



微重力气/液两相泡状流的摩擦压降¹⁾

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 针对微重力条件下气/液两相泡状流动特征, 建立了其摩擦压降的半理论模型: $f_{TP} = ARe_{TP}^{-1}$, 并利用文献报道的微重力实验数据, 确定了模型参数 A 的数值.

关键词 微重力, 气/液两相流, 泡状流, 摩擦压降

1 引言

气/液两相流现象广泛存在于动力、化工、石油等工业领域, 流动中摩擦压降的确定对于众多相关工业应用系统的设计至关重要. 在以往的半个多世纪中, 在地面常重力环境中进行了大量的研究, 建立了许多模型或关系式来预测地面常重力条件下气/液两相流动中的摩擦压降. 不过, 由于影响气/液两相流动的因素繁多, 尤其是重力引起的密度分层和相间速度滑移等现象, 使得常重力条件下的气/液两相流动现象十分复杂. 现有模型和关系式往往是纯经验的或半经验的, 各种人为定义的参数繁多, 无法揭示气/液两相流动中摩擦压降的物理本质, 因此, 对经验之外的情形很难给出较好的预测, 有时甚至有量级上的差别. 而且, 即使在经验范围之内其预测精度也很有限(例如, 现有模型预测的标准偏差一般不小于 30%, 有时甚至会有数量级上的差别).

随着航天事业和空间技术的发展, 利用微重力环境减弱甚至消除重力的影响, 简化气/液两相流动的复杂性, 使得对其基本机理进行研究成为可能. 同时, 微重力条件下气/液两相流动现象也是微重力环境开发和应用中迫切需要解决的问题, 具有特别重要的应用价值^[1].

目前, 对气/液两相流动研究而言, 微重力条件 ($\leq 10^{-5}g$, g 为地面重力加速度) 主要利用落塔来实现, 但其持续时间太短(一般约 2~5s), 很难对摩擦压降进行准确的测量. 利用抛物线飞机可实现约 20s 的低重力条件 ($10^{-2}g$), 在此条件下收集了一些气/液两相流动中摩擦压降的实验数据^[2~4], 但对数据的分析和处理往往沿用现有模型和关系式, 同样存在着

许多人为定义的参数引起的混乱, 并导致不同作者研究结果之间难以比较. 有鉴于此, 本文希望通过微重力条件下泡状流中两相速度分布等特征的分析, 给出合理的参数定义. 建立其摩擦压降的理论模型, 结合实验结果确定其中具体参数的数值.

2 理论模型

微重力条件下壁面处的摩擦损失直接对应着管道内的沿程压降 dp/dx , 即 $\tau_w = \frac{D}{4} \frac{dp}{dx}$, 其中, τ_w 和 D 分别表示壁面平均切应力和管道内径. 对于润湿性壁面, 紧靠壁面处必然存在一个无气泡区, 其中, 在摩擦速度 u_* (和随后的摩擦因子) 的定义中应采用液相的物性参数, 即 $u_*^2 = \frac{\tau_w}{\rho_L} = \nu_L \left(-\frac{du}{dr} \right) \Big|_{r=R}$. 这里, u 、 ρ 和 ν 分别表示局部速度、密度和运动黏性系数, r 表示径向坐标, R 表示管道半径, 下标“L”和“G”表示液相和“气相”.

Kamp 等^[5] 测量了低重力条件下泡状流中气、液两相的局部速度分布, 结果表明两相速度间差别极小(其具体大小在速度测量的误差范围之内), 这说明在微重力条件下不存在局部速度滑移, 即 $u_G \approx u_L \equiv u$. 实验结果还表明, 局部速度的径向分布可表示为如下形式

$$u = u_0 \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^m \right] \quad (1)$$

其中, u_0 表示管道中心处的(最大)速度, m 为局部速度分布指数, 其数值需要由经验确定(Kamp 等测得的结果为 9). 假设紧靠壁面处速度分布仍遵循式(1), 由单相流动经验可知该区域内局部速度分布指数将与外区有所不同(记为 n), 则

$$u_*^2 = \frac{n\nu_L u_0}{R} \quad (2)$$

另一方面, 由于近壁区很薄并且速度很低, 平均速度可利用管中心区的速度分布关系计算, 即

$$U_M = \frac{2}{R^2} \int_0^R u r dr = \frac{m}{m+2} u_0 \quad (3)$$

1) 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项目资助.

1999-04-27 收到第 1 稿, 2000-02-21 收到修改稿.

可以证明, $U_M = U_{SL} + U_{SG}$, 这里 U_{SL} 和 U_{SG} 分别表示液相和气相表观流速. 显然, 用 U_M 表示微重力条件下气 / 液两相泡状流动中的特征速度是合理的.

这样, 微重力条件下泡状流摩擦因子 f_{TP} 可以利用摩擦速度 u_* 与特征速度 U_M 表示为

$$f_{TP} = \frac{2\tau_w}{\rho_L U_M^2} = \frac{D}{2\rho_L U_M^2} \frac{dp}{dx} = 2 \left(\frac{u_*}{U_M} \right)^2 \quad (4)$$

利用关系式 (2), (3), 可得

$$f_{TP} = A Re_{TP}^{-1} \quad (5)$$

其中, Reynolds 数 $Re_{TP} = U_M D / \nu_L$, 参数 $A = 4n(m+2)/m$.

3 比较与讨论

一般地说, 速度分布指数 m 和 n 均为 Reynolds 数的函数, 但其具体的依赖关系由于以下原因而难以确定: (1) 微重力条件下气 / 液两相流动中的近壁区域速度测量十分困难, 至今未有相应实验结果报道; (2) 气泡对液相流动结构的影响目前还不清楚, 也无法进行理论预测. 不过, 如果假设在微重力条件下, 影响泡状流动中局部速度分布特征的主要因素是异质 (即气相) 的引入, 而与 Reynolds 数之间关系较弱, 则可以利用实验数据来确定模型参数 A 的大小. 图 1 利用 Bousman^[2]、Zhao 和 Rezkallah^[3] 所得到的低重力泡状流摩擦压降实验数据, 得到参数 A 的经验值为: $Re_{TP} < 3000$ 时, $A = 32$; $Re_{TP} > 4000$ 时, $A = 110$, 其最大偏差不超过 30%.

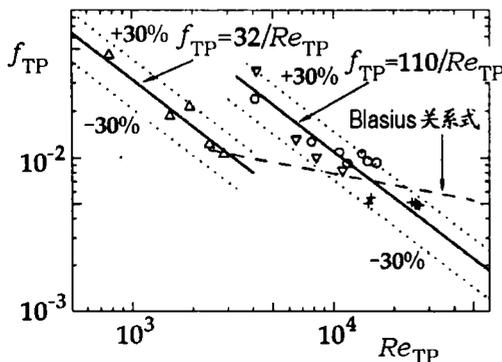


图 1 微重力气 / 液两相泡状流摩擦因子随两相 Reynolds 数的变化

+ Zhao 和 Rezkallah (1995), 空气 - 水;
 ○ Bousman (1995), 空气 - 水;
 △ Bousman (1995), 空气 - 水 / 甘油;
 ▽ Bousman (1995), 空气 - 水 / Zonyl FSP

和管内单相层流情形 ($m = n = 2, A = 16$) 相比, 微重力条件下气 / 液两相泡状流动中的摩擦因子分别变为单相流动时的 2 倍和 7 倍左右. 特别值得注意的是, 图 1 显示微重力条件下气 / 液两相泡状流动中摩擦因子在两相 Reynolds 数为 3000 ~ 4000 时存在跃变, 表明流动形态发生了某种变化. 不过, 这种跃变和单相管内流动情形中由层流向湍流的转变不同, 即式 (5) 中改变的仅仅是模型参数, 而两相 Reynolds 数的指数并不发生变化. 关于这种跃变的性质, 由于缺乏足够的实验数据目前还不能确定. 这有待于今后进一步的研究, 尤其是大量实验数据的获得.

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Bousman WS. Studies of two-phase gas-liquid flow in microgravity. NASA-CR-195434, 1995
- 3 Zhao L, Rezkallah KS. Pressure drop in gas-liquid flow at microgravity conditions. *Int J Multiphase Flow*, 1995, 21: 836~849
- 4 Colin C, Fabre J. Gas-liquid pipe flow under microgravity conditions: influence of tube diameter on flow patterns and pressure drops. *Adv Space Res*, 1995, 19(7): 751~763
- 5 Kamp A, Colin C, Fabre J. Bubbly flow in a pipe: influence of gravity upon void and velocity distributions. In: 3rd World Conf Exp Heat Transfer, Fluid Mech Thermodyn, Honolulu, USA, 1993

FRICIONAL PRESSURE DROP OF BUBBLY GAS-LIQUID TWO-PHASE FLOW UNDER MICROGRAVITY

ZHAO Jianfu HU Wenrui

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

Abstract A semi-theoretical model, $f_{TP} = A Re_{TP}^{-1}$, for the frictional factor of bubbly gas-liquid two-phase flows under microgravity condition is proposed in accordance with their special characteristics, and the parameter of the model is determined using the experimental results reported in the literature.

Key words microgravity, gas-liquid two-phase flow, bubbly flow, frictional pressure drop