

微重力两相流相似准则

赵建福 胡文瑞

(中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100080)

摘要 本文根据两流体同心环状流线性稳定性分析的结果, 对微重力气/液两相流地面模拟实验所应遵循的相似准则进行了探讨, 得到了一个新的重力无关性准则, 即 Bond 数和基于环形区流体表面速度的毛细数之比的绝对值不大于 1。此外, 微重力气/液两相流模拟实验还必须满足两个条件, 即流量比和 Weber 数应与所模拟的流动中对应数值相等。

关键词 微重力; 两相流; 模拟实验; 相似准则

中图分类号: O359+.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2003)01-0131-03

PRINCIPLE OF SIMILARITY FOR MICROGRAVITY TWO-PHASE FLOW

ZHAO Jian-Fu HU Wen-Rui

(National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract In the present paper, the principle of similarity for two-phase flows at microgravity is studied based on the results of the linear stability analysis of the two-fluid concentric annular flow configuration. A new criterion of gravity-independence, namely the absolute value of the ratio between the Bond number and the capillary number based on the superficial velocity of the phase flowing in the annulus is no more than one, is achieved. It is also pointed out that the flowrate ratio and the Weber number must have the same values as their counterparts in the simulated flow in order to simulate correctly the behavior of two-phase flow at microgravity.

Key words microgravity; two-phase flow; simulating test; principle of similarity

1 前言

微重力气/液两相流在人类空间探索与开发中有着越来越大的应用价值, 如在航天器主动热控系统、动力与能源供应系统、流体管理系统及航天员生命保障系统等都存在有气(汽)/液两相流现象。

开展微重力气/液两相流实验的理想环境是环绕地球运行的大型空间飞行器, 如空间站或航天飞机, 但实验机会、经费支出及对实验装置、实验介质甚至观测方法等的苛刻限制, 导致目前此类空间实验极少^[1], 绝大部分实验是利用地基短时失重设施(失重飞机、落塔等)进行的^[2]。

地基短时失重实验设施有着很大的局限性, 如持续失重时间短, 失重阶段前、后有很大的超重过程等。这些因素对实验都是不利的。因此, 在地面常重力环境中进行模拟微重力两相流实验就显得尤为

重要。

然而, 影响两相流特征参数众多, 模拟实验中各无量纲参数应满足什么样的关系(即相似准则)尚不清楚, 制约了地面模拟实验在微重力两相流研究中发挥其应有的作用。

严格地讲, 模拟实验所应遵循的相似准则, 应由相关问题的控制方程及相应的初始条件和边界条件来确定。但是, 由于气、液两相介质在流动中均可变形、破碎及合并, 两相界面的变化极为复杂, 几何相似往往都难以满足, 这导致上述严格的分析方法难以应用。不过, 对圆截面光滑直管内充分发展的两流体同心环状流的线性稳定性与两相流型间关系的研究^[3,4]表明, 在重力作用较弱时, 该流动的线性稳定性分析结果与实验观测到的流型特征间存在很强的关联, 可用来预测相应流动条件下实验观测到

收稿日期: 2001-12-15; 修订日期: 2002-11-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.10202025); 中国科学院“知识创新工程”资助项目(No.KJCX2-L02)

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动及传热等方面的研究。

的流型特征。因此，本文将据此分析微重力气 / 液两相流地面模拟实验应遵循的相似准则。

2 微重力两相流相似准则

圆截面光滑直管内充分发展的绝热、不可压两流体同心环状层流无量纲速度 W (以轴心流速 W_0 为特征值) 的分布可表示为:

$$W_1 = 1 - \frac{\eta r^2}{\eta + a^2 - 1} [1 - B(2 \ln a - a^2 + 1)]$$

$$W_2 = \frac{a^2 - r^2}{\eta + a^2 - 1} [1 - B(2 \ln a - a^2 + 1)] - B(a^2 - r^2 - 2 \ln \frac{a}{r}) \quad (1)$$

这里，半径比 $a = R_2/R_1$ ，粘度比 $\eta = \mu_2/\mu_1$ ， $B = Bo/(16\eta Ca_w)$ ，毛细数 $Ca_w = \mu_1 W_0/\sigma$ ，Bond 数 $Bo = (\rho_2 - \rho_1)gd^2/\sigma$ 。流动方向与重力加速度 g 平行， g 为正值对应于垂直向上流动，反之则为垂直向下流动。

图 1 为不同重力条件下同心环状流速度剖面的典型特征。可以看到，若重力减小到一定程度，其影响便可忽略不计 (如 $g/g_0 = \pm 10^{-4}$ 时，速度分布曲线与零重力时的差别极小，这里 g_0 为地面重力加速度)，据此可以确定两相流型的重力无关性准则。

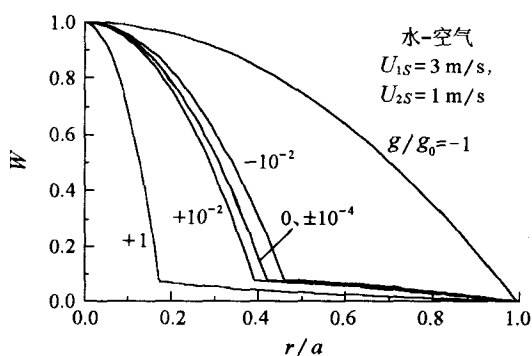


图 1 重力对同心环状流速度剖面的影响

两相流研究领域往往采用截面平均速度 (即表观速度) 来表示流动条件，并以此作为特征速度 (这有多种选择)。对式 (1) 的分析表明，只有两相流量比、粘度比和 Bo/Ca 在模拟实验和被模拟的流动中具有完全相同的数值，才能实现基本流动速度剖面相同的要求。不过，对模拟微重力气 / 液两相流而言，若 Bo/Ca 绝对值小于某临界值，速度剖面间的差异可忽略不计。因此，只要模拟实验中 Bo/Ca 的绝对值不大于其临界值，同时保证流量比和粘度比不变，即可认为速度剖面满足相似要求。

若存在重力作用时环形区厚度与核心区半径之比与零重力条件下的相应数值的相对差别不大于 1%，则重力的影响完全可以忽略。不过，如前所述，两相流动中存在多个特征速度，因此，首先需确定最能代表相关流动特征的速度作特征速度。分析表明，环形区流体相表观流速是最合适的选择。图 2 给出了基于核心区流体相物性和环形区流体相表观流速计算的 Bo/Ca 的临界值。在常见的粘度比范围内，临界 Bo/Ca 的等值线存在一个平台，表明其数值近似地不随粘度比变化，且平台随粘度比增加而扩大。 Bo/Ca 的最小临界值 $(Bo/Ca)_{cr,min} \approx \eta$ (图 3)。若定义毛细数 $Ca = \mu_2 U_{2s}/\sigma$ ，则实用的重力无关性准则为:

$$|Bo/Ca| \leq 1 \quad (2)$$

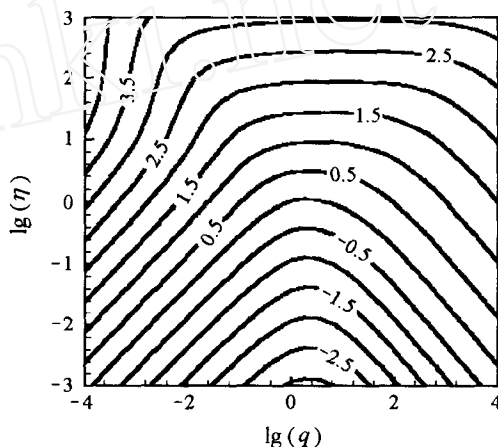


图 2 Bo/Ca 的临界值

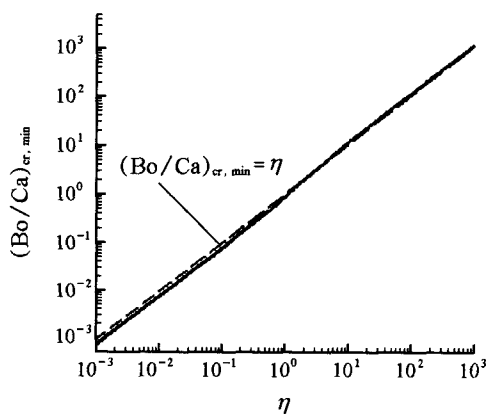


图 3 Bo/Ca 的最小临界值随粘度比的变化

另一方面，对同心环状流线性稳定性控制方程的分析表明，决定该流动稳定性特征的是流量比、密度比、粘度比、Reynolds 数、Weber 数以及 Bond

数 Bo 和毛细数之比 Bo/Ca 。而同心环状流的线性稳定性与两相流型间关系的研究表明^[3,4], 相界面的存在是影响同心环状流稳定性特征的重要因素。相界面处有三类不稳定因素:

(1) 轴向扰动速度间断, 源于相界面处基本流动速度剖面斜率的不同, 其根源在于两相介质粘度比不等于 1。因此, 粘度比相同可能是模拟实验应该遵循的相似准则之一。

(2) 切向应力间断, 源于相界面处基本流动速度剖面曲率的不同, 它正比于无量纲数 Bo/Ca , 根源在于由两相介质密度差和重力引起的浮力作用。因此, 若式 (2) 得到满足, 浮力作用可以忽略, 则相应系统可用来模拟微重力条件下的气 / 液两相流型特征。

(3) 法向应力间断, 源于表面张力作用, 它取决于 Weber 数的大小。因此, Weber 数相同也将是模拟实验应遵循的相似准则之一。此外, 存在于两相 (尤其是轻相) 介质内部的 Reynolds 应力也会引起该流动构型失稳, 不过, 液 / 液两相流动研究表明^[3], 该不稳定机制一般在极大 Reynolds 数时才起作用, 由此导致重相介质完全以微滴形态弥散分布于轻相介质内, 这种弥散状流型在目前微重力气 / 液两相流实验所研究的参数范围内很少出现, 这里暂不考虑。因此, 从流型研究的角度看, 可以适当放宽对 Reynolds 数和密度比的限制。

上述分析和微重力两相流型研究结果是一致的。对微重力两相流型实验结果的归纳总结及机理分析均表明^[5,6], 气相表观 Weber 数和流量比决定着微重力两相流型特征, 其他无量纲数只有很微弱的影响。此外, 半理论 Weber 数模型不仅成功预测了微重力气 / 液两相流型实验的结果, 而且对地面

常重力环境中的中性悬浮液 / 液两相流型和毛细管气 / 液两相流型的实验结果也有令人满意的预测效果^[6]。而在该模型中, 并不显含粘度比的影响。因此, 模拟实验中也可以适当放宽对粘度比的限制。

3 结 论

本文根据两流体同心环状流线性稳定性分析的结果, 并参照目前微重力气 / 液两相流研究成果, 对在地面常重力环境中模拟微重力气 / 液两相流型特征的模拟实验所应遵循的相似准则进行了探讨, 结论如下:

模拟微重力两相流实验应首先满足重力无关性准则, 即无量纲数 Bo/Ca 应小于 1; 其次, 流量比和 Weber 数应对应相等。此外, 基本流动速度剖面相似还要求粘度比也对应相等, 但由于粘度比对流型特征的影响并不明显, 可以和密度比及 Reynolds 数一样, 适当放宽其限制条件。

参 考 文 献

- [1] 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: 1931-1944
- [2] 赵建福. 微重力条件下气 / 液两相流型研究进展. *力学进展*, 1999, 29(3): 369-382
- [3] Joseph D D, Bai R, Chen K P, et al. Core-Annular Flow. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 1997, 29: 65-90
- [4] Carron I, Best F R. Gas-Liquid Annular Flow Under Microgravity Conditions: a Temporal Linear Stability Study. *Int. J. Multiphase Flow*, 1994, 20(6): 1085-1093
- [5] Wölk G, Dreyer M, Rath H J. Gas/Liquid Two-Phase Flow Under Low Gravity Conditions. *ZAMM*, 2001, 81: S577-S578
- [6] Zhao J F, Hu W R. Slug to Annular Flow Transition of Microgravity Two-Phase Flow. *Int. J. Multiphase Flow*, 2000, 26: 1295-1304