

倾斜圆管内空泡份额径向分布及形成机制

刘国强, 孙立成, 阎昌琪, 田道贵

(哈尔滨工程大学 核科学与技术学院

核安全与仿真技术国防重点学科实验室, 哈尔滨 150001)

摘 要: 采用光纤探针测量方法, 对倾斜圆管中气液两相流动的空泡径向分布特性进行了实验研究, 并对其形成原因进行了分析. 实验选用有机玻璃圆管内径为 50 mm, 竖直倾斜角度为 5° , 15° 和 30° , 液相折算速度为 $0.071\sim 0.284$ m/s, 气相折算速度的范围为 $0\sim 0.05$ m/s. 结果表明: 随着倾斜角度的增加, 空泡份额径向分布逐渐由“核峰”、“壁峰”分布向单一“壁峰”分布转变; 通过分析气泡受到的横向升力、浮力径向分量和壁面力, 发现升力、浮力、壁面力的共同作用, 使气泡在圆管径向位置 15 mm 与 22 mm 之间处聚集, 从而造成空泡份额沿径向呈“壁峰”型分布.

关 键 词: 两相流; 光纤探针; 空泡份额; 升力; 壁面力

中图分类号: V232.8; TL334

文献标志码: A

Radial distribution and formation mechanism of the void fraction in an inclined circular tube

LIU Guo-qiang, SUN Li-cheng, YAN Chang-qi, TIAN Dao-gui

(National Defense Key Subject Laboratory of Nuclear Safety and Simulation Technology,
College of Nuclear Science and Technology,
Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Void fraction radial distribution of gas-liquid two phase flow in an inclined circular tube was investigated experimentally by using an optical fiber probe, and the reason for its formation was also illustrated. Experiments were conducted in an inclined circular tube made of perspex with inner diameter of 50 mm, and inclination angles of 5° , 15° and 30° . The specific liquid velocity was $0.071\sim 0.284$ m/s and the specific gas velocity covered the range of $0\sim 0.5$ m/s. The results show that, with increase of the inclined angle, the radial distribution of void fraction gradually shifts from the ‘core peak’ and ‘wall peak’ to the single ‘wall peak’ distribution. The analysis of the buoyancy component in radius and lateral lift forces as well as wall force acting on bubbles shows that the combined effects of these forces lead to the bubbles gathering around the radial position between 15 mm and 22 mm, resulting in the ‘wall peak’ distribution of the void fraction.

Key words: two-phase flow; fiber probe; void fraction; lift force; wall force

两相流动现象在核动力装置、航天飞行器等热能动力系统中经常遇到, 例如核动力系统中的核反应堆、蒸发器以及火箭动力系统等一些主要设备中都存在着两相流动问题^[1-3]. 空泡份额作为

两相流动中重要参数, 对于计算管内两相流动中的传热传质、阻力特性、流型判定等都极为关键. 受海洋条件的影响, 在海面上航行的船舶将会出现倾斜、摇摆和起伏状态. 航空航天飞行器在空中

收稿日期: 2013-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(51076034, 51376052); 中央高校基本科研专项资助(HEUCFZ1122); 黑龙江省博士后启动基金

作者简介: 刘国强(1987-), 男, 内蒙古赤峰人, 硕士生, 主要从事气液两相流动方面的研究.

飞行时,由于气流的影响,也会出现起伏、颠簸等情况.因此有必要对倾斜条件下的圆管内空泡份额径向分布特性进行研究.

目前国内外学者对空泡份额的测量方法以及计算模型的研究已经开展了多年,得到了很多计算空泡份额的数学模型^[4-5],但研究多集中于竖直圆管条件,对于倾斜状态下空泡份额径向分布特性的研究,公开发表论文中还不.幸莫川等^[6]虽然对倾斜圆管内空泡份额分布特性进行了研究,但只是得到了其径向的分布规律,并没有对分布形成的机理进行探讨.

本文采用光纤探针测量方法对两相流动中空泡份额进行测量,并通过对气泡运动受到的横向升力、浮力、壁面力等进行分析,探讨倾斜条件下空泡份额径向呈“壁峰型”分布的形成原因.

1 实验装置

1.1 光纤探针测量原理

实验采用自行研制的双探头光纤探针测量系统,对气液两相流动中空泡份额、界面面积体积分数、气泡速度等界面参数进行测量.光学探针是利用探针头部处于气液两相不同介质时,反射到探头端面光强度的不同,来区分探针头部处于气相还是液相,其简图及具体测量原理参看文献^[7].

实验采用单模光纤探针,即入射光与反射光通过同一根光纤进行传输.与双模探针相比,单模探针头部较小,反应更加灵敏,对流场扰动小,能够测量直径更小的气泡,因此单模光纤探针测量精度更高.

1.2 实验回路

实验段采用内径为 50 mm 的透明有机玻璃圆管,实验工质为空气和纯净水.实验回路如图 1 所示,图中虚线表示实验段处于倾斜状态时的位置.实验回路中水通过离心泵的驱动进入混合腔,储气罐贮存的空气进入混合腔与水混合,形成较理想的泡状流.气水混合物竖直向上通过实验段后,空气直接排入大气,水则经由回水管路返回水箱,循环使用.通过不断向水箱中添加纯净水来控制水温,使其趋于恒温.混合腔内隔板上安装了 140 个孔径为 0.5 mm 不锈钢毛细管,以确保产生尺寸均匀的细小气泡,同时确保水和空气在混和腔内充分混合.图中坐标系原点 O 位于圆管内测量界面中心点, XY 为测量截面,光纤探针在 XY 平面内沿 Y 轴移动,且光纤探针固定在 $L/D=22$ (L 和 D 分别为探针位置到实验段入口的距离和有机玻璃圆管内径)的位置,保证测试位置气液两相流体不受入口段的影响.空气和水的流量均通过质量流量计测量(空气质量流量计:阿尔伯格

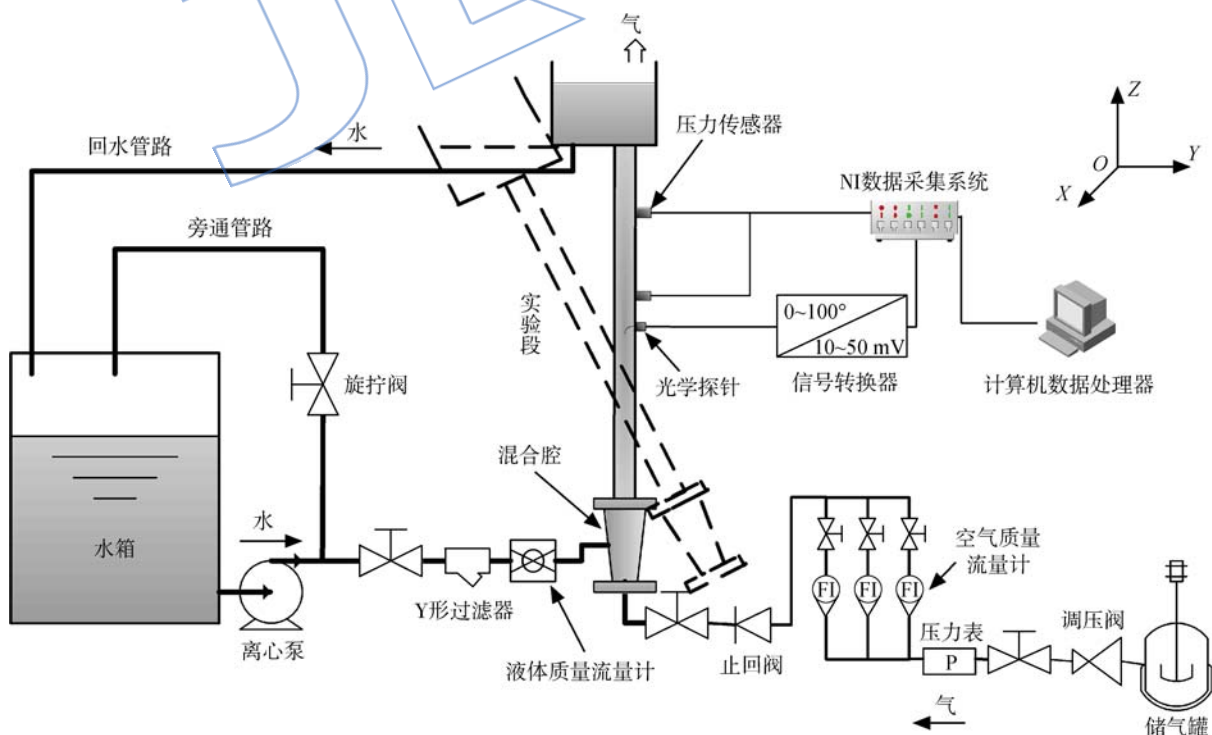


图1 实验回路简图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental loop

(生产商), FM17(型号), 1 级精度; 液体质量流量计: E+H(生产商), Promass 83(型号), 0.2 级精度), 实验的液相折算速度为 0.071~0.284 m/s, 气相折算速度的变化范围为 0~0.05 m/s.

实验段(内径为 50 mm 有机玻璃圆管)安装在实验固定架上, 见图 2. 实验倾斜角度 β 为 5° , 15° 和 30° , 通过固定架与底座上不同的安装位置进行调节. 实验的过程中需要采用水平仪对倾斜实验平台进行找平, 以使实验段只在 ZY 平面内倾斜.

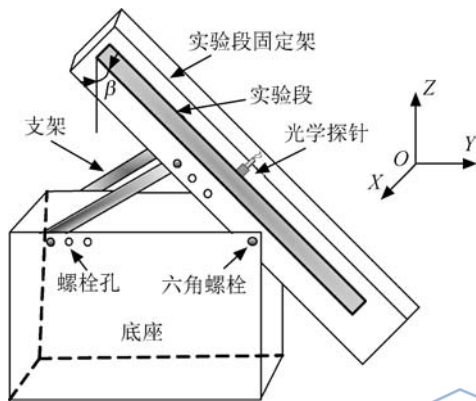


图 2 倾斜实验平台
Fig. 2 Inclining experiment platform

2 实验结果分析

2.1 空泡份额径向分布特性

在实验段, 如图 1 所示, 在 XY 平面内, 光纤探针沿圆管右侧壁面至左侧壁面(自 Y 轴正向至其负向)共分布 21 个测点, 各测点距离圆管中心距离(即径向距离) r 分别为 24, 23, 22, 21, 19, 17, 14, 11, 8, 4, 0, -4, -8, -11, -14, -17, -19, -21, -22, -23, -24 mm. 实验时测量截面与圆管中心线始终垂直; 当进行竖直、倾斜实验时, 倾斜角度 $\beta=0^\circ, 5^\circ, 15^\circ, 30^\circ$. 借助光纤探针分别对各个径向位置的空泡份额、界面面积、气泡速度等界面参数进行测量^[7].

液相折算速度 j_l 为 0.071 m/s, 竖直、倾斜条件下空泡份额 (α) 径向分布如图 3 所示, 可以发现, 在竖直状态下, 空泡份额在低气体折算速度 j_g , 沿着圆管中心轴线到近壁面变化较小, 当 $r \geq \pm 15$ mm, 空泡随着 r 的增加逐渐增加达到最大值后逐渐降低, 呈“马鞍”型分布, 即“壁峰”型分布; 而在高气体折算速度时, 空泡份额沿着圆管中心到壁面逐渐减小, 在圆管中心空泡值最大, 即呈

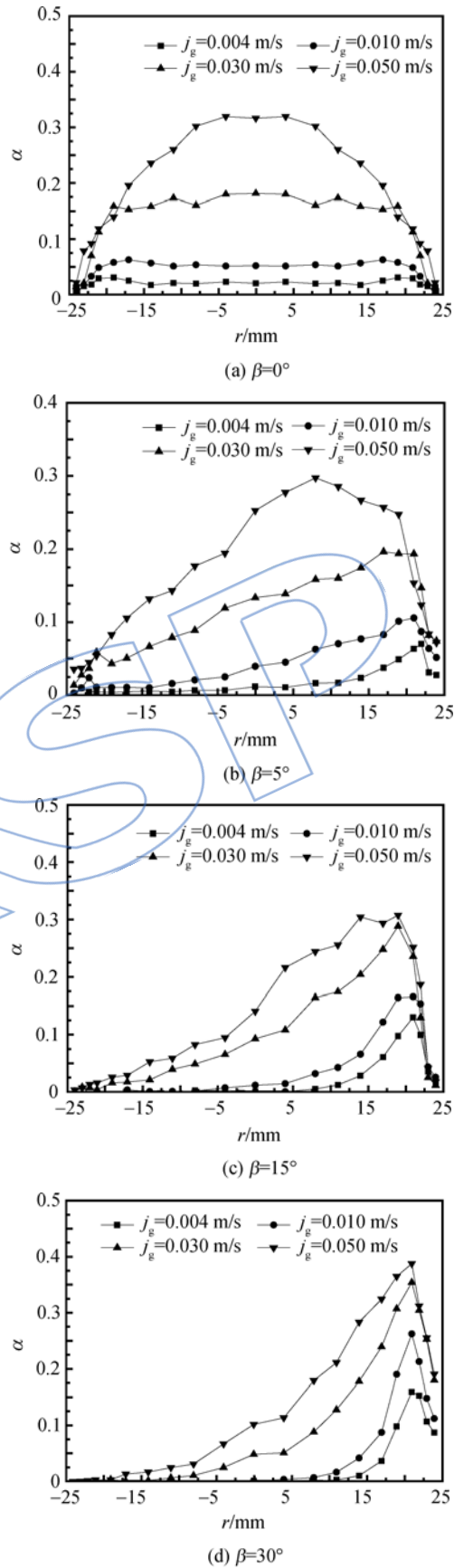


图 3 空泡份额径向分布 ($L/D=22, j_l=0.071$ m/s)
Fig. 3 Radial distribution of void fraction ($L/D=22, j_l=0.071$ m/s)

“核峰”型分布. 随着倾斜角度的增加,空泡份额径向分布逐渐呈现单一“壁峰”型分布. 在管内上侧,低气流量时空泡份额分布的“壁峰”更加靠近壁面,但随着气流量的增加,“壁峰”逐渐远离壁面. 随着倾斜角度的增加,空泡份额径向分布呈“壁峰”分布的特点更加明显,且“壁峰”逐渐向壁面靠近,峰值也逐渐增加. 但空泡份额截面平均值却逐渐减小;在管内下侧,随着倾角的增加,空泡份额在低气流量时呈现的“壁峰”分布逐渐消失,空泡份额从倾斜圆管下壁面沿着直径方向逐渐增加.

2.2 气泡径向受力

目前国外学者对气液两相流中受到的升力(lift force)、壁面力(wall force)、湍流扩散力(turbulent dispersion force)、曳力(drag force)以及虚拟质量力(virtual mass force)进行了广泛的研究^[8-15],得到了大量的计算关联式.

由于实验参数的测量位置位于实验段两相流充分发展区域,因此在对气泡受力进行分析时,忽略了气泡轴向受到的虚拟质量力. 同时,气泡重力的数量级在 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ 之间,因此气泡重力的影响,也不予以考虑. 通过文献^[16]中 Lahey 等提出的湍流扩散力模型,对气体折算速度 j_g 为 0.03 m/s 与 0.05 m/s 两个较大气流量时的湍流扩散力(F_{td})进行了估算,见图 4. 结果发现湍流扩散力随着倾斜角度的增加而增大,且在管道中心区域其值较大,而在壁面附近其值较小. 同时,可以发现,湍流扩散力数量级基本处于 $10^{-7} \sim 10^{-5}$ 之间,与相应工况下升力、壁面力、浮力的径向分量相比相差 2~3 个数量级,故湍流扩散力亦可以省略.

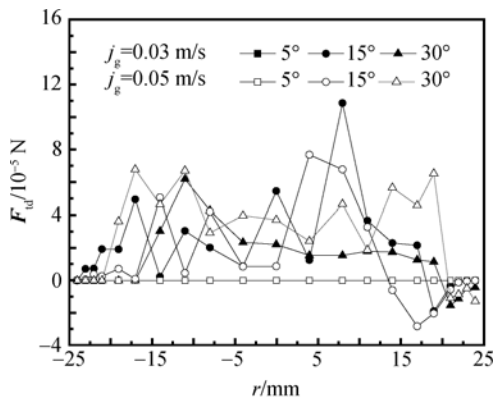


图 4 湍流扩散力径向分布
($L/D=22, j_t=0.071 \text{ m/s}$)

Fig. 4 Radial distribution of turbulent dispersion force
($L/D=22, j_t=0.071 \text{ m/s}$)

通过以上分析,可以给出气泡在本实验条件下受力图,见图 5,图中 F_w 为壁面力, F_l 为升力, F_d 为曳力, F_{bu} 为浮力, F'_{bu} 为浮力的径向分量. 因此本文结合气泡径向受到的升力、浮力、壁面力,对倾斜条件下空泡份额径向呈现“壁峰”型分布的形成机制进行了分析.

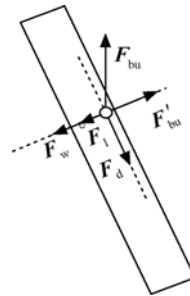


图 5 气泡径向受力机理图

Fig. 5 Mechanism diagram of radial forces on a bubble

计算中,升力采用 Tomiyama 升力模型,此模型是在充分考虑了竖直圆管内气泡周围流场和气泡周围切应力场之间的相互作用而得到的,虽然是建立在单个气泡基础之上的,但是 Lucas 等^[15]的研究发现, Tomiyama 升力模型仍可以用于液体流速低于 1m/s 情况下的湍流泡状流,而本实验条件满足这一要求. 文献^[9]提出的升力模型的计算关系式如下:

$$F_l = -C_l \rho_l \frac{\pi d_b^3}{6} (\mathbf{V}_g - \mathbf{V}_l) \times \text{rot } \mathbf{V}_l \quad (1)$$

式中 $C_l, \rho_l, d_b, \mathbf{V}_g, \mathbf{V}_l$ 为升力系数、液体密度、气泡直径、相应径向位置的气体轴向绝对速度以及液体轴向绝对速度,其中气体绝对速度通过光纤探针测得,而液体绝对速度通过文献^[9]中给出的模型进行求解; $\text{rot } \mathbf{V}_l$ 为液体轴向速度旋度,其中升力系数关系式为

$$C_l = \begin{cases} \min[0.288 \tanh(0.121 Re), f(E)], & E \leq 4 \\ f(E), & 4 \leq E \leq 10.7 \\ -0.29, & E \geq 10.7 \end{cases} \quad (2)$$

其中 $f(E)$ 计算关系式为

$$f(E) = 0.00105 E^3 - 0.0159 E^2 - 0.0204 E + 0.474 \quad (3)$$

式中 Re, E 分别为粒子雷诺数以及 Eötvös 数,其表达式分别为

$$Re = \frac{\rho_l (\mathbf{V}_g - \mathbf{V}_l) d_b}{\mu_l} \quad (4)$$

$$E = \frac{g(\rho_l - \rho_g)d_b^2}{\sigma} \quad (5)$$

式中 ρ_g 为气体密度, σ 为液体的表面张力.

由于管道内径向压力梯度的存在造成壁面附近压力较高, 而中心区域压力较低, 当一个气泡向壁面运动时, 由于压力梯度的存在会产生一个抑制气泡向壁面运动的力, 这个力就是壁面力, 其中 Tomiyama^[9] 提出的壁面力壁面力模型如下:

$$F_w = -C_w \rho_l \frac{\pi d_b^3}{12} f(r) (V_g - V_l)^2 \quad (6)$$

这里规定指向壁面的方向为正, 式中 C_w 为壁面力系数. 在气液泡状流中壁面力系数取 0.1, 壁面力的方向指向圆管中心不变, 其值为负. 其中函数 $f(r)$ 关系式为

$$f(r) = d_b \left[\frac{1}{(R-r)^2} - \frac{1}{(R+r)^2} \right] \quad (7)$$

式中 R 为圆管半径. 壁面力只在壁面附近起作用, 且随着气泡向壁面靠近会越来越大, 从而抑制气泡进一步向壁面运动.

浮力的径向分量为

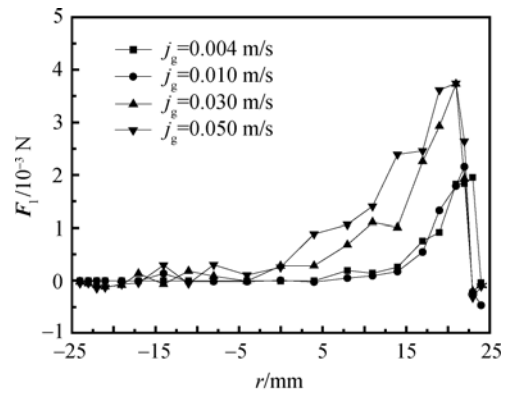
$$F'_{bu} = \frac{\rho_0 g \pi d_b^3 \sin \beta}{6} \quad (8)$$

式中 ρ_0 为圆管内流体真实密度, 其中表达式为

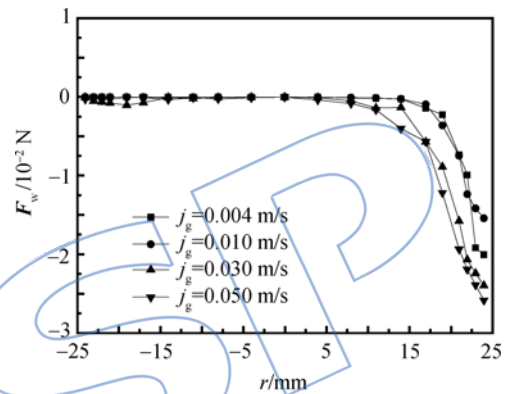
$$\rho_0 = \alpha \rho_g + (1 - \alpha) \rho_l \quad (9)$$

其中浮力的径向分量 F'_{bu} 沿着圆管直径到倾斜圆管上壁面增加逐渐增大, 迫使气泡向上壁面运动.

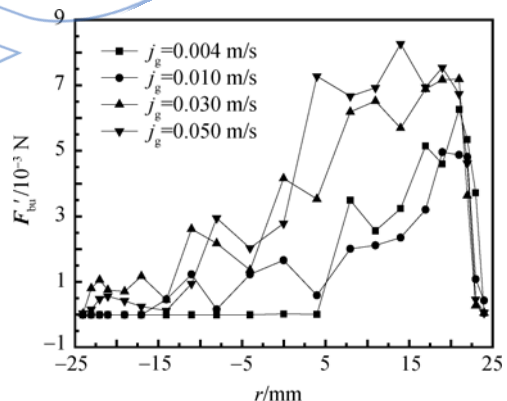
通过以上分析可以发现, 在倾斜条件下, 管内测量截面上不同位置的气泡, 由于径向受到的浮力径向分量, 使整个测量截面上的气泡向圆管上壁面(XY平面最上端)运动, 又由于壁面力的作用抑制气泡向壁面运动, 两个力的共同作用使气泡不断的向圆管上壁面聚集, 因此本文针对 XY 平面内空泡份额径向分布沿 Y 轴正方向呈“壁峰”型分布的机理进行了研究. 其中本文对倾斜角度为 15° 工况下的升力、壁面力、浮力径向分布进行了计算, 其径向分布见图 5. 当升力为正时, 其方向指向圆管中心, 为负值时, 指向壁面. 本实验条件下, 当气泡直径大于 6.6 mm 时, 升力系数变为负值, 升力方向发生转变, 指向圆管中心. 由图 6 可知, 在倾斜角度为 15° 、不同气流速条件下, 升力沿着倾斜圆管直径方向逐渐增大, 且升力均为正值, 并在壁面附近形成“壁峰”; 壁面力则沿着直径方向逐渐增大, 且壁面力仅在 $r \geq 10$ mm 时才起作用, 方向指向圆管中心, 抑制气泡向壁面运动; 浮力径向分布同升力径向分布类似.



(a) 升力



(b) 壁面力



(c) 浮力径向分量

图 6 气泡受力径向分布图

($L/D=22, \beta=15^\circ, j_i=0.071$ m/s)

Fig. 6 Radial distribution of forces on a bubble

($L/D=22, \beta=15^\circ, j_i=0.071$ m/s)

通过图 6 还可以看出: 在倾斜圆管中心下侧, 相对于气泡受到的壁面力、升力, 气泡径向受到的浮力分量更大, 使气泡不断向圆管上侧运动. 而升力、壁面力、浮力径向分量均在径向位置 $r \geq 10$ mm 处发生剧烈变化. 因此对于倾斜圆管上侧径向位置可以分为 3 个过程:

1) 当 $0 \text{ mm} < r < 15 \text{ mm}$ 时, 此时壁面力、升力

之和相对于气泡径向浮力较小,因此气泡进一步向壁面聚集。

2) 当 $15\text{ mm} < r < 22\text{ mm}$ 时,此时壁面力、升力之和与气泡所受浮力径向分力大小相当,因此气泡在此处聚集。

3) 当 $22\text{ mm} < r < 25\text{ mm}$ 时,此时壁面力进一步增大,而浮力径向分量逐渐减小,因此抑制气泡进一步向壁面靠近。

通过以上分析可以发现,倾斜条件下由气泡由于受到三力的共同作用,驱使气泡不断在 $15\text{ mm} < r < 22\text{ mm}$ 区域聚集,从而使空泡份额在倾斜条件下呈“壁峰”分布。

3 结 论

1) 竖直条件下,空泡份额径向分布呈“马鞍”和“核峰”型分布,随倾斜角度的增加,空泡份额径向分布逐渐向单一“壁峰”型分布转变,且随着倾斜角度的增加,“壁峰”越靠近管道中心上测壁面。

2) 升力、壁面力、浮力径向分力均在圆管径向位置 $r \geq 10\text{ mm}$ 处发生剧烈变化。

3) 受升力、浮力、壁面力三力的共同作用,气泡在 $15\text{ mm} < r < 22\text{ mm}$ 聚集,从而在倾斜条件下,空泡份额呈“壁峰”型分布。

参考文献:

- [1] 陈学俊,陈立勋,周芳德.气液两相流与传热基础[M].北京:科学出版社,1995.
- [2] 于勇,刘淑艳,张世军,等.固体火箭发动机喷管气固两相流动的数值模拟[J].航空动力学报,2009,24(5):931-937. YU Yong, LIU Shuyan, ZHANG Shijun, et al. Numerical simulation of gas-particle flow in nozzle of solid rocket motor[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(5): 931-937. (in Chinese)
- [3] 王延忠,牛文韬,唐文,等.航空直齿轮喷油润滑油气两相流分析[J].航空动力学报,2013,28(2):439-444. WANG Yanzhong, NIU Wentao, TANG Wen, et al. Research on oil-air multiphase flow of spray lubrication of aero spur gears[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(2): 931-937. (in Chinese)
- [4] Hibiki T, Ishii M. One-dimensional drift-flux model and constitutive equations for relative motion between phases in various two-phase flow regimes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46(25): 4935-4948.
- [5] 田道贵,孙立成,刘靖宇,等.较大管径中两相流动漂移流模型研究[J].原子能科学技术,2013,47(2):229-232. TIAN Daogui, SUN Licheng, LIU Jingyu, et al. Study on drift-flux model for two-phase flow in relative large diameter channel[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(2): 229-232. (in Chinese)
- [6] 幸奠川,孙立成,阎昌琪,等.倾斜圆管内泡状流空泡份额特性实验研究[J].核动力工程,2012,33(4):111-115. XING Dianchuan, SUN Licheng, YAN Changqi, et al. Experimental investigation on characteristics of void fraction for bubbly flow in an inclined circular tube[J]. Nuclear Power Engineering, 2012, 33(4): 111-115. (in Chinese)
- [7] 田道贵,孙立成,高菲,等.光学探针在气液两相流动局部参数测量中的应用研究[J].实验流体力学,2012,26(6):91-95. TIAN Daogui, SUN Licheng, GAO Fei, et al. A study on application of optical probes for the measurement of local parameters in two-phase flow[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2012, 26(6): 91-95. (in Chinese)
- [8] Drew D, Lahey D. The virtual mass and lift force on a sphere in rotating and straining inviscid flow[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1987, 13(1): 113-121.
- [9] Tomiyama A, Tamai H, Zun I. Transverse migration of single bubbles in simple shear flows[J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57(10): 1849-1858.
- [10] Marco P D, Grassi W, Memoli G. Experimental study on rising velocity of nitrogen bubble in FC-72[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2003, 42(5): 435-466.
- [11] Hibiki H, Ishii M. Lift force in bubbly flow systems[J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(7): 6457-6474.
- [12] Chuang M S, Lee S J, Chang K S. Effect of interfacial pressure jump and virtual mass terms on sound wave propagation in the two-phase flow[J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 244(4): 717-728.
- [13] Krepper E, Reddy Vanga B N, Zaruba A, et al. Experimental and numerical studies of void fraction distribution in rectangular bubble columns[J]. Nuclear and Design, 2007, 237(4): 399-408.
- [14] Ishii M, Zuber N. Drag coefficient and relative velocity in bubbly, droplet or particulate flows[J]. AIChE Journal, 1979, 25(5): 843-855.
- [15] Lucas D, Krepper E, Prasser H M. Use of models for lift, wall and turbulent dispersion forces acting on bubbles for poly-disperse flows[J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(15): 4146-4157.
- [16] Lahey R T, Jr., Bertodano M L, Jones O C, Jr. Phase distribution in complex geometry conduits[J]. Nuclear Engineering and Design, 2001, 141(1/2): 177-201.