

# 垂直下降管内汽水两相流截面含汽率\*

陈学俊 刘尧奇 陈听宽

(西安交通大学)

## 摘 要

在 3MPa 压力下对垂直下降管内绝热汽水两相流截面含汽率进行了理论及试验研究。结果表明,在低含汽率区,截面含汽率大于容积含汽率;在高含汽率区,截面含汽率小于容积含汽率。本文建立的模型能与试验数据较好吻合。

## 一、前 言

关于垂直下降两相流截面含气率,已有文献中有两种不同的研究结果。一种认为在下降流中,截面含气率总是大于容积含气率。Шварю (1958)<sup>[1]</sup>对汽水两相下降流截面含汽率的研究结果表明,在一定压力下,截面含汽率 $\varphi$ 为容积含汽率 $\beta$ 及循环速度的函数,且在一定的 $\beta$ 范围内, $\varphi$ 与 $\beta$ 呈线性关系,并且 $\varphi > \beta$ 。苏联 1961 年和 1973 年的锅炉水力计算标准方法<sup>[2,3]</sup>中,计算两相下降流截面含汽率的结果也是 $\varphi > \beta$ 。最近 Kendou-sh 和 AL-Khatab (1989)<sup>[4]</sup>发表的关于水空气两相下降流截面含气率的测量结果, $\varphi$ 也总是大于 $\beta$ 。

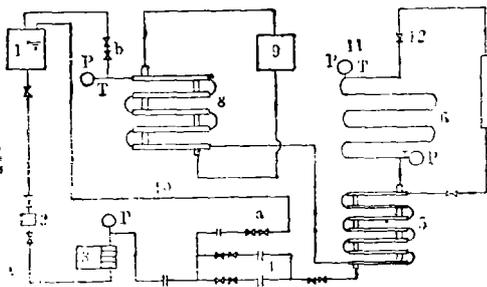
另一种研究结果则认为,下降流中截面含气率大于容积含气率的结论只在低容积含气率区成立,而在高容积含气率区域,截面含气率小于容积含气率。这一结果首先由陈立勋和陈学俊 (1963)<sup>[5]</sup>发现(以水空气两相为试验工质),后来被 Тихоненко (1973)<sup>[6]</sup>(以蒸汽—水两相为试验工质)、Yamazaki 和 Yamaguchi (1979)<sup>[7]</sup>(以水空气为试验工质)及 Shi 和 Li (1989)<sup>[8]</sup>(以氟利昂汽液两相为试验工质)等所再现。我国的电站锅炉水动力计算方法<sup>[9]</sup>采用了文献[6]提出的两相下降流截面含汽率计算公式,考虑了 $\varphi < \beta$ 的情况。

总的来说,关于两相下降流截面含气(汽)率的特性研究得还不够深入,测量和计算还不够准确,理论研究尚很欠缺,人们对它的认识还没有统一。因此,在这方面进行进一步的理论和试验研究很有意义和必要。

1990年5月7日收到。\*自然科学基金资助项目。

## 二、试验系统及测试方法

试验在西安交通大学电加热高压汽水两相流试验回路上进行。图1所示为该回路流程简图。经三级离子交换器处理的去离子水从储水箱1经过滤器2,由高压柱塞泵3送入试验系统,经流量调节阀a(试验流量通过调节旁路10的流量来调节)调节流量后,试验工质通过测流量孔板4进入再生式换热器5,在此处吸收从试验段7出来的汽水混合物的热量而得到初步加热,然后流入加热器,在此被加热到所要求的参数后即流到试验段7,从试验段流出的工质经换热器和冷却器8冷却后又流回储水箱。系统压力用出口节流阀b调节,其与流量调节阀a配合调节,可维持试验系统压力和流量不变。加热器采用低压大电流交流电通过管子本身直接加热,电功率由调压变压器连续调节。



1—储水箱; 2—过滤器; 3—高压柱塞泵; 4—测流量孔板; 5—再生式换热器; 6—加热器; 7—试验段; 8—冷却器; 9—冷却塔; 10—流量旁路; 11—压力、温度测点; 12—阀门

图1 电加热高压汽水两相流试验回路

试验中,流量用经过标定的孔板测量;压力用0.35级弹簧管式精密压力表测量;工质温度用 $\phi 0.5\text{mm}$ 的Cr-Si钎装热电偶测量;电加热功率通过传感器用计算机数据采集系统测量;工质干度根据热平衡计算确定。

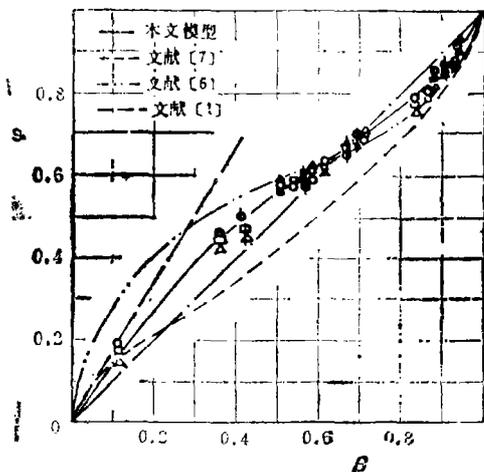
试验时,固定压力和流量,逐步增加加热段电功率,以渐提高试验段内工质的干度。每次增加功率,待工况稳定后记录所有参数的值。

试验段为 $\phi 25 \times 2\text{mm}$ 的垂直放置不锈钢管。在测量段前后留有足够长的流动稳定段。整个试验段绝热。

对截面含汽率的测量,本文采用了光导纤维探针法、电导探针法和快速关闭阀门法等三种方法。其中,光导探针的信号由微机处理,给出含汽率的值;电导探针的信号通过一系列电路处理直接输出含汽率值;对快速关闭阀门法,作者研制了一种“液位测量法”,通过测量试验段的重位压差来求取含汽率。有关详细情况参阅文献[10, 11]。

## 三、试验结果及讨论

本文在3MPa压力下用光导纤维探针、电导探针及快速关闭阀门法测量了绝热下降管内汽水两相流的截面含汽率,其试验结果如图2所示。由之可见,在下降流动中,存在一个临界容积含汽率 $\beta_{cr}$ ,在 $\beta < \beta_{cr}$ 的低含汽率区,截面含汽率大于容积含汽率,即 $\varphi > \beta$ ;但在 $\beta > \beta_{cr}$ 的高含汽率区,则有 $\varphi < \beta$ 。这一结果在定性上是与文献[5~8]相一致的。



$\phi \Delta$  中  $p = 3.09 \text{ MPa}, G = 656.71 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$

$\bigcirc \Delta \square$   $p = 2.98 \text{ MPa}, G = 552.96 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$

$\bigcirc$  光导探针法;  $\Delta$  电导探针法;  $\square$  快速关闭阀门法。

(公式计算取  $p = 3 \text{ MPa}, G = 630 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ )

图 2 垂直下降管内绝热汽水两相流截面含汽率测量结果及其与模型比较

我们知道，截面含汽率与容积含汽率之间存在如下理论关系式：

$$\varphi = \frac{1}{1 + S(1/\beta - 1)} \quad (1)$$

其中， $S = w''/w'$ ，称为两相滑移率； $w''$ 和 $w'$ 分别为气相和液相的流速。

由式(1)可知，当 $S > 1$ ，即 $w'' > w'$ 时，结果为 $\varphi < \beta$ ；当 $S < 1$ ，即 $w'' < w'$ 时，结果为 $\varphi > \beta$ 。这就是说，由实验结果表明：在下降流动中，在低含汽率区域，汽速是小于水速的；而在高含汽率区，汽速则大于水速。

将图2所示截面含汽率测量结果与相同工况下得到的绝热下降流型图(如图3所示)

相比较，我们会发现，临界容积含汽率 $\beta_c$ 刚好是出现在泡状流向弹状流转变的区域，这样， $\beta < \beta_c$ 的区域即为泡状流区，此时，浮力的影响是很大的。而在下降流动中，由于汽泡所受浮力的作用方向与流动方向相反，从而对汽泡的运动形成一种阻力，这就使得在下降泡状流中汽相速度小于液相速度，因此有 $\varphi > \beta$ 的结果。当 $\beta > \beta_c$ 后，流动进入弹状流和环状流区，这时由于含汽量很大，浮力的作用不再是主要影响因素，惯性力起了主导作用，使汽相速度又大于液相速度，从而 $\varphi < \beta$ 。

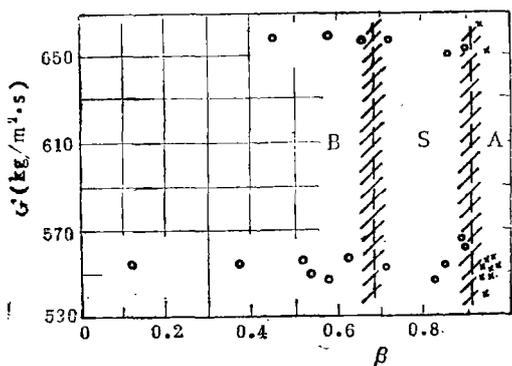


图 3 垂直下降管内绝热汽水两相流型图  
( $D = 21 \text{ mm}, p = 3 \text{ MPa}$ )

B—泡状流；S—弹状流；A—环状流。

速度又大于液相速度，从而 $\varphi < \beta$ 。在上升流动中，由于浮力与流动方向相同，总是对汽相运动起推动作用，所以汽相速度总是大于液相速度，使 $\varphi < \beta$ 。

以上分析表明，本文所得下降流截面含汽率试验结果是合理的。文献中关于下降流截面含汽率的两种不同结论应该以存在 $\varphi > \beta$ 和 $\varphi < \beta$ 两个区域为正确结论。

## 四、模型的建立

作者在文献 [12] 中, 在如下假定:

$$w''/w_e = (y/R)^{1/m} \quad (2)$$

$$w'/w_e = (y/R)^{1/l} \quad (3)$$

$$\varphi_y/\varphi_e = (y/R)^{1/n} \quad (4)$$

的条件下, 推导得绝热汽水两相流的截面含汽率计算公式为:

$$\varphi = \frac{2l^2 (m+n+mn) (m+n+2mn)}{m^2 (l+1) (2l+1) (n+1) (2n+1)} \beta \quad (5)$$

其中,  $R$  为管半径,  $y$  为径向上某点到壁面的距离,  $\varphi_y$  为局部含气率,  $w_e$  和  $\varphi_e$  分别为管中心处的流速和含气率,  $m$ 、 $l$ 、 $n$  为分布指数。

文献 [12] 指出, 上述模型原则上可用于各种直管内各种流型两相流截面含气率的计算, 但模型中各分布指数需按具体情况而定。

对于热力学平衡的汽水两相下降流动, 取分布指数为  $F_r$  数、压力  $P$  及容积含汽率  $\beta$  的函数, 即:

$$m, n, l = f(F_r, P, \beta) \quad (6)$$

考虑到汽水两相下降流动的约束条件: 当  $\beta \rightarrow 1$  时,  $m = l$ ; 当  $\beta \rightarrow 1$  或  $P \rightarrow P_{cr}$  时,  $\varphi/\beta \rightarrow 1$ ,  $n \rightarrow \infty$ ; 当  $\beta \rightarrow \beta_{cr}$  时,  $\varphi/\beta \rightarrow 1$ , 有  $m = l$  和  $n \rightarrow \infty$ ; 同时为尽量简化, 各分布指数被确定为如下形式:

$$m = l + C_1 (1 - \beta) C_2 (\beta - \beta_{cr}) l \quad (7)$$

$$l = C_3 F_r C_4 \quad (8)$$

$$n = \frac{C_5}{(1 - \beta^6)} \frac{C_6}{(\beta - \beta_{cr})^2} \left( \frac{p}{p_{cr} - p} \right) C_6 \quad (9)$$

其中,  $C_1 \sim C_6$  为试验系数。

根据试验数据, 临界容积含流率  $\beta_{cr}$  可用下式计算:

$$\frac{\beta_{cr}}{1 - \beta_{cr}} = 2.62 \left( \frac{G^2}{\rho_1^2 g D} \right)^{-3/8} \quad (10)$$

$$F_r \text{ 数为: } F_r = \frac{G^2}{\rho_1^2 g D} [1 + X (\rho_1/\rho_g - 1)] \quad (11)$$

其中,  $G$  为质量流速,  $D$  为管内径,  $g$  为重力加速度,  $\rho_l$  和  $\rho_g$  分别为液相和汽相的密度,  $x$  为蒸汽干度。

当  $\beta > 0.3$  时, 由试验数据可确定式 (7) ~ (9) 中各系数为:

$$\begin{aligned} C_1 &= 2.1; & C_2 &= -0.01; & C_3 &= 4.2; \\ C_4 &= 0.5; & C_5 &= 2; & C_6 &= 1 \end{aligned} \quad (12)$$

当  $\beta \leq 0.3$  时, 可直接用下式近似计算截面含汽率:

$$\varphi = 1.4\beta \quad (13)$$

## 五、模型与试验数据及其他公式比较

本文模型与试验数据及文献[1, 6, 7]的公式比较的结果示于图2。由之可见, 本文模型与试验数据基本吻合, 但在低含汽率区, 它们偏低于文献[1, 6]的结果, 而在高含汽率区与文献[6]的结果相近。

本文试验所得临界容积含汽率与文献[6]的值相近, 均在0.65左右, 而文献[1]的结果则是 $\phi$ 总大于 $\beta$ 。文献[5]是以水空气为工质的, 其临界容积含气率 $\beta_{cr} = 0.8$ 左右, 稍高于以汽水两相为工质的结果, 这是合理的。但文献[7]同样以水空气系统为研究对象, 所得 $\beta_{cr}$ 则在0.2左右, 显然这一结果太偏小。

由上述可见, 关于垂直下降两相流动的截面含气(汽)率特性, 尚需要在宽广的参数范围内进行深入的研究, 以求彻底搞清它的规律。

## 六、结 论

1. 本文成功地用光导纤维探针法, 电导探针法及快速关闭阀门法, 在3MPa压力下测量了垂直下降管内绝热汽水两相流的截面含汽率。结果表明, 在低含汽率区, 截面含汽率大于容积含汽率; 在高含汽率区, 截面含汽率小于容积含汽率。其转变的区域大致上在流型从泡状流向弹状流转变的区域。

2. 本文建立的模型能与试验数据较好吻合。

## 参 考 文 献

- [1] Стырикович, М. А. 等, Коэффициент агрегации, Госэнергоиздат, (1958)。
- [2] 董祖康, 姜霖林译, 苏联61年水力计算标准方法(草案)。
- [3] (苏) Докшин, Б.А.等著, 董祖康等译, 锅炉机组水力计算标准方法, 电力工业出版社, (1981)。
- [4] Kendoush, A. A. and AL-Khatib, S. A. W., Flow Regimes Characterization in Vertical Downward Two-Phase Flow, paper presented in the 2nd Int. Symposium on Multiphase Flow and Heat Transfer, Xian, China, Sept.18-21, (1989)
- [5] 陈立勋, 直流锅炉沸腾管中上升和下降的流动特性研究, 西安交通大学研究生毕业论文(1963)。
- [6] Tikhonenko, L.K. (Тухоненко, Л.К.), Influence of Wall Roughness and Flow Direction on the Characteristics of Two-Phase Adiabatic Flow, in 'Achievements in Research of Heat Transfer and Hydraulics of Two-Phase Flow in power Generating Equipments (in Russian), PP109-119, Science, Moscow, (1973)。
- [7] Yamazaki, Y. and Yamaguchi, K., Characteristics of Cocurrent Two-Phase Downflow in Tubes-Flow Pattern, Void Fraction and pressure Drop", J. Nucl. Sci. Tech., Vol. 16, No.4, (1979)。
- [8] Shi Deqiang and Li Huimin, Measurement of Void Fraction with Capacitance Method in Vertical Downward Vapor-Liquid Flow, paper presented in the 2nd Int. Symposium on Multiphase Flow and Heat Transfer, Xian, China, Sept.18-21 (1989)。

- [ 9 ] 上海发电设备成套设计研究所等, 电站锅炉水动力计算方法JB/Z201—83, (1983)。
- [10] 刘尧奇等, 中压汽水两相流截面含汽率测量方法研究, 第三届高校工程热物理学术会议论文集, 西安交通大学出版社, (1990)。
- [11] 刘尧奇, 垂直下降管内高压汽水两相流动及沸腾传热特性, 西安交通大学博士学位论文论文集, 西安交通大学出版社, (1989)。
- [12] 刘尧奇, 陈昕宽, 陈学俊, 计算气液两相流含气率的一个二维二速度模型, 核科学与工程, Vol.10, No.1, (1990)。

## STEAM-WATER TWO-PHASE FLOW VOID FRACTION IN A VERTICALLY DOWNWARD TUBE

CHEN XUEJUN      LIU YAOQI      CHEN TINGKUAN

(Xi'an Jiaotong University)

(Manuscript received 7 May, 1990)

### ABSTRACT

This paper presents the results of theoretical and experimental studies on steam-water two-phase flow void fraction in a vertically downward tube at a pressure of 3 MPa. The optical fiber probe, conductance probe and quick closed valves are applied in the experiments. The results show that the void fraction is larger than the volumetric fraction in low volumetric fraction region, however, in high volumetric fraction region the void fraction is less than the volumetric fraction. The model established in this paper is coincident well with the experimental data.

# 核科学与工程

第11卷 第1期 1991年3月

## 作者简介

### 钍—铀栅零功率堆临界实验



**姚志铨** (前右一) 1960年毕业于清华大学反应堆工程专业, 研究员。

**张家群** (前右二) 1952年美国华盛顿大学, 核物理, 博士, 研究员。

**陈志成** (前左一) 1960年毕业于清华大学反应堆工程专业, 高级工程师。

**姚则悟** (前左二) 1959年毕业于复旦大学数学系计算数学专业, 副研究员。

**季华祥** (后右一) 1956年毕业于南京电力学校, 高级工程师。

**包伯荣** (后右二) 1958年毕业于北京大学化学系, 研究员。

### 核动力装置总体热工参数最佳化



**王兆祥** 1954年毕业于海军工程学院蒸汽动力工程系, 副教授。



**李智广** 1987年毕业于哈尔滨船舶工程学院船舶动力系核动力装置专业, 并取得硕士学位, 助教。

### 垂直下降管内汽水两相流截面含汽率

**陈学俊** 1939年毕业于中央大学, 1966年美国普渡大学研究院毕业, 获硕士学位, 中国科学院学部委员, 教授 (照片见第10卷第1期)。

**刘尧奇** 1983年毕业于西安交通大学热能工程专业, 1989年获工学博士学位, 讲师 (照片见第10卷第1期)。

**陈听宽** 1956年毕业于上海交通大学锅炉专业, 1960年西安交通大学研究生毕业, 教授, 国家级有突出贡献中青年专家 (照片见10卷第1期)。