

文章编号: 1005-0930(2000)-04-0394-04 中图分类号: O359<sup>+</sup>.1 文献标识码: A

# 论微重力弹-环状流转换的空隙率匹配模型

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:** 对基于微重力条件下, 气/液两相弹状流滑移速率关系和光滑环状流流动量平衡关系的弹-环状流转换空隙率匹配模型的解的特征, 进行了深入分析. 发现该模型具有双解、单解和无解三种情况. 由此阐明了该模型难以正确预测微重力条件下气/液两相弹-环状流转换条件的原因在于光滑环状流流动量平衡关系的非客观性.

**关键词:** 微重力; 气/液两相流; 流型转换; 空隙率匹配模型

气/液两相流动现象广泛存在于地面常重力和空间微重力环境中的众多应用领域中. 两相介质在流道内的分布特征(即流型), 对两相流压力损失及传热传质特性有着极大影响, 因此, 流型研究一直是两相流研究领域最基本和最重要的课题之一, 至今已有数十年的研究历史. 但是, 由于气/液两相流动现象极为复杂, 影响因素繁多, 尤其是在地面常重力环境中, 由于气、液两相间往往存在较大的密度差, 重力引起的浮力分层现象作为主控因素, 使常重力气/液两相流动更加复杂, 以致于对流型的分类及其相互转换机理迄今未有一致的结论. 近十多年来, 利用微重力或模拟微重力环境减弱甚至完全消除重力的影响, 简化了流动中各种不同因素间的相互作用及流型特征, 极大地促进了对气/液两相流动特征及流型产生与转换机理的研究. 同时, 微重力条件下的气/液两相流动是空间技术领域(尤其是未来大型航天器, 如空间站和月球基地的建造)必需解决的关键技术问题之一, 具有重大的应用价值<sup>[1]</sup>.

本文研究重点是微重力气/液两相弹-环状流转换的机理, 通过对空隙率匹配模型<sup>[2]</sup>关于转换空隙率的解的特征分析, 说明该模型不能正确预测微重力气/液两相弹-环状流转换条件的原因.

## 1 空隙率匹配模型解的特征

空隙率匹配模型认为, 弹状流和环状流是微重力条件下气/液两相流动中相邻的两基本流型, 这两种流型转换边界附近的两相流动兼具二者的共同特征, 因此, 其转换条件可

收稿日期: 2000-10-18; 修订日期: 2000-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 19789201)、攀登计划(编号: 95-预-34)和中国科学院“创新工程”资助项目

作者简介: 赵建福(1967—), 男, 工学博士, 副研究员

Bousman W S. Studies of two-phase gas-liquid flow in microgravity. Ph. D. thesis, Univ of Houston, 1994

以根据相同流动条件下按弹状流或环状流计算的空隙率相等来确定

在充分发展的微重力气/液两相弹状流动中, 气、液两相间尽管不存在局部相对滑移, 但由于气相更多地集中于实验段中心部位, 截面平均的气、液两相表观流速间同样存在宏观的滑移现象 利用滑移流率模型<sup>[3]</sup>可得:

$$U_{SG} = C_0 \epsilon (U_{SG} + U_{SL}) \tag{1}$$

其中,  $U_{SG}$ 、 $U_{SL}$  和  $\epsilon$  分别代表气相表观流速、液相表观流速和气相空隙率, 气相分布参数  $C_0$  是一个须由实验确定的经验参数, 在充分发展的微重力气/液两相弹状流动中, 其数值大于 1.

利用相间作用力分析可知, 在微重力条件下光滑环状流动中存在:

$$\frac{\epsilon^{5/2}}{(1 - \epsilon)^2} = \Phi \frac{f_G}{f_L} \frac{\rho_G}{\rho_L} \left( \frac{U_{SG}}{U_{SL}} \right)^2 \tag{2}$$

其中,  $\rho_G$  和  $\rho_L$  分别代表气、液两相介质的密度,  $\Phi$  代表气、液界面摩擦因子与气相摩擦因子之比, 可以由 Wallis<sup>[4]</sup> 关系式  $\Phi = 1 + 150(1 - \epsilon^{1/2})$  或其他经验关系式确定 气、液两相摩擦因子  $f_G$  和  $f_L$  可按如下 Blasius 关系式确定:

$$f_j = CR e_j^n \quad (j = G, L) \tag{3}$$

其中, 气、液两相 Reynolds 数定义如下:

$$Re_G = \frac{DU_{SG}}{\nu_G \epsilon^{1/2}} \tag{4}$$

$$Re_L = \frac{dU_{SL}}{\nu_L} \tag{5}$$

其中,  $\nu_G$  和  $\nu_L$  分别代表气、液两相介质的运动粘性系数 式(3)中经验参数  $C$  和  $n$  的取值分别为: 层流状态  $C = 16, n = -1$ ; 湍流状态  $C = 0.046, n = -0.2$  一般情况下, 式(4)和(5)所确定的气、液两相 Reynolds 数往往落于湍流区域内, 因此, 随后的分析与讨论将只着眼于湍流状态, 此时, 由式(1)和(2)的解所确定了微重力条件下气/液两相弹-环状流转换的条件对应于某个确定数值的转换空隙率  $\epsilon$  该条件还可以改写为关于转换空隙率  $\epsilon$  的隐函数形式:

$$C_0 = \left\{ \epsilon + \left[ \zeta \Phi (1 - \epsilon^2)^{5/9} / \epsilon \right]^{1/3} \right\}^{-1} \tag{6}$$

其中, 物性参数  $\zeta = \frac{\rho_G}{\rho_L} \left( \frac{\nu_G}{\nu_L} \right)^{1/5}$ .

图 1 显示了  $C_0$  随  $\zeta$  和  $\epsilon$  的变化情况 对应于某种具体的气、液两相介质, 空隙率匹配模型的解由图 1 中  $C_0$  随  $\epsilon$  的变化曲线与对应  $C_0$  数值的水平直线的交点确定 (如图 1 中点  $a, b$  或  $c$ ). 根据文献报道, 微重力条件下利用不同实验介质进行的气/液两相流实验结果表明,  $C_0 = 1.2$  (图中水平虚线). 显然, 对不同气、液两相系统的微重力弹-环状流转换, 随着物性参数  $\zeta$

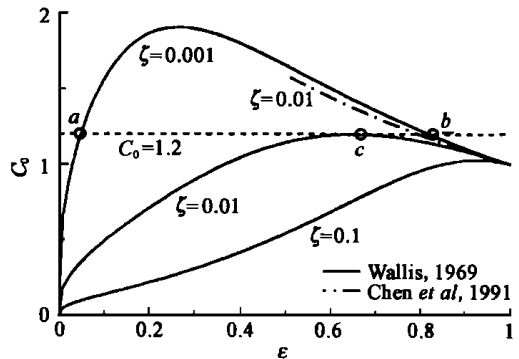


图 1 微重力弹-环状流转换的空隙率模型解的特征  
Fig 1 Characteristics of the solution of the void fraction matched model for slug-to-annular transition at microgravity

由小到大, 空隙率匹配模型关于转换空隙率的解的情况有可能为以下三种之一: 双解(点  $a, b$ )、单解(临界点  $c$ )、无解 Crow ley<sup>[5]</sup>曾得到类似结论, 但却误认为物性参数  $\zeta$  较小(如常温常压条件下的水/空气两相系统  $\zeta = 0.002$ )时, 空隙率匹配模型有唯一解

需要说明的是, 式(6)关于转换空隙率的解强烈依赖于气、液界面摩擦因子与气相摩擦因子之比  $\Phi$  Wallis<sup>[4]</sup>关系式源于地面常重力实验结果, 其对微重力条件下气/液两相流动的适用性还有待验证 Chen *et al*<sup>[6]</sup>根据有限的微重力气/液两相流动实验结果, 提出在大空隙率条件下, 气、液界面摩擦因子与气相摩擦因子之比  $\Phi$  可由下式确定:

$$\Phi = 1 + 5.85(1 - \epsilon^{1/2})^{0.639} \tag{7}$$

图 1 也给出了  $\zeta = 0.01$  时由上式及式(6)得出的  $C_0$  随  $\epsilon$  的变化曲线 可以明显看到, 所预测的转换空隙率变化很大

## 2 讨论

对于存在双解的情况, Duk ler<sup>[7]</sup>认为转换空隙率  $\epsilon$  较小的解对应于“最先”由表面张力引起液相粘覆流道周壁形成环状流型的条件, 因此应取该解而舍弃转换空隙率较大的解 但是, 如图 1 所示, 这种作法对于物性参数  $\zeta$  较小的情况必然是错误的 如常温常压条件下的水/空气两相系统, 空隙率匹配模型所得到的两个解分别为  $\epsilon = 0.15$  和  $0.8$ , 按上述建议应取前者, 但该解事实上完全落在泡状流区域内 这里需要指出的是, 空隙率匹配模型的提出和最初实验检验正是针对微重力水/空气两相流动<sup>[2]</sup>, 并且不加说明地选取了较大的转换空隙率  $\epsilon = 0.8$ , 与上述建议正好相反

为了解决空隙率匹配模型可能无解的困境, Duk ler<sup>[7]</sup>提出对确定的气、液两相系统, 气相分布参数  $C_0$  的取值有一个上限 但迄今实验结果并不支持这一假设

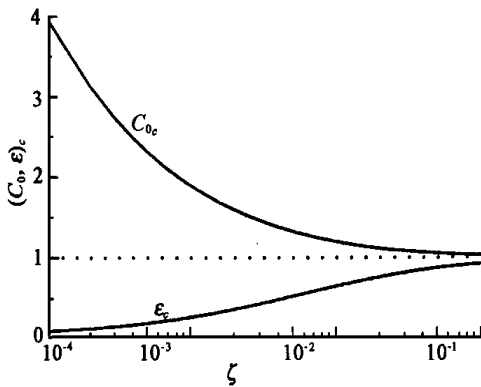


图 2 空隙率匹配模型中气相分布参数的允许上限及相应临界转换空隙率

Fig 2 The allowable upper limit of the gas distribution parameter and corresponding critical value of the transition void fraction in the void fraction matched model

图 2 给出了利用 Wallis<sup>[4]</sup>关系式计算出的空隙率匹配模型有解存在时气相分布参数  $C_0$  的数值上限及其对应临界转换空隙率 一个有趣的现象是, 当物性参数  $\zeta$  趋于 1 时, 气相分布参数  $C_0$  取值的可能上限及其对应临界转换空隙率也趋于 1 转换空隙率趋于 1 或空隙率匹配模型无解的情况均暗示在此类条件下不存在微重力弹-环状流转换 这同样与实验事实不符

根据两相环状流稳定性分析的结果<sup>[8,9]</sup>, 核心区流体密度小于管壁周围环形区流体密度的流动构型是绝对不稳定的 和 Duk ler<sup>[7]</sup>建议相反, 表面张力的作用并不是产生与维持环状流型, 而是导致连通的中心气核破碎形成孤立气团甚至

小气泡产生与维持环状流型的动力是惯性力。在高 Reynolds 数条件下, 气相惯性力的作用将液相推离流道核心区, 并使其粘覆在管壁周围形成环状液膜; 但此时剪切不稳定性又使得液膜表面呈现剧烈波动状, 甚至在更高的 Reynolds 数条件下会引起液膜完全破碎, 形成雾滴状流。因此, 不考虑流速(即 Reynolds 数)影响的理想的光滑环状流动量关系式(2)是不现实的, 尤其是在弹环状流转换边界附近, 毛细不稳定性和剪切不稳定性相互竞争的结果, 使得液膜表面存在扰动幅值接近流道半径的随机波动, 从而导致理想的光滑环状流构型大大偏离实际流动情况。这可能是空隙率匹配模型与实验事实不符的根源。

### 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[J]. 力学进展, 1999, 29(3): 263~ 287
- [2] Dukler A E, Fabre J A, McQuillen J B, *et al*. Gas-liquid flow at microgravity conditions: flow patterns and their transitions[J]. *Int J Multiphase Flow*, 1988, 14(4): 389~ 400
- [3] Zuber N, Findlay J A. Average volumetric concentration in two-phase flow systems[J]. *J Heat Transfer*, 1965, 87: 453~ 468
- [4] Wallis G B. One-dimensional two-phase flow[M]. New York: McGraw-Hill, 1972
- [5] Crowley C J. Discussion of the slug-to-annular flow pattern transition for microgravity condition[J]. *Int J Multiphase Flow*, 1989, 15(4): 675~ 677
- [6] Chen I Y, Downing R S, Keshock E, *et al*. Measurements and correlation of two-phase pressure drop under microgravity conditions[J]. *J Thermophysics & Heat Transfer*, 1991, 5: 514~ 523
- [7] Dukler A E. Reply to Crowley[J]. *Int J Multiphase Flow*, 1989, 15(4): 677
- [8] Joseph D D, Bai R, Chen K P, *et al*. Core-annular flows[J]. *Ann Rev Fluid Mech*, 1997, 29: 65~ 90
- [9] Carron I, Best F R. Gas-liquid annular flow under microgravity condition: a temporal linear stability study[J]. *Int J Multiphase Flow*, 1994, 20(6): 1085~ 1093

## On the Void Fraction Matched Model for the Slug-to-Annular Transition at Microgravity

ZHAO Jianfu

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

**Abstract** A detailed analysis on the characteristics of the solution of the void fraction matched model for the slug-to-annular flow pattern transition at microgravity condition, which is based upon the drift-flux relationship of slug flow and the momentum balance relationship of smooth annular flow, is presented. It is found that the number of the solutions of this model may be 2, 1, or zero. It is pointed that the failure of this model in predicting the transition stems from the non-objective of the momentum balance relationship of smooth annular flow.

**Keywords** microgravity, two-phase gas-liquid flow, flow pattern transition, void fraction matched model