub R, et al. Flow regime identification and volume fraction prediction in multiphase flows by means of gamma-ray attenuation and artificial neural networks[J]. Progress in Nuclear Energy, 2010; 52(6): 555.
- [5] 梁法春, 陈婧, 曹学文. 基于图像处理的分层流持液率测量[J]. 石油天然气学报, 2008, 30(4): 161.
- [6] 李立超, 杨录, 张艳花. 利用红外图像处理方法检测材料缺陷[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(2): 372.