第20卷 第4期 空 间 科 学 学 报 Vol.20, No.4
2000 年 10月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Oct., 2000

# 失重飞机搭载气/液两相流实验研究 *

赵建福 林 海 解京昌 胡文瑞
(中国科学院力学研究所 北京 100080)
吕从民 张玉涵
(中国科学院空间科学与应用研究中心)

**摘 要**

利用俄罗斯 IL-76MDK 失重飞机对失重条件下方形截面 (12 mm×12 mm) 管道内气/液两相流动进行了实验研究，观测到失重条件下气/液两相泡状流、弹状流和环状流等三种主要流型，同时得到了气、液两相介质的流量、温度和实验段内压力等结果，分析了失重条件下方形截面管道内气/液两相流型转换的条件.

**关键词** 微重力—气/液两相流—流型

## 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 (尤其是航天飞机和空间站) 越来越向大功率和高度精细化方向发展，对能源的需求也越来越大. 这就要求设计和建造具有更大功率、更为先进的空间热量传输与控制系统. 两相流动环路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，因此，两相流动环路成为先进的空间热量传输与控制系统的一种极好的选择. 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.

在过去的十多年中，国外一些研究人员利用落塔和失重飞机产生的短时失重过程进行了一些失重条件下的气/液两相流动实验；另外，在地面常重力条件下，利用中性悬浮实验方法和毛细管气/液两相流动系统，也进行了一些模拟微重力条件下的气/液两相流动实验 [1]. 在这些研究中，实验段的横截面往往采用圆形. 非圆形截面流道因为横截面存在“二次流”现象，强化了传热性能，更适用于热量的交换与传输. Wölk 等 [2] 研究了圆形和非圆形截面流道内的气/液两相流动，在常重力垂直向上流动中，观察到泡状流、弹状流和混块状流三种流型；而在失重条件下，只观察到泡状流和弹状流两种流型. 实验结果表明，在泡状流向其他流型转换边界处，液相流率可以被划分为“大”、“中”、“小”

* 中国科学院“失重飞机科学实验”项目之一；国家自然科学基金 (19789201) 、攀登计划 (95-预-34) 和中国博士后科学基金部分资助
1999-11-08 收到原稿，2000-05-1 收到修定稿

三个区域，空隙率模型 [3] 只适于中等液相流率区．由于实验中气相流率偏小，没有观察到环状流型．

## 2　实验装置与实验流程

我们所用的实验装置如图 1 所示，包括气相通路 (气瓶、减压阀、气体质量流量控制器和电磁阀等)、液相通路 (分离与泵装置、调节阀和液相流量计等)、气/液两相通路 (混合器和实验段) 及流型记录装置 (光源和摄像机)、测控系统等．实验介质为压缩空气和自来水．

空气储存在 8 L 铝合金高压气瓶内，气瓶内初始压力为 6.0—8.0 MPa, 减压阀出口压力设定为 0.5 MPa. 减压阀出口与两个气相流量测控支路相连，每个支路均包括一台气体质量流量控制器 (用于控制和测量空气流量，量程分别为 0—100 SLM 和 0—10 SLM, 精度均为满量程的 ±1.5%) 和一个电磁阀 (用于实现气相回路的开闭及两个测控支路间的切换)．空气流经测控支路，进入混合器与水混合，形成的水/气两相混合物通过实验段后，进入分离与泵装置，空气被分离出来直接排入机舱．实验中空气流量大小由程序自动控制．

水相回路是封闭的．水由分离与泵装置经调节阀流过液相流量计 (该流量计可同时测量水相流量和温度，量程分别为 0—1 500 kg/h 和 0—200°C, 流量的测量精度为满量程的 ±0.15%) 后，在混合器内和空气混合，形成的水/气两相混合物经实验段回到分离与泵装置，将空气分离出去后水循环使用．失重飞机起飞前，利用调节阀设置水相流量的大小．

混合器采用双套管结构，空气由 50 个均匀分布在内管壁上的小孔 (孔径为 0.8 mm) 流出，在内、外管间与水充分混合，形成均匀的水/气两相混合物．混合器出口截面与实验段横截面尺寸相同，均为 12 mm×12 mm. 实验段长 960 mm(相应于长径比为 80), 内部

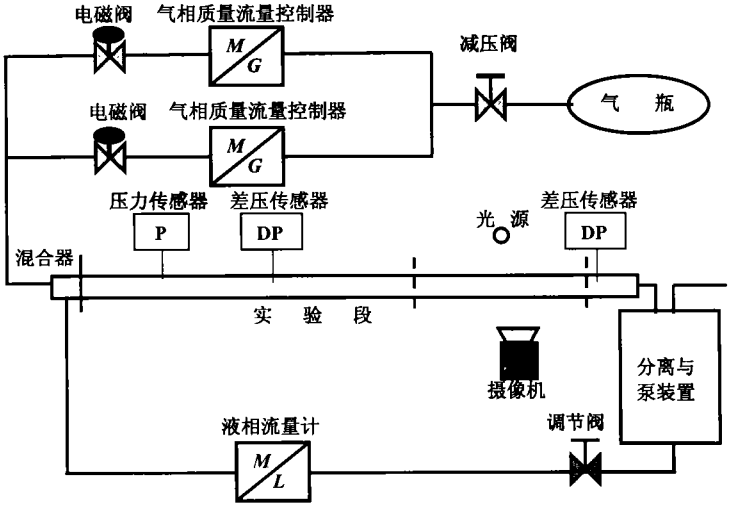


图 1　实验装置结构简图

Fig.1　Scheme of the experimental apparatus

流道用有机玻璃制造，外框用铝合金制造，在实验段进、出口附近各开有 13 mm×400 mm 的观察窗，以便于摄像机记录流型特征．实验表明，当实验段长径比大于 50 时，可以忽略进口效应对失重条件下气/液两相流型的影响．

实验段上连结有一个绝对压力传感器 (量程为 0—300 kPa, 精度为满量程的 ±0.5%) 和两个差压传感器 (量程为 0—20 kPa, 精度为满量程的 ±0.5%), 用来测量实验段内混合介质的绝对压力及沿程压降，后者是由两个差压传感器输出信号相减得出．差压传感器的参考压力端与一个封闭的压力旁管相连接，该压力旁管通过一个背向毕托管连接在实验段出口附近，使其内部压力与实验段出口附近的静压相等，保证了差压传感器在实验过程中不会过载．

实验段出口附近水/气两相流动特征由摄像机记录在 Hi-8mm 摄像磁带上，实验完成后逐格回放以判断实际的流型特征．摄像机快门速度设定为 1/4 000 s, 以减小高速流动图像的模糊程度．

测控系统由公用平台、微重力仪、气流控制器、气体质量流量控制器、电磁阀及流量、压力与温度测量设备等组成，用来实现实验过程的自动控制及实验参数的自动检测．具体运控模式如下：系统加电后，启动分离与泵装置，利用调节阀设置水相流量 (实验中水流量将随系统阻力变化而改变)；同时，测控系统自动进入预热、自检或待命状态．当失重飞机进入第 $N$ 次抛物线飞行时，公用平台收到微重力仪 “失重开始” 信号，立即发出 “实验 $N$” 指令；气流控制器收到该指令后，打开相应气相支路中的电磁阀 ($N$ 为奇数对应小流量， $N$ 为偶数对应大流量), 并在相应的气体质量流量控制器上施加规定的电压，控制气流量的大小．当失重飞机退出第 $N$ 次抛物线飞行时，公用平台收到微重力仪 “失重结束” 信号，立即发出 “气流 $S$” 指令，气流控制器收到该指令后，关闭相应气相支路中的电磁阀 ($S=1$ 对应小流量， $S=2$ 对应大流量), 并将相应气体质量流量控制器电压置为 0.

实验过程中，水相流量和温度、气相流量 1(小流量)、气相流量 2(大流量)、实验段内绝对压力和两个差压传感器的输出等模拟量信号均由公用平台自动采集，采样频率为 4 Hz. 此外，由于实验段内摩擦压降是由两个差压信号相减得出，为保证其测量精度，在失重飞行过程中，对两个差压信号进行了同步采集，采样频率为 125 Hz, 并单独存储．为减少测量数据的转换误差，所有信号均直接记录相应传感器的电压输出结果，实验结束后再对数据进行转换处理．

## 3 结果与讨论

1999 年 7 月，中国科学院失重飞机科学实验队赴俄罗斯加加林航天员训练中心，利用 IL-76MDK 失重飞机进行了 9 个架次的失重飞行实验．气/液两相流实验项目进行了共计 42 个工况的失重条件下水/气两相流实验，详细实验结果列于表 1, 表中数据为气/液两相流量稳定后一定时间 (不小于 10 s) 内的统计平均值．图 2 为失重条件下方形截面内水/气两相流动的三种典型流型，即泡状流、弹状流和环状流．此次实验还验证了我们研制的分离与泵装置能够在失重条件下正常工作．

气/液两相流流型研究的主要目的是建立合理的流型产生与转换模型，预测具体流动

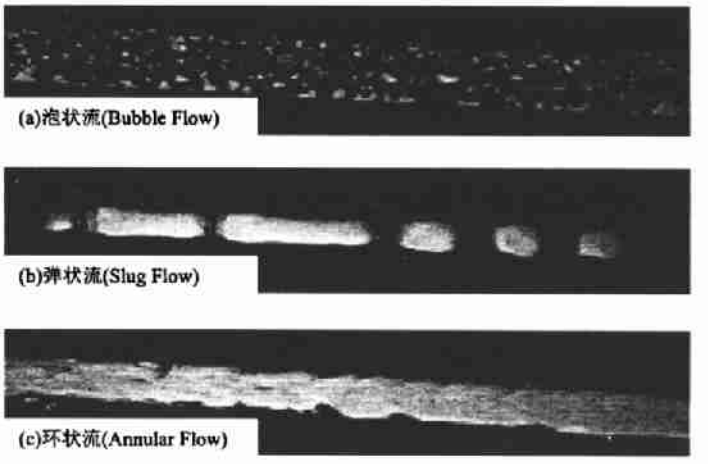


图 2　失重条件下的气/液两相流流型

Fig.2　Gas-liquid two-phase flow patterns at reduced gravity

情况下存在的流型特征，便于选择适宜的模型预测摩擦压降及传热传质特性等，或者采取适当措施避免或促成某种流型的出现.

目前，失重条件下泡状流-弹状流间的转换，一般用空隙率模型 [3] 来预测. 该模型假设控制泡状流向弹状流转换的机理是气泡之间的合并，因此，存在一个临界空隙率 $\alpha_C$，当流道内实际空隙率超过 $\alpha_C$，小气泡合并形成尺寸大于流道直径的弹状气团，流动便由泡状流转换为弹状流. 考虑到流道内空隙率分布与速度分布的差异，截面平均的两相速度 (即表观流速) 间存在着相对滑移 [4]，Colin 等 [5] 定义了一个临界参数 $x_C$:

$$x_C = C_0\alpha_C, \tag{1}$$

其中，$C_0$ 为气相分布参数. 这样，失重条件下泡状流-弹状流间的转换条件可表示为

$$U_{SL} = \frac{1-x_C}{x_C}U_{SG}, \tag{2}$$

其中，$U_S$ 表示表观流速，下标 L 和 G 分别表示液相和气相. 利用失重条件下圆形截面管道内气/液两相流实验结果，Colin 等 [5] 提出:

$$\begin{cases} x_C = 0.54 (Su < 1.5\times 10^6), \\ x_C = 0.24 (Su > 1.7\times 10^6). \end{cases} \tag{3}$$

(3) 式中，Suratman 数 $Su = \rho_L\sigma D/\mu_L^2$，$\rho$、$\sigma$、$D$ 和 $\mu$ 分别表示密度、表面张力、管道直径和动力粘性系数. 利用几乎完全相同的实验数据，Jayawardena 等 [6] 归纳出了一个与空隙率模型等价的经验判据，利用滑移流率模型 [4] 可得:

$$x_C = K_1\frac{\nu_G}{\nu_L}\left(K_1\frac{\nu_G}{\nu_L} + Su^{2/3}\right)^{-1}, \tag{4}$$

(4) 式中，$\nu$ 为运动粘性系数，经验参数 $K_1 = 464.16$.

表 1 失重条件下气/液两相流型实验结果

| 序号 | 流型 | 气相表观流速 (m/s) | 液相表观流速 (m/s) | 实验压力 (kPa) | 实验温度 (°C) | 垂向重力 ($g_0$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.1 | 泡状流 | 0.15 | 0.30 | 81 | 34.2 | 0.038 |
| 1.2 | 环状流 | 7.99 | 0.26 | 161 | 34.8 | 0.026 |
| 1.3 | 弹状流 | 0.21 | 0.21 | 81 | 35.6 | 0.012 |
| 1.4 | 环状流 | 7.45 | 0.19 | 124 | 36.1 | 0.018 |
| 1.5 | 弹状流 | 0.30 | 0.16 | 79 | 36.6 | 0.026 |
| 1.6 | 环状流 | 6.12 | 0.22 | 107 | 36.9 | 0.026 |
| 1.7 | 弹状流 | 0.42 | 0.19 | 80 | 37.4 | 0.023 |
| 1.8 | 环状流 | 4.86 | 0.19 | 97 | 38.2 | 0.030 |
| 1.9 | 弹状流 | 0.57 | 0.28 | 82 | 38.5 | 0.028 |
| 1.10 | 环状流 | 3.56 | 0.25 | 97 | 38.6 | 0.018 |
| 1.11 | 弹状流 | 0.77 | 0.25 | 83 | 38.9 | 0.017 |
| 1.12 | 环状流 | 2.67 | 0.24 | 91 | 39.3 | 0.026 |
| 4.1 | 泡状流 | 0.14 | 0.61 | 90 | 39.7 | 0.016 |
| 4.2 | 环状流 | 6.52 | 0.49 | 204 | 40.0 | 0.019 |
| 4.3 | 泡状流 | 0.19 | 0.61 | 92 | 40.5 | 0.023 |
| 4.4 | 环状流 | 5.52 | 0.51 | 174 | 41.0 | 0.019 |
| 4.5 | 泡状流 | 0.27 | 0.58 | 89 | 41.5 | 0.011 |
| 4.6 | 环状流 | 4.58 | 0.53 | 147 | 41.8 | 0.016 |
| 4.7 | 泡状流 | 0.37 | 0.61 | 94 | 42.1 | 0.019 |
| 4.8 | 环状流 | 3.63 | 0.56 | 134 | 42.6 | 0.019 |
| 4.9 | 弹状流 | 0.50 | 0.61 | 96 | 42.8 | 0.027 |
| 4.10 | 环状流 | 2.85 | 0.57 | 125 | 43.2 | 0.022 |
| 6.1 | 泡状流 | 0.13 | 0.82 | 97 | 43.7 | 0.017 |
| 6.2 | 环状流 | 6.47 | 0.54 | 209 | 44.0 | 0.012 |
| 6.3 | 泡状流 | 0.18 | 0.84 | 97 | 43.8 | 0.022 |
| 6.4 | 环状流 | 5.12 | 0.66 | 191 | 44.0 | 0.014 |
| 6.5 | 泡状流 | 0.24 | 0.82 | 101 | 43.7 | 0.018 |
| 6.6 | 环状流 | 4.00 | 0.68 | 172 | 44.3 | 0.020 |
| 6.7 | 弹状流 | 0.42 | 0.18 | 81 | 44.2 | 0.014 |
| 6.8 | 环状流 | 3.67 | 0.60 | 134 | 43.4 | 0.012 |
| 6.9 | 泡状流 | 0.48 | 0.79 | 100 | 44.0 | 0.009 |
| 6.10 | 环状流 | 2.86 | 0.62 | 125 | 44.2 | 0.024 |
| 6.11 | 泡状流 | 0.61 | 0.81 | 108 | 44.4 | 0.015 |
| 6.12 | 环状流 | 1.96 | 0.76 | 129 | 44.9 | 0.018 |
| 7.1 | 泡状流 | 0.12 | 1.06 | 103 | 34.2 | 0.009 |
| 7.2 | 环状流 | 4.30 | 0.79 | 284 | 36.2 | 0.024 |
| 9.1 | 泡状流 | 0.15 | 0.49 | 88 | 37.4 | 0.021 |
| 9.2 | 环状流 | 6.01 | 0.43 | 187 | 38.3 | 0.035 |
| 9.3 | 泡状流 | 0.20 | 0.49 | 89 | 37.7 | 0.021 |
| 9.4 | 环状流 | 5.72 | 0.41 | 170 | 38.6 | 0.013 |
| 9.5 | 泡状流 | 0.28 | 0.41 | 86 | 38.7 | 0.016 |
| 9.6 | 环状流 | 4.94 | 0.38 | 136 | 38.7 | 0.023 |

本实验中，$Su = (1.95 \pm 0.35) \times 10^6$，处在 Colin 等 [5] 模型跃变间隙处. Jayawardena 等 [6] 模型给出 $x_C = 0.45 \pm 0.03$. 图 3 给出了以气、液两相表观流速 $U_{SG}$ 和 $U_{SL}$ 为坐标的失重条件下方形截面内水/气两相流泡状流和弹状流的流型观测结果. 若取 $x_C = 0.44$，空隙率模型可以较好地将泡状流与弹状流数据分开，这和 Jayawardena 等 [6] 模型预测结果相一致.

关于失重条件下弹状流-环状流间的转换条件，最近 Zhao 和 Hu[7] 提出了一个半理论模型，认为二者间的转换源于表面张力与气相惯性力之间相对关系的变化：当气相惯性力大于表面张力时，气流将冲破相邻气团间的液膜，形成连通的气核，液相粘附在流道周壁，流动即为环状流；当表面张力大于气相惯性力时，粘附于流道周壁上的液环破裂，形成横贯整个截面的液膜，将气流阻隔为孤立的气团，流动即为弹状流. 因此，失重条件下弹状流-环状流间的转换条件可表示为：

$$\frac{2\sigma/R_B}{\rho_G U_{SG}(U_{SG} - U_{SL})/2} = \kappa. \tag{5}$$

(5) 式左侧分子代表表面张力，分母代表气相惯性力，$R_B$ 表示气团前端半径，$\kappa$ 表示弹状流-环状流转换处表面张力与气相惯性力的相对比值，是一个量级为 1 的经验参数.

假设滑移流率模型 [4] 在弹状流-环状流转换边界附近仍然适用，气团前端维持经典 Taylor 气团的半球状，其半径近似等于两相介质按光滑环状流运动时中心气核的半径，则失重条件下弹状流-环状流间的转换条件即可确定，并且，所得转换条件可以表示为无量纲的气/液两相表观 Weber 数 $We = \rho U_S^2 d/\sigma$ 的形式，因此，该模型属于 Weber 数模型. 和现有实验结果的比较表明，这一新的 Weber 数模型能够很好地适用于不同的实验介质、流道直径和实验方法 (包括失重实验、中性悬浮模拟实验和毛细管模拟实验) 等情形.

对于失重条件下方形截面管道内气/液两相流弹状流-环状流转换，上述模型可表示为如下无量纲形式：

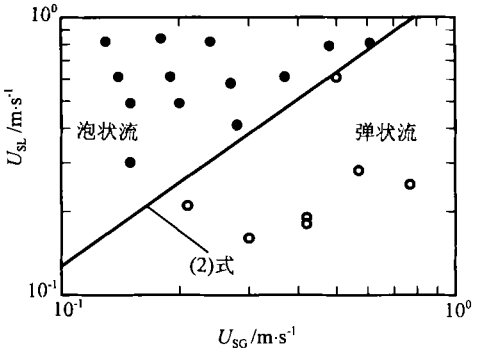


图 3　泡状流-弹状流间的转换

Fig.3　Flow pattern transition between the bubble and slug flow

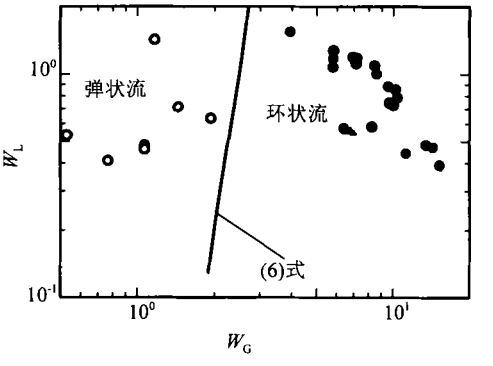


图 4　弹状流-环状流间的转换

Fig.4　Flow pattern transition between the slug and annular flow

$$W_{\mathrm{G}}=\sqrt{\frac{2\kappa C_0(1-\alpha)\sqrt{\pi\alpha}}{(C_0-1)}},$$
$$W_{\mathrm{L}}=\frac{1-C_0\alpha}{C_0\alpha}W_{\mathrm{G}}. \tag{6}$$

其中，$W_{\mathrm{G}}=U_{\mathrm{SG}}/U_0=\sqrt{We_{\mathrm{SG}}}$，$W_{\mathrm{L}}=U_{\mathrm{SL}}/U_0=\sqrt{\frac{\rho_{\mathrm{G}}}{\rho_{\mathrm{L}}}We_{\mathrm{SL}}}$，$U_0=\sqrt{\rho_{\mathrm{G}}a/\sigma}$ 为特征速度，$a$ 表示截面边长. 图 4 表明式 (5) 的预测与实验数据符合甚好，其中模型参数仍采用圆形截面管道情形中的数值，即 $C_0=1.16$ 和 $\kappa=0.8$[7].

这里，需要说明的是，在上述两个流型转换模型中，都存在有需要由实验确定的模型参数 $C_0$ 和 $\alpha_{\mathrm{C}}$ 或 $\kappa$. 如何通过理论分析、实验研究和数值模拟来建立这些模型参数的预测模型，是今后工作的主要任务之一.

**致谢** 本项目得到了中国科学院空间科学与应用总体部赵光恒研究员和席隆工程师、中国空间技术研究院兰州物理研究所雷军刚工程师、中国科学院力学研究所朱丽红博士及北京圣业科技发展有限公司李然先生等的热情帮助，在此表示衷心地感谢.

## 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):369—382

[2] Wölk G, Dreyer M, Rath H J. Two-phase flow in small diameter channels under low and normal gravity. In: Drop Tower Days 1998-in Hokkaido (extended abstracts), 1998. 107—109

[3] Dulker A E, Fabre J A, McQuillen J B, Vernon R. Gas-liquid flow at microgravity conditions: flow patterns and their transitions. *Int. J. Multiphase Flow*, 1988, **14**(4):389—400

[4] Zuber N, Findlay J A. Average volumetric concentration in two-phase flow systems. *J. Heat Transfer*, 1965, **87**:453—468

[5] 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

[6] Jayawardena S S, Balakotaiah V, Witte L C. Flow pattern transition maps for microgravity two-phase flow. *AIChE J.*, 1997, **43**(6):1 637—1 640

[7] Zhao Jianfu, Hu Wenrui. Slug to annular flow transition of microgravity two-phase flow. *Int. J. Multiphase Flow*, 2000, **20**(8):1 295—1 304

# EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF GAS-LIQUID TWO-PHASE FLOW UTILIZING REDUCED GRAVITY AIRPLANE

ZHAO Jianfu LIN Hai XIE Jingchang HU Wenrui

(*Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100080)

LU Congmin ZHANG Yuhan

(*Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences*)

## Abstract

An experimental investigation of the air-water two-phase flow in a tube with a 12 mm×12 mm square cross-section is performed under reduced gravity on board IL-76MDK Russian airplane. Three main flow patterns of the gas-liquid two-phase flow under reduced gravity conditions are observed. The flow rates of the air and water phases, the water temperature and the pressure inside the test section are obtained. The flow pattern transitional criteria of the gas-liquid two-phase flow at reduced gravity are also discussed.

**Key words** Microgravity, Gas-liquid two-phase flow, Flow patterns