

中国工程热物理学会

第十届年会论文集

多 相 流

二〇〇一

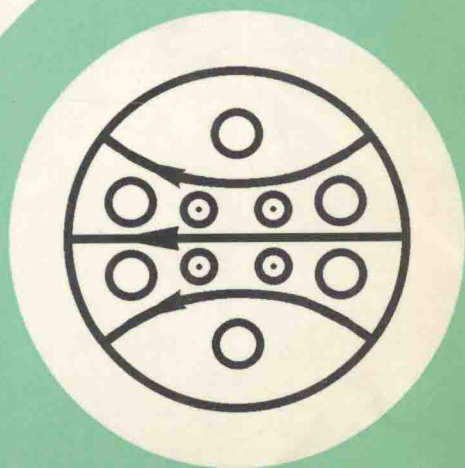
青 岛

中国工程热物理学会 主办

青岛海尔集团

山东工业大学能源与动力工程学院

提供资助



多相流学术会议论文目录

一. 气液两相流

- 016001 微重力两相流相似模拟准则新探.....赵建福 胡文瑞(1)
- 016002 加热管内空泡率径向分布特性实验研究.....孙 奇(8)
- 016004 子通道内空泡份额的实验研究.....
.....杨瑞昌 钟 勇 蒋文俊 杨定华 冯俊凯(14)
- 016005 用概率统计方法对泡状流界面浓度的研究.....
.....杨 建 张鸣远 苏玉亮 张超杰(20)
- 016008 二维液膜表面波的线性稳定性分析.....叶学民 阎维平(25)
- 016011 零净液流量气液两相流持液率与阻力特性研究.....刘 磊 周芳德(33)
- 016012 冷热态两相流场的计算研究.....牛海瑛 徐 行 杨茂林(39)
- 016013 垂直细管内环状两相流换热特性的研究.....易 杰 王 经 刘振华(46)
- 016014 多孔介质内轴对称流动与相变传热过程的双倒易边界元数值模拟.....
.....韩 龙 卢文强(53)
- 016016 汽轮机湿蒸汽两相流中大水滴速度的实验研究.....
.....汪丽莉 蔡小舒 欧阳新 苏明旭 卫敬明(58)
- 016018 气泡-液体多股射流二阶矩两相湍流模型的研究.....
.....杨 玟 周力行 李荣先 L. S. Fan(65)
- 016025 模拟突扩通道中带蒸发湍流气液两相流的拉氏 PDF 模型.....
.....柳朝晖 郑楚光 赵海波 周力行(71)
- 016030 液滴冲击无限大液面过程的边界元模拟.....
.....罗朝霞 李会雄 陈听宽 罗毓珊(76)
- 016033 气泡-液体闭式多股射流的欧拉-拉式大涡模拟研究.....
.....杨 玟 周力行 李荣先 L. S. Fan(82)
- 016046 水平圆管内油水两相流动特性实验研究 (1) 流型及其转换规律.....
.....吴铁军 郭烈锦 刘文红 张西民(88)
- 016051 水平管道段塞流特征参数的差压波动分析.....何利民 郭烈锦 陈学俊(96)
- 016055 凝析气藏开采期间井筒多相流动规律研究.....
.....李相方 王利国 庄湘琦 刚 涛 隋秀香(107)

二. 气固两相流

- 016009 带粒燃气透平气固双向耦合湍流场下叶片冲蚀的数值模拟.....
.....鲁嘉华 凌志光(115)
- 016010 颗粒间相互作用对稠密气固两相流动的影响.....
.....昌泽舟 王建军 A. Berlemont(126)
- 016017 加装肋条的弯管抗磨特性的数值试验研究.....姚 军 樊建人 岑可法(131)
- 016019 用二阶矩颗粒壁面相互作用新模型对突扩两相湍流的研究.....
.....张 夏 周力行(139)
- 016020 湍流两相流的脉动速度-耗散频率联合 PDF 输运方程.....
.....赵海波 柳朝晖 郑楚光(144)
- 016021 颗粒-气体微团脉动速度联合 PDF 输运方程.....赵海波 柳朝晖 郑楚光(150)
- 016023 空间发展湍流气粒两相平面混合层的大涡模拟与统计.....
.....李 勇 柳朝晖 郑楚光 周向阳(156)
- 016024 湍流气粒两相流动中两相关联耗散的理论研究...王汉封 柳朝晖 郑楚光(162)
- 016028 多组分颗粒稠密气固两相流动的数值模拟.....
.....陆慧林 何玉荣 刘 阳 别如山 刘文铁(168)

016034 欧拉框架下的气固阻力模型的最新进展.....	肖海涛 祁海鹰 由长福 徐旭常(173)
016036 小雷诺数下颗粒所受 Saffman 力的研究.....	由长福 祁海鹰 徐旭常(180)
016042 柱状粒子在液体中沉降的数值模拟.....	林建忠 王魏雄(186)
016043 固体粒子通过叶尾激波的流动特性.....	葛满初(191)
016044 含蒸汽气流通道的内固体粒子运动特性.....	葛满初 杨那爽 厉树廉 黄存魁(196)
016049 细颗粒分离新概念初探.....	吴邦贤 刘 石 王海刚 马人熊(202)
016050 突扩管道中密相气固两相湍流流场的数值研究.....	龚晓波 林高平 顾兆林 冯 霄 郁永章(207)

三. 实验及其它

016003 声在颗粒两相流中传播的衰减和声速的数值分析.....	苏明旭 蔡小舒(212)
016006 气固流化床压力信号复杂性规律分析.....	陈伯川 黄春燕 甄 玲 王晓萍(219)
016007 取样管型分流分相式气液两相流体流量计.....	王 栋 林 益 林宗虎(224)
016015 电厂煤粉在线实测研究.....	蔡小舒 欧阳新 李俊峰 顾立群 王克勤(229)
016026 磁流化床中磁场与气固两相流场的协同性.....	归柯庭 陆 敏 施明恒(235)
016027 Benchmark PSRI Challenge Problem II 的数值模拟.....	陆慧林 孙永立 何玉荣 别如山 刘文铁(241)
016029 两相临界流实验研究.....	陈听宽 徐进良 罗毓珊(246)
016032 气固两相流质量浓度摩擦电法测量研究.....	赵延军 陆 勇 朱伯友 王式民 徐益谦(252)
016035 应用 PTV 技术研究颗粒的碰撞规律.....	张文斌 祁海鹰 程 旭 由长福 徐旭常(258)
016037 用 DEM 软球模型研究颗粒间的接触力.....	仇 轶 由长福 祁海鹰 徐旭常(265)
016038 两相平板混合层流动的双向耦合离散涡法数值模拟 (1) 时间发展混合层流动的数值模拟.....	王赫阳 张会强 王希麟 郭印诚 林文漪(271)
016039 两相平板混合层流动的双向耦合离散涡数值模拟 (2) 空间发展混合层流动的数值模拟.....	王赫阳 张会强 王希麟 郭印诚 林文漪(279)
016041 纤维悬浮两相边界层流场稳定性的研究.....	林建忠 聂德明(285)
016045 二维通道内带湿气气固两相流试验.....	黄存魁 杨那爽 葛满初 厉树廉 饶 江 毛靖儒 宫武旗 邹 林 张 玮(290)
016047 水平管油水两相流动特性实验研究 (2) 摩擦阻力特性.....	吴铁军 郭烈锦 刘文红 张西民(296)
016048 固体颗粒与通道壁面相互作用的实验研究.....	饶 江 葛满初 徐建中 杨那爽 毛靖儒 宫武旗 邹 林 张 玮(303)
016052 油气水多相流压力和压差信号特征分析与流型在线识别.....	白博峰 郭烈锦 王忠勇 张西民(309)
016053 倾斜下降管气液两相分层流截面含气率的计算与液层高度的预测.....	周云龙 孙 斌 梁 强 顾 欣(319)
016054 管道密相气力输运的栓柱运动研究.....	许 华 刘 石 王海刚(324)
016056 水平管内油水两相流动的摩擦压力降研究.....	牛冬梅 王 栋 王树众 林 益(329)
016057 垂直下降管内油气水三相流摩擦压力降的实验研究.....	王 祺 王树众 王 栋 林宗虎(334)
016059 相变材料微胶囊 (MEPCM) 悬浮液传热模型与仿真.....	饶 宇 林贵平(339)

微重力两相流相似模拟准则新探*

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 数和环形区流体相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三个限制条件, 即粘度比、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

Novel Investigation on Principle of Similarity for Two-phase Flow at Microgravity

Zhao Jian-Fu**, Hu Wen-Rui

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

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 of the phase flowing in the annulus is no more than one, is achieved. It is also pointed out that the viscosity ratio, the flowrate ratio, and the Weber number ought to 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. 引 言

在人类不断探索太空、开发空间资源的进程中, 越来越多的空间技术设施(如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)中存在有气(汽)/液两相流现象。由于此类设施运行的重力环境与地球表面不同(如沿稳定轨道飞行的航天器内残余重力几乎为 0, 而月球表面重力约为地面的 1/6), 其成功设计与安全运行, 依赖于对不同重力条件下气/液两相流规律(即流型、摩擦压降、传热特性及系统稳定性等)的深刻认识。鉴于目前有关气/液两相流动规律的认识, 往往基于在地面常重力环境中进行的大量精心设计的实验所获得的经验数据, 难以保证能成功地推广应用到空间不同重力条件, 因此, 开展不同重力条件下(尤其是微重力条件下)的气/液两相流实验研究具有特别重要的意义。此外, 此类研究将重力作为变量, 可以揭示其对气/液两相流动的影响机理, 同样有助于对地面常重力环境中的气/液两相流动规律的理解。

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

* 本文为中国科学院“知识创新工程”资助项目(编号: KJCX2-L02)。

** Tel: 010-62615538, Fax: 010-62615524, E-mail: jfzhao@imech.ac.cn

空间站或航天飞机。但空间实验机会很少, 经费支出极大, 而且对实验装置、实验介质甚至观测方法等都有很强的限制。因此, 目前真正的空间实验还很少^[1, 2], 绝大部分实验工作是利用地基短时失重实验设施(失重飞机、落塔等)进行的^[3]。地基短时失重实验设施具有如下局限性: 能够提供的持续失重时间很短(失重飞机约 20 秒, 落塔仅数秒), 每个失重阶段前、后会有很大的超重过程, 失重飞机实验在失重阶段残余重力较大(约 $10^{-2}g_0$, g_0 为地面重力加速度), 且存在较强的波动。这些因素对实验都是不利的。此外, 利用等密度液/液两相系统和小尺度毛细管气/液两相系统, 在地面常重力环境模拟微重力气/液两相流特征, 也受到很大重视^[4-6]。

一般地说, 对于具有自由界面的流动系统, 当重力大大削弱甚至完全消失后, 界面张力对流动的影响将上升为主导因素; 而在地面常重力环境中, 由于两相介质密度往往相差悬殊, 浮力作用将主导两相流特征。因此, 表示浮力与界面张力相对大小的 Bond 数 $Bo = (\rho_2 - \rho_1)gd^2/\sigma$ (其中, ρ 、 g 、 d 和 σ 分别代表密度、重力加速度、管道直径和表面张力, 下标“1、2”分别表示核心区和环形区)在微重力两相流模拟实验中具有特别重要的意义。利用等密度液/液两相系统和小尺度毛细管气/液两相系统进行微重力气/液两相流模拟实验均是据此提出的。然而, 影响两相流特征的参数众多, 模拟实验中各无量纲参数应满足什么样的关系(即相似模拟准则), 目前尚不清楚, 只是定性地要求 Bond 数远小于 1, 并认为在此条件下, 重力作用即可忽略。利用量级分析的方法, 结合“和平号”空间站不同重力条件下气/液两相流型实验及 Colin^[7]大直径管内气/液两相流失重飞机实验的结果, Zhao 等^[1]得出临界 Bond 数的范围约为 1.5~6。但是, 毛细管气/液两相流实验^[6]表明, 在较小的液相流量条件下, 即使 Bond 数满足上述要求, 流动仍表现出某种重力效应(如气泡明显偏向水平流道的上部)。目前这种关于微重力气/液两相流相似模拟准则的认识的不完备性, 导致对模拟实验结果的解释存在有诸多争议, 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, 相似模拟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特征间的关系的研究^[8-15]表明, 在重力作用较弱时, 该流动构型的线性稳定性分析结果与实验观测到的流型特征间存在较强的关联, 可以由线性稳定性分析结果很好地预测相应流动条件下实验观测到的流型特征。因此, 本文将根据两流体同心环状流线性稳定性问题, 对微重力气/液两相流地面模拟实验准则进行初步分析。

2. 数学模型

对于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流动, 其无量纲速度 W (其特征值为轴心处流速 W_0) 可表示为:

$$W = \begin{cases} 1 - \frac{\eta r^2}{\eta + a^2 - 1} [1 - B(2 \ln a - a^2 + 1)] & 0 \leq r \leq 1 \\ \frac{a^2 - r^2}{\eta + a^2 - 1} [1 - B(2 \ln a - a^2 + 1)] - B \left(a^2 - r^2 - 2 \ln \frac{a}{r} \right) & 1 \leq r \leq a \end{cases} \quad (1)$$

这里, $r = 2R/d$ 表示无量纲径向坐标, $a = R_2/R_1$ 表示管道半径 R_2 与核心区半径 R_1 之比, $\eta = \mu_2/\mu_1$ 表示两种流体的粘度比, $B = Bo/(16\eta Ca_w)$, $Ca_w = \mu_1 W_0/\sigma$ 表示(基于轴心处流速的)毛细数。若重力不为 0 时, 为保证流动的对称性, 流动方向必须与重力平行。这里, g 为正值对应于垂直向上流动, g 为负值则为垂直向下流动。

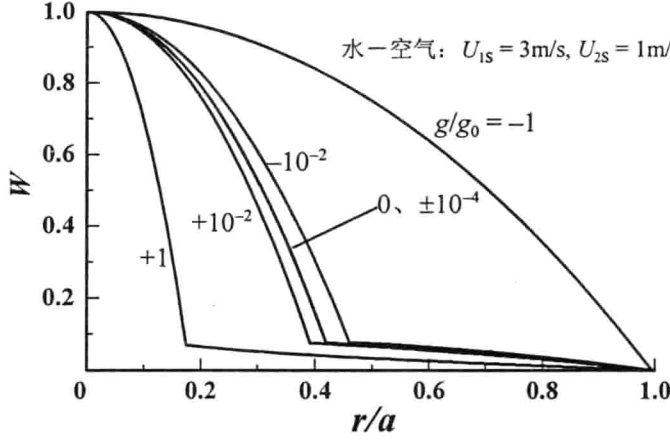


图 1 重力对双流体同心环状流速度分布的影响

图 1 显示了不同重力条件下水、空气两流体同心环状流速度分布的典型特征。可以看到，在垂直向上流动中，浮力将使核心区气流加速，减小截面内气相所占份额；在垂直向下流动中，浮力对核心区气流起着阻碍作用，相应地会增大气相份额；若重力减小到一定程度，其影响可以完全忽略（例如， $g/g_0 = \pm 10^{-4}$ 时，速度分布曲线与零重力时的差别极小，以致难以分辨）。此外，相应于失重飞机平均重力水平（ $g/g_0 = \pm 10^{-4}$ ）的速度分布曲线和零重力时的差别尽管不大，但仍然相当明显。这样，目前研究微重力气/液两相流动的最主要的实验方法（失重飞机实验）的有效性，还需要进一步的检验。

在两相流研究领域，一般采用两相表观流速 U_{1S} 和 U_{2S} 来表示相应的流动条件，由式（1）可得：

$$U_{1S} = \frac{W_0}{2a^2} \left\{ 2 - \frac{\eta[1 - B(2 \ln a - a^2 + 1)]}{\eta + a^2 - 1} \right\}, \quad (2)$$

$$U_{2S} = \frac{W_0}{2a^2} \left\{ \frac{(a^2 - 1)^2 [1 - B(\eta + 2 \ln a)]}{\eta + a^2 - 1} - 4B \ln a \right\}. \quad (3)$$

若 $B=0$ ，由式（2）和（3）可得：

$$a = \sqrt{(1 + q + \sqrt{1 + \eta q}) / q}, \quad (4)$$

$$W_0 = \frac{2}{\eta} \sqrt{1 + \eta q} (\eta - 1 + \sqrt{1 + \eta q}) U_{2S}. \quad (5)$$

其中， $q = Q_1/Q_2 = U_{1S}/U_{2S}$ 为两相体积流量比或两相表观流速比。如果按惯常作法，以表观流速作为速度无量纲化的特征值（不失一般性，特征值可取为混合流速 $U_M = U_{1S} + U_{2S}$ ），则轴心处无量纲速度 $W_0^* = W_0/U_M$ 和半径比 a 将由 q 和 η 唯一确定。

若 $B \neq 0$ ，同样由式（2）和（3）可得：

$$W_0^* = \frac{1}{16\eta Ca} \frac{Bo \eta (2 \ln a - a^2 + 1) + q [(a^2 - 1)^2 (\eta + 2 \ln a) + 4(\eta + a^2 - 1) \ln a]}{a^2 [q(a^2 - 1)^2 - 2(a^2 - 1) - \eta]}. \quad (6)$$

其中， $Ca = \mu_1 U_M / \sigma$ 表示（基于混合流速的）毛细数。将式（6）代入式（2）或（3），

可以消去 W_0^* ，得到一个只包含 a 、 q 、 η 和 Bo/Ca 的隐式方程：

$$F\left(a; q, \eta, \frac{Bo}{Ca}\right) = 0. \quad (7)$$

这样，由 q 、 η 和 Bo/Ca 可以完全确定 a ，从而 W_0^* 也将由 q 、 η 和 Bo/Ca 确定。因此，与 Joseph 等^[12]看法不同，半径比 a 并不是一个独立的影响参数。

若上述流动（在稳定性理论中一般称其为基本流动或基态解）中存在无穷小的扰动 (u, v, w, p, δ) ，其中， u 、 v 、 w 、 p 分别代表 3 个速度分量和压力对基本流动中相应参数的偏离， $\delta = \delta(\theta, z, t)$ 表示相界面位置对 $r=1$ 的偏离，则在线性稳定性理论适用的范围内，扰动量的线性控制方程为：

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(ru) + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (8)$$

$$m_k \left(\frac{\partial u}{\partial t} + W \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\eta_k}{Re} \left(\nabla^2 u - \frac{u}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \theta} \right), \quad (9)$$

$$m_k \left(\frac{\partial v}{\partial t} + W \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \frac{\eta_k}{Re} \left(\nabla^2 v - \frac{v}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \theta} \right), \quad (10)$$

$$m_k \left(\frac{\partial w}{\partial t} + W \frac{\partial w}{\partial z} + W' u \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\eta_k}{Re} \nabla^2 w. \quad (11)$$

其中， $W' = \frac{dW}{dr}$ ， $m_k = \begin{cases} 1, & k=1 \\ m, & k=2 \end{cases}$ ， $\eta_k = \begin{cases} 1, & k=1 \\ \eta, & k=2 \end{cases}$ ， $Re = \frac{\rho_1 U_M d}{\mu_1}$ 表示 Reynolds 数。

相界面（ $r = a^{-1}$ ）条件为：

$$u = W \delta_z + \delta_t, \quad (12)$$

$$[u] = [v] = 0, \quad (13)$$

$$[W' \delta + w] = 0, \quad (14)$$

$$\left[\eta \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \right) \right] + [W' W'' \delta] = 0, \quad (15)$$

$$\left[\eta \left(\frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial r} - v \right) \right] = 0, \quad (16)$$

$$\frac{1}{We} (\delta_{\theta\theta} + \delta_{zz} + \delta) = -[p] + \frac{2}{Re} \left[\eta \frac{\partial u}{\partial r} \right]. \quad (17)$$

其中， $W'' = d^2 W / dr^2$ ， $[\Psi] = \Psi_2 - \Psi_1$ 表示相界面两侧物理量 Ψ 的间断， $m = \rho_2 / \rho_1$ 代表两种流体的密度比， $We = \rho_1 U_M^2 d / \sigma$ 表示 Weber 数。

相应的边界条件为： $r=0$ （轴心处），扰动速度为有限值； $r=1$ （管壁处），扰动速度为 0。

综上所述，在两流体同心环状流线性稳定性问题中，存在以下 6 个无量纲参数： q 、 η 、 m 、 Re 、 We 和 Bo/Ca ，它们将决定两相流动的特征。而两相流研究领域其他常用的无量纲参数，如 Froude 数 $Fr = W_0 / \sqrt{g R_1}$ 和 Suratman 数 $Su = \rho_1 \sigma R_1 / \mu_1^2$ ，均可用上述无量纲参数的组合来表示，不是独立参数。需要说明的是，若以 U_{1S} 或 U_{2S} 作为速度无量纲化的特征值，相关方程的形式并不改变。

3. 相似模拟准则

线性稳定性分析^[8-15]表明，两流体同心环状层流很难存在稳定的基态解，尤其是

当轻相介质位于核心区时该流动构型总是不稳定的。这和单相流动不同，后者在任意 Reynolds 数条件下对无穷小的扰动而言总是稳定的^[16]。导致上述差异的根本原因就在于相界面的出现与否。

考察前节所述两流体同心环状流稳定性的数学模型，可以看到在相界面处存在有导致线性不稳定性的三个因素：（1）轴向扰动速度的间断（式（14）），它源于基本流动速度剖面在相界面处斜率的不同，决定于两相介质粘度比 η ；（2）切向应力的间断（式（15）），它源于基本流动速度剖面在相界面处曲率的不同，决定于无量纲参数 Bo/Ca ，其本质在于两相介质密度的不同及重力作用的存在；（3）法向应力的间断（式（17）），它源于表面张力的作用。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^[10、12、15]，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尚未观察到，这里暂不考虑。与此相应，从流型研究的角度看，Reynolds 数和密度比在微重力气/液两相流模拟实验中作用不大。

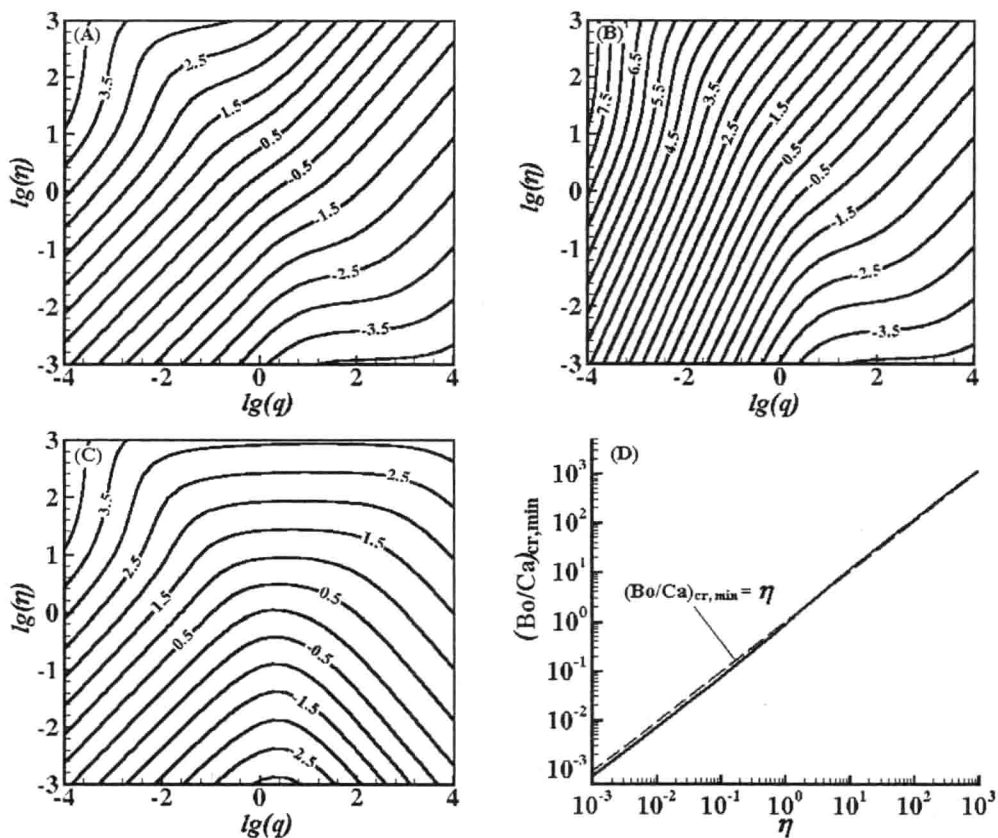


图 2 Bo/Ca 的临界值（图 A、B 和 C 分别对应特征速度为混合流速、核心区流体相和环形区流体相表观流速时临界 Bo/Ca 的自然对数的等值线图，图 D 中实线表示以环形区流体相表观流速为特征速度时 Bo/Ca 的最小临界值随粘度比的变化关系）。

由此可见，基本流动速度剖面的相似在两流体同心环状流线性稳定性问题中具有特别重要的意义，它不仅对应于一般相似模拟问题中的几何相似要求，而且还具有动

力相似的含义，后者还可参照单相剪切流动中不稳定性的发展对于速度剖面细节的敏感性予以解释。由方程 (6)、(7) 和 (1) 可知，只有 q 、 η 和 Bo/Ca 三个无量纲参数在模拟实验和被模拟的流动中具有完全相同的数值，这一要求才能实现。不过，图 1 表明，对于微重力气/液两相流动的模拟而言，若 Bo/Ca 的绝对值小于某一临界值后，尽管其具体数值在两种流动中并不严格相等，但只要 q 和 η 在两种流动中保持相同，速度剖面间的差异可以忽略不计。因此，只要模拟实验中的 Bo/Ca 的绝对值不大于其临界值，同时保证 q 和 η 不变，即可认为速度剖面相似的要求得到满足。

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。图 2 显示了按此标准计算得到的临界 Bo/Ca 随流量比和粘度比的变化特征。这里，仅显示了 Bo/Ca 为正值的情况，这对应于轻相介质位于核心区的垂直向上流动或重相介质位于核心区的垂直向下流动。如前所述，在两相流动中存在三个特征速度，为了判别究竟什么速度才是能真正反映两相流动的特征，分别以混合流速（图 2A）、核心区流体相表观流速（图 2B）和环形区流体相表观流速（图 2C）为特征速度进行了计算。可以看到，选取前两种速度作为特征速度所得到的 Bo/Ca 临界值，将随着粘度比和流量比增加而增加；而以环形区流体相表观流速为特征速度，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。若粘度比不变，临界 Bo/Ca 存在一个最小值， $(Bo/Ca)_{cr,min}$ 近似等于粘度比（图 2D）。若流动反向，则临界 Bo/Ca 将为负值，不过，其绝对值与上述结果相差甚微。

考虑到模拟实验体系一旦选定，粘度比将固定不变，而流量比往往有很大的变化，因此，以环形区流体相表观流速为特征速度将是最恰当的。同时，定义环形区流体相的毛细数为：

$$Ca = \mu_2 U_{2s} / \sigma, \quad (18)$$

则实用的重力无关性准则可表示为：

$$|Bo/Ca| \leq 1. \quad (19)$$

在此条件下，环形区厚度与核心区半径之比及轴心处速度与零重力条件下的相应数值的最大相对差别分别如图 3A、B 所示。

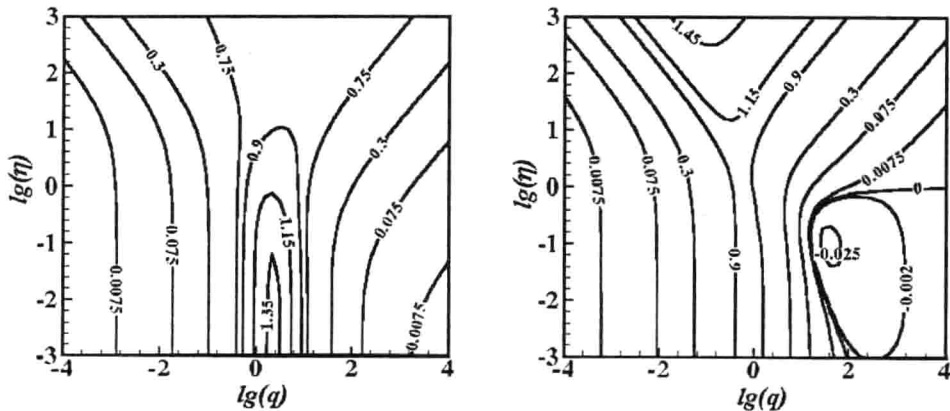


图 3 满足重力无关性准则时环形区厚度与核心区半径之比 (A) 及轴心处速度 (B) 与零重力条件下的相应数值的最大相对差别。

此外，界面张力是微重力两相流不稳定性的另一根源，它导致在相界面处法向应力不连续，Weber 数代表了这一作用的强弱，因此，Weber 数相等将是模拟实验必须

满足的另一个条件。

这样,在满足重力无关性准则(18)的前提下,微重力气/液两相流模拟实验还必须满足三个限制条件,即粘度比、流量比和 Weber 数应与所模拟流动中对应数值相等。对相应模拟实验结果的解释,也应该依据这些条件进行。

4. 结束语

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 数和环形区流体相的毛细数之比的绝对值小于 1。在满足重力无关性准则的前提下,微重力气/液两相流模拟实验还必须满足三个限制条件,即粘度比、流量比和 Weber 数应与所模拟流动中对应数值相等。对相应模拟实验结果的解释,也应该依据这些条件进行。

参考文献

- [1] Zhao JF, Xie JC, Lin H, Hu WR, Ivanov AV, Belyaev AY. Experimental study of two-phase flow in microgravity. In: *51st Int. Astronautical Cong.*, Oct. 2–6, 2000, Rio de Janeiro, Brazil.
- [2] Reinarts, T. R., Ungar, E. K. & Butler, C. D. 1995. Adiabatic two-phase pressure drop in microgravity: TEMP2A-3 flight experiment measurements and comparison with predictions. In: *33rd Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*, January 9–12, Reno, NV.
- [3] 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.
- [4] Lovell TW. Liquid-vapor flow regime transitions for use in design of heat transfer loops in spacecraft. AFWAL-TR-85-3021, 1985.
- [5] Galbiati L, Andreini P. Flow pattern transition for horizontal air-water flow in capillary tubes: a microgravity 'equivalent system' simulation. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 1994, 21(4): 461–468.
- [6] Zhao JF, Hu WR. Experimental study on two-phase flow in a square micro-channel. In: *2nd Pan Pacific Basin Workshop on Microgravity Sciences*, May 1–4, 2001, Pasadena, CA, USA.
- [7] Colin C. Ecoulements diphasiques à bulles et à poches en micropesanteur. Thesis, Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, 1990.
- [8] Preziosi L, Chen K, Joseph DD. Lubricated pipelining: stability of core-annular flow. *J. Fluid Mech.*, 1989, 201: 323–356.
- [9] Hu HH, Joseph DD. Lubricated pipelining: stability of core-annular flow. Part 2. *J. Fluid Mech.*, 1989, 205: 359–396.
- [10] Chen K, Bai R, Joseph DD. Lubricated pipelining. Part 3: stability of core-annular flow in vertical pipes. *J. Fluid Mech.*, 1990, 214: 251–286.
- [11] Aul RW, Olbricht WL. Stability of a thin annular film in pressure-driven, low-Reynolds-number flow through a capillary. *J. Fluid Mech.*, 1990, 215: 585–599.
- [12] Joseph DD, Bai R, Chen KP, Renardy YY. Core-annular flow. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 1997, 29: 65–90.
- [13] Carron I, Best FR. Gas-liquid annular flow under microgravity conditions: a temporal linear stability study. *Int. J. Multiphase Flow*, 1994, 20(6): 1085–1093.
- [14] Carron I, Best FR. Microgravity gas/liquid flow regime maps: can we compute them from first principles? In: *Heat Transfer – Houston 1996*, AIChE symposium Series No. 310, Vol. 92, pp. 92–99.
- [15] 赵建福, 李会雄, 胡文瑞. 线性稳定性理论在两相流型研究中的应用. 已投交 *力学进展*, 2001.
- [16] Schlichting H. *Boundary Layer Theory*. New York: McGraw-Hill, 1968.

加热管内空泡率径向分布特性实验研究

孙 奇

中国核动力研究设计院, 空泡物理和自然循环重点实验室, 成都, 610041

电话: (028)5582199-88584

E-mail: qisun@263.net

摘 要

掌握受热工况空泡率径向分布基本规律对于汽液两相流多维计算模型的建立极为重要。为此, 本文运用光学探针在加热上升管内对蒸汽-水两相流空泡率径向分布特性进行了测量与研究。根据实验结果, 研究了受热工况下空泡率径向分布的基本规律以及热平衡含汽率、压力、质量流密度和热流密度对空泡率的影响。

关键词 两相流 空泡率 光学探针

1 引 言

空泡率是汽液两相流中一个非常重要的参数。当知道两相流空泡率后便可求得两相混合物的平均密度、计算压降、分析管内流动状况等, 此外, 在核反应堆中, 该参数又会对堆功率的稳定性、堆内流动和传热特性以及运行的安全性产生很大的影响。因此, 对空泡率的研究非常重要。

然而, 对于管道内相同截面平均空泡率的两相流动, 可能其空泡率径向分布不同, 这将产生不同的两相流动形态, 进而对传热等特性产生不同的影响。而研究空泡率的分布规律对于建立平均空泡率的计算模型又具有重要的意义, 如二维一速度模型、二维二速度模型就必须考虑空泡率的径向分布。近年来, 随着计算机功能的日渐强大, 已可以提供对两相流更加精细的计算, 两相流模型也由最初的均相流模型发展到目前更加精确的多维两流体模型, 为实现两相流的多维计算, 掌握两相流参数特别是空泡率的空间分布特性就显得极为重要。

为此, 国外已在此方面进行了一些实验研究(Wang,S.K.I 1986^[1]; Liu,T.J 1993^[2,3]; Kalkach-Navarro,S et al.1993^[4]; Grossetête,C 1995^[5]; Hibiki,T 1998^[6]), 但实验数据仍然不多, 仍有许多规律尚未了解。而且, 已有的实验多在绝热空气-水系统中进行, 这与实际工业环境下(核反应堆)的蒸汽-水系统有所不同。对于受热蒸汽-水系统, 由于测量研究难度相对较大, 相关研究极少报道。

本实验的主要目的是对加热上升管内汽水两相流空泡率径向分布特性进行研究, 通过光学探针沿管道径向的测量, 得出其径向分布情况, 为更加全面深入地了解受热工况汽水两相流动的真实情况及相关模型的发展提供参考。

2 两相流空泡率测量系统

2.1 系统简介

各种测量空泡率径向分布的方法中，最常用的就是探针法，如光学探针、电阻探针以及热线风速探针等。本次实验采用空泡物理和自然循环重点实验室由法国引进的RBI光学探针系统作为测量研究的手段。该探针系统由五部分组成，分别是光学探针、光电转换模块、数字示波器、信号采集及处理系统、计算机及计算显示软件^[7]。

该系统及实验用光学探针主要性能指标如下：

最大测量压力： 3 MPa
 探头敏感端直径：~40 μm
 采样频率： 8 MHz
 最大测量气泡数：5000 个/通道

本次实验前，作者(2000)曾进行了该光学探针系统的准确性检验试验，试验结果表明探针对气泡信号的响应敏感，该系统可以得出满意的测量结果^[8]。

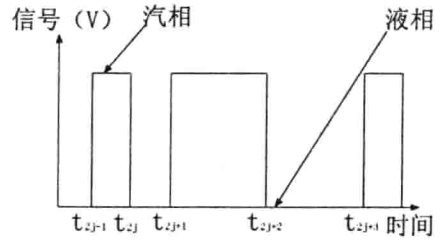


图1 局部点探针信号

2.2 空泡率计算

图1为转换后的某局部点探针信号^[9]，高低电平分别对应汽相与液相，则该点处的空泡率为：

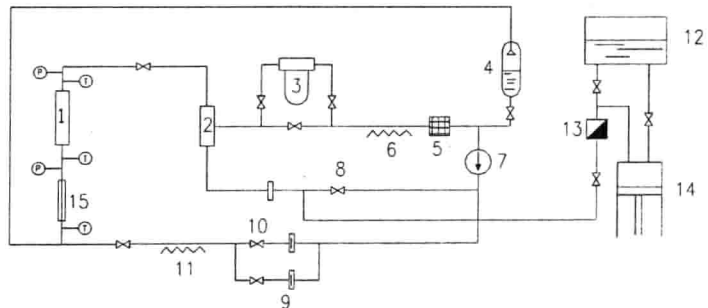
$$\alpha(r) = \frac{\sum (t_{2j} - t_{2j-1})}{T} \quad j=1, 2, \dots, N \quad [1]$$

其中 r 为径向位置， T 为总采样时间， N 为探测到的气泡数。

3 实验装置与实验方法

3.1 实验装置

本实验在空泡物理和自然循环重点实验室热工实验小回路上完成，图2是该实验台架的流程简图。它是一个闭式的高温高压回路，实验的工作介质为去离子水。从实验段流出的水依次经过汽水混合冷凝器、热交换器、过滤器至屏蔽泵的入口，再由屏蔽泵送出，经过预热段进行预



1. 实验段 2. 汽水混合冷凝器 3. 热交换器 4. 稳压器 5. 过滤器
 6, 11. 加热器 7. 屏蔽泵 8, 10. 调节阀 9. 孔板 12. 水箱
 13. 止回阀 14. 柱塞泵 15. 预热段 T温度 P压力

图2 热工实验小回路流程简图

加热流回到实验段，形成一个闭式的循环回路。

实验段为一垂直安装的单管试验段，由直流电通过导电排直接通电加热。加热管选用标准管 $\phi 32\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ ，全长 1.304 m ，其中加热段长 1.0 m ，加热管两端通过绝缘法兰连接于回路上。为实现探针沿管道径向的精确移动及测量，设计并制造了探针驱动机构。该机构与实验段刚性连接，不仅驱动光学探针作一维移动，同时对探针相对于实验段的移动距离进行精确测量，其测量精度为 0.01 mm 。

3.2. 实验方法

由于两相流空泡率在径向的分布很不均匀，一般说来在管道中心区域变化缓慢，而在管道近壁区变化较为显著。因此，在探针的径向测量过程中，不采用径向的均匀测量，而是在空泡率变化较小的管道中心区测量点间隔相对大一些，在空泡率变化显著的近壁区测量点则密得多。同时可认为气泡在整个截面上对称分布，因此只在一个半径方向进行测量，一般采集12或13个点的数据，其中大多数点都处于距壁面 3 mm 以内的区域。

实验中保持系统压力一定，选取典型的质量流密度和热流密度(加热段功率)并保持不变，通过改变预热段功率使实验段入口温度发生变化，以达到改变探针所测截面热平衡含汽率的目的，沿径向移动光学探针进行测量，得出不同热平衡含汽率条件下空泡率径向分布情况。选取不同的系统压力、质量流密度以及热流密度，重复上述过程，根据测量结果研究压力、质量流密度和热流密度对空泡率的影响。通过实验共计测量得出85个不同工况下近千个空间点的局部空泡率数据，实验工况主要受到探针性能的限制，最终工况范围如下：

压力	0.13~2.01 MPa
探测点热平衡含汽率	-5.3%~+1.6%
热流密度	306~775 kW/m^2
质量流密度	266~814 $\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$

4 实验结果与分析

实验结果表明上升加热管内两相流空泡率径向分布极不均匀，不同的系统工况具有不同的径向分布特征，其中热平衡含汽率对空泡率分布的影响最为显著。

图3为典型的不同的热平衡含汽率工况下空泡率径向分布曲线，其中压力 P 、质量流密度 G 、热流密度 q 以及热平衡含汽率 X_{eq} 的单位分别为MPa、 $\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$ 、 kW/m^2 、

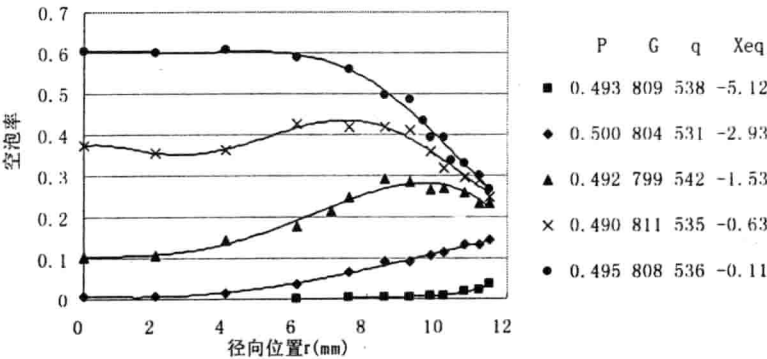
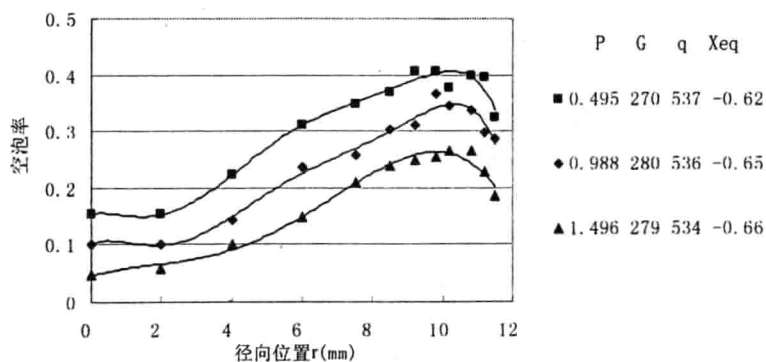
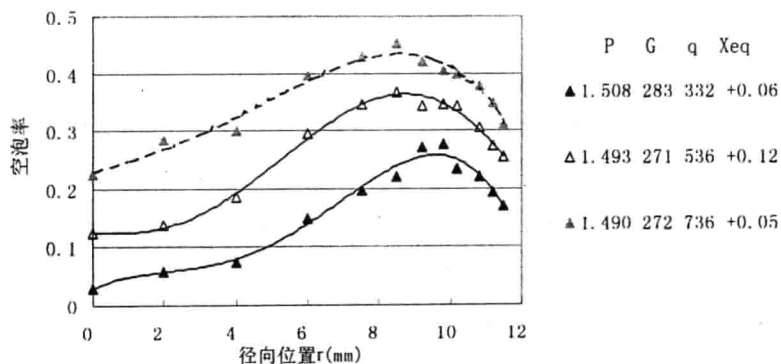


图3 不同热平衡含汽率空泡率分布

实验结果分析发现,过冷沸腾工况下压力对空泡率的影响与过冷度(热平衡含汽率)有关。可以认为,该现象主要是系统压力对汽



泡脱离点与汽相密度共同作用的结果。压力升高, 汽相密度增加使空泡率降低, 然而由于高压下汽化潜热较小, 汽泡脱离点对应热平衡含汽率较低, 因此在一些高过冷沸腾工况(对



应低热平衡含汽率)，压力的升高又会使空泡率升高。在仅有少量汽泡产生的高过冷沸腾工况，实验结果表明，空泡率随系统压力的变化趋势很不确定。不过可以认为，在接近汽

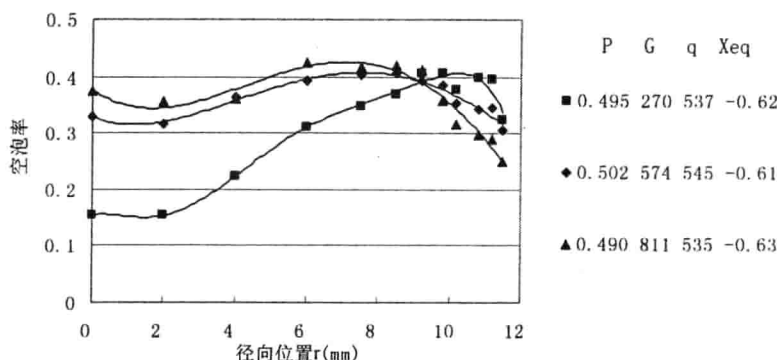


图6 不同质量流密度空泡率分布

泡脱离点的过冷沸腾工况，压力的升高会使空泡率升高。在低过冷沸腾以及饱和沸腾工况，汽相密度的变化起主导作用，从实验结果中可以得出一致的规律，即压力升高使空泡率降低，如图4。

随着热流密度的升高空泡率明显升高，在一些较高热平衡含汽率工况下甚至发现随着热流密度的升高整个截面上空泡率由近似的鞍形分布发展为近弧形，典型的热流密度对空泡率的影响如图5所示。

人们一般认为质量流密度对空泡率的影响较小。然而，实验发现，低过冷沸腾以及饱和沸腾工况下，当工况由 $270 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ 左右的低质量流密度上升到 $575 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ 左右时，汽泡更趋于向管道中心区迁移，质量流密度对空泡率的影响较大，如图6，当质量流密度进一步上升至 $800 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ 左右时，质量流密度对空泡率的影响很小。因此，可以认为，在压水堆正常运行工况下，由于质量流密度很高，其对空泡率的影响在很大程度上可以忽略，而对于一些低质量流密度工况，如自然循环，则必须充分考虑质量流密度对空泡率的影响。通过本实验结果的分析表明，本实验工况范围内，当质量流密度大约低于 $600 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ 时，其对空泡率的影响较大，反之，对空泡率的影响较小。

5 结论

通过本实验，可得出以下结论：

(1) 加热上升管内汽液两相流空泡率在径向上的分布不均匀，工况不同，整个直径上空泡率分布可能是近U形(高过冷沸腾中心区无汽泡)、鞍形或中心区高于近壁区的近弧形。

(2) 热平衡含汽率、压力、热流密度以及质量流密度对局部空泡率都有重要影响：空泡率随热平衡含汽率的升高而上升，同时整个直径上其分布曲线从近U形向鞍形以及近弧形发展；在低过冷沸腾和饱和沸腾工况，压力升高，空泡率降低；热流密度增加，空泡率随之增加；本实验工况范围内，当质量流密度大于 $600 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ 左右时，质量流密度对空泡率的影响很小，当质量流密度小于 $600 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ 左右时，其对空泡率的影响较大。

致谢 作者感谢中国核动力研究设计院赵华研究员、李忠朋教授以及蒋序伦副研究员对本课题所给予的指导和帮助。

参 考 文 献

- [1] Wang, S. K. I. Three dimensional turbulence structure measurements in air/water two phase flow. Rensselaer Polytechnic Inst., Troy, NY (USA). 449 p, 1986
- [2] Liu, T. J. Bubble size and entrance length effect on void development in a vertical channel. *Int.J.Multiphase Flow*. 19, 99-113, 1993
- [3] Liu, T. J. & Bankoff, S. G. Structure of air-water bubble flow in a vertical pipe—II. void fraction, bubble velocity and bubble size distribution, *Int.J.Heat Mass transfer*. 36, 1061-1072, 1993
- [4] Kalkach-Navarro, S. & Lahey, R. T. Jr. & Drew, D. A. & Meyder, R. Interfacial area density, mean radius and number density measurements in bubbly two-phase flow. *Nucl.Engrg.Des.* 142(2-3), 341-351, 1993
- [5] Grossetête, C. Experimental investigation of void profile development in a vertical cylindrical pipe. *Advances in Multiphase Flow*, 333-346, 1995
- [6] Hibiki, T. & Hogsett, S. & Ishii, M. Local measurment of interfacial area, interfacial velocity and liquid turbulence in two-phase flow. *Nucl.Engrg.Des.* 184, 287-304, 1998
- [7] 2-phase measurement system—User's Notice, RBI.
- [8] 孙奇, 蒋序伦, 赵凤霞. RBI光学探针准确性检验试验. 空泡物理和自然循环实验室年报, 1999
- [9] Vin software two-phase flow study—User's Guide, RBI.
- [10] 孙奇, 吴晓航, 陈军, 赵华. 垂直上升管内两相流空泡份额径向分布. 核动力工程, 2000, Vol121(5)

AN EXPERIMENTAL STUDY ON VOID FRACTION RADIAL DISTRIBUTION IN A HEATED TUBE

Sun Qi

(National key laboratory of bubble physics & natural circulation, NPIC, Chengdu, 610041)

Abstract

The study of void fraction radial distribution in heated state is significant in steam-water two-phase flow, upon which multidimensional calculating models can be developed. The radial profiles of void fraction are obtained through the measurement in a vertical upward heated tube using optical probe in this paper. This paper studies the foundational law and the influences of equilibrium quality, pressure, heat flux and mass velocity on local void fraction distribution, according to the experimental results.

Keywords two-phase flow, void fraction, optical probe

子通道内空泡份额的实验研究

杨瑞昌 钟勇 蒋文俊 杨定华 冯俊凯

清华大学热能工程系, 北京, 100084

Tel: 010-62781005 Email: rcyang@te.tsinghua.edu.cn

摘要: 本文以低压空气-水为介质, 对子通道内的空泡份额分布进行了实验研究, 使用自制的电导探针测量系统, 测定了子通道内的空泡份额分布。通过实验数据的整理, 得到了截面平均空泡份额, 并将实验结果与已有的计算截面平均空泡份额的方法进行了比较, 以检验已有的截面平均空泡份额的计算方法对计算子通道内的空泡份额的适用性。

关键词: 子通道, 空泡份额, 实验研究

1. 前言

管壳式汽(气)液两相流装置在动力、石油和煤化工等部门有广泛应用, 在这种装置中, 管束间子通道内的汽(气)液两相流动及传热现象十分复杂, 而确定管束间子通道内的空泡份额分布特点, 则是进行管束间汽(气)液两相流动及传热特性计算的基础, 因而研究子通道内的空泡份额分布具有十分重要的意义。迄今为止, 对于管内的汽(气)液两相流空泡份额已有大量研究, 并提出了许多计算方法^[1-3], 但对于管束间子通道内的空泡份额研究则相对较少。因而开展子通道内空泡份额的实验测定及其计算方法研究具有实际意义。本文以低压空气-水为介质, 对模拟管束子通道内的空泡份额分布进行了实验研究, 使用自制的电导探针空泡测量系统测定了不同结构的子通道内的空泡份额分布, 通过实验数据的整理, 得到了子通道内的截面平均空泡份额。然后将实验结果与文献已有的截面空泡份额的计算方法进行了比较, 以检验已有的截面平均空泡份额的计算方法对于计算管束间子通道内的截面平均空泡份额的适用性。

2. 实验系统及测量系统

实验系统见图 1, 由压气机来的空气及由水箱经水泵来的水分别分成二路, 经过相应的调节阀和流量计后进入混合段, 混合段由隔板分隔成二个横截面不同的混合室。混合段出口接实验段, 实验段由透明的有机玻璃构成, 其横截面结构见图 2。实验段内偏心布置有 $\Phi 14\text{mm}$ 的不锈钢棒, 使实验段形成二个几何结构不同的子通道。在距实验段入口的 80mm