

# 不同重力条件下气 / 液两相流实验研究

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 Russia 125438 )

**摘 要** 利用俄罗斯“和平号”空间站进行了国际上首次长时间微重力 ( $10^{-5}$  g) 条件下气 / 液两相流型实验, 并利用实验装置旋转产生的低重力 (0.1 g 和 0.014 g) 条件进行了低重力对比实验. 实验结果和现有模型进行了比较, 并通过比较不同重力条件下气 / 液两相流型的特征, 得到了两个气 / 液两相流型非重力依赖性准则.

**关键词** 微重力; 两相流动; 流型

中图分类号: O359+.1 文献标识码: A 文章编号: 0253-231X(2001)03-0367-03

## EXPERIMENTAL STUDY ON TWO-PHASE GAS-LIQUID FLOW PATTERNS AT DIFFERENT 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** A series of experiments of two-phase flow patterns were firstly conducted at long-term, steady reduced gravity conditions on board the Russian Space Station “Mir”. Most of the experimental runs are performed at microgravity condition of the background environment of the space station, while low gravity conditions (0.1 g and 0.014 g) are also provided by rotating the stand with corresponding angular velocities. The results are compared with some widely used model, and the influence of gravity on two-phase flow patterns is analyzed.

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

## 1 引 言

在人类早期的空间实践中, 热量传输与控制往往采用与重力无关的技术, 如固体热传导、内部辐射、热管和单相的液体或气体环路等。然而, 随着空间科学技术的进步, 空间飞行器越来越向大功率和高度精细化方向发展, 对能源和废热管理的要求也越来越高。这就要求设计和建造具有更大功率、更为先进的能源供应和热量传输与控制系统。两相流动环路作为一种极好的选择, 具有优良的等温化性能, 并且, 和单相流动环路相比, 两相流动环路输送

相同的热量所需流体流率非常小, 相应的系统质量也小得多。此外, 两相流动还被广泛应用于地面各种工业过程和空间科学其他方面。这样, 深入理解空间微重力环境中两相流动的机理, 预测在不同的气、液两相流率情况下流道内各相介质的分布特征 (即流型)、沿程压降及传热特性等, 有着重要的学术意义和重大的应用价值<sup>[1]</sup>。

目前主要采用飞机沿抛物线轨迹飞行或落塔内自由下落等方法产生实验所需要的微重力条件, 另外, 在地面常重力环境中利用等密度液 / 液两相流动或毛细管气 / 液两相流动也可以进行模拟微重力

收稿日期: 2001-01-03; 修订日期: 2001-02-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.19789201); 科技部攀登计划资助项目 (No.95-预-34)

作者简介: 赵建福 (1967-), 男, 河南南阳人, 副研究员, 博士, 主要从事微重力流体物理 (特别是两相流动与传热) 的研究。

气 / 液两相流动实验。不过, 上述方法都存在许多缺陷, 如实验时间短, 残余重力波动剧烈, 或不能实现完全模拟等<sup>[2]</sup>。因此, 在长时间、高水平、稳定的微重力环境中进行气 / 液两相流动实验, 对深入其流动机理十分必要。

本文介绍了利用俄罗斯“和平号”空间站进行的不同重力条件下气 / 液两相流实验结果, 并将实验结果与常用的微重力气 / 液两相流型转换模型进行了比较, 分析了气 / 液两相流型的非重力依赖性准则。

## 2 实验装置与方法

实验装置(见图 1)包括液相回路、气相回路、气 / 液两相回路、照明及摄像装置等, 符号 A~K 分别代表贮液箱、泵、涡轮流量计、气 / 液混合器、实验段、气 / 液分离器、贮气软囊、压气机、高压气罐和两个压力表。整个实验装置安装在俄罗斯“和平号”空间站 VOLNA-2A 流体动力学实验台上。“和平号”空间站背景重力水平不大于  $10^{-5} g$ , VOLNA-2A 流体动力学实验台按一定角速度旋转, 可以产生所需要的离心加速度, 形成“模拟”低重力条件。本实验中, 实验段与旋转轴平行, 因此, 相应于“模拟”重力加速度而言流动为水平的。

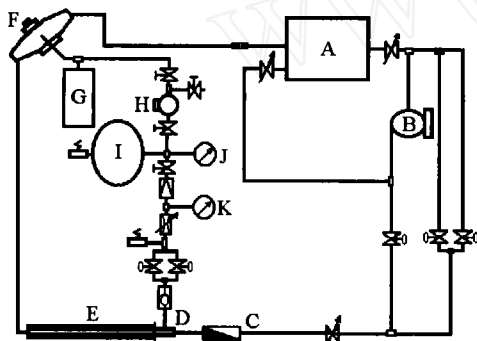


图 1 实验装置简图

由于受“和平号”空间站允许空间的限制, 内径 10 mm 透明实验段的长度仅为 356 mm。流型观测位置在实验段后半部分(不小于 150 mm)。为了尽量消除较小的实验段长径比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>[2]</sup>。

液相为 Carbogal( $C_6F_{10}(CF_3)_2$ ), 其流量用涡轮流量计测量, 结果用数字万用表显示。气相为空气, 其流量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

空间实验于 1999 年 8 月完成。绝大部分(42 组)实验是在“和平号”空间站背景微重力条件下进行的; 由于宇航员空间活动时间比原计划大大缩短, 在 0.1 g 条件下只进行了 10 组实验, 在 0.014 g 仅完成了 1 组实验。选用这样两种“模拟”低重力条件, 是因为它们与目前常用的抛物线飞机所能提供的低重力条件相同, 由此可检验抛物线飞机对微重力气 / 液两相流研究的可行性; 此外, 0.1 g“模拟”重力加速度接近月球重力水平, 这一研究有可能直接服务于将来的月球开发任务。

实验中, 气、液两相表观流速范围分别为 0.09~8.6 m/s 和 (0.001~0.013 m/s)0.04~0.18 m/s, 括号内数字对应于 7 组预备性实验, 其中因液相流量低于涡轮流量计灵敏度下限无法直接测量, 只能根据液膜表面波传播速度估算液相表观流速。在这 7 组预备性实验中, 首次发现微重力条件下极低液相表观流速时存在一个新的环状流区域, 其中, 气相表观流速有大范围的变化。这一新的环状流型与 Aul & Olbricht<sup>[3]</sup> 在内径 54 $\mu$ m 毛细管内观察到的油 / 水两相环状流动极为相似, 说明微重力两相流动与微细尺度两相流动间存在某种相似关系, 可以进行相互模拟实验研究。

此外, 空间实验还观测到了 4 类 6 种不同流型: 微重力泡状流、微重力弹状流和低重力弹状流、微重力弹-环过度流和低重力波-环过度流、环状流。其中微重力条件下泡状流、弹状流、弹-环过度流、环状流及低重力环状流均表现出与重力无关的特征, 0.014 g 条件下完成的唯一 1 组实验表现为微重力弹-环过度流。

图 2 给出了全部实验结果, 并将其与空隙率模型<sup>[4,5]</sup>(泡状流-弹状流转换)和 Zhao & Hu<sup>[6]</sup>提出的半理论 Weber 数模型(弹状流-环状流转换)的预测结果进行了比较。图中, 点划线、虚线及实线分别对应 Colin et al<sup>[4]</sup>、Jayawadena et al<sup>[5]</sup>及 Zhao & Hu<sup>[6]</sup>模型的预测结果, 水平点线表示新环状流可能的上界。

空隙率模型认为微重力气 / 液两相泡状流-弹状流转换源于气泡间的合并, 而后者又决定于气泡充填程度, 即气相空隙率。因此, 存在一临界空隙率, 对

应着泡状流 - 弹状流转换。同时, 考虑到截面相分布与速度分布的不同, 微重力气 / 液两相流动中同样存在宏观 (或截面平均意义上的) 相间滑移现象, 也会影响泡状流 - 弹状流转换的条件。Colin et al<sup>[4]</sup> 和 Jayawadana et al<sup>[5]</sup> 利用几乎完全相同的实验数据, 分别给出了两个不同的确定空隙率模型参数  $X_C$  的经验关系, 均依赖于 Suratman 数  $Su = \rho_1 \sigma D / \mu_1^2$ 。本实验中, Suratman 数约为  $9.28 \times 10^4$ , 根据 Colin et al 关系可知模型参数为 0.54, 而 Jayawadana et al 关系则给出其值 0.76, 二者正好给出了实验观测到的泡状流 - 弹状流转换区域的上、下界限: Colin et al 关系在小液相流速情况下与实验符合较好, 而 Jayawadana et al 关系则比较符合液相流速较大的情况, 二者所预测泡状流 - 弹状流转换边界都较实验观测到的转换边界陡; 而在 0.1 g 条件下都存在将弹状流划到泡状流区域的情形。在 Zhao & Hu<sup>[6]</sup> 提出的半理论 Weber 数模型中, 弹 - 环过度流的存在被认为是源于实验条件控制与流型观测方法上的不确定性, 不属于基本流型 (由于其流动的间歇性, 本文将视为与弹状流同类); 弹状流 - 环状流转换源于气相惯性力与表面张力作用间平衡的破坏。和实验结果相比, 该模型较好地预测了不同重力条件下弹状流 - 环状流间的转换。

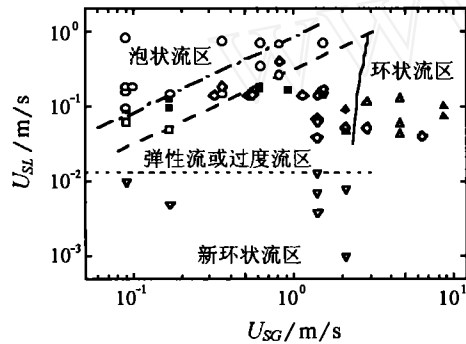


图 2 空间实验结果

根据两流体环状流动的线性稳定性分析及对微重力气 / 液两相流动特征的分析, 可将影响气 / 液两相流型的各种因素归结为两个无量纲参数<sup>[2]</sup>:

Bond 数和 Froude 数。结合本次空间实验结果, 尤其是不同重力条件下弹状流及过度流的不同特征及其对应参数范围, 可以确定气 / 液两相流型的非重力依赖性准则为:

$$\begin{cases} Bo = (\rho_L - \rho_G)gD^2/\sigma < Bo_{cr} \\ Fr = U_{SG}/\sqrt{(\rho_L - \rho_G)gD/\rho_G} > Fr_{cr} \end{cases}$$

其中  $Bo_{cr} \approx 1.5 \sim 6$ ,  $Fr_{cr} \approx 0.54 \sim 2.2$ 。上述准则对在地面常重力环境中正确模拟微重力两相流动现象具有重要的理论指导意义, 同时, 有助于正确解释模拟微重力两相流动实验结果。需要说明的是, 上述准则中, Bond 数准则与 Brauner & Moalem-Maroon 结论<sup>[7,8]</sup> 相近, 而 Froude 数准则在文献中尚未见有明确论述。

## 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] Zhao J F, Xie J C, Lin H, et al. Experimental Study on Gas/Liquid Two-Phase Flow in Microgravity. In: Proc. of 51st International Astronautical Congress, Rio de Janeiro, Brazil, 2000
- [3] Aul R W, Olbricht W L. Stability of a Thin Annular Film in Pressure-Driven, Low-Reynolds-Number Flow through a Capillary. J. Fluid Mech., 1990, 215: 585-599
- [4] Colin C, Fabre J, McQuillen J. Bubble and Slug Flow at Microgravity Conditions: State of Knowledge and Open Questions. Chem. Eng. Comm., 1996, 141/142: 155-173
- [5] Jayawardena S S, Balakotaiah V, Witte L C. Flow Pattern Transition Maps for Microgravity Two-Phase Flows. AIChE J., 1997, 43(6): 1637-1640
- [6] 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
- [7] Brauner N. On the Relations between Two-Phase Flows under Reduced Gravity and Earth Experiment. Int. Comm. Heat Mass Transfer, 1990, 17(3): 271-282
- [8] Brauner N, Moalem Maron D. Identification of the Range of 'Small Diameters' Conduits, Regarding Two-Phase Flow Pattern Transitions. Int. Comm. Heat Mass Transfer, 1992, 19(1): 29-39