

# 气泡初始尺寸对泡 - 弹状流型转换的影响

赵建福

(中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100080)

**摘要** 本文对气液两相泡状流向弹状流转换的机制进行了分析, 认为气泡合并是影响该流型转换的主要机制, 并据此用随机数值模拟方法, 对气泡初始尺寸对泡状流向弹状流转换的影响进行了研究。计算结果表明, 无量纲气泡碰撞率是一条通用曲线, 根据该曲线可以确定气泡初始尺寸产生影响的区域及其大小, 与实验结果的比较令人满意。

**关键词** 气液两相流; 流型; 气泡初始尺寸; 泡状流 - 弹状流转换; 随机模拟  
**中图分类号**: O359+.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253-231X(2005)05-0793-03

## INFLUENCE OF BUBBLE INITIAL SIZE ON BUBBLE-TO-SLUG TRANSITION

ZHAO Jian-Fu

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

**Abstract** In the present paper, common accepted mechanisms for the bubble-to-slug transition (BST) of two-phase gas-liquid flows are reviewed. It is shown that BST will be controlled by the bubble coalescence. A random numerical method is used to simulate the influence of the initial bubble size on the bubble-to-slug transition based on the bubble coalescence mechanism. It is found that the locus of the dimensionless rate of collision is a universal curve. Based on this curve, the range and the intensity of the influence of the bubble initial size on the bubble-to-slug transition are determined, which agrees very well with the experimental data.

**Key words** two-phase gas-liquid flow; flow pattern; bubble initial size; bubble-to-slug transition; random numerical simulation

## 1 前 言

泡状流和弹状流是气液两相流动系统中经常遇见的两种主要流型, 确定二者间相互转换的条件在众多工业应用中有着重要的意义。

对引起气液两相泡状流向弹状流转换的原因, 经典观点认为是气泡间相互碰撞导致气泡尺寸增加, 以至于超过流道直径<sup>[1]</sup>。由于气泡碰撞频率取决于气泡的装填程度, 即气相空隙率, 因此, 临界空隙率 $\alpha_{cr}$ 在泡状流向弹状流转换的研究中自然成为一个十分重要的概念<sup>[2~4]</sup>。然而, 实验表明临界空隙率有着相当大的变动范围, 由此而来的经验或半经验的流型转换模型中, 相应参数的数值也就因提出者的不同而各不相同, 尚没有公认的结果。

对气液两相泡状流向弹状流转换机制的经典观

念的挑战来源于气液两相流空隙率波的研究<sup>[5,6]</sup>。后者认为导致气液两相泡状流向弹状流转换的原因在于空隙率波的失稳。但是, 最近 Cheng 等<sup>[7]</sup>更细致的实验研究发现, 空隙率波失稳条件与泡状流 - 弹状流转换条件并不一致。事实上, 文献<sup>[5]</sup>中也只是将空隙率波的失稳作为该流型转换发生的外在表征, 而并非其控制机制。

最近的研究发现气泡的初始尺寸对泡状流向弹状流转换存在明显的影响<sup>[7~9]</sup>。事实上, 在 Radovich 和 Moissis 早期的研究中, 就已经观察到大的气泡初始尺寸和小的流道直径有利于泡状流向弹状流转换提前发生<sup>[1]</sup>, 但一直未得到应用的重视。

随着技术的进步与发展, 微细尺度两相流动现象受到越来越大的重视。此时, 由于 Reynolds 数的减小, 气液两相流动中气泡的平衡尺寸极大地受制

收稿日期: 2004-11-15; 修订日期: 2005-07-07

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (No.10202025; No.10432060); 中国科学院知识创新工程 (No.KJ CX2-SW-L05)

作者简介: 赵建福 (1967-), 男, 河南南阳人, 研究员, 博士, 主要研究方向为微重力与小尺度气液两相流与传热。

于气、液两相介质引入的方式, 气泡初始尺寸效应将起着更关键的作用。有鉴于此, 本文试图通过随机数值模拟的方法, 来揭示气泡初始尺寸对气液两相泡状流 - 弹状流转换的影响。

## 2 数值方法

如上所述, 控制气液两相泡状流向弹状流转换的机制是气泡合并, 后者依赖于气泡间碰撞次数及液体粘性、表面张力等因素。这里, 我们忽略液体粘性、表面张力等次要因素的影响, 着重考察气泡碰撞随其初始尺寸的变化。为简明扼要起见, 气、液两相间的相对滑移、气泡尺寸及其位置分布的非均匀性也一并予以忽略。

假设气泡初始直径为  $D_b$ , 流道直径为  $D$ ,  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  为  $[0, 1]$  区间上均匀分布的独立随机变量, 则在流道内均匀分布的球形气泡其中心位置可表示为:

$$R = X_1^{1/2}(1 - \eta)/2 \quad (1)$$

$$\phi = 2\pi X_2 \quad (2)$$

$$Z = (2/3)N\eta^3 X_3/\alpha \quad (3)$$

这里,  $\eta = D_b/D$  代表无量纲的气泡初始尺寸,  $N$  和  $\alpha$  分别代表计算中气泡取样个数和气相空隙率。如果任意两个气泡中心间距离小于气泡的直径, 则碰撞发生。碰撞率  $P$  等于碰撞次数与气泡对的总个数之比。

## 3 结果与讨论

本文计算了在 9 个不同的气相空隙率条件下气泡碰撞率随其初始尺寸的变化情况 (表 1)。计算结果表明, 若以相应空隙率条件下的最大碰撞率作为特征值, 定义气泡无量纲碰撞率  $P_R$ , 则气泡无量纲碰撞率  $P_R$  随其初始尺寸的变化可以由一条通用曲线来描述 (图 1)。

图 1 表明, 若  $\eta < 0.03$ , 气泡无量纲碰撞率随其初始尺寸的减小而急剧降低, 这表明此时气泡间很难发生相互碰撞, 其合并也就无从谈起, 除非达到最大可能装填程度, 即最大空隙率  $\alpha_{\max} = 0.53$ 。因此,  $\eta < 0.03$  时, 泡状流 - 弹状流转换发生在  $\alpha = \alpha_{\max} = 0.53$ 。若  $\eta > 0.4$ , 气泡无量纲碰撞率也会随其初始尺寸的增大而缓慢降低。不过, 此时由于气泡初始尺寸相当大, 很少量的气泡合并即可导致流型从泡状流转换为弹状流, 因此, 此时将不可能存在稳定的泡状流。而在  $0.03 < \eta < 0.4$  时, 气

泡无量纲碰撞率可以表示为:

$$P_R = 0.664 + 0.867\eta \quad (4)$$

这将是气泡初始尺寸能够影响泡状流向弹状流转换条件的范围。若假设临界空隙率可以用  $(P_R^{-1} - 1)$  的线性函数来表示, 则考虑到相应边界条件, 可得:

$$\alpha_{cr} = 1.18[(0.664 + 0.867\eta)^{-1} - 1],$$

$$(0.03 < \eta < 0.4) \quad (5)$$

当气泡相对尺寸很小时, 上式还可以展开为  $\eta$  的线性函数:

$$\alpha_{cr} = 0.60 - 2.32\eta \quad (6)$$

这和 Song 等<sup>[8]</sup> 获得的如下经验关系

$$\alpha_{cr} = 0.55 - 2.37\eta \quad (7)$$

非常接近。不过, 仔细检查 Song 等<sup>[8]</sup> 原始数据, 发现在其图 13(b) 中错误地将第一组数据由  $\eta = 0.108$  左移到  $\eta = 0.08$ , 这会引起方程 (7) 中参数的变化。

表 1 最大碰撞率及其位置

$\alpha$	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
$\eta_{\max}$	0.38	0.35	0.35	0.42	0.38	0.36	0.38	0.37	0.34
$P_{\max}$	0.312	0.617	0.910	1.163	1.505	1.780	2.074	2.370	2.617

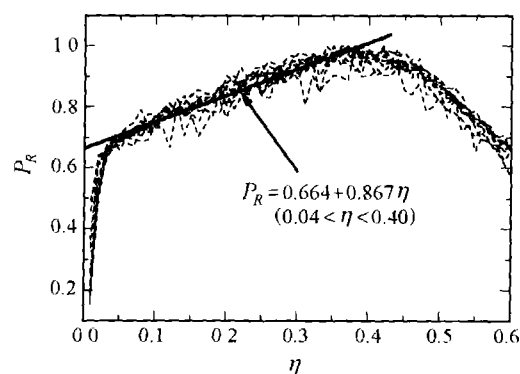


图 1 气泡碰撞率随其初始尺寸的变化情况

图 2 给出了方程 (5)~(7) 所预测的泡状流向弹状流转换的临界空隙率随气泡初始尺寸的变化情况, 同时显示的还有 Song 等<sup>[8]</sup> 和 Cheng 等<sup>[7]</sup> 获得的实验数据, 理论预测和实验数据的符合令人满意。

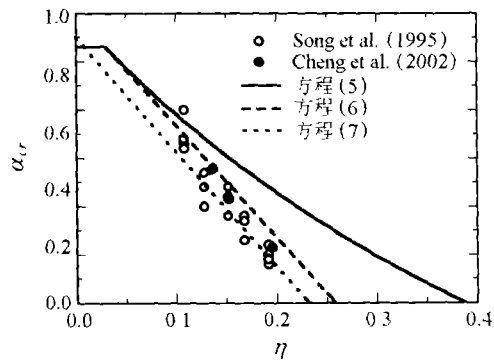


图2 气泡初始尺寸对泡状流-弹状流转换临界空隙率的影响

## 4 结 论

基于气液两相泡状流向弹状流的转换源于气泡合并的机制, 利用随机数值模拟方法, 对气泡初始尺寸对泡状流向弹状流转换的影响进行了研究。计算结果表明, 无量纲气泡碰撞率是一条通用曲线, 并由此曲线确定气泡初始尺寸产生影响的区域: 若气泡相对尺寸  $\eta$  小于 0.03, 气泡间很难发生相互碰撞, 泡状流-弹状流转换发生在最大空隙率  $\alpha_{\max} = 0.53$  时; 若  $\eta > 0.4$ , 将不可能存在稳定的泡状流; 而在  $0.03 < \eta < 0.4$  时, 气泡初始尺寸将对临界空隙率有着明显的影响。据此提出了一个简单的关系式来预测临界空隙率随气泡初始尺寸的变化情况, 与实验

结果的比较令人满意。

## 参 考 文 献

- [1] Radovic N A, Moissis R. The Transition from Two-Phase Bubbly Flow to Slug Flow. Report No 7-7673-22, MIT, 1962
- [2] Schwartzbeck R K, Kocamustafaogullari G. Two-Phase Flow Pattern Transition Scaling Studies. In: ANS Proc. 1988 Nat. Heat Transfer Conf., Houston, TX, 1988, 387-398
- [3] Taitel Y, Barnea D, Dukler A E. Modeling Flow Pattern Transitions for Steady Upwards Gas-Liquid Flow in Vertical Tubes. AIChE J., 1980, 26(3): 345-354
- [4] Mishima K, Ishii M. Flow Regime Transition Criteria for Upward Two-Phase Flow in Vertical Tubes. Int. J. Heat Mass Transfer, 1984, 27(5): 723-737
- [5] Matuszkiewicz A, Flamand J C, Boure J A. The Bubble-Slug Flow Pattern Transition and Instabilities of Void Fraction Waves. Int. J. Multiphase Flow, 1987, 13(2): 199-217
- [6] Monji H. Transition Mechanism from Bubble Flow to Slug Flow in a Riser. Fluid Dyn. Res., 1993, 11(1,2): 61-74
- [7] Cheng H, Hills J H, Azzopardi B J. Effects of Initial Bubble Size on Flow Pattern Transition in a 28.9 mm diameter Column. Int. J. Multiphase Flow, 2002, 28(7): 1047-1062
- [8] Song C H, No H C, Chung M K. Investigation of Bubble Flow Developments and its Transition Based on the Instability of void Fraction Waves. Int. J. Multiphase Flow, 1995, 21(3): 381-404
- [9] Zhao J F, Liu G, Li B. Two-Phase Flow Patterns in a Square Micro-Channel. J. Thermal Sci., 2004, 13(2): 174-178