



# 微重力气 / 液两相泡状流的摩擦压降<sup>1)</sup>

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<sup>[1]</sup>.

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<sup>[2~4]</sup>, 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, 本文希望通过对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,  $\tau_w$  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,  $u$ 、 $\rho$  和  $\nu$  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<sup>[5]</sup> 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<sup>[2]</sup>、Zhao 和 Rezkallah<sup>[3]</sup> 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%.

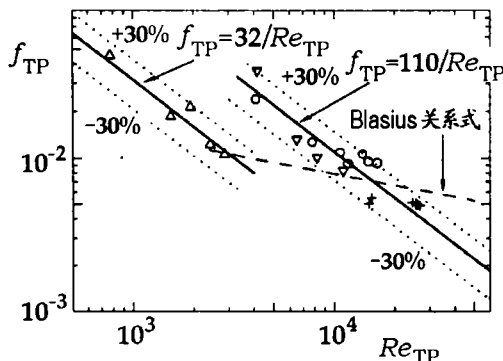


图 1 微重力气 / 液两相泡状流摩擦因子随两相 Reynolds 数的变化

- + Zhao 和 Rezkallah (1995), 空气 - 水;
- o 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