

# 管内低温垂直向上两相流弹状汽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弹状汽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 Moissis 等和 Takatoshi 弹状汽泡上升速度经验公式的基础上, 通过对弹状汽泡的上升速度的分析, 提出了圆管内弹状汽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汽泡的生成机理提供依据。

**关键词** 高速摄像机; 液氮汽泡; 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(2007)Suppl.1-0197-04

## EXPERIMENTAL STUDY ON TAYLOR BUBBLE RISING VELOCITY IN VERTICAL 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<sup>[1,2]</sup>。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。

垂直低温两相流输送管内两相流流型的确定是航空航天工程中的重要问题。由于在低温液体火箭发动机中的低温燃料大多使用的是液氧和液氢或液氧和煤油的组合, 因此, 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<sup>[3~5]</sup>, 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, 因此低温两相流汽泡的产生、发展与常温两相流汽泡的产生、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。

本文针对低温液体的特性, 对液氮弹状汽泡的产生和上升速度进行了实验研究, 利用高速摄像技术获得了液氮弹状汽泡上升速度的实验数据, 并在 Moissis 等和 Takatoshi 汽泡上升速度经验公式的基

收稿日期: 2007-03-18; 修订日期: 2007-06-09

基金项目: 国家自然科学基金的资助 (No.50476015)

作者简介: 张 华 (1977-), 男, 安徽霍邱县人, 在读博士研究生, 主要从事多相流方面的研究。

基础上,通过对低温液体液氮弹状汽泡的上升速度的分析,提出了圆管内液氮弹状汽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汽泡的生成机理提供依据。

## 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汽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。

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-10 KC 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。

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。

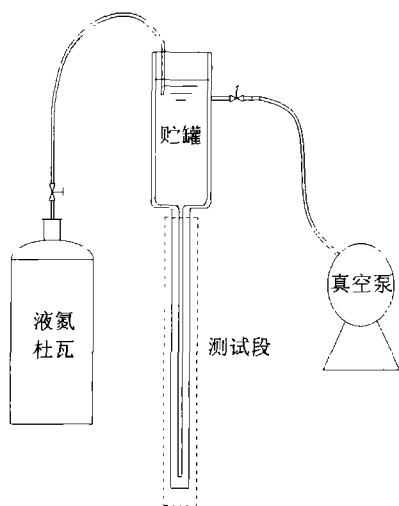


图 1 可视化实验装置示意图

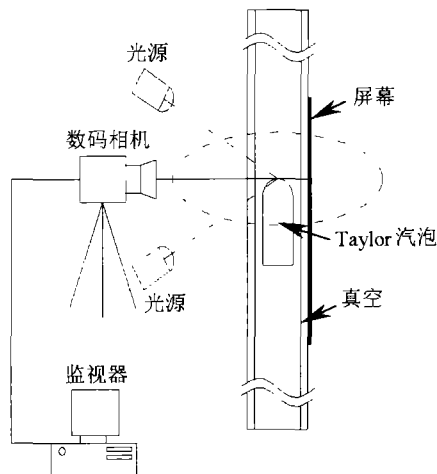


图 2 拍摄装置示意图

实验过程中,采用高速摄像机对管路  $6D \sim 48D$  ( $D$  为输送管内径) 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。

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	16	0.80	50	真空夹层 15 mm, 真空度 $6 \times 10^{-2}$ Pa

## 3 弹状流汽泡上升速度的研究

图 3 是汽泡聚合形成后,发展中的弹状流弹状流汽泡模型示意图。设汽泡间距较小,流体处于发展中状态,汽泡间相互影响。上面一个 Taylor 汽泡上升后,在汽泡后部形成的负压,促进汽泡过热,并产生更多的汽泡。这样,汽泡后面的小汽泡在汽泡尾部聚合后,形成一定的绕流区,影响着下一个 Taylor 汽泡。促使下一个汽泡速度增大,直至与前一个 Taylor 汽泡聚合,形成更大的汽泡。

关于弹状汽泡上升速度的预测计算,目前较公认的是 Ishii、Moissis 等<sup>[6]</sup>和 Takatoshi<sup>[7]</sup>的公式。Ishii 在对垂直管路中产生的弹状流汽泡上升速度给出了相关的计算关系式是:

$$u_{gs} = C_0 J + V_j \quad (1)$$

$$C_0 = 1.2 - 0.2 \sqrt{\rho_g / \rho_l} \quad (2)$$

$$V_j = 0.35 \sqrt{g \Delta \rho D / \rho_l} \quad (3)$$

其中,  $C_0$  是速度分布系数;  $V_j$  是漂移流模型中气泡速度, m/s;  $D$  是管路内径, m;  $J$  是流体的表观速度, m/s。

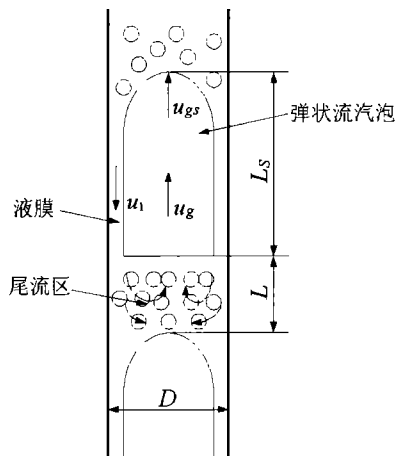


图 3 Slug 气泡模型

但 Ishii 没有考虑气泡间距对气泡速度分布的影响。实际气泡聚合并上升后, 弹状流气泡的上升速度主要与气泡流体性质和两个气泡间距离有关。两个气泡间距离较短时, 前面一个气泡将对后面的气泡产生一定的影响。Moissis 等和 Takatoshi 考虑了弹状流气泡在上升时, 气泡间距对气泡速度分布的影响, 及管路中气泡上升会产生一定的振荡现象。对公式 (1) 进行了修正, 增加了与气泡间距有关的修正系数  $C_1$ 。

$$u_{gs} = C_0 J + C_1 V_j \quad (4)$$

$$C_0 = 1.2 - 0.2 \sqrt{\rho_g / \rho_l} \quad (5)$$

$$C_1 = 1 + A e^{B(L/D)} \quad (6)$$

$$V_j = K \sqrt{g \Delta \rho D / \rho_l} \quad (7)$$

其中,  $C_1$  是速度分布系数;  $A$  和  $B$  是与  $C_1$  相关的系数;  $L$  是图 3 中上一个气泡末端到下一个气泡顶端的距离, m。

公式 (5)、(6)、(7) 中的速度系数  $K$ 、 $A$  和  $B$  与管路中流体性质及管路内流体流动时的流型有关。而以上实验及理论研究均采用汽水两相流体进行的, 因此对于低温流体在低温垂直输送管路中的汽体流动, 不能直接采用公式 (5)、(6)、(7) 中给定的速度分布系数。

本文实验通过获得的大量图像及图片数据 (如图 4、5、6), 对弹状流气泡的上升速度进行了测

量。通过对图 4、5、6 分别放大测量, 本文得出了图 7。

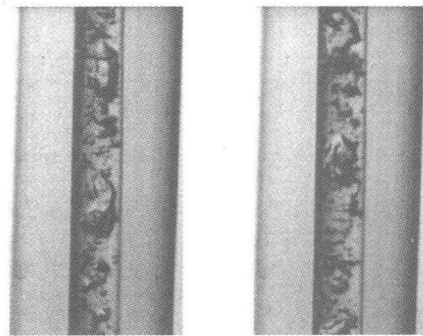


图 4 弹状气泡刚形成时管路内的流动情况

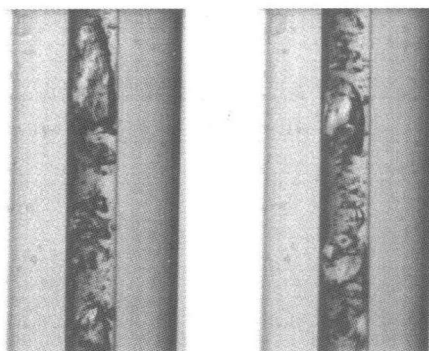


图 5 弹状气泡刚成长时管路内的流动情况

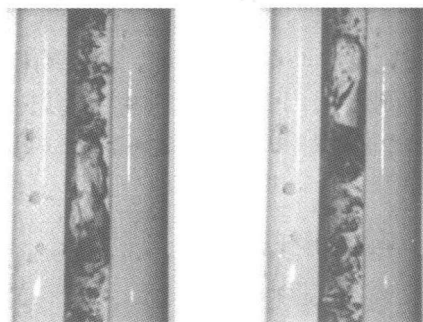


图 6 弹状气泡成长较充分时管路内的流动情况

图 7 所绘本实验中液氮在低温垂直管路中弹状流气泡上升速度与  $L/D$  的关系, 是根据所获图像放大后测量出的数据所绘制。其中为进行比较还给出 Moissis 和 Takatoshi 采用水为工质时, 得出的速度分布曲线 (其中  $L$  为前一个气泡底部到后一个气泡顶部之间的距离,  $D$  为管路内径)。图 7 表明弹状流气泡的上升速度随着气泡间间距的减小而上升。尤其是在气泡间距小于  $4D$  时, 后面的气泡明显受到前面气泡的激活效应的影响, 导致弹状流气泡的

速度有明显的上升趋势。当汽泡间距大于  $4D$  后, 汽泡速度分布受汽泡间距的影响逐渐减少, 开始趋于稳定。而汽泡速度在汽泡间距大于  $6D$  以后基本不再互相影响, 汽泡速度基本不变。

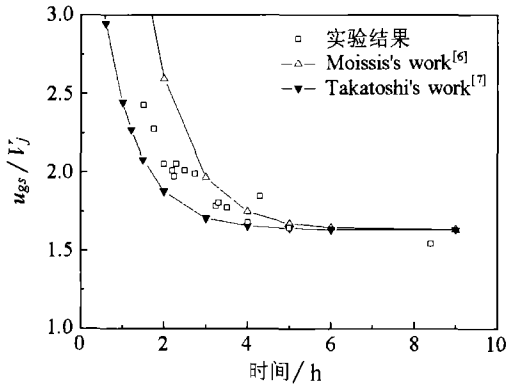


图 7 汽泡上升速度

本文在式 (5), (6), (7) 的基础上对速度系数  $K$ 、 $A$  和  $B$  进行拟合, 得到低温垂直管路中弹状汽泡上升速度拟合公式:

$$u_{gs} = C_0 J + C_1 V_j \quad (8)$$

$$C_0 = 1.2 - 0.2 \sqrt{\rho_g / \rho_l} \quad (9)$$

$$C_1 = 1 + A e^{B(L/D)} \quad (10)$$

$$V_j = K \sqrt{g \Delta \rho D / \rho_l} \quad (11)$$

其中,  $K=0.36$ 、 $A=2.31$ 、 $B=-0.688$ 。

应该说明的是, 本文实验中由于管路没有足够长, 因此汽泡最终没有充分发展, 汽泡间距大于  $6D$  的实验数据较少。因此可以认为实验管路中的弹状流始终处于发展状态, 少部分两相流体的流动达到了充分发展状态。

## 4 结 论

本文实验研究得出以下结论:

(1) Taylor 汽泡在上升过程中, 相互影响, 后面的汽泡被前面的汽泡带动, 流速逐渐增大, 最终两个汽泡聚合成较大的弹状汽泡。随着汽泡间距的逐渐增大 ( $> 4D$ ), 汽泡之间的相互影响及聚合现象将会减少, 弹状汽泡的上升速度逐渐趋于稳定。

(2) 本文得到了管路内弹状汽泡上升速度分布与汽泡间距的关系: 随着汽泡间距的增加, 汽泡上升速度逐渐减小, 最后趋于稳定。并根据实验获得的弹状汽泡的上升速度的数据, 拟合了弹状汽泡上升速度的关系式。

(3) 本文所得液氮汽泡在圆管管路内上升速度的拟合关系式与常温液体的弹状汽泡上升速度经验公式的差别, 反映了低温液体中汽泡产生的物理特性, 可用于进一步研究低温两相流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, ed. Heat Transfer at Low Temperatures. New York: Plenum Press, 1975
- [2] 陈国邦, 林理和. 低温绝热与传热. 杭州: 浙江大学出版社, 1989
- [3] 李小明, 王治, 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: 971-974
- [4] Kawai T, Yoshino H, Kawabata Y. Self-Regulating Characteristics of a Cold Neutron Source with a Cylindrical Annulus Moderator 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): 943-955
- [6] R Moissis, P Griffith. Entrance Effect in two Phase Slug Flow. Journal of Heat Transfer, TRANS ASME. Series C, 1962, 84: 29-39
- [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