

窄矩形通道内两相流动压降特性研究

王广飞, 阎昌琪, 孙立成, 曹夏昕, 贾辉

(哈尔滨工程大学 核科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:以空气和水为工质,在 40 mm×1.6 mm 的窄矩形通道中对竖直向上气-液两相流动压降特性进行了实验研究。对比了现有的两相流动阻力计算关系式,结果表明,传统的计算关系式均不适用于窄矩形通道内两相流动阻力的计算;而以窄矩形通道为基础的 Lee-Lee 关系式误差相对较小,但预测值与实验值相比整体偏小。为此结合实验数据,以分液相-分气相雷诺数之比 Re_l/Re_g 为依据将流动分为两个区域,分别对 Chisholm 关系式进行修正,修正关系式与实验数据的误差较小,能够很好地预测本次实验结果。

关键词:窄矩形通道;摩擦阻力压降;洛克哈特-马蒂里参数

中图分类号:TL314

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2011)06-0677-05

Investigation on Resistance Characteristics of Two-Phase Flow Through Narrow Rectangular Duct

WANG Guang-fei, YAN Chang-qi, SUN Li-cheng, CAO Xia-xin, JIA Hui

(College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Two-phase frictional pressure drop of air-water mixture was studied in a narrow rectangular duct with cross-section 40 mm by 1.6 mm. The experimental results show that the conventional correlations fail to predict the two-phase frictional pressure drop in narrow rectangular duct; Lee-Lee correlation which is based on the rectangular duct gives a relatively good agreement with our experiment, but has lower values than the experimental data. Different modified Chisholm correlations were proposed in two regions which were distinguished by the ratio of liquid Reynolds number and gas Reynolds number. The modified correlation has a good agreement with the experimental data.

Key words: narrow rectangular duct; frictional pressure drop; L-M parameter

对于两相流动特性机理的研究大部分均是在内径大于 10 mm 的圆形通道内进行的,由于小通道的换热特性较常规通道好,其流动机理的研究越来越受到重视,目前小通道已广泛应用于紧凑式换热器和微处理器散热冷却上,但

在小通道内由于壁面摩擦力的增加,压降随之增加,特别是在小型蒸发器和冷凝器内^[1]。无论单相或两相流动压降均较常规尺寸通道内的压降大,传统的两相流动压降公式(均相模型、分相模型)均不适用于小通道内两相流动压降

的计算,因此必须寻求新的小通道两相流动压降计算关系式。目前对于窄矩形通道内两相流动的研究主要集中在国外^[1-4]。

研究人员曾对窄矩形通道内两相流动压降的计算公式做了很多的修正,但适用性不够,为此本文以空气和水为实验工质,对窄矩形通道内两相流动压降特性进行研究,在实验参数范围内重新对 Chisholm 关系式进行修正。

1 实验装置与实验方法

实验装置示于图 1,整个实验装置由供水系统、供气系统、实验段和数据采集系统等 4 部分组成,实验工质为压缩空气和水。其中压缩空气回路中空气经由空气压缩机增压后存储在储气罐内,经过汽水分离器将汽水分离,再经由稳压阀将气压保持在稳定值,进入汽水混合室内与水混合后进入实验段,流经实验段的工质水直接进入循环水箱,而空气则直接排向大气。

实验管段示于图 2,为有机玻璃制成,截面为 $40\text{ mm} \times 1.6\text{ mm}$,长度 $2\ 000\text{ mm}$,竖直固定于实验台架上。两取压孔间的距离为 $1\ 500\text{ mm}$,压差通过分别测量两个引压孔的压力得到,采用 KELLER 公司的 PR35X 型压力变送器。气体和液体流量测量采用精度等级为 0.2 的质量流量计,数据采集采用 NI 采集系统。实验中两个引压孔的压力信号及气体和液体质量流量计的流量信号通过 NI 采集系统读入计算机,并通过专门软件处理存储。为保证测量信号的实时性,设定采样频率为 256 Hz ,采集时间为 20 s ,准确记录压力与流量信号的变化。

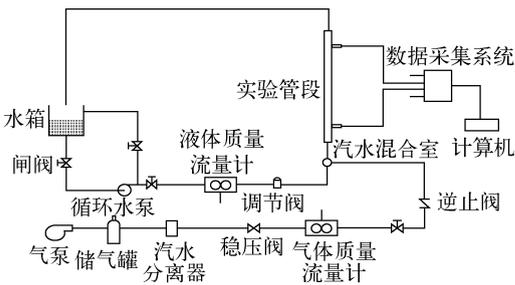


图 1 实验装置系统流程图

Fig. 1 Scheme of experimental apparatus

实验在常压下进行,气体和液体的流量分别为 $0.03 \sim 5.01\text{ kg/h}$ 和 $75 \sim 931\text{ kg/h}$ 。实验

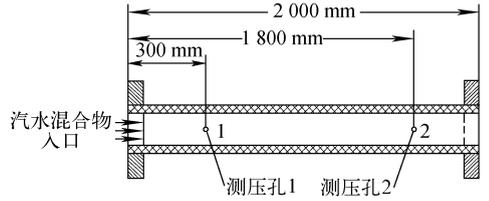


图 2 实验段示意图

Fig. 2 Scheme of test section

时,先启动气泵,将储气罐内的空气保持在较高压力,调节稳压阀,将气体经过稳压阀后的压力维持在 0.2 MPa ,打开气回路阀门,再启动水泵,通过调节阀来调节水流量。实验过程中每次稳定 1 个水流量,然后将气流量依次由小到大调节,待每个工况稳定后,记录要测量的实验数据,完成 1 个循环,然后再增大水流量,重复调节气流量。在依次调大气流量的过程中,水流量会减小。实验完毕后应先关闭供水回路,然后再关闭供气回路。

2 实验数据处理

竖直管内两相流动压降包括摩擦压降、重位压降和加速压降,其中对于空气和水的两相流动,加速压降可忽略不计,即流动总压降 Δp_t 只包含摩擦压降 Δp_f 和重位压降 Δp_g 两部分:

$$\Delta p_t = \Delta p_f + \Delta p_g \quad (1)$$

实验中,压差传感器直接安装在引压孔上面,无引压管路,因此两个引压孔测量的压力直接相减即为流动的总压降。为获得摩擦压降数据,首先须从总压降中除去重位压降。重位压降的计算采用分相模型:

$$\Delta p_g = \int_0^L \rho_0 g \sin \theta dz = \int_0^L [\rho_l \alpha + \rho_g (1 - \alpha)] g \sin \theta dz \quad (2)$$

式中: L 为管道长度; α 为空泡份额; ρ_0 为气液混合相密度; ρ_l 和 ρ_g 为液相密度和气相密度。

对于绝热流动,空泡份额 α 沿通道长度不变,则重位压降为:

$$\Delta p_g = [\rho_l \alpha + \rho_g (1 - \alpha)] g \sin \theta \cdot L \quad (3)$$

式(3)中重位压降计算涉及一关键参数 α , Jones 等^[5]对窄矩形通道内空泡份额的计算进行了研究,得出漂流流模型可很好地用于矩形通道内空泡份额的计算,并得出下式:

$$j_g / \alpha = C_0 j + (0.23 + 0.13s/w) \sqrt{\Delta \rho g w / \rho_l} \quad (4)$$

式中: C_0 为漂移流模型中分布参数; j 为表观速度, m/s ; s 和 w 为矩形通道的短边和长边长度, m ; $\Delta\rho$ 为气液密度差, kg/m^3 ; g 为重力加速度, $9.81 m/s^2$ 。文中空泡份额计算采用式(4)。

式(4)中 C_0 采用Ishii^[6]提出的对于矩形通道分布参数的计算式:

$$C_0 = 1.35 - 0.35 \sqrt{\rho_g/\rho_l} \quad (5)$$

矩形通道内单相水流动摩擦阻力系数不同于圆管,文中层流区单相水摩擦阻力系数的计算采用Hartnett等的多项式简化方程^[7]:

$$\lambda_l = C_1 Re_D^{-1} = 96(1 - 1.355 3a + 1.946 7a^2 - 1.701 2a^3 + 0.956 4a^4 - 0.253 7a^5) Re_D^{-1} \quad (6)$$

式中: λ_l 为矩形通道内沿程摩擦阻力系数; a 为矩形通道的短边与长边之比。

Sadatomi等^[8]通过研究得出了考虑通道几何形状层流与湍流沿程摩擦阻力系数关系的计算式:

$$C_t = C_{t0} [(0.015 4C_1/C_{t0} - 0.012)^{1/3} + 0.85] \quad (7)$$

$$\lambda_t = C_t Re^{-0.25} \quad (8)$$

式中: λ_t 为任意形状流道湍流区沿程摩擦阻力系数; $C_{t0} = 64, C_{t0} = 0.316 4$,分别为光滑圆管内层流和湍流沿程摩擦阻力系数计算关系式中常数项。本文通过式(7)、(8)计算矩形通道内湍流时沿程摩擦阻力系数。

3 实验结果及分析

本文采用均相模型、Chisholm C系数法、Chisholm B系数法^[9]、Friedel模型^[10]、Tran模型^[11]、Mishima模型、Lee-Lee模型、Zhang模型和Licheng Sun模型进行了预测,并与实验结果进行了比较。比较结果如图3所示。误差分析结果列于表1。

由图3和表1可看出,传统计算模型(均相模型、Chisholm B系数法和C系数法及Friedel模型)预测值均小于实验值,传统模型均是基于常规通道内两相流动所提出的,而对于窄矩形通道,流动空间狭小,气泡的运动受到壁面的限制,气泡受到挤压发生变形,种种因素导致了窄矩形通道内两相流动阻力的增加,Friedel模型是根据大量的实验数据总结得出的,误差相对较小。Mishima模型等虽是基于窄矩形通道内的两相流动所提出的,但实验误差仍较大,除Tran模型外其它模型预测值均小于实验值,由图3及表1可知, Lee-Lee关系式相对其它模型误差较小,但预测值与实验值相比整体偏小,尤其在流动阻力较小的区域。通过上述分析可知,须对现有模型进行新的修正,以满足本实验条件下两相流动摩擦阻力的计算。

本文依然是对Chisholm关系式进行修正, Chisholm关系式为:

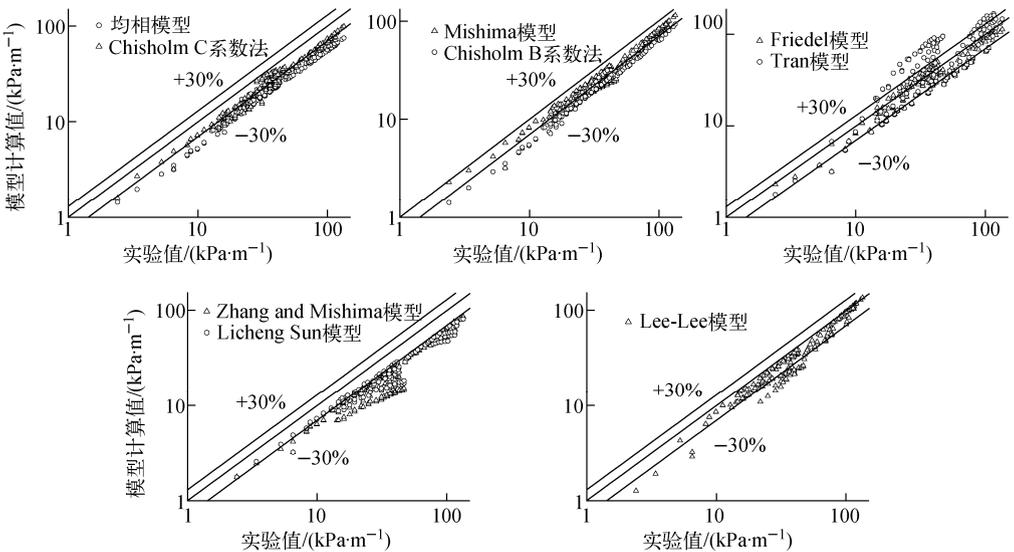


图3 实验值与各模型预测值比较

Fig. 3 Comparison between experimental data and different models results

表 1 模型平均绝对误差及平均误差比较

Table 1 Mean deviation and average deviation calculated for different pressure drop correlations

误差	均相	C 系数	B 系数	Friedel	Miahima	Tran	Zhang	Licheng Sun	Lee-Lee
平均绝对误差, %	38.78	29.00	36.46	21.63	24.80	44.08	42.47	38.29	19.19
平均误差, %	-38.78	-29.00	-36.46	-19.56	-24.80	-21.34	-42.47	-38.29	-19.14

$$\Phi_1^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (9)$$

式中: Φ_1^2 为分液相折算系数; X 为洛克哈特-马蒂里参数; C 为 Chisholm 常数, 代表两相相互作用程度。

Chisholm 依据分液相和分气相雷诺数将流动分为 4 个区 (ll, tl, lt, tt), 4 个区对应的 C 分别为 5、10、12 和 20, 对应的 Chisholm 关系式曲线示于图 4。即 Chisholm 关系式曲线随 C 增大向右上平移, 与实验数据均不相符。

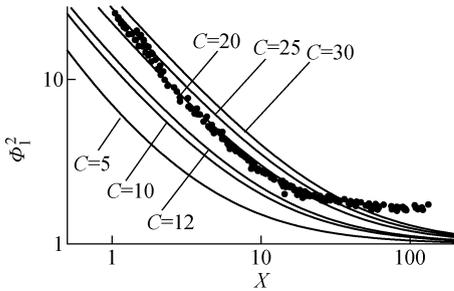


图 4 实验折算系数与 Chisholm 计算值比较

Fig. 4 Comparison between experimental data and Chisholm method result

文献[4]认为, 摩擦压降计算关系式中, Chisholm 关系式中两相相互作用项中 X 的指数不是 1, 参照其形式, 通过对实验数据中 Φ_1^2 与 X 进行拟合, 得到式(10), 如图 5 所示。

$$\Phi_1^2 = 1 + \frac{24.5}{X^{1.13}} + \frac{1}{X^2} \quad (10)$$

由图 5 可看出, 在 $X < 10$ 的区间内拟合值与实验值符合较好, 但在 $X > 10$ 的区间内拟合值与实验值有较大的偏差, 仍不能用来预测实验数据。 X 为分液相压降与分气相压降之比的平方根, X 越大, 则表明两相流动压降中分液相压降所占比例越大。通过对实验数据的分析发现, 分液相折算系数 Re_1/Re_g 受分液相-分气相雷诺数之比影响很大(图 6), X 为随分液相-分气相雷诺数之比递增的函数, 当 $X = 10$ 时, 对

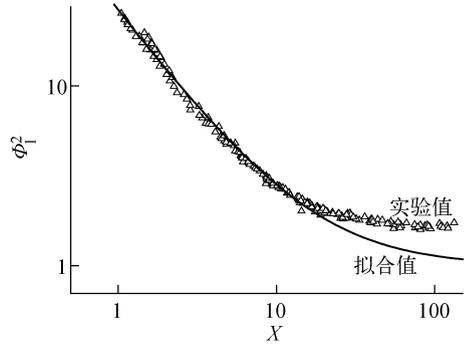
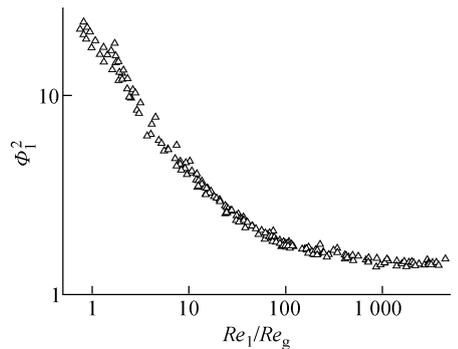


图 5 拟合关系式(10)与实验值对比

Fig. 5 Comparison between fitting correlation (10) and experimental data

应的 Re_1/Re_g 约为 30, 为此, 以 $Re_1/Re_g = 30$ 进行分界。在 $Re_1/Re_g < 30$ 的区间内, 仍采用式(10)的形式进行拟合, 得出:

$$\Phi_1^2 = 1 + \frac{24.7}{X^{1.16}} + \frac{1}{X^2} \quad (11)$$

图 6 Φ_1^2 与 Re_1/Re_g 关系Fig. 6 Relationship between Φ_1^2 and Re_1/Re_g

通过实验数据还可得出, 式(9)中的 C 受 Re_1/Re_g 影响很大, 尤其当 $Re_1/Re_g > 30$ 时。 C 与 Re_1/Re_g 关系示于图 7。则式(9)可修正为:

$$\Phi_1^2 = 1 + \frac{C(Re_1/Re_g)}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (12)$$

其中: C 为 Re_1/Re_g 的函数。

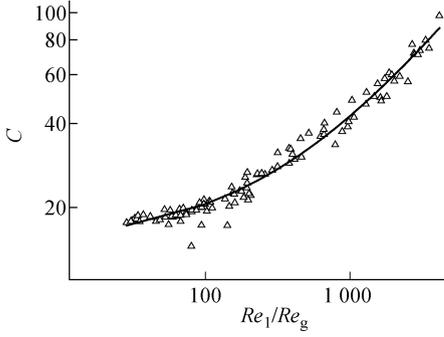


图7 C与 Re_1/Re_g 关系

Fig. 7 Relationship between C and Re_1/Re_g

对实验数据进行拟合得出如下关系式:

$$C = 0.25(Re_1/Re_g)^{0.68} + 14.7 \quad (13)$$

修正后的计算关系式计算压降与实验值符合较好,平均误差为3.17%,如图8所示。

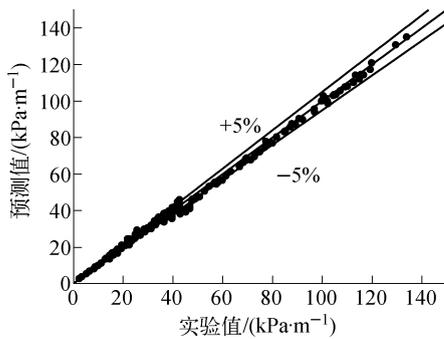


图8 预测值与实验值对比

Fig. 8 Comparison between new correlation and experimental data

4 结论

1) 窄矩形通道内两相流动阻力大于常规尺寸圆管内两相流动阻力,现有的两相流动阻力计算公式均不适用于窄矩形通道。

2) Lee-Lee 关系式相对其它模型误差较小,但预测值与实验值相比整体偏小。

3) 根据实验数据,依据分液相-分气相雷诺数之比将流动分为两个区间,分别对Chisholm关系式进行修正,在 $Re_1/Re_g < 30$ 时,将两相相互作用项中C和X重新修正;在 $Re_1/Re_g > 30$ 时,将C表示为 Re_1/Re_g 的函数。修正后的计算关系式与实验数据符合较好,平均误差为3.17%。

参考文献:

- [1] LEE H J, LEE S Y. Pressure drop correlations for two phase flow within horizontal rectangular channels with small heights[J]. Int J Multiphase Flow, 2001, 27(5): 783-796.
- [2] MISHIMA K, HIBIKI T, NISHIHARA H, et al. Some characteristics of gas-liquid flow in narrow rectangular ducts [J]. Int J Multiphase Flow, 1992, 19(1): 115-124.
- [3] ZHANG W, HIBIKI T, MISHIMA K. Correlations of two-phase frictional pressure drop and void fraction in minichannel[J]. Int J of Heat Mass Transfer, 2009, 53(1): 453-465.
- [4] LICHENG S, MISHIMA K. Evaluation analysis of prediction methods for two phase flow pressure drop in minichannels[J]. Int J Multiphase Flow, 2009, 35(1): 47-54.
- [5] JONES O C, ZUBER N. Slug-annular transition with particular reference to narrow rectangular ducts in two phase momentum [J]. Heat and Mass Transfer in Chemical, Process and Energy Engineering Systems, 1979, 1(3): 345-355.
- [6] ISHII M. One-dimensional drift-flux model and constitutive equations for relative motion between phases in various two phase flow regimes, ANL-77-47[R]. [S.l.]: ANL, 1977.
- [7] HARTNETT J P, KOSTIC M. Heat transfer to Newtonian and non Newtonian fluids in rectangular ducts[J]. Adv Heat Transfer, 1989, 19(1): 247-356.
- [8] SADATOMI Y, SATO Y, SARUWATARI S. Two-phase flow in vertical noncircular channels [J]. Int J Multiphase Flow, 1982, 8(6): 641-655.
- [9] CHISHOLM D. Pressure gradients due to friction during the flow of evaporating two-phase mixtures in smooth tubes and channels[J]. Int J Heat Mass Transfer, 1973, 16(2): 347-358.
- [10] FRIEDEL L. Improved friction pressure drop correlations for horizontal and vertical two phase pipe flow[C]//European Two-Phase Flow Group Meeting. Italy: [s. n.], 1979: E2.
- [11] TRAN T N, CHYU M C, WAMBSGANSS M W, et al. Two-phase pressure drop of refrigerants during flow boiling in small channels: An experimental investigation and correlation development[J]. Int J Multiphase Flow, 2000, 26(11): 1 739-1 754.