

较大管径中两相流动漂移流模型研究

田道贵, 孙立成, 刘靖宇, 孙波

(哈尔滨工程大学 核安全与仿真技术国防重点学科实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 漂移流模型作为一种简单实用的模型, 在反应堆热工水力及安全分析, 特别是在空泡份额的计算方面, 应用非常广泛。针对不同的通道及流型, 研究者提出了多种基于漂移流模型的计算方法。通过较大通道中两相流动过程的实验研究, 对 5 种空泡份额计算模型进行评价分析。结果表明, 基于常规通道的 Hibiki-Ishii 模型与实验值吻合较好, 平均相对误差为 14.1%。结合对气泡运动过程的研究, 发现在 $\langle J_g \rangle \beta < 0.027$ 区, 分布参数 $C_0 < 1$, 据此, 给出了在较大管径通道中计算精度更高的模型关系式。

关键词: 漂移流模型; 空泡份额; 较大管径通道

中图分类号: TL334

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2013)02-0229-04

doi: 10.7538/yzk.2013.47.02.0229

Study on Drift-Flux Model for Two-Phase Flow in Relative Large Diameter Channel

TIAN Dao-gui, SUN Li-cheng, LIU Jing-yu, SUN Bo

(National Key Discipline Laboratory of Nuclear Safety and Simulation Technology,
Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The drift-flux model, as its simplicity, has been widely used in the thermal-hydraulic and accidents analysis, especially in the calculation of void fraction. In view of different channels and flow regimes, researchers have developed some correlations based on the drift-flux model, five of which were evaluated against the experimental results. The Hibiki-Ishii model for conventional channel is the best with average relative error of 14.1%. Combined with the investigation of bubble motion, it is found that the value of distribution parameter is less than one when $\langle J_g \rangle \beta < 0.027$, and a more accurate correlation was proposed.

Key words: drift-flux model; void fraction; relative large diameter channel

两相流动中, 空泡份额、界面面积浓度和 Sauter 平均直径是描述两相流内部结构的基本参数^[1], 其中空泡份额代表两相分布情况, 对空泡份额计算方法的研究有着重要的意义。在两相流空泡份额的理论计算中, 漂移流模型应用

最为广泛。由于研究者对模型中分布参数 C_0 及平均加权漂移速度 V_{gj} 的确定持不同观点^[2], 不同的关系式相继被提出。关于大通道和常规通道中空泡份额的计算方法, 国内外已有大量研究^[2-8], 然而这些计算方法基本是研究者根据

各自的实验观察和数据结果进行理论分析总结得到的,其应用范围可能仅限于与其实验条件相同或类似的实际工况,适用性有限。

Kataoka 和 Ishii^[7]发现,当管径超过一定尺寸后,在常规通道中可观察到的弹状气泡将无法观察到,并指出这一临界尺寸的无量纲水力直径为 40。对于空气-水两相流动,在常温常压下,管径增大到 0.1 m 后,气弹便难以形成。Schlegel 等^[3]根据管径对弹状或帽状气泡的影响,认为无量纲水力直径从 18.6 到 30 的通道,属于介于常规通道和大通道之间的过渡通道^[3],本文将之称作较大管径通道。由于在常规通道和大通道中,两相间相互作用及流型转换机理存在差异,计算模型就可能不同。对于较大管径通道,选择基于常规通道还是基于大通道的漂移流计算模型的研究还极少报道。本文通过在较大管径通道中两相流动实验研究,分析空泡变化规律,并对 5 个已有模型的适应性进行评价。

1 实验回路及数据测量

实验回路如图 1 所示。

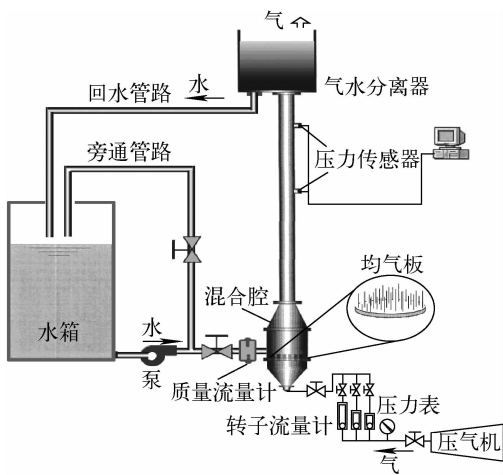


图 1 实验回路简图

Fig. 1 Schematic of experimental loop

实验中所使用的实验段为透明的有机玻璃圆管,管内径为 50.8 mm,根据 Schlegel 等^[3]对大小管径通道的划分规则,该圆管属于过渡通道。实验中所采用的两相流动介质为纯净水和空气,水由离心泵提供动力,空气则由压气机

加压后,进入实验回路。空气和水在混合腔内混合,混合腔中的均气板上装有多根不锈钢毛细管。气体流经毛细管后,形成大小基本一致且分布均匀的气泡,达到气水充分混合的目的。

水流量由可变量程质量流量计测得,气流量由量程不同的 3 个转子流量计测量。在实验段高径比为 24 和 34 处(以实验段入口为起点)各安装 1 个精度为 0.25% 的压力传感器,实时测量实验段中流经这两个位置的两相流体压力信号。实验中,气相折算速度为 0.01~0.55 m/s,液相折算速度为 0~0.2 m/s。

2 模型验证

Zuber 等^[4]提出了漂移流模型,认为在分析和计算空泡份额时,必须同时考虑沿通道截面的流速和气相含量的分布规律及通道截面上各局部位置两相之间的相对速度等因素,并在模型中分别对分布系数 C_0 和气相加权平均漂移速度 V_{g0} 加以考虑。

利用漂移流模型计算空泡份额的基本公式为:

$$\langle \alpha \rangle = \frac{\langle \beta \rangle}{C_0 + V_{g0} / \langle J \rangle} \quad (1)$$

式中: $\langle \alpha \rangle$ 为平均空泡份额; $\langle \beta \rangle$ 为平均体积含气率; $\langle J \rangle$ 为折算速度。由于在两相流的实际流动过程中,分布系数 C_0 和漂移速度 V_{g0} 并不能直接测得,一般是通过测量局部流动参数再进行积分计算得到,或通过研究者的理论分析和实验研究得出的经验、半经验公式进行计算得到,在实际应用中,一般采用后一种方法。

本文利用实验数据,对 3 个基于常规通道的漂移流模型^[4-6]关系式和 2 个基于大通道的漂移流模型^[7-8]关系式进行评价,各模型计算关系式列于表 1。模型计算 $\langle \alpha \rangle$ 值与实验 $\langle \alpha \rangle$ 值^[9]比较结果示于图 2,计算相对误差列于表 2。除了 Hibiki-Ishii 模型^[6]和 Ishii 模型^[5]关系式的预测值与实验值相对误差相对较小外,其他 3 个模型的预测值较实验值普遍偏小。

Zuber-Findlay 模型中 V_{g0} 的关系式是在常规通道中得到的,而对于实验段较大管径通道,由于壁面对气泡的运动影响相对要小,近壁面气相速度与主流速度更为接近,管道中两相之间的相对速度相对较小。因此,在相同流动条

表 1 漂移流模型关系式
Table 1 Correlations for drift-flux model

模型	C_0	V_{gj}
Zuber-Findlay ^[4]	$C_0 = 1.2$	$V_{gj} = 1.53 \left(\frac{g\sigma\Delta\rho}{\rho_1^2} \right)^{0.25}$
Ishii ^[5]	$C_0 = 1.2 - 0.2 \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_1}}$	泡状流, $V_{gj} = \sqrt{2} \left(\frac{g\sigma\Delta\rho}{\rho_1^2} \right)^{0.25} (1 - \langle\alpha\rangle)^{1.75}$ 弹状流, $V_{gj} = 0.35 \left(\frac{g\sigma\Delta\rho}{\rho_1^2} \right)^{0.5}$
Hibiki-Ishii ^[6]	$C_0 = \left(1.2 - 0.2 \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_1}} \right) \left[1 - \exp\left(-22 \frac{\langle D_{SM} \rangle}{D} \right) \right]$	$V_{gj} = \sqrt{2} \left(\frac{g\sigma\Delta\rho}{\rho_1^2} \right)^{0.25} (1 - \langle\alpha\rangle)^{1.75}$
Kataoka-Ishii ^[7]	$C_0 = 1.2 - 0.2 \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_1}}$	$V_{gj} = 0.0019 D_H \left(\frac{g\sigma\Delta\rho}{\rho_1^2} \right)^{0.25} \left(\frac{\rho_g}{\rho_1} \right)^{-0.157} N_{mf}^{0.562}$ $N_{mf} \leq 2.25 \times 10^{-3}$
Hibiki-Ishii ^[8]	$C_0 = \exp\left[0.475 \left(\frac{\langle J_g \rangle}{\langle J \rangle} \right)^{1.69} \right] \left(1 - \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_1}} \right) + \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_1}}$ $0 \leq \frac{\langle J_g \rangle}{\langle J \rangle} \leq 0.9$ $C_0 = \exp\left(-2.88 \frac{\langle J_g \rangle}{\langle J \rangle} + 4.08 \right) \left(1 - \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_1}} \right) + \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_1}}$ $\frac{\langle J_g \rangle}{\langle J \rangle} > 0.9$	$V_{gj} = V_{gjH2002} \exp\left[-1.39 \langle J_g \rangle \left(\frac{g\sigma\Delta\rho}{\rho_1^2} \right)^{-0.25} \right] +$ $V_{gjKH1987} \left\{ 1 - \exp\left[-1.39 \langle J_g \rangle \left(\frac{g\sigma\Delta\rho}{\rho_1^2} \right)^{-0.25} \right] \right\}$

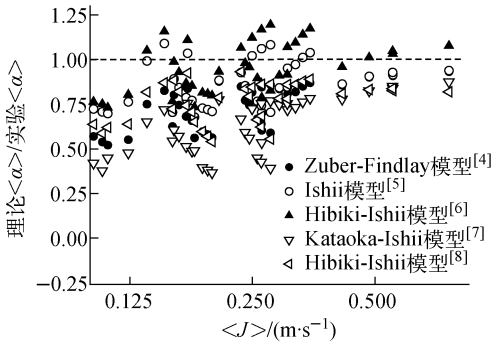


图 2 实验 $\langle\alpha\rangle$ 与漂移流模型理论 $\langle\alpha\rangle$ 比较
Fig. 2 Comparison of experimental $\langle\alpha\rangle$ and predicted $\langle\alpha\rangle$ by drift-flux model

表 2 不同漂移流模型计算精度比较
Table 2 Comparison of calculating deviations for different drift-flux models

模型	平均相对误差/%
Zuber-Findlay ^[4]	28.7
Ishii ^[5]	16.5
Hibiki-Ishii ^[6]	14.1
Kataoka-Ishii ^[7]	41.8
Hibiki-Ishii ^[8]	25.1

件下,较大管径通道中漂移速度较常规通道低,这使得用常规通道计算 $\langle\alpha\rangle$ 值较实验值普遍偏低;Hibiki 等^[6]在 Ishii 模型^[5]的基础上,对分布系数 C_0 进行了改进,考虑了管径以及气泡尺

寸对分布系数的影响,且认为气泡的尺寸是决定分布系数的主要因素。从图 2 可看出,该模型较 Ishii 模型^[5]得出的 $\langle\alpha\rangle$ 大,但计算精度更高;Kataoka-Ishii 模型^[7]和 Hibiki-Ishii 模型^[8]是针对大通道提出的。在大通道中,虽然壁面效应降低,但气泡的横向运动等形式的附加运动增强,由此引起的两相速度分布不均程度,可能比在常规通道中由壁面效应引起的两相速度分布不均程度还要大,即相同条件下,大通道中的漂移速度高于较大管径通道,因此,模型对空泡份额的预测值较实验值偏小。

结合实验结果及理论分析,在较大管径中,虽然气泡运动特性异于常规通道和大通道,但在 5 个模型中,基于常规通道的 Hibiki-Ishii 模型^[6]计算值与实验值吻合最好。因此,在较大管径通道中的空泡份额可采用 Hibiki-Ishii 模型进行计算。

3 新漂移流模型修正关系式

在对实验数据分析总结的基础上发现,根据气相折算速度与体积含气率之积 $(\langle J_g \rangle \beta)$,可分成 2 个区,如图 3 所示。斜率表示 C_0 ,截距表示气相 V_{gj} 。在 $\langle J_g \rangle \beta < 0.027$ 区, $C_0 < 1$;在 $\langle J_g \rangle \beta > 0.027$ 区, C_0 和 Ishii 漂移流模型^[5]计算值基本相同。据此,在 Ishii 模型的基础上,通

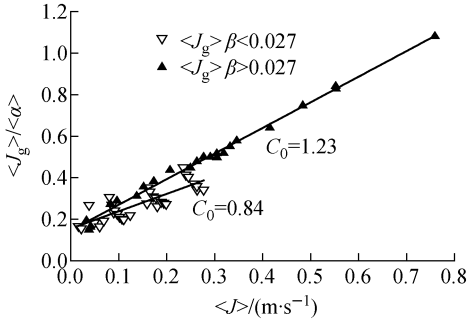


图3 实验条件下的分布参数

Fig. 3 Distribution parameter in experimental condition

过对 C_0 和 V_{gi} 关系式进行修正,可得到修正的计算关系式。

在 $\langle J_g \rangle \beta < 0.027$ 区:

$$C_0 = 1 - 0.15 \sqrt{\rho_1 / \rho_g} \quad (2)$$

$$V_{gi} = (g \sigma \Delta \rho / \rho_1^2)^{0.25} (1 - \langle \alpha \rangle)^{1.75} \quad (3)$$

在 $\langle J_g \rangle \beta > 0.027$ 区, C_0 和 V_{gi} 计算式与 Ishii 漂移流模型关系式一致。

新关系式和 Ishii 模型关系式对 $\langle \alpha \rangle$ 预测比较结果如图 4 所示,新关系式的预测值更为接近实验值,平均相对误差为 8.0%,具有较高的预测精度。

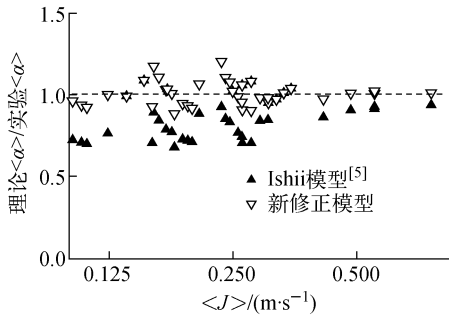


图4 实验 $\langle \alpha \rangle$ 与新漂移流模型理论 $\langle \alpha \rangle$ 比较

Fig. 4 Comparison of experimental $\langle \alpha \rangle$ and predicted $\langle \alpha \rangle$ by new drift-flux model

4 结论

1) 本文以实验所获得的数据为基础,分别对 5 种漂移流模型进行了验证评价,发现 Hibiki-Ishii 模型^[6]和 Ishii 模型^[5]的理论计算值与实验值符合较好。在对较大管径通道空泡份额进行理论计算时,推荐使用 Hibiki-Ishii 模型^[6]。

2) $\langle J_g \rangle$ 与体积含气率 β 之积 $\langle J_g \rangle \beta$ 可分成 2 个区,在 $\langle J_g \rangle \beta < 0.027$ 区, $C_0 < 1$; 在较大管径

通道中,漂移速度相对常规和大通道要低。结合以上两点,给出了计算精度更高的修正计算关系式。

参考文献:

- [1] SHEN X Z, SAITO Y, MISHIMA K, et al. Methodological improvement of an intrusive four-sensor probe for the multi-dimensional two-phase flow measurement [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2005, 31(5): 593-617.
- [2] 孙奇,赵华,杨瑞昌,等. 垂直上升两相流漂移流模型研究[J]. 核动力工程,2006,27(2):40-44. SUN Qi, ZHAO Hua, YANG Ruichang, et al. Drift flux model for vertical upward two-phase flow[J]. Nuclear Power Engineering, 2006, 27(2): 40-44(in Chinese).
- [3] SCHLEGEL J, HIBIKI T, ISHII M. Development of a comprehensive set of drift-flux constitutive models for pipes of various hydraulic diameters[J]. Progress in Nuclear Energy, 2010, 52(7): 666-677.
- [4] ZUBER N, FINDLAY J A. Average volumetric concentration in two-phase flow systems [J]. Journal of Heat Transfer, 1965, 87(4): 453-468.
- [5] 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): 4 935-4 948.
- [6] HIBIKI T, ISHII M. Distribution parameter and drift velocity of drift-flux model in bubbly flow [J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 2002, 45(4): 707-721.
- [7] KATAOKA I, ISHII M. Drift-flux model for large diameter pipe and new correlation for pool void fraction[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1987, 30(9): 1 927-1 939.
- [8] HIBIKI T, ISHII M. One-dimensional drift-flux model for two-phase flow in a large diameter pipe [J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 2003, 46(10): 1 773-1 790.
- [9] TANG C Z, HEINDEL T J. Estimating gas holdup via pressure difference measurements in a cocurrent bubble column[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2006, 32(7): 850-863.