

小宽高比矩形通道两相阻力特性研究

秦胜杰, 陈炳德, 闫晓, 张震, 肖泽军, 黄彦平

(中国核动力研究设计院 核反应堆热工水力技术重点实验室, 四川 成都 610041)

摘要:通过对宽高比为 0.05 的矩形通道内两相流动阻力特性的实验研究结果, 以及与现有经典公式的对比分析结果表明, 现有公式在预测较小宽高比的矩形通道内阻力特性时偏差较大。引入了能够反映小通道对气泡生长的限制特性无量纲 N_{conf} , 用于对小宽高比矩形通道阻力特性的预测, 并采用 Lockhart-Martinelli 方法拟合了 C 系数预测关系式。预测结果与实验数据比较, 发现 95% 的实验数据与预测值相对偏差在 $\pm 15\%$ 以内。

关键词: 矩形通道; 阻力特性; Chisholm; 关系式

中图分类号: TL334

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2013)01-0070-05

doi: 10.7538/yzk.2013.47.01.0070

Two Phase Pressure Drop Characteristics in Rectangular Channel With Low Aspect Ratio

QIN Sheng-jie, CHEN Bing-de, YAN Xiao, ZHANG Zhen,
XIAO Ze-jun, HUANG Yan-ping

(Key Laboratory on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics Technology,
Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China)

Abstract: The study on two phase pressure drop in rectangular channel with low aspect ratio (0.05) was carried on using water. The state-of-art correlations failed to satisfactorily predict the experimental data. The dimensionless N_{conf} can account for the maximum size of the bubble confined in small channel during flow boiling process. The data were used to develop a new correlation based on Lockhart-Martinelli method with N_{conf} . The correlation is tested against the experimental data, and the relative deviation is in $\pm 15\%$.

Key words: rectangular channel; pressure drop; Chisholm; correlation

矩形通道的结构特性(宽高比), 特别是通道宽高比较小时, 对流动沸腾条件下的气泡生长以及流道截面两相分布特性产生影响, 造成通道内传热及阻力特性发生变化。

在矩形通道两相阻力特性已开展的研究中可发现经典的 Lockhart-Martinelli 方法预测的两相摩擦倍增因子结果不够准确, 大多情况下需对其进行修改; 两相摩擦倍增因子可能需考

考虑质量流速的影响,对于矩形通道还应考虑窄缝宽度(或当量直径)的影响^[1-4]。

本研究通过实验获得饱和状态下两相流动阻力特性实验数据,并与已有预测公式进行比较,分析矩形通道内两相流动阻力的特点,揭示矩形通道阻力特性的控制因素,并得出矩形通道阻力特性预测关系式。

1 实验装置及本体

1.1 实验装置

实验装置包括实验本体、换热器、稳压器、循环泵、流量计、预热器等设备。实验工质由循环泵流入实验支路,经流量计测量流量后,进入预热器升温,然后进入实验本体,再经换热器冷却后回到循环泵。为了保持系统压力稳定以及安全运行,实验装置设有稳压器及安全阀。实验装置流程如图1所示。

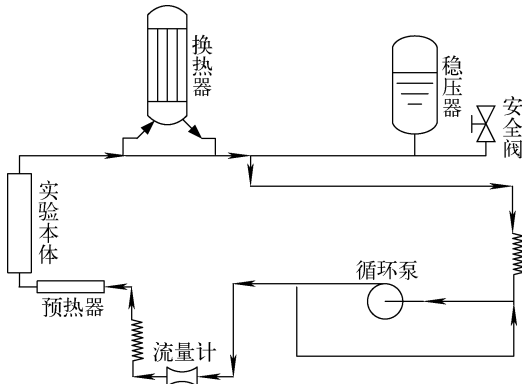


图1 实验装置流程图

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

1.2 实验本体

实验本体截面尺寸如图2所示,加热长度为1 000 mm,在距加热段末端25 mm和225 mm处布置2个测压点,去离子水沿矩形通道竖直向上流动。

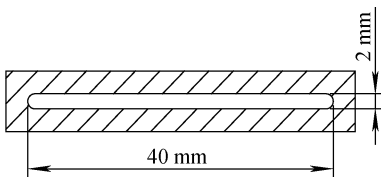


图2 实验本体截面图

Fig. 2 Schematic of test section

2 实验数据

2.1 实验参数

压力:12~16 MPa;实验本体入口流量:147~620 kg/h;实验本体热流密度:372~1 501 kW/m²;出口质量含汽率:0~0.47。

2.2 数据处理方法

实验测量压降数据为测量段总压降 Δp_{TP} ,包括摩擦压降 Δp_f 、重位压降 Δp_e 和加速压降 Δp_a 3部分,即:

$$\Delta p_{TP} = \Delta p_f + \Delta p_a + \Delta p_e$$

重位压降为:

$$\Delta p_e = \int [\rho_g \alpha + (1 - \alpha) \rho_l] g dz$$

式中: α 为空泡份额; ρ_g 、 ρ_l 分别为气相和液相密度; g 为重力加速度。

加速压降为:

$$\Delta p_a = G^2 \int \left[\frac{x^2}{\alpha \rho_g} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha) \rho_l} \right] dz$$

式中: G 为质量流速; x 为质量含汽率。

空泡份额 α 采用 Zuber-Findlay 公式计算:

$$\alpha = \frac{x}{\rho_g} \left[C_0 \left(\frac{x}{\rho_g} + \frac{1-x}{\rho_l} \right) + \frac{u_{gj}}{G} \right]^{-1}$$

$$u_{gj} = 1.41 \left[\frac{(\rho_l - \rho_g) \sigma g}{\rho_l^2} \right]^{0.25}$$

式中: C_0 取1.13; u_{gj} 为漂移速度; σ 为表面张力。

3 比较分析

3.1 均相模型

均相模型中的等效黏度采用 McAdams 方法计算:

$$\frac{1}{\mu_{TP}} = \frac{x}{\mu_g} + \frac{1-x}{\mu_l}$$

式中, μ 为等效黏度。

摩擦压降实验值与均相模型结果进行比较,结果如图3所示,模型预测结果平均约为实验值的25%,均相模型不能很好地预测实验结果。

3.2 Lockhart-Martinelli 方法

Lockhart-Martinelli(L-M)方法两相摩擦倍增因子采用 Chisholm 拟合关系式计算:

$$\phi_l^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2}$$

式中:常数 C 取20; ϕ_l^2 为两相摩擦倍增因子; X 为Martinelli参数。

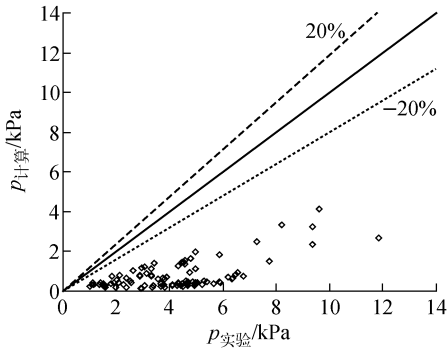


图3 摩擦压降实验值与均相模型结果比较

Fig. 3 Comparison of experimental data with homogeneous model

摩擦压降实验值与 L-M 方法结果进行比较,结果如图 4 所示。可看出,模型预测结果普遍高于实验结果,但实验数据的分散度较好,模型预测结果平均约为实验值的 200%。实际上将常数 C 取 7,大部分实验数据与预测值的相对偏差将在 $\pm 25\%$ 以内。

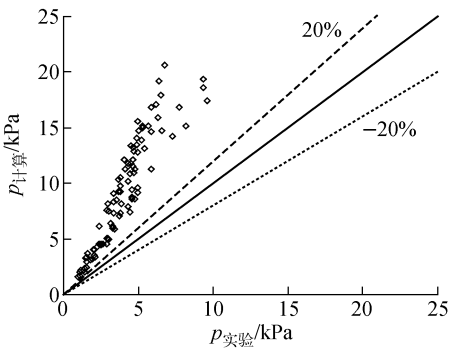


图4 摩擦压降实验值与 L-M 方法结果比较

Fig. 4 Comparison of experimental data with L-M method

3.3 Chen 方法

Wambsganss 等^[1]对 $19.05 \text{ mm} \times 3.18 \text{ mm}$ (宽高比为 0.167) 的矩形通道内阻力特性进行研究后,给出了 C 关系式:

$$C = ax^b$$

$$a = -2.44 + 0.00939Re_{LO}$$

$$b = -0.938 + 0.000432Re_{LO}$$

关系式适用范围:质量流速 $100 \sim 400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,含汽率 $0.05 \sim 1.0$, Re_{LO} 小于 2 200;质量流速大于 $400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,建议 C 取 21。

拟合关系式中包含了质量含汽率 x 和

Re_{LO} ,反映了通道结构和质量流速对 C 的影响。

随后 Chen 等^[4]在上式基础上拟合了新的 C 关系式:

$$C = ax^b$$

$$a = 5.55 - 0.7555A^{-0.895} + 0.00939Re_{LO}$$

$$b = 0.1001 + 0.0005A^{0.895}$$

关系式适用范围:质量流速 $50 \sim 700 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,含汽率 $0.001 \sim 0.95$,Martinelli 参数 $0.05 \sim 20$,宽高比 $0.1 \sim 1.0$ 。

相比 Wambsganss 的研究结果,在关系式中反映了矩形通道宽高比 A 的影响。由于本研究矩形通道宽高比超出了 Chen 关系式的适用范围,预测结果偏差较大。

3.4 Mishima-Hibiki (M-H) 方法

Mishima 和 Hibiki 等^[5-6]于 1993 年对窄缝宽度为 $1 \sim 5 \text{ mm}$ 的矩形通道内空气-水两相摩擦压降进行了研究,获得了与窄缝宽度 s 相关的 C 表达式:

$$C = 21[1 - \exp(-0.27s)]$$

1996 年研究了直径 $1 \sim 4 \text{ mm}$ 的圆形通道内空气-水两相摩擦压降,获得了与当量直径 D_e 相关的 C 表达式:

$$C = 21[1 - \exp(-0.333D_e)]$$

可看出,不论是特征尺寸取窄缝宽度 s ,还是取当量直径 D_e , C 均随窄缝宽度和当量直径的减小而变小。摩擦压降实验值与 M-H 方法比较结果如图 5 所示。可看出, M-H 方法 (1993) 预测结果相对较好,数据分散在 $-22.3\% \sim 45.3\%$ 之间,而 M-H 方法 (1996)

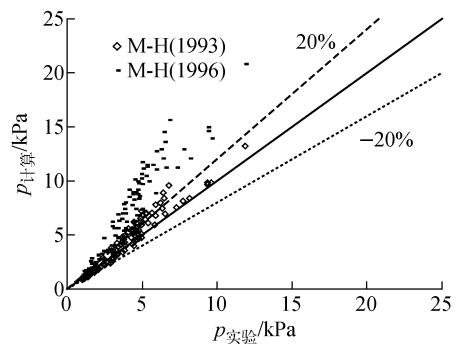


图5 摩擦压降实验值与 M-H 方法结果比较

Fig. 5 Comparison of experimental data with M-H method

预测结果平均约为实验值的 150%，对于小宽高比矩形通道，窄缝宽度比当量直径更能反映矩形通道的结构特性。

3.5 孙立成方法

孙立成等^[7]从公开发表的文献中搜集了 2 092 个两相摩擦压降实验数据,对 11 种两相摩擦压降计算方法进行了评价,并基于 Chisholm 方法,考虑了表面张力的影响(即拉普拉斯常数 La),给出了 C 计算关系式如下。

层流:

$$C = 26 \left(1 + \frac{Re_1}{1\ 000} \right) \left[1 - \exp \left(\frac{-0.153}{0.27La + 0.8} \right) \right]$$

紊流:

$$\phi_1^2 = 1 + \frac{C}{X^{1.19}} + \frac{1}{X^2}$$

$$C = 1.79 \left(\frac{Re_g}{Re_l} \right)^{0.4} \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0.5}$$

摩擦压降实验值与孙立成方法比较结果如图 6 所示。模型预测结果分散度小,平均预测结果较实验值偏低约 20%。

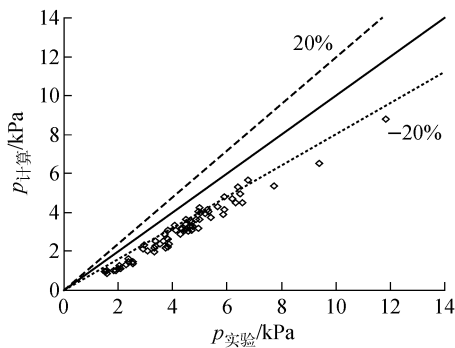


图 6 摩擦压降实验值与孙立成方法结果比较
Fig. 6 Comparison of experimental data with Sun Licheng method

3.6 小结

均相模型对本研究结果的预测明显偏低,表明均相模型不适用于矩形通道。Chisholm 的 C 系数方法提出后,研究者多采用拟合 C 系数关系式的方法,对于不同研究对象,最大的区别在于 C 的取值,以及 C 受不同参数的影响程度。对于矩形通道,研究者分别引入了窄缝宽度 s 、宽高比 A ,反映通道结构对两相阻力特性的影响,引入 $Re_{1,0}$ 反映通道当量直径和质量流速的影响,但适用性均不理想。

从不同模型比较结果看,以窄缝宽度为特征尺寸的 M-H 方法和考虑表面张力影响的孙立成方法对实验结果的预测较为准确,且孙立成方法的预测结果分散度较小。

4 阻力关系式

Kew 等^[8]定义了无量纲 N_{conf} 来描述小直径通道对气泡生长的影响:

$$N_{conf} = \frac{1}{D_c} \sqrt{\frac{4\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}}$$

Kew 采用 R141b 研究了直径为 1.69 ~ 3.69 mm 的圆管传热特性,结果表明包含 N_{conf} 的关系式能较准确地预测实验结果,但未对阻力特性进行分析。

从定义式看, N_{conf} 由两部分组成:当量直径以及表面张力与浮力之比,可较好地反映小通道对气泡生长的限制,表面张力越大,当量直径越小, N_{conf} 越大,对气泡生长的限制越明显。

因此,可得到 C 关系式如下:

$$C = 17.315 N_{conf} x^{-0.175}$$

摩擦压降实验值与拟合关系式预测结果比较示于图 7,约 95% 的实验数据与预测结果的相对偏差在 ±15% 以内。

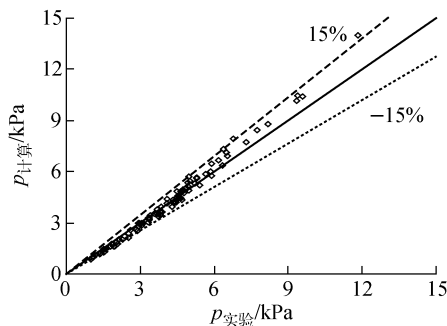


图 7 摩擦压降实验值与拟合关系式预测结果比较
Fig. 7 Comparison of experimental data with new correlation

5 结论

本研究通过两相阻力实验数据与公式预测结果的比较分析,得出以下结论:

1) 均相模型和 L-M 方法对本研究预测偏差很大,M-H 方法预测结果与实验值的相对偏

差在 $-22.3\% \sim 45.3\%$ 之间,孙立成方法预测结果较实验值平均偏低约 20% ;

2) 无量纲 N_{conf} 能够反映小通道对气泡生长限制的特性,可作为影响参数之一,用于对小宽高比矩形通道阻力特性的预测;

3) 以无量纲 N_{conf} 和质量含汽率 x 为变量,得到 C 系数预测关系式,该关系式预测结果偏差较小。

参考文献:

- [1] WAMBSGANSS M W, JENDRZEJCZYK J A, FRANCE D M. Two-phase flow and pressure drop in flow passages of compact heat exchangers, ANL/CP-74646 [R]. Chicago, USA: Argonne National Laboratory, 1992.
- [2] WARRIER G R, DHIR V K, MOMODA L A, et al. Heat transfer and pressure drop in narrow rectangular channels[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2002, 26(1): 53-64.
- [3] WEN D S, YAN Y Y, KENNING D B R. Saturated flow boiling of water in a narrow channel: Time-averaged heat transfer coefficients and correlations [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2004, 24(8-9): 1 207-1 223.
- [4] CHEN I Y, CHEN Y M, LIAW J S, et al. Two-phase frictional pressure drop in small rectangular channels[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2007, 32(1): 60-66.
- [5] MISHIMA K, HIBIKI T, NISHIHARA H. Some characteristics of gas-liquid flow in narrow rectangular ducts [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1993, 19(1): 115-124.
- [6] MISHIMA K, HIBIKI T. Some characteristics of gas-liquid flow in small diameter vertical tubes [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1996, 22(4): 703-712.
- [7] 孙立成, 阎昌琪, 孙中宁. 小通道内两相流摩擦压降计算方法评价[J]. *核动力工程*, 2010, 31(4): 36-40.
SUN Licheng, YAN Changqi, SUN Zhongning. An evaluation of prediction methods for frictional pressure drop of two-phase flow in mini-channels [J]. *Nuclear Power Engineering*, 2010, 31(4): 36-40(in Chinese).
- [8] KEW P A, CORNWELL K. Correlations for the prediction of boiling heat transfer in small diameter channels[J]. *Applied Thermal Engineering*, 1997, 17(8-10): 705-715.