

# 静态水气分离特性的失重飞机实验研究

赵建福<sup>1</sup> 彭超<sup>1</sup> 李晶<sup>1</sup> 周抗寒<sup>2</sup> 李俊荣<sup>2</sup>

(1. 中国科学院力学研究所微重力重点实验室(国家微重力实验室), 北京 100190;

2. 中国航天员科研训练中心, 北京 100094)

**摘要** 利用失重飞机提供的短时失重、超重和常重力交变环境, 研究了膜式静态水气分离器首级可视化分离室和再循环管道中的水气两相流动构型。首级分离室内变截面蛇形窄通道内变质量流率的气液两相流动表现为间歇状的、不稳定的溪状流, 在不同重力阶段具有几乎相同的变化特征。再循环管路内的气液两相流主要以细碎的泡状流和弹状流为主, 气泡或气团间平均间距极大, 含气率演化过程具有强烈的间歇性, 但在抛物线飞行过程中含气率变化的总体特征与重力水平的变化基本无关。这表明静态水气分离器的工作性能基本不受重力影响。

**关键词** 流型; 重力效应; 静态水气分离器; 失重飞机

**中图分类号**: TKQ051.8+93 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253-231X(2011)05-0799-04

## Experimental Study on Performance of a Static Water-Air Two-Phase Separator Aboard Reduced Gravity Airplane

ZHAO Jian-Fu<sup>1</sup> PENG Chao<sup>1</sup> LI Jing<sup>1</sup> ZHOU Kan-Han<sup>2</sup> LI Jun-Rong<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Microgravity (National Microgravity Laboratory) /CAS; Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Astronaut Research and Training Center of China, Beijing 100094, China)

**Abstract** Utilizing the alternating environment of short-term reduced, super- and normal-gravity provided by a reduced gravity airplane, two-phase water-air flow patterns both in the first visible stage of a static membrane separator and in the recycled water line are studied experimentally in the present paper. Unsteady intermittent rivulet flow with variable mass flux is observed in the variable cross-section serpentine flow channel in the first visible stage, which exhibits the same characteristics in different gravity. Finely bubble flow and slug flow with much large averaged space between air bubbles are observed in the recycled water line. Although much large fluctuation of void fraction is obvious in the recycled water line, the general characteristics is irrelative with the gravity. Thus, the performance of the separator is not dependent upon the gravity.

**Key words** flow pattern; gravity influence; static water-air two-phase separator; reduced gravity airplane

## 0 引 言

气液两相系统广泛应用于动力、石油、化工、航天等领域, 具有重大应用价值。航天用气液两相系统在任务执行过程的不同阶段将处于不同的重力(如发射准备阶段的常重力、发射和机动飞行时的超重及在轨自由飞行时的微重力等)环境, 其特征和常规地面环境中有着明显差异, 因此吸引了国际航天大国和学术界的广泛关注, 成为气液两相流领域研究的热点之一<sup>[1~3]</sup>。

液气分离技术对气液两相系统能否持续、稳定和安全的运行至关重要, 尤其是在诸多航天应用(如载人航天器环境控制与生命保障系统等)中, 相关气

液两相系统运行于微重力环境, 地面常重力环境中因气、液两相间往往具有的极大密度差导致的重力分层效应被削弱甚至完全抑制, 使得高效、稳定的液气分离技术成为决定系统运控性能的关键难题。

静态分离器具有无运动部件、低能耗、免维护、分离可靠、控制容易等特点, 因此, 尽管其分离能力相对较小, 混合物的污染程度直接影响其使用寿命, 但特别适合较洁净的小流量水气混合物的分离, 是航天用水气分离设备的主要形式之一。不过, 航天用静态水气分离器往往需要在不同的重力环境中工作, 但其研制与测试等却是在地面常重力环境中进

收稿日期: 2011-01-07; 修订日期: 2011-04-15

作者简介: 赵建福(1967-), 男, 河南南阳人, 研究员, 博士, 主要从事微重力多相热流体动力学理论及相关应用研究。

行, 其实际分离性能需要空间实验的检测。另一方面, 也是最关键的, 是要通过有限的微重力实验, 揭示重力对分离过程的影响机制, 将分离设备在常重力与微重力时的性能正确关联起来, 在地面常重力环境即可正确地评价水气分离设备在空间运行时的性能。这对实际工程设计至关重要。

本文利用失重飞机提供的短时失重、超重和常重力交变环境, 对静态水气分离器首级可视化分离室和再循环管道中的水气两相流动构型进行观测, 研究静态水气分离器在不同重力条件下的分离效果, 为我国航天用静态水气分离器设计与运控服务。

## 1 实验装置与实验流程

本文所研究的静态水气分离器采用多级串联结构, 水平放置。首级分离室采用透明视窗以观测其内部水气两相流态分布及其在不同重力条件下的变化特征。对水高度润湿的分离膜构成流道底面边界, 3 个平行隔板将流道分隔成不规则的蛇形, 流道宽度远大于其高度。空气在流动过程中会被隔离在流道内, 而水相则在两侧压差作用下渗透过该边界进入水相收集腔。因此, 在流动过程中主流道内水相介质流量及相应的水气混合物的含水率会随着流动过程减少。这样, 分离室内部的水气两相流是一种不规则蛇形窄通道内变质量流率的气液两相复杂流动现象。

失重飞机实验是利用法国空间局 A300 失重飞机完成的, 一个典型的抛物线飞行过程, 包含初始平飞(常重力)、加速拉起(超重)、抛物线飞行(失重)、改出加速(超重)和再次平飞(常重力)等 5 个阶段, 除平飞阶段外, 其他 3 个阶段分别持续约 20 秒, 且每个阶段均存在严重的加速度波动。

失重飞行实验中, 气相流量固定为 400 mL/min。通过调节水流量(水流量调节范围为 50~150 mL/min)来调节水气混合物组成比例, 并通过调节水气分离器的工作压差(即水气分离器进口压力与气相出口压力之差, 其调节范围为 5~20 kPa)改变水气分离器工况条件, 来测试静态水气分离器在不同工况下的工作性能。每个架次的飞行包括 1 个测试用抛物线过程和 6 组共 30 个正式的抛物线过程, 在每组正式抛物线过程开始前调整水气分离器工况条件, 因此, 每个工况持续 5 个抛物线过程。

## 2 首级分离室内气液两相流特征

图 1 显示了首级可视化分离室内的水气两相流型的典型特征(水流量 60 mL/min, 气流量 400 mL/min, 水气入口压力为 45 kPa, 气相出口压力为

40 kPa, 工作压差为 5 kPa)。图中流动自左向右, 深色部分为流道底部分离膜的图像, 对应于完全被空气或水所占据的部分, 因为此时流道内折射率是均匀的, 对图像没有影响; 而离散的浅色部分则源于流道内折射率的变化, 因此, 对应于原来被水占据但却又因水被渗透分离出去后体积收缩而空出的部分, 折射率的变化则源于残留水痕。

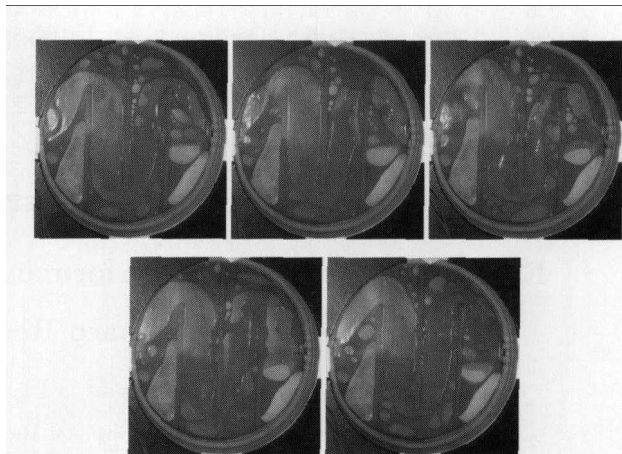


图 1 首级可视化分离室内气液两相流型特征(图像依次对应常重力、超重、失重、超重和常重力情形)

Fig. 1 Flow patterns in the first visible stage of the separator (images corresponding respectively to normal-, super-, reduced-, super- and normal-gravity conditions)

总体而言, 进入分离室内的水气混合流动表现为间歇状的、不稳定的溪状流。在切应力和表面张力作用下, 溪状流边界上会产生离散液滴并从主体上脱落下来; 这些液滴有时又会被来流扫掠并入主流之中。

由于实验中气、液两相表观流速所处范围, 水气混合物在进入静态水气分离器前的管道内即表现为间歇流特征。在首级可视化分离室进口附近, 由于流动死角的排斥作用, 水气混合物流动方向改变, 有效流道沿分离室边界展开为有扁平浅色连续条带状结构, 偶尔有深色间断。这里, 浅色条带状结构对应剧烈掺混的水气混合物(细碎气泡将使混合物呈乳白色), 掺混来自于进口前混合器与流道布局的共同作用; 而当间歇性大气团进入分离器时, 相应进口部位的图像则显示为单一的深色。

经过第一个隔板端部形成的近似 180° 弯头后, 水气两相混合物进入一个较长的直通道, 浅色条带状结构由初始时几乎占据整个流道的宽度逐渐收缩, 而其颜色也逐渐变深, 这表明细碎气泡逐渐逸出混合体, 流道中部波动的条带状结构逐渐演化为纯水流。不过, 流动自身的间歇性及进口的高速扰动, 也

使中心条带边缘一直剧烈波动, 并被剥落形成诸多液滴。

在分离室中心位置处的第二个隔板端部形成一个  $180^\circ$  弯头, 液滴剥落现象在此处最为明显。此后, 水气两相混合物进入另一个较长的直通道。此时, 条带状结构的宽度明显减小, 而且, 随着时间演化, 条带边缘渐次为浅色侵袭, 并不断向条带中心扩展(如前所述, 浅色部分对应于被分离出去的水相体积)。同时, 中心条带中的水会剥落形成新的液滴, 停留在流道边界处, 随着时间的演化, 同样会由深色演变为浅色, 这同样源于水被渗透分离出去了。

第三个隔板端部形成另一个近似  $180^\circ$  弯头, 流动图像与前面流道内相似, 同样存在边缘水相占据部分被气相侵入以及液滴剥落、渗透等现象。

分离室出口附近流动在此变向, 近似为一个  $90^\circ$  弯头。弯头外侧与前面的拐角处一样为流动死角, 有液滴积存, 远离流动主体的部分会有细小雾状液滴团构成白色不透明区域。主流区的流动过程中, 由于离心力的作用, 往往在外侧形成较厚的液膜, 并很容易被剥落下来形成离散液滴, 这些液滴合并长大, 会黏附在临近出口的中间不透明区, 同时颜色由黏附边界处渐次变浅; 另一方面, 外侧接近主流处也会被主流切削携带, 进入分离室出口(即下一级分离室进口)。

根据飞行实验所获图像的回放与认真判读, 发现在不同工况下, 首级可视化分离室内气液两相流态特征在不同阶段具有几乎相同的变化特征, 即重力对相关流动没有明显影响。这也为对实验图像的量化分析所证实(图 2)。

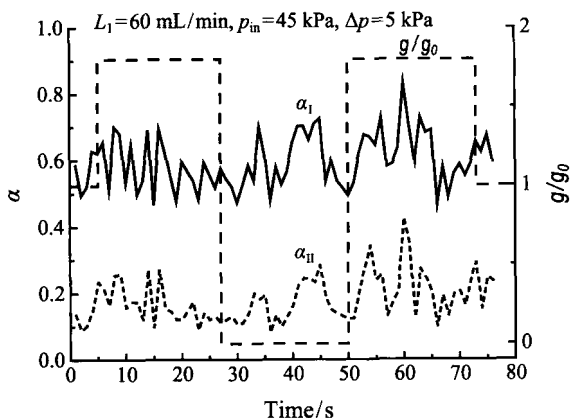


图 2 不同重力条件下首级分离室内含气率变化特征

Fig. 2 Characteristics of void fraction in the first visible stage of the separator in different gravity

图 2 中, 曲线 I 对应区域位于分离室前半部分,

某种意义上反映的是进口流动的间歇性; 而曲线 II 对应区域则位于分离室后半部分, 将较好地反映首级分离室对进口水气混合流间歇性及重力变动的响应。图中还示意性地给出了不同阶段的重力水平。

图 2 表明曲线 I、II 之间存在明显的正关联, 即曲线 II 明显跟随着曲线 I 的变化而变化: 曲线 I 升高, 曲线 II 在简短滞后后随之升高; 曲线 I 下降, 曲线 II 同样在简短滞后后也随之下降。不过, 曲线基本不随重力变化而变化, 随着时间的演化过程保持在某个统计平稳状态。这说明在所采用的结构形式与安装方位条件下, 相应的静态水气分离器的分离性能基本上与重力无关。

### 3 再循环管路内的气液两相流特征

水气分离器水相出口连接透明的再循环管路(内径 5 mm), 将分离后的水输送到储水软袋循环使用。实验观测到不同工况条件下, 气液两相流型变化基本一致, 主要以细碎的泡状流和弹状流为主, 并且气泡/团间平均间距极大, 出水管道平均含气量极低。

平飞阶段, 流道内流型为弹状流, 但相邻两个气泡之间距离较远, 且弹状气泡较短(略大于管道直径)。从侧面看, 弹状气泡在重力作用下偏向管道上壁面, 并在沿程压力梯度、浮力和管壁约束作用等的共同影响下, 呈倒梯形结构, 这和常规管道内的弹状流是不同的, 其原因除了管道直径减小外, 更关键的原因可能要归于管壁润湿性。超重状态流道内的流型仍为弹状流, 但在过载重力作用下, 气泡横向压缩, 而长度加大(往往达到数倍管道直径), 前、后缘倾斜程度更大, 同时, 间距也进一步增大。而在失重条件下, 流道内分散着直径小于管道直径的近似球形气泡, 且气泡位置居中, 间距缩小, 一般呈现为气泡串的形态, 属于典型的微重力气液两相泡状流。偶尔会有接近或略大于管道直径的气团出现, 其形状近似为椭球(气团长度接近并略小于管道直径)或半球头长柱体(气团长度大于管道直径)。不论气泡/团尺寸大小, 其相邻气泡/团间距一般要远小于常重力和超重状态, 尽管流道内同样存在长时间纯粹的单相水流动的状态。

图 3 显示了典型工况下分离器出水再循环管路中的含气率变化情况。统计区域为首个光路校正器——这相当于将光路校正器所在管段作为一个光学的含气率传感器, 通过图像处理的方法来测量管路内含气率的变化。此外, 图像记录格式(PAL 制, 25 帧/s)使得该“含气率传感器”采样频率只有 25 Hz。

不过,对于平均含气率变化特征的辨析而言,可以通过适当时间段内的平均来满足要求。本文平均时间段均采用 1 s。

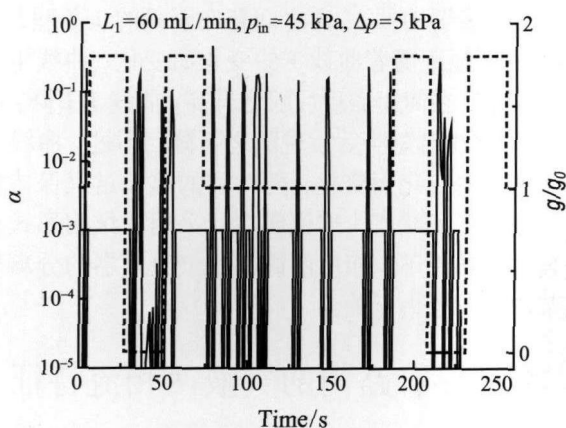


图3 分离器出水管路中含气率的变化特征  
Fig. 3 Void fraction in the recycled water line

可以看到,含气率变化具有强烈的间歇性,即使经过逐秒平均,含气率的波动仍然很大,瞬态最大值甚至可高达 47%(对应于相邻较近的两个气团同时穿过光路校正器),而绝大部分时间含气率为零(即纯粹的单相水流动状态)。其次,微重力条件下,水出口管道中会出现众多细碎小气泡,其出现频率高,但尺寸极小,对空隙率的贡献在  $10^{-4}$  量级。再次,尽管由于气泡间隔极大导致含气率演化过程具有强烈的间歇性,但整个抛物线飞行过程中含气率变化的总体特征与重力水平的变化基本无关,表明静态水气分离器的工作性能基本不受重力影响。最后,整个抛物线飞行过程中的平均含气率约为 1.6%,说明

所采用的水气分离器有着优异的分离效果。

## 4 结 论

本文利用失重飞机提供的短时失重、超重和常重力交变环境,对静态水气分离器首级可视化分离室和再循环管道中的水气两相流动构型进行观测和分析,可以得出如下结论:

(1) 静态水气分离器首级分离室内流型在不同重力条件下变化不大,表明所采用的静态水气分离器的工作性能基本不受重力影响。

(2) 再循环管道内残留的少量气体在不同重力条件下形态变化较大,即在失重条件下气相以细碎气泡或短气团形态出现,而在常重力和超重条件下往往以较长弹状气团形态出现。在不同的重力条件下,气泡/团间距均很大,管路中相邻气泡/团合并机会极小。含气率演化过程具有强烈的间歇性,但在抛物线飞行过程中含气率变化的总体特征与重力水平的变化基本无关,同样表明了所采用的静态水气分离器的工作性能基本不受重力影响。

因此,基于地面测试的结果,能够较为可靠地预测空间不同重力环境下静态水气分离器的实际工作性能。

## 参 考 文 献

- [1] McQuillen J, Colin C, Fabre J. Ground-based gas-liquid flow research in microgravity conditions: state of knowledge [J]. Space Forum, 1998, 3: 165-457
- [2] Gabriel K S. Microgravity Two-phase Flow and Heat Transfer [M]. El Segundo: Springer, 2007
- [3] Zhao J F. Two-phase flow and pool boiling heat transfer in microgravity [J]. Int J Multiphase Flow, 2010, 36(2): 135-143