

## 部分重力条件下气液两相流型研究

赵建福<sup>1</sup> 解京昌<sup>1</sup> 林海<sup>1</sup> 胡文瑞<sup>1</sup> A V Ivanov<sup>2</sup> A Yu Belyaev<sup>2</sup>

( 1. 中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100080;

2. Keldysh Research Center, Moscow 125438, Russia )

**摘要** 本文分析了“和平号”空间站气液两相流实验中获得的部分重力 (0.1 g 和 0.014 g) 条件下的流型特征及其相互转换条件, 并将其和常重力与微重力两相流研究中较常用的流型转换模型的预测结果进行了比较。

**关键词** 微重力; 气液两相流; 流型

**中图分类号:** O359<sup>+</sup>.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2004)01-0085-03

### STUDY ON TWO-PHASE GAS-LIQUID FLOW PATTERNS AT PARTIAL GRAVITY CONDITIONS

ZHAO Jian-Fu<sup>1</sup> XIE Jing-Chang<sup>1</sup> LIN Hai<sup>1</sup> HU Wen-Rui<sup>1</sup> A V Ivanov<sup>2</sup> A Yu Belyaev<sup>2</sup>

(1. National Microgravity Laboratory; Institute of Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Keldysh Research Center, Moscow 125438, Russia)

**Abstract** The two-phase flow patterns at partial gravity conditions (0.1 g and 0.014 g), which were obtained from the experiments conducted aboard the Mir space station, are analyzed in the present study. The experimental data are compared with some models widely used to predict the flow pattern transitions at both normal gravity and microgravity.

**Key words** microgravity; two-phase gas-liquid flow; flow patterns

## 1 前言

气液两相流现象不仅广泛应用在地面常重力环境中众多工业过程(如石油、化工、能源、动力等), 而且在空间微重力环境也有很多重要应用, 如航天器流体与热管理、动力与能源供应、环境控制与生命保障等。此类系统设计与运行的可靠性, 依赖于对气液两相流机理的充分认识。流型因其对两相流压降及传热、传质特性等的重要影响, 一直是气液两相流研究中颇受重视的基础课题之一。

目前, 关于流型产生与转换机理的知识往往基于地面常重力环境中大量精心设计的实验的结果。由于地面常重力环境中, 重力作为主导因素所引起的浮力分层及相间滑移等复杂影响难以完全揭示, 现有知识远非完善。空间微重力环境中, 重力作用被削弱甚至完全消失, 气液两相流具有与常重力环境相比大为简单的特征。因此, 微重力气液两相流

研究还将有助于彻底揭示流型产生与转换的机理, 保证相关技术的顺利发展<sup>[1]</sup>。

目前微重力两相流实验所需要的失重条件主要由抛物线飞机或落塔等地基设施提供, 具有很大的局限性<sup>[1]</sup>。1999年8月, 中国科学院国家微重力实验室和俄罗斯 Keldysh 研究中心合作, 利用“和平号”空间站, 首次在长期、稳定的微重力环境中开展了不同重力条件下气液两相流实验<sup>[2]</sup>。文献[3,4]分析了在“和平号”空间站背景微重力条件下的两相流型特征。本文将对部分重力(0.1 g 和 0.014 g)条件下的气液两相流特征进行分析。

## 2 实验装置与方法

实验装置包括液相回路、气相回路、气液两相回路、照明及摄像装置等<sup>[2]</sup>, 安装在“和平号”空间站“Volna-2A”流体动力学实验台上。该实验台可

收稿日期: 2003-02-26; 修订日期: 2003-11-18

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (No.19789201; No.10202025); 中国科学院“知识创新工程”资助项目 (No.KJJCX2-SW-L05)

作者简介: 赵建福 (1967-), 男, 河南南阳人, 副研究员, 博士, 主要从事微重力两相流传热研究。

以绕其轴按一定角速度旋转。“和平号”空间站背景重力水平不大于  $10^{-5} g$ 。本实验中, 实验段与旋转轴平行(因此流动为水平的), 由实验台旋转在实验段所在位置产生两种离心加速度:  $0.1 g$  和  $0.014 g$ , 即“模拟”的部分重力条件。

受“和平号”空间站内部空间的限制, 实验段内径  $10 \text{ mm}$ , 长度仅  $356 \text{ mm}$ 。流型观测位置在实验段出口附近。为尽量消除长径比较小可能带来的进口效应对观察段流型的影响, 特别设计了气液混合器, 结果表明流量较大时, 进口效应可以忽略不计<sup>[3]</sup>。

本实验采用 carbogal( $\text{C}_6\text{F}_{10}(\text{CF}_3)_2$ ) 为液相介质, 其物性参数 ( $20^\circ\text{C}$ ) 分别为: 密度  $1858 \text{ kg/m}^3$ , 粘度  $1.95 \times 10^{-3} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ , 表面张力  $0.019 \text{ N/m}$ 。气相为空气。液相流量用涡轮流量计测量, 其输出由数字万用表显示。气相流量则根据一定时间内高压气罐内压力的变化计算。实验段内流型特征及万用表、压力表读数均用 SONY DCR VX-1000 数码摄像机记录下来, 并随宇航员一起由“和平号”空间站带回地面进行分析。气、液两相表观流速的不确定度在实验范围内均不大于  $15\%$ 。

### 3 结果和讨论

受空间实验时间限制, 本实验在  $0.1 g$  条件下进行了 10 组实验, 观测到弹状流、波-环过渡流和环状流等 3 种流型; 在  $0.014 g$  条件下仅完成了 1 组实验, 流型为弹-环过渡流(图 1)。实验中气、液两相表观流速分别为  $0.09 \sim 8.6 \text{ m/s}$  和  $0.05 \sim 0.18 \text{ m/s}$ , 相应地, Bond 数为  $9.6(0.1 g)$  和  $1.34(0.014 g)$ , 气相表观 Reynolds 数和 Weber 数分别为  $60 \sim 5700$  和  $0.005 \sim 47$ , 液相表观 Reynolds 数和 Weber 数分别为  $475 \sim 1700$  和  $2.4 \sim 30$ 。

小气相流量条件下,  $0.1 g$  条件下的流型(弹状流和波-环过渡流)明显具有浮力分层现象: 较轻的气相介质偏向于流道顶部, 而密度较大的液相介质则居于流道底部。在气相流量较大时, 环状流 ( $0.1 g$ ) 和弹-环过渡流 ( $0.014 g$ ) 表现出一定的对称性, 显示出不依赖于重力的特性。这和气相惯性的增强及浮力效应的减弱有关。

图 2 比较了部分重力条件下气液两相流型实验数据和某些常用的常重力或微重力两相流型转换模型的预测结果。

目前, 在地面常重力环境中, 最常采用的流型转换模型有两类: 一是由 Taitel 等<sup>[5,6]</sup> 提出的半理论模型, 二是由 Weisman 等<sup>[7,8]</sup> 提出的经验模型。根据

Reddy Karri 和 Mathur<sup>[9]</sup> 计算的结果, Weisman 模型预测的水平流和垂直向上流流型图, 随着重力逐渐减弱会趋于一致, 这与微重力两相流不依赖于流动方向的特征相符; Taitel 模型不具有这种特性。因此, 图 2 仅给出了 Weisman 模型<sup>[8]</sup> 的预测结果。一般而言, 该预测和实验数据符合较好。但因为实验数据较少, 尤其是液相流量范围较窄, 难以给出确定性的结论。

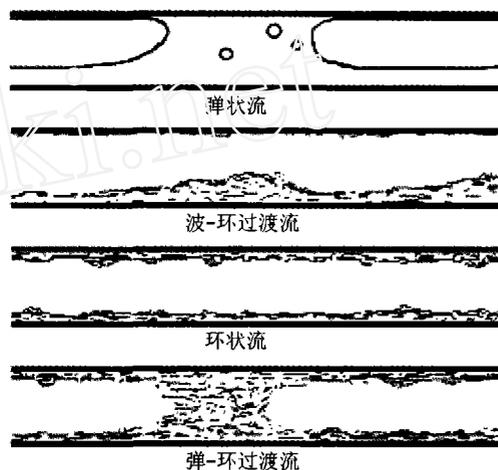


图 1 部分重力条件下气液两相流型特征

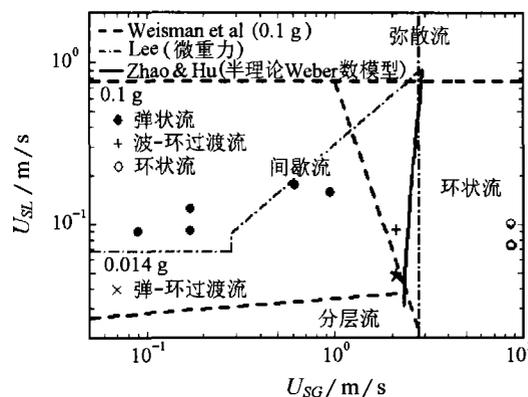


图 2 “和平号”空间站部分重力条件下气液两相流型图

对于微重力条件下的弹状流-环状流转换, Zhao 和 Hu<sup>[10]</sup> 提出的半理论 Weber 数模型具有明确的物理意义和较广泛的适用性。图 2 将其预测结果和实验数据进行了比较, 该模型很好地区分了  $0.1 g$  条件下观测到的弹状流和环状流实验数据。Zhao 等<sup>[11]</sup> 认为, 该模型当基于混合流速的 Froude 数大于  $3.5$  时都可适用。事实上,  $0.1 g$  条件下观测到的流型中, 最接近弹状流-环状流转换边界的实验点,

恰好处在 Froude 数等于 3.5 的状态, 而全部的环状流、波-环过度流都满足 Froude 数大于 3.5 条件。当然, 实验数据的有限性同样会影响到该结论的确定性。

为了便于比较不同重力条件下两相流型图的异同, 图 2 还给出了 Lee<sup>[12]</sup> 模型预测的微重力条件下的流型转换边界。该模型考虑了进口效应的影响(主要表现在小气相流量时), 若将弹状流和弹-环过度流型均视为间歇流, 其预测和“和平号”空间站背景微重力条件下的实验数据符合很好<sup>[3,4]</sup>。0.1 g 条件下弹状流区明显向小气相流量方向扩展。若 0.1 g 条件下控制泡状流-弹状流转换的基本机制是气泡间合并, 则上述扩展主要源于浮力分层效应引起气泡上移, 增大了局部气相份额, 强化了气泡间的碰撞与合并。

#### 参 考 文 献

- [1] 赵建福. 微重力条件下气/液两相流流型的研究进展. 力学进展, 1999, 29(3): 368-382
- [2] 赵建福, 解京昌, 林海等. 不同重力条件下气/液两相流实验研究. 工程热物理学报, 2001, 22(3): 367-369
- [3] Zhao J F, Xie J C, Lin H, et al. Experimental Studies on Two-Phase Flow Patterns Aboard the Mir Space Station. *Int. J. Multiphase Flow*, 2001, 27(11): 1931-1944
- [4] Zhao J, Xie J, Lin H, et al. Microgravity Experiments of Two-Phase Flow Patterns aboard Mir Space Station. *Acta Mechanica Sinica*, 2001, 17(2): 151-159
- [5] Taitel Y, Dukler A E. A Model for Prediction Flow Regime Transition in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow. *AIChE J.*, 1976, 22(1): 47-55
- [6] Taitel Y, Barnea D, Dukler A E. Modelling Flow Pattern Transitions for Steady Upward Gas-Liquid Flow in Vertical Tubes. *AIChE J.*, 1980, 26(3): 345-354
- [7] Weisman J, Duncan D, Gibson J, et al. Effects of Fluid Properties and Pipe Diameter on Two-Phase Flow Patterns in Horizontal Lines. *Int. J. Multiphase Flow*, 1979, 5(6): 437-462
- [8] Weisman J, Kang Y. Flow Pattern Transitions in Vertical and Upwards Inclined Lines. *Int. J. Multiphase Flow*, 1981, 7(3): 271-291
- [9] Karri BBR, Mathur V K. Two-Phase Flow Pattern Map Predictions Under Microgravity. *AIChE J.*, 1988, 34(1): 137-139
- [10] Zhao J F, Hu W R. Slug to Annular Flow Transition of Microgravity Two-Phase Flow. *Int. J. Multiphase Flow*, 2000, 26(8): 1295-1304
- [11] Zhao J F, Xie J C, Lin H, et al. Experimental Study on Two-Phase Gas-Liquid Flow Patterns at Normal and Reduced Gravity Conditions. *Science in China, Ser E*, 2001, 44(5): 553-560
- [12] Lee J. Scaling Analysis of Gas-Liquid Two-Phase Flow Pattern in Microgravity. In: 31<sup>st</sup> Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, NV, 1993