

垂直低温两相流管底液氮气泡上升速度的实验研究

张 华 王 经

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200030)

摘 要 本文对垂直低温两相流管底部液氮气泡的上升速度运用高速摄像机进行了可视化实验研究, 对所采集的实时图像进行处理。在 Cole 和 Mendelson 气泡上升速度经验公式的基础上, 通过对液氮气泡的上升速度的分析, 提出了圆管管路底部液氮气泡的上升速度的拟合公式, 分析研究其变化规律, 为进一步探求圆管内液氮弹状气泡的生成机理提供依据。

关键词 高速摄像机; 液氮气泡; 上升速度; 图像处理; 拟合公式

中图分类号: O359.1 文献标识码: A 文章编号: 0253-231X(2006)Suppl.1-0233-04

EXPERIMENTAL STUDY ON NITROGEN BUBBLE RISING VELOCITY IN BOTTOM OF CIRCULAR PIPE

ZHANG Hua WANG Jing

(School of Mechanical & Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract Nitrogen bubble rising velocity in bottom of circular pipe has been studied by virtual experiment with high-speed camera. The obtained images are processed systematically. Based on Cole's and Mendelson's empirical formula of bubble rising velocity, fitting formula of nitrogen bubble rising velocity in bottom of circular pipe has been acquired through analyzing nitrogen bubble rising velocity. Through this experiment, we research rising velocity's change law, which is the spade work to study propagation mechanism of nitrogen slug bubble in circular pipe.

Key words high-speed camera; nitrogen bubble; rising velocity; image process; fitting formula

1 前 言

现代宇航工程的发展对多相流科学理论在低温工程中的应用提出了新的挑战和极高的要求。低温工程中的低温液体输送系统中始终存在热漏, 从而不可避免地形成低温两相流动^[1,2]。两相流的发生使低温液体输送系统的压力计算、稳定运行等问题变得十分复杂, 给低温设备的安全运行监控提出更高的要求。研究低温液体的贮存、输送过程中出现的两相流非稳定现象在低温液体火箭发动机设计中具有重要的意义。国内外虽然有采用氟利昂及水等工质进行气泡上升速度的研究^[3~5], 但工质往往都是常温液体工质, 比较少见低温液体作为工质进行气泡上升速度的研究。他们的研究工作指出: 气泡在不同常温液体工质中的上升速度均不相同, 且与

工质的密度、粘度及表面张力有关。低温液体如液氢, 液氮, 液氦等具有很大的压缩系数, 汽相与液相间密度差别小且蒸发潜热小, 因此低温两相流气泡的产生、发展与常温两相流气泡的产生、发展有很大的不同。常温液体中气泡上升速度的公式不能直接用于计算低温液体气泡的上升速度。

2 低温液体可视化实验装置

图 1 为垂直低温两相流管底液氮气泡上升速度的实验装置的示意图, 主要由液氮杜瓦、贮罐、低温垂直输送管(测试段)和真空泵组成。为探讨低温液体垂直输送管路的流动规律, 针对低温液体特性, 实验所用贮罐及低温垂直输送管路均采用双层 Pyrex 玻璃特殊制成, 并使用真空泵将真空夹层抽取真空。

收稿日期: 2006-03-02; 修订日期: 2006-06-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.50476015)

作者简介: 张 华 (1977-), 男, 安徽霍邱人, 在读博士生, 主要从事两相及多相流的研究。

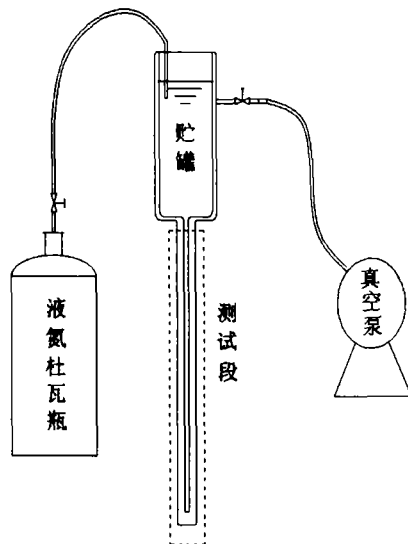


图1 可视化实验装置示意图

实验使用的玻璃管参数及抽真空后的真空夹层的真空度见表1的双层输送管路结构数据。利用高速摄像装置，测量并拍摄管路内流体运动状况。

图2是本实验所用摄像装置示意图。摄像装置由高速数码相机、监视器、光源、计算机组成。数码相机的型号为Faster-calm super high-speed video camera-10KC的高速数码相机，采样频率为25~10000帧。通过高速数码相机可以记录捕捉到的低温垂直可视化管路测试段的汽泡运动状况。通过数码相机拍摄到的管路高度由采样频率决定，频率越高，拍摄的范围越小，清晰度也越高。

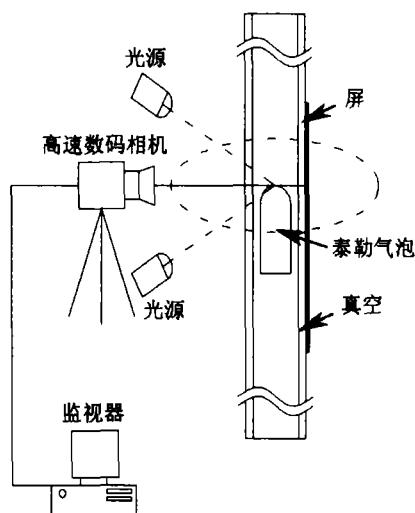


图2 拍摄装置示意图

实验中，当液氮汽泡经过测试段时，运动状况被高速数码相机及摄像机记录，并直接或通过视频采集卡存储到计算机中。高速数码相机的采样频率为250帧，捕捉下来的图片为16 bit的彩色图片，分辨率为25万像素，质量较高，易于汽泡分析。光源采用了2个1000 W的摄影灯。

实验过程中，采用高速摄像机的对从管路底部开始取0D~4D的区域进行了测量。

表1为管路的结构数据，双层输送管路由透明的Pyrex玻璃直接烧制而成，可以通过摄像机直接拍摄管路内部汽泡运动状况。

3 可视化实验结果及分析

实验通过获得的大量图像及图片数据，对0~4D区域汽泡的上升速度进行了测量。针对低温实验的特点，为减少测量误差，本文采用文献[6,7]介绍的汽水两相流可视化实验方法，测量时采用图像软件将图片放大后测量，保证了必要的直观性和可靠性。

由于高速摄像机的采样频率为250帧，因此每幅图片之间的时间间隔仅为4 ms。由于时间间隔较短，在较短的时间间隔内，汽泡上升速度和变形程度较小，因此在连续的一系列图片中可以清楚地找到需要进行测量的汽泡的位置。通过将所得的图片经过曝光及灰度处理后，利用图片处理软件将图片放大，即可以对汽泡的大小以及位置进行测量，并对多组图片中获得的数据进行算术平均，得到平均值，然后再利用测量出来的数据对汽泡的上升速度进行计算。

图3是高速摄像图片经过曝光以及灰度处理后所获取的2D~4D区域的图像。图3中每张图像时间间隔为4毫秒。从图中可以较清楚的看出，同一个汽泡在不同图片中的形状变化不是很大，因此同一个汽泡在不同图片中的位置比较好确定。

测量计算表明，在2D~4D区域内靠近管壁的汽泡上升速度普遍大于靠近管路中心部分汽泡的上升速度。这是由于管内生成汽泡，管路下方需要补充液氮，因此上方的液氮通过管路中心向下补充，因此在管路内形成了自然循环。由于自然循环的原因，管路中部的液氮向下补充，管路靠近壁面的液氮向上运动，于是管路中心部分的汽泡受到上方下降的液氮的影响速度减小，而靠近管壁部分的汽泡速度相对增加；同时由于受到上方下降的液氮的挤压，

表1 低温输送管路结构数据

输送管路	输送管内径 (mm)	管路长度 (m)	长径比	绝热方式
双层输送管 (抽真空绝热)	16	0.80	50	真空夹层 15 mm, 真空度 6×10^{-2} Pa

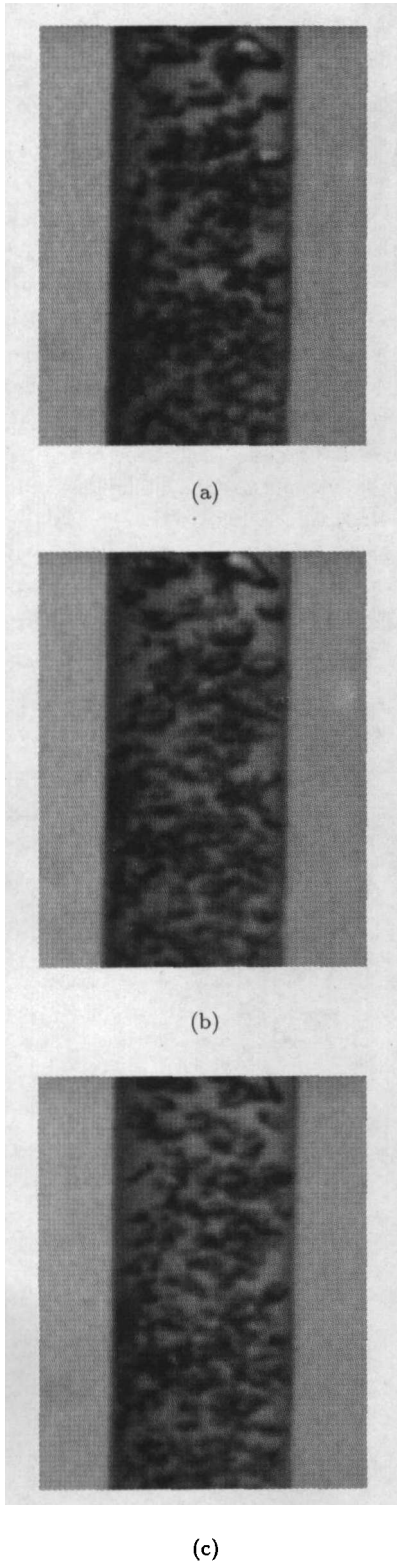


图 3 高速摄像图片经过曝光及灰度处理后的图像

气泡逐渐向管壁运动, 并且逐渐融合, 从而造成小气泡数量的减少, 由小气泡融合而成的较大的气泡在管壁附近形成。图 4 给出了气泡在管路底部上升速度与直径 D 的速度分布曲线。

文献 [3] 介绍了 Mendelson 和 Harmathy 的气泡上升速度的经验公式分别如下:

$$v_b = (2.14\sigma/(\rho_l d_b) + 0.505gd_b)^{1/2} \quad (1)$$

$$v_b = 1.53(g\sigma/\rho_l)^{0.25} \quad (2)$$

文献 [8] 介绍了 Cole 的气泡上升速度的经验公式:

$$v_b^2 = \frac{4\sigma + g(\rho_l - \rho_v)D_b^2}{2\rho_l D_b} \quad (3)$$

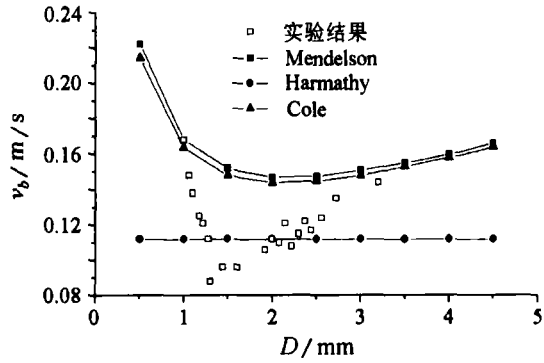


图 4 在管路底部气泡上升速度

从图中可以看出本文实验数据与三个不同气泡上升速度的经验公式曲线都有差异。这是因为上述三个气泡上升速度的经验公式都是采用汽-水两相流动在常温下进行的, 造成差异的原因是因为低温工质不同的热物理性质所致。同时图 4 表明本文实验测量计算所的数据, 与 Cole 和 Mendelson 气泡上升速度公式趋势基本一致。在此基础上, 本文对实验数据进行拟合, 得到以下液氮气泡上升速度经验公式 (4):

$$v_b^2 = \frac{1.25\sigma + 0.373g(\rho_l - \rho_v)D_b^2}{1.036\rho_l D_b} \quad (4)$$

式中, v_b 是圆管底部液氮气泡上升速度, σ 是液氮表面张力, ρ_l 是液氮密度, ρ_v 是氮气密度, D_b 是圆管直径。

实验结果表明, 表面张力是影响气泡形状和气泡上升速度的主要因素。表面张力越大, 气泡越接近球形, 气泡上浮所受的阻力越小, 气泡上升速度越大。液体粘度主要影响气泡上浮过程所受的阻力, 粘度越大阻力越大。同时, 汽液密度差越大, 气泡上升的速度也就越快。因此对于管路底部而言, 由于是气泡生成的区域, 因此气泡各向变形很小, 故气泡在这一区域里非常接近球形。因此, 此时管路底部的小气泡的上升速度较快。

受实验设备所限, 无法准确地测量直径小于 1 mm 的气泡直径的大小, 故直径小于 1 mm 的气泡没有测量计算数据。

4 结 论

本文实验研究得出以下结论:

(1) 圆管管路底部气泡上升速度随着气泡半径的变化而变化: 当气泡半径小于 1.5 mm 时, 气泡上升速度随着气泡直径的减小而增加; 当气泡大于 1.5 mm 时, 气泡上升速度随着气泡直径的增加而减小。

(2) 本文所得液氮气泡在圆管管路底部上升速度的拟合关系式与常温液体的气泡上升速度经验公式的差别, 反映了低温液体中气泡产生的物理特性, 可用于进一步研究低温两相流型变化的预测实验, 并可为模拟理论计算研究提供依据。

参 考 文 献

[1] Frost W. Heat Transfer at Low Temperatures. New York:

Plenum Press, 1975. 1-3

- [2] 陈国邦, 林理和. 低温绝热与传热. 杭州: 浙江大学出版社, 1989. 137-144
- [3] 李小明, 王冶, 等. 气泡在不同液体中上升速度的实验研究. 西安交通大学学报, 2002, 37(9): 971-974
- [4] Kawai T, Yoshino H, Kawabata Y. Self-Regulating Characteristics of a Cold Neutron Source with A Cylindrical Annulus Moderate Cell. Physica: B, 2002, 311: 164-172
- [5] Raymond F, Rosant J M. A Numerical and Experimental Study of The Terminal Velocity and Shape of Bubbles in Viscous Liquids. Chemical Engineering Science, 2000, 55(5): 943-955
- [6] L Shemer, D Barnea. Visualization of the Instantaneous Velocity Profiles in Gas-Liquid Slug Flow. PhysicoChemical Hydrodynamics, 1987, 8(1): 243-253
- [7] Takatoshi Takemoto, Mitsuo Matsuzaki, et al. The Coalescence Mechanism of Multiple Slug Bubbles. Journal of Nuclear Science and Technology, 1999, 36(8): 671-682
- [8] 林瑞泰. 沸腾换热. 北京: 科学出版社, 1988. 117-120