

# 螺旋管内气-水 两相流流型转换的研究

张鸣远 陈学俊

(西安交通大学)

## 摘 要

本文叙述螺旋管内气-水两相流流型及其转换,并给出了流型图;系统地研究了螺旋直径及螺旋上升角对流型转换的影响;通过因次分析及实验数据整理提出了三个准则关系式,以确定在不同流动条件下螺旋管内的流型转换。

## 一、引 言

在核电站中,蒸汽发生器是十分重要的主设备,而螺旋管式蒸汽发生器是经常采用的一种型式。到目前为止,对螺旋管内单相流体的流动和传热规律已作了大量的研究工作,但对气液两相在螺旋管内的流动规律,特别是气液两相流型及其相互转换的规律,国内外进行的研究工作却很少<sup>[1]</sup>。

作者对螺旋管内气液两相流的流型及其转换进行了实验研究,根据实验结果绘制了流型图;系统地研究了螺旋管结构参数,螺旋直径  $D$  和螺旋上升角  $\alpha$  对流型转换的影响;在实验基础上,通过因次分析及数据处理对三条主要流型转换边界曲线提出了准则关系式。

## 二、实验设备

实验装置如图1所示。

实验管圈使用内径22mm、壁厚4mm的有机玻璃管弯制而成,其结构参数见表1。

1982年11月2日收到。

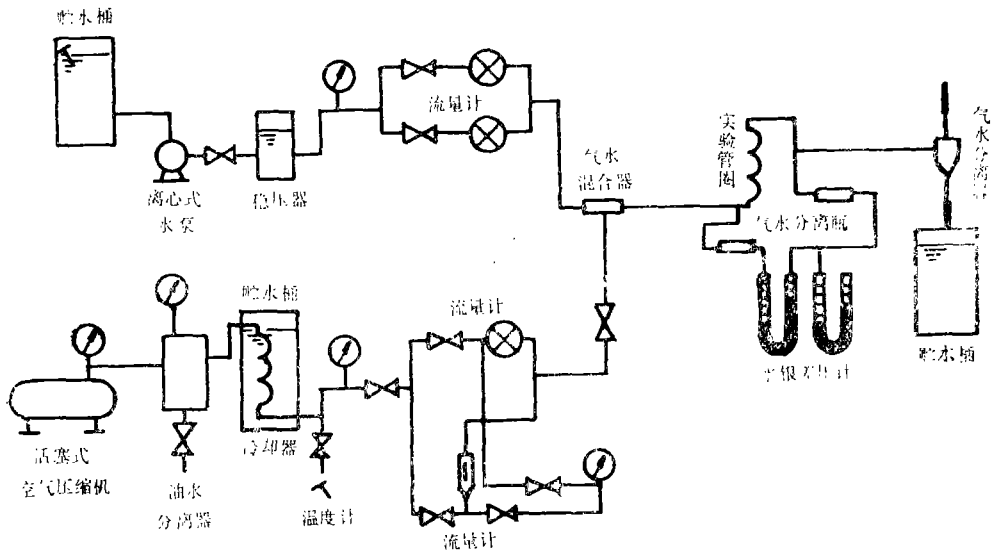


图 1 实验装置示意图

各种流型及其转换可直接观察确定。

实验气、水速度范围：水引用速度  $u_{L0}$  为  $0.04\text{--}2.7\text{m/s}$ ，空气引用速度  $u_{g0}$  为  $0.2\text{--}18\text{m/s}$ 。

### 三、螺旋管流型转换的理论分析

本文把螺旋管气、液两相流流型区分为五种：波状流、柱塞状流、弹状流、环状流和分散泡状流。实验中观察到的流型类似于在水平管中观察到的流型。

气液两相流各种流型的出现及其转换是由作用在气液两相上的各种力的相互作用及平衡引起的<sup>[3,4]</sup>。在管内气液两相流动情况下，当取管子内径  $d$  作为特性尺寸，则作用

在流体上的力可分别表示为：惯性力—— $\frac{1}{2}\rho u^2$ ；粘性力—— $\mu u/d$ ；重力—— $\rho g d$ ；表面张力—— $\sigma/d$ 。

由量纲分析可得以下无量纲数组：雷诺数  $Re = \rho du/\mu$ ；韦伯数  $We = \rho u^2 d/\sigma$ ；弗鲁特数  $Fr = u^2/(gd)$  等。再加上容积流量比  $u_{L0}/u_{g0}$ ，密度比  $\rho_L/\rho_g$ ，粘性系数比  $\mu_L/\mu_g$ ，螺旋管结构参数  $D/d$ 、 $\alpha$  等，即可比较全面地来描述各种流型之间的相互转换了。在研究特定的转换时，并不需要考虑上述所有的准则数。

如果把柱塞状流和弹状流看作统一的间歇状流，那么需要考虑的流型转换边界曲线

表 1 螺旋管圈结构参数表

| 编号 | 螺旋直径 $D$<br>(m) | 螺旋上升角 $\alpha$<br>(°) | 圈数 |
|----|-----------------|-----------------------|----|
| 1  | 0.623           | 1.2                   | 2  |
| 2  | 0.623           | 3                     | 2  |
| 3  | 0.623           | 12                    | 2  |
| 4  | 0.910           | 5                     | 2  |
| 5  | 0.213           | 5                     | 5  |
| 6  | 0.129           | 5                     | 6  |

有三条:

1. 波状流向间歇状流或环状流的转换 由实验观察,螺旋管中发生这一转换时,流动工况与水平管中的情况极其相似,其流型图中转换边界曲线的形状和变化趋势也与倾斜直管的大致相同。因此可以认为发生这一转换的机理,螺旋管与水平管、微倾斜管是相同的<sup>[6]</sup>。为考虑气相惯性力与液相重力的作用,引入准则数  $F_g = \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_L - \rho_g}} \times \sqrt{\frac{u_{g0}}{dg}}$

来描述,螺旋上升角  $\alpha$  的影响作为一个独立因素考虑。伯努力效应力的大小还与管道中的液位高低有关,而螺旋管中波状流的液位高低与  $u_{g0}/u_{L0}$ 、 $D/d$  及  $\alpha$  等因素有关。因此,这一转换边界曲线的准则关系式可表示为:

$$f_1(F_g, u_{g0}/u_{L0}, D/d, \alpha) = 0 \quad (1)$$

2. 间歇状流向环状流的转换 螺旋管中在不同水流量下,间歇状流向环状流转换的空气引用速度大致保持为一常数。这说明,在螺旋管中向环状流的转换与水平管一样主要是由于气流惯性力克服液相重力作用引起的<sup>[6,7,8]</sup>,同时还受到表面张力的影响<sup>[2]</sup>。

为考虑气相惯性力、液相重力及表面张力的相互作用,引入  $F_g = \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_L - \rho_g}} \frac{u_{g0}}{\sqrt{dg}}$ ,

$$Ku = \frac{u_{g0} \rho_g^2}{[g(\rho_L - \rho_g)\sigma]^4} \quad \text{两个准则数。实验观察还表明,转换还受 } D \text{ 和 } u_{L0} \text{ 变化的影响,}$$

而螺旋上升角  $\alpha$  则几乎没有什么影响。因此需再引入  $D/d$ ,  $u_{g0}/u_{L0}$ 。这样该转换的边界曲线准则方程式可写作:

$$f_2(Ku, F_g, D/d, u_{g0}/u_{L0}) = 0 \quad (2)$$

3. 间歇状流向分散泡状流的转换 螺旋管中该转换的情形要比水平管复杂。此时流体不仅受到重力作用,同时还受到离心力的作用,这将促使气液两相分离;另一方面,水的流速比较高时,在螺旋管中导致比较剧烈的二次流,这和紊流脉动一样,又将促使气液两相混合。当气液两相混合趋势足以克服两相分离趋势时,就会向分散泡状流转换,螺旋管中二次流的强弱直接影响到摩擦压降的大小,因此本文仍采用准则数  $\left[\frac{(dp/dx)_{L0}}{(\rho_L - \rho_g)g}\right]^*$  来描述这一转换<sup>[6]</sup>,但  $|(dp/dx)_{L0}|$  应当根据螺旋管的有关公式来计

算。该转换,还应考虑表面张力及管径的影响,用准则数  $\left[\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_g)d^2}\right]$  来表示。实验结果表明,  $u_{g0}$ 、 $D$  也有影响。综合以上分析,向分散泡状流的转换边界曲线可表示为:

$$f_3\left(\left[\frac{(dp/dx)_{L0}}{(\rho_L - \rho_g)g}\right]^*, \left[\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_g)d^2}\right], u_{g0}/u_{L0}, D/d\right) = 0 \quad (3)$$

#### 四、实验及观察结果

六根螺旋管的实验观察结果已绘成流型图,示于图2。

\* 水平管中,文献[6]建议用准则数  $T = \left[\frac{(dp/dx)_{L0}}{(\rho_L - \rho_g)g}\right]^*$  整理数据。

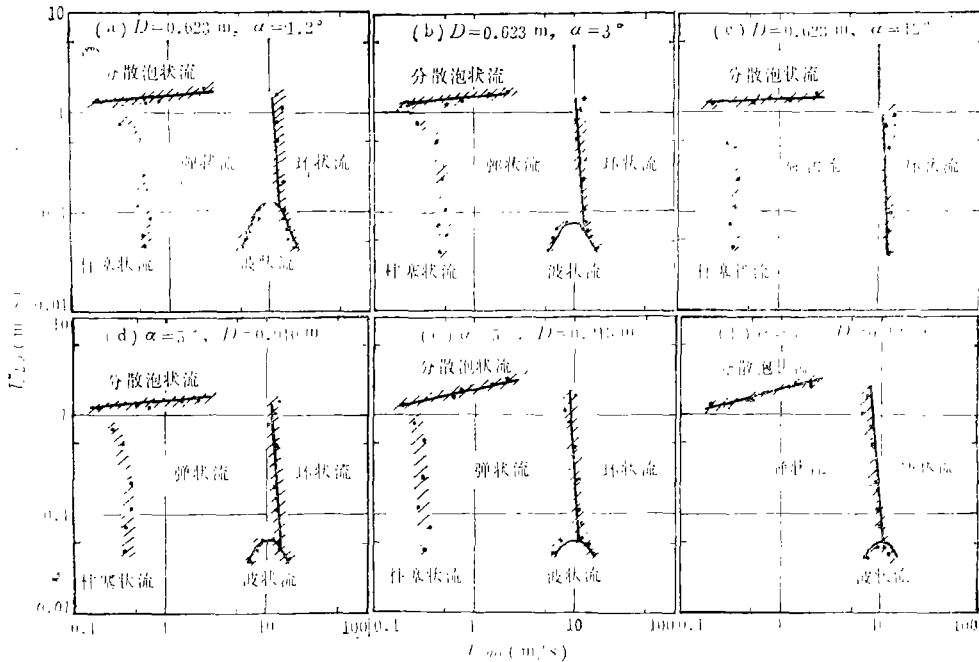


图 2 螺旋管流型图(校后注:图中“柱塞状流”左上移至与“弹状流”等高)

·—实验转换点; ///—实验转换区; ——由准则关系式作出的曲线

流型图中各转换边界区域的形状大致相似。以图2(a)为例可以看出:

弹状流向柱塞状流以及弹状流向环状流转换的边界在图中均大致为一垂直带状区域,即转换主要取决于空气引用速度,而水引用速度影响不大。当 $u_{g0} = 0.3—0.5 \text{ m/s}$ 时发生向柱塞状流的转换, $u_{g0} = 11—13 \text{ m/s}$ 时向环状流转换。弹状流向分散泡状流的转换边界为一微倾斜的带状区域, $u_{g0}$ 增加时,发生转换的 $u_{L0}$ 也略有增加,发生转换时的 $u_{L0} > 1.3 \text{ m/s}$ (实验中 $u_{g0} < 2.5 \text{ m/s}$ )。波状流向弹状流或环状流的转换发生在一个钟形的带状区域内,波状流区域的范围相对于水平管大为缩小。

螺旋管流型图非常类似于 Barnea 等人所作的倾斜直管(向上流动)流型图<sup>[9]</sup>,只是转换边界的位置及流型区域的大小互有差异而已。

螺旋上升角 $\alpha$ 对流型转换的影响:由图2(a)—(c)可以看出, $\alpha$ 角对向环状流和向分散泡状流的转换边界几乎没有什么影响。但波状流向弹状流或环状流转换的钟形边界曲线对 $\alpha$ 角比较敏感。当 $\alpha$ 角增加时,整个钟形曲线向着水流量较小的方向缩小, $\alpha = 12^\circ$ 时,在实验气、水流量范围内已经不能看到波状流。与 Barnea 等人的实验结果比较,如果把他们所谓的波环状流看作弹状流,那么两者这一相应转换边界曲线的变化趋势是一致的,只是螺旋管中,该转换边界曲线随 $\alpha$ 角增加而缩小的速率不及倾斜管的快。随 $\alpha$ 角增大,柱塞状流与弹状流之间的转换边界向气流量较小的方向移动。

螺旋直径 $D$ 对流型转换的影响: $D$ 对流型转换的影响可通过图2(d)—(f)说明。随着 $D$ 的减少,弹状流与环状流,柱塞状流与弹状流之间的转换边界曲线向空气流量小的方向移动(前者移动幅度较小),在 $D = 0.129 \text{ m}$ 时,在实验气、水流量范围内,柱塞状流不再出现;波状流与环状流或弹状流之间的钟形转换边界曲线向水流量较小的方向

略有缩小。随着 $D$ 的减小，在同样气流量下向分散泡状流转换的水流量增加，转换边界曲线在流型图上的斜率也有增加的趋势。

### 五、螺旋管中两相流流型转换的准则关系式

根据前述的(1)、(2)、(3)式，对实验数据进行分析 and 归纳，得出以下具体函数关系式：

1. 波状流向间歇状流或环状流转换边界曲线：

$$3.18 \left(\frac{d}{D}\right)^{0.05} \cdot \sin^{0.4} \alpha \cdot (1.66 F_g^2)^{0.526 \ln(1.66 F_g^2) + 0.15} = \left(\frac{u_{go}}{u_{Lo}}\right)^{0.9} \quad (4)$$

2. 间歇状流向环状流转换边界曲线：

$$K u^{0.2} F_g^{0.36} \left(\frac{d}{D}\right)^{0.07} = 0.816 \left(\frac{u_{go}}{u_{Lo}}\right)^{0.03} \quad (5)$$

3. 间歇状流向分散泡状流转换边界曲线：

$$\left[ \frac{|(dp/dx)_{Lo}|}{(\rho_L - \rho_g)g} \right]^{0.5} \left[ \frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_g)d^2} \right]^{-0.25} = 2.3 \left(\frac{d}{D}\right)^{0.2} \left(\frac{u_{go}}{u_{Lo}}\right)^{0.87} \left(\frac{d}{D}\right)^{0.6} \quad (6)$$

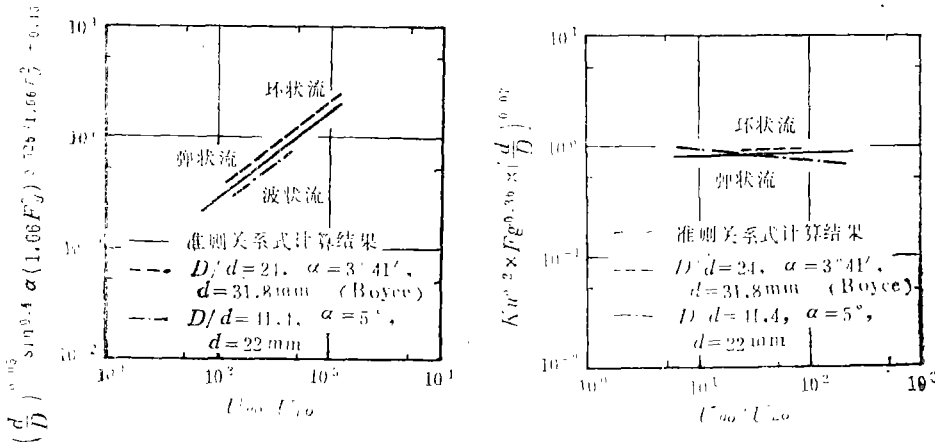
计算中各有关常数取值如下： $\rho_L = 1000 \text{ kg/m}^3$ ， $\rho_g = 1.3 \text{ kg/m}^3$ ， $\sigma = 0.07 \text{ N/m}$ ，

$\mu_L = 1 \times 10^{-3} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ ， $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。  $|dp/dx)_{Lo}| = \frac{4}{d} c_{LC} \frac{1}{2} \rho_L u_{Lo}^2$ ， $c_{LC}$ 按照Ito公式<sup>[10]</sup>

计算  $\left(\sqrt{\frac{D}{d}} c_{LC} = 0.079 / \left[ Re \left(\frac{d}{D}\right)^2 \right]^{\frac{1}{5}}\right)$ 。式(4) — (6)的计算结果用实线

表示在图2(a) — (f)中。由图可以看出，准则关系式和实验观察结果相当吻合。

Boyer<sup>[5]</sup>等人的实验资料与式(4)、(5)的比较示于图3中，两者也符合得相当



(a) 波状流向弹状流或环状流的转换

(b) 弹状流向环状流的转换

图3 准则关系式与Boyer实验资料的比较

好。

## 六、结 论

1. 在本实验参数范围内,螺旋管中气、液两相流流型类似于水平管中观察到的流型。

2. 通过理论分析及实验数据整理得出波状流向间歇状流或环状流、间歇状流向环状流和间歇状流向分散泡状流转换的三条边界曲线的准则关系式(4)、(5)、(6)。根据此三式计算作出的边界曲线与实验结果一致。

3. 准则关系式(4)、(5)与 Boyce 相应流型转换边界的实验资料符合较好。

4. 随着螺旋上升角 $\alpha$ 的增加,波状流向环状流或弹状流转换的边界曲线向水流量较小的方向缩小,柱塞状流向弹状流转换的边界曲线向气流量较小的方向移动,当 $\alpha = 12^\circ$ 时,在实验气、水流量范围内已经观察不到波状流。 $\alpha$ 角对向环状流或向分散泡状流转换的边界曲线几乎没有什么影响。

5. 随着螺旋直径 $D$ 的减小,弹状流与环状流、柱塞状流与弹状流之间的转换边界曲线向空气流量较小的方向移动,前者移动幅度较小;波状流向环状流或弹状流转换的边界曲线向水流量较小的方向略有缩小。随着 $D$ 的减小,在同样的气流量下向分散泡状流转换的水流量增加,转换边界曲线在流型图上的斜率也有增加的趋势。

## 〔附录〕

### 符号:

$c_{f,c}$ : 液体在螺旋管内流动时的摩擦阻力系数;

$g$ : 重力加速度( $m/s^2$ );

$u$ : 流体速度( $m/s$ );

$u_{go}$ : 气体(空气)引用速度( $m/s$ );

$n_{Lo}$ : 液体(水)引用速度( $m/s$ );

$\mu$ : 粘性系数( $kg/m \cdot s$ );

$\rho$ : 密度( $kg/m^3$ );

$\sigma$ : 表面张力( $N/m$ );

$|(dp/dx)_{Lo}|$ : 液体(水)单独在管内流动时的摩擦压力梯度( $N/m^3$ )。

### 下标:

$L$ : 液体(水);

$g$ : 气体(空气)

## 参 考 文 献

〔1〕 陈学俊,屠传经,西安交通大学科学技术报告,80—317(1980)。

〔2〕 J.Weisman et al., *Int. J. Multiphase Flow*, 5,437 (1979)。

〔3〕 赤川浩爾,气液二相流,ユロナ社,14(1974)。

〔4〕 Yin-Yun Shu & Robert W. Graham, *Transport Processes in Boiling and Two-Phase Systems*, Hemisphere Pub. Co., 169(1976)。

〔5〕 B.E.Boyce et al., *Cocurrent Gas-Liquid Flow*, Proc. of Int. Sump. on Res. in Cocurrent Gas-Liquid Flow held at the Univ. of Waterloo, Sep., 1968, Plenum

Press, New York, 203(1969).

[6] Y. Taitel & A. E. Dukler, *A. I. Ch. E. J.*, 22, 17(1976).

[7] Y. Taitel et al., *A. I. Ch. E. J.*, 26, 345(1980).

[8] D. Butterworth and G. F. Hewitt, *Two-Phase Flow and Heat Transfer*, Oxford University Press, 235(1978).

[9] D. Barnea et al., *Int. J. Multiphase Flow*, 6, 217(1980).

[10] H. Ito, *Trans. ASME.*, D81, 123(1959).

## AN INVESTIGATION ON FLOW PATTERN TRANSITIONS FOR AIR-WATER TWO-PHASE FLOW IN HELICAL COILS

ZHANG MINGYUAN    CHEN XUEJUN

(Xian Jiaotong University)

(Manuscript received 12 November, 1982)

### ABSTRACT

This paper describes the air-water two-phase flow patterns and their transitions in helical coils, the flow pattern maps are also plotted. A systematical investigation of effects of the coil diameter  $D$  and the helix angle  $\alpha$  on the flow pattern transitions has been made. Using the dimensional analysis method and based on the induction of the experimental data, the authors have proposed three criterion correlations for predicting the flow pattern transitions in helical coils under different flow conditions.

---

(上接 297 页, Continued from Page 297)

then the tests of high power operation went successfully. This paper summarizes some results of the important tests such as power calibration, flow reverse, transient nuclear measurements, full-load operation and loss of offsite power. This paper also describes the methods of controlling safety margins.



徐江清 1957年毕业于北京大学物理系，高级工程师。



王永茂 1961年毕业于南京工学院无线电技术专业，工程师。

### 螺旋管内气-水两相流流型转换的研究



张鸣远 1969年毕业于西安交通大学锅炉专业，  
1982年西安交通大学热能工程专业研究生毕业，工学硕士，  
讲师。



陈学俊 1939年毕业于中央大学机械系，教授。

### 核电站主泵静压轴密封的试验研究



陈鉴墅 1957年毕业于北京航空学院航空发动机系，讲师。