

棒束通道内两相流动摩擦阻力特性分析

田齐伟, 阎昌琪*, 孙立成, 闫超星

(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: 常温常压下, 对竖直 3×3 棒束通道内气液两相流动阻力特性进行了实验研究。利用所获得的实验数据, 对 8 种典型的两相流动摩擦压降计算模型进行了评价。结果表明, 均相模型在两相流速较高时精度较高, 在两相流速较低时则偏差较大。分相模型中, Friedel 模型和 Lombodi-Pedrocchi 模型不适用于本实验条件下棒束通道内气液两相流动摩擦压降的计算。Chisholm C 模型、Zhang-Mishima 模型、Chisholm B 模型、Mishima-Hibiki 模型及 L. Sun 模型的预测值与实验值的平均相对误差介于 20%~30% 之间。基于实验数据, 通过修正 Chisholm C 模型的 C 系数, 给出一个新的修正模型, 其计算值与实验值符合良好。

关键词: 棒束通道; 两相流动; 摩擦阻力; Chisholm C 模型

中图分类号: TL334

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2015)05-0819-06

doi: 10.7538/yzk.2015.49.05.0819

Analysis of Frictional Resistance of Two-phase Flow in Rod Bundle Channel

TIAN Qi-wei, YAN Chang-qi*, SUN Li-cheng, YAN Chao-xing

(Fundamental Science on Nuclear Safety and Simulation Technology Laboratory,
Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The experimental investigation of air-water two-phase flow resistance characteristics in a vertical channel with a 3×3 rod bundle was carried out under atmospheric and room temperature conditions. Eight classical correlations for predicting frictional pressure drop of two-phase flow were evaluated against the experimental data. The experimental results show that the homogeneous model can predict the experimental data well at high flow rates, but with relatively large deviations at low flow rates. Both the Friedel model and the Lombodi-Pedrocchi model are not suitable any longer for the present case. The Chisholm C model, the Zhang-Mishima model, the Chisholm B model, the Mishima-Hibiki model and the L. Sun model can well predict the experimental data with mean relative errors in the range of 20%-30%. The C factor in the Chisholm C model was modified for giving a new correlation to predict the frictional

收稿日期: 2014-01-16; **修回日期:** 2014-03-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11175050, 51376052)

作者简介: 田齐伟(1988—), 男, 河北沧州人, 硕士研究生, 从事反应堆热工水力及气液两相流研究

* **通信作者:** 阎昌琪, E-mail: Changqi_yan@163.com

pressure drop of two-phase flow through rod bundles, showing a good agreement with the experimental data.

Key words: rod bundle channel; two-phase flow; frictional resistance; Chisholm C model

棒束型燃料元件作为压水反应堆、沸水反应堆堆芯的主体结构,其内部的流动和换热特性对反应堆的设计和安全运行起着至关重要的作用。棒束通道由于其流道结构的复杂性,通道内的流动阻力特性与常规圆管有很大不同。准确计算棒束通道内的流动阻力特性,一方面可降低主泵功率的设计裕量,有效减少厂用电损失,另一方面,可更准确地计算堆内冷却剂的流量分配,提高反应堆的设计水平和安全性。

目前,棒束通道两相摩擦压降的计算大多采用基于圆管的计算方法,但由于棒束通道内流动的复杂性,其有效性还有待考证。因此,本文结合 3×3 棒束通道气液两相流动摩擦压降实验数据,对相应的计算方法在棒束通道内的适用性进行评价,并在此基础上提出相应的修正方法。

1 实验装置

实验系统(图 1)由水循环回路、气回路、实验段和数据采集系统组成。实验以常温常压(20 ℃,0.1 MPa)下的空气和水为工质,空气经压气机压缩,通过减压阀将流量计入口空气压力维持在 0.3 MPa。空气流过气体流量计后,进入混合腔,并与水进行混合,之后流入实验段。水循环驱动压头由多级离心泵提供,水依次流经流量调节阀、流量计、混合腔和实验

段。在实验段出口,气液混合物依靠重力自然分离,空气排入大气,水则返回水箱。

棒束实验段截面如图 2 所示,外壳采用 34 mm×34 mm 的正方形有机玻璃通道,内部 9 根(3×3)有机玻璃棒呈正方形排列,棒径为 8 mm,棒中心距为 11 mm,外侧棒中心距外壳 6 mm。实验段总长 2 000 mm,有机玻璃棒通过 3 个定位格架进行固定。实验段通过法兰连接到实验回路上。

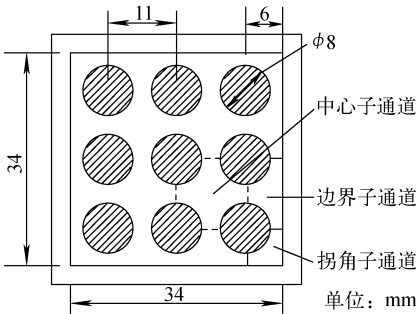


图 2 棒束实验段结构

Fig.2 Structure of rod bundle channel

实验中采集的数据主要包括气流量、水流量、温度及实验段内的压力等。气流量通过 3 个气体质量流量计测量,型号分别为 GFM17、GFM37、GFM57,对应量程依次为 0~10、0~50、0~200 L/min,精度等级均为 1 级。水流量通过德国 E+H 的 PROMASS83 质量流量计测量,量程为 0~6 500 kg/h,0.1 级精度。水温在水箱回水口取样测量,气体温度以室温为准。沿程静压由 GE 公司的 UNIK5000 型压力传感器测量,精度等级为 0.04。两个压力传感器的量程分别为 0~100、0~200 kPa,分别布置在距通道入口 1 060 mm 和 1 410 mm 处的两个定位格架之间。流量和对应压力信号通过 NI 数据采集系统传输给计算机,采样频率为 256 Hz。

实验在常压和室温下进行,气液两相表观速度分别为 0.094~5.303 m/s 和 0.196~1.793 m/s。

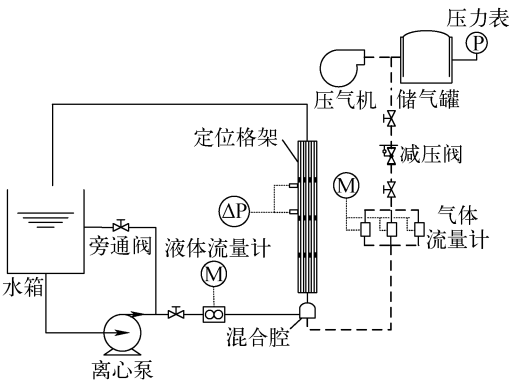


图 1 实验系统流程图

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

2 实验数据处理与误差分析

竖直绝热条件下,棒束通道内两相流动总压降 Δp 由重位压降 Δp_{gr} 和摩擦压降 Δp_f 两部分组成。

$$\Delta p = \Delta p_{gr} + \Delta p_f \quad (1)$$

重位压降 Δp_{gr} 可按下式计算:

$$\Delta p_{gr} = (\alpha \rho_g + (1 - \alpha) \rho_l) g h \quad (2)$$

其中: α 为截面含气率; g 为重力加速度, m/s^2 ; h 为两测压点间的高度差, m ; ρ_g 、 ρ_l 分别为气液两相密度, kg/m^3 。

对于棒束通道内截面含气率的计算方法, Coddington 等^[1] 依据大量实验数据进行了分析, 发现 Chexal-Lellouche^[2] 模型的效果较好, 特别是在低压条件下。因此本文采用此模型计算通道内截面含气率, 方法如下:

$$j_g/\alpha = C_0 j + \ll v_{gj} \gg \quad (3)$$

其中: j_g 、 j 分别为气相表观速度与气液混合物表观速度, m/s ; C_0 为分布参数; $\ll v_{gj} \gg$ 为漂移速度, m/s 。 C_0 由下式计算:

$$C_0 = \frac{L}{K_0 + (1 - K_0) \langle \alpha \rangle^r} \quad (4)$$

L 为与压力和截面含气率有关的参数, 按式(5)计算, 参数 C_1 与系统压力 p 及临界压力 p_{crit} 有关。 $\langle \alpha \rangle$ 为截面含气率平均值, 在此等于 α 。

$$L = \frac{1 - e^{-C_1 \langle \alpha \rangle}}{1 - e^{-C_1}} \quad (5)$$

$$C_1 = \frac{4 p_{crit}^2}{p(p_{crit} - p)} \quad (6)$$

K_0 为与两相相对密度及雷诺数有关的参数, 计算方法见式(7)~(9), 其中参数 B_1 与雷诺数有关, Re 为分相雷诺数中的最大值。

$$K_0 = B_1 + (1 - B_1) (\rho_g/\rho_l)^{0.25} \quad (7)$$

$$B_1 = \min \left(0.8, \frac{1}{1 + \exp(-Re/60\,000)} \right) \quad (8)$$

$$Re = \max(Re_l, Re_g) \quad (9)$$

其中: Re_l 为分液相雷诺数; Re_g 为分气相雷诺数。

参数 r 与两相相对密度及雷诺数有关。

$$r = \frac{1 + 1.57 \rho_g/\rho_l}{1 - B_1} \quad (10)$$

式(3)中的 $\ll v_{gj} \gg$ 按下式计算:

$$\ll v_{gj} \gg = 1.41 (g \sigma \Delta \rho / \rho_l^2)^{0.25} C_2 C_3 C_4 C_9 \quad (11)$$

其中: σ 为表面张力系数, N/m ; $\Delta \rho$ 为气液两相密度差, kg/m^3 ; 修正参数 C_2 与两相密度有关。

$$C_2 = \begin{cases} 0.4757 (\ln(\rho_l/\rho_g))^{0.7} & \rho_l/\rho_g \leq 18 \\ 1 & \rho_l/\rho_g > 18, C_5 \geq 1 \\ (1 - \exp(-C_5/(1 - C_5)))^{-1} & \rho_l/\rho_g > 18, C_5 < 1 \end{cases} \quad (12)$$

C_5 为与两相相对密度有关的参数:

$$C_5 = (150 \rho_g/\rho_l)^{1/2} \quad (13)$$

C_3 与分液相雷诺数有关:

$$C_3 = \max(0.5, 2 \exp(-Re_l/60\,000)) \quad (14)$$

C_4 为与 D_e 有关的修正参数:

$$C_4 = \begin{cases} 1 & C_7 \geq 1 \\ (1 - \exp(-C_7/(1 - C_7)))^{-1} & C_7 < 1 \end{cases} \quad (15)$$

C_7 表示为:

$$C_7 = (0.09144/D_e)^{0.6} \quad (16)$$

C_9 与截面含气率有关:

$$C_9 = (1 - \langle \alpha \rangle)^{B_1} \quad (17)$$

截面含气率需迭代计算, 迭代初值采用体积含气率 β , 直至迭代收敛。计算出截面含气率, 便可从总压降中剥离出摩擦压降。

本文采用文献[3]中的不确定度计算方法分析测量参数的误差范围。各类不确定度分析结果列于表1。其中, A类不确定度 Δ_A 指根据所测数据统计分析得出的不确定度; B类不确定度 Δ_B 是指仪表及采集系统引入的系统误差; 使用均方根合成法表示总不确定度 Δ 。

表1 测量参数的不确定度

Table 1 Uncertainties of measured parameters

测量参数	$\Delta_A/\%$	$\Delta_B/\%$	$\Delta/\%$
气流量	0.007~0.187	1.005	1.005~1.022
液流量	0.931~7.712	0.141	0.942~7.713
压力	0.064~0.535	0.108	0.126~0.298

3 计算模型评价

基于棒束通道实验数据, 本文对均相模型和分相模型中的 Chisholm B/C 模型^[4]、Friedel 模型^[5]、Lombodi-Pedrocchi 模型^[6]、Zhang-Mishima 模型^[7]、Mishima-Hibiki 模型^[8]、L. Sun 模型^[9] 等共8种两相摩擦压降计算方法的适用性进行了评价分析。

单相摩阻系数的计算,采用 Cheng 等^[10]的棒束通道摩阻系数计算方法,将棒束通道划分为中心子通道、边界子通道和拐角子通道 3 种类型(图 2)。棒束通道与其子通道的摩阻系数均按下式计算:

$$\lambda_i = K_i / Re_i^m \tag{18}$$

其中: λ 为摩阻系数; K 为摩阻系数几何因子; Re 为雷诺数;角标 $i=1、2、3、b$ 分别对应中心子通道、边界子通道、拐角子通道及棒束整体;层流时 $m=1$,紊流时 $m=0.18$ 。

子通道摩阻系数几何因子 K_i 与棒束中心距 P 与棒径 D 的比值 P/D 有关,即:

$$K_i = a + b_1(P/D - 1) + b_2(P/D - 1)^2 \tag{19}$$

其中, $a、b_1、b_2$ 取决于流动状态及 P/D 值。

棒束整体几何因子为:

$$K_b = D_{cb} \left(\sum_{i=1}^3 S_i (D_{ei} / D_{cb})^{\frac{m}{2-m}} (K_i / D_{ei})^{\frac{1}{m-2}} \right)^{m-2} \tag{20}$$

其中: D_e 为通道当量直径, m ; $S_i = N_i A_i / A_b$, N_i 为各类子通道数目, A_i 为对应通道面积, m^2 。

图 3 为摩擦压降梯度各模型计算值与实验值的对比。相应的统计性分析结果列于表 2。

表中列出了各模型计算结果的平均相对误差以及相对误差在 $\pm 30\%、\pm 50\%$ 以内数据点所占的比例。其中,平均相对误差(MRE)的计算方法为:

$$MRE = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{\Delta p_{exp} - \Delta p_{pred}}{\Delta p_{exp}} \right| \times 100\% \tag{21}$$

均相模型的 MRE 为 24.64%,计算精度较高,但由图 3 可看出,其在摩擦压降相对较高时预测值很好,较低时偏差较大,说明均相模型不太适合于气液流速较低的工况。这可能是因为低流速下,气相由于浮力作用,相对速度快于液相,气液滑速比较大所致;高流速下气液搅混明显,两相运动过程更趋于均相流。

分相模型中 Friedel 和 Lombodi-Pedrocchi 模型的 MRE 分别为 72.74%和 95.72%,且相对误差在 $\pm 30\%、\pm 50\%$ 以内的数据点所占比例很低,说明这两种模型并不适用于本实验条件下的棒束通道。L. Sun 指出 Friedel 模型更适用于有机制冷剂的两相流动。而 Lombodi-Pedrocchi模型适用于压力相对较高、气液密度差较小的两相流动工况。

此外,由表2可看出Zhang-Mishima模型、

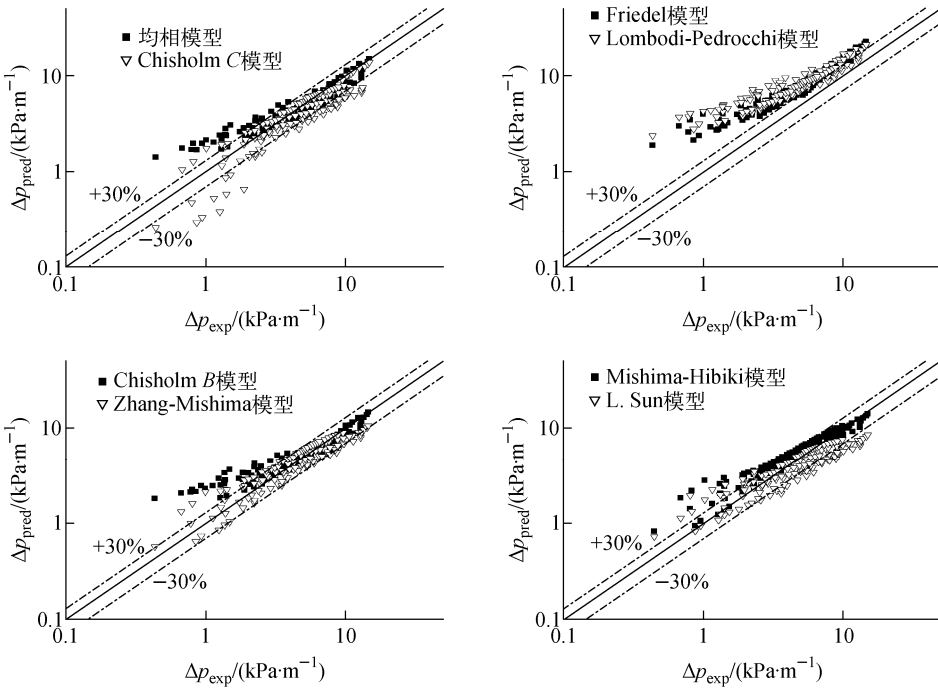


图 3 摩擦压降梯度各模型计算值与实验值比较

Fig. 3 Comparison between experimental data and calculated values of frictional pressure drop gradient by different models

Chisholm C 模型、L. Sun 模型、Mishima-Hibiki 模型、Chisholm B 模型的 MRE 依次增大,但均介于 20%~30% 之间,预测精度相差不大。MRE 相对较小的 Zhang-Mishima 模型和 Chisholm C 模型,在气液流速相对较低、摩擦压降相对较小的工况下,MRE 的散度偏大,气液流速较高、摩擦压降较大时预测值偏低。Chisholm B 模型和 Mishima-Hibiki 模型在摩擦压降相对较高时,预测效果较好,在摩擦压降较低时,预测值偏大。L. Sun 模型在摩擦压降较小时,预测值偏高,而摩擦压降较大时,预测值偏低。

表 2 不同模型误差的统计性分析

Table 2 Statistical analysis of errors of different models			
模型	MRE/%	±30%数据点 所占比例/%	±50%数据点 所占比例/%
均相模型	24.64	76.12	86.57
Chisholm C	22.50	66.42	93.28
Chisholm B	28.81	76.87	82.09
Friedel	72.47	8.96	47.01
Lombodi-Pedrocchi	95.72	10.45	34.33
Zhang-Mishima	21.49	80.60	95.52
Mishima-Hibiki	27.73	67.91	88.06
L. Sun	26.46	58.96	92.54

4 修正模型提出

Chisholm C 模型中 C 系数的确定是以雷诺数等于 2 000 为界,划分为层流和紊流,进而给出 C 值。但在棒束通道内,针对层流和紊流的划分,不同学者的观点各异。Cheng 等^[10]认为棒束通道内层流和紊流的划分受 P/D 影响明显,且存在较大的过渡区。Rehme^[11]认为棒束通道中不存在层流到紊流的突变,而存在一个摩擦系数指数值由 -1 到 -0.2 的渐变过程。当主流区达紊流时,两棒之间及棒与壁面之间的区域仍有可能处于层流状态。因此,以圆管临界雷诺数 2 000 为界划分流态进而确定 C 值的方法,并不适用于棒束通道,从而导致偏差较大。

基于上述原因,本文以 Chisholm C 模型为基础,通过对 C 系数进行修正,给出适合于棒

束通道的摩擦压降计算方法。Chen 等^[12]认为 Chisholm C 模型的 C 系数与全液相雷诺数 Re_{l0} 及马蒂内利参数 X 有关。在此基础上,同时考虑 Re_l 、 Re_g 对 C 系数的影响,得出如下修正关系式:

$$C = 0.012(Re_g/Re_l)^{2.09} Re_{l0}^{0.74} X^{2.38} \tag{22}$$

摩擦压降梯度的修正关系式计算值与实验值的对比如图 4 所示。统计性分析表明,修正关系式计算值的平均相对误差为 15.45%,相对误差在 ±30% 及 ±50% 范围内的数据点所占比例分别为 88.81% 和 94.78%,总体效果好于其他模型,且提高了气液流速较低工况时的预测精度。

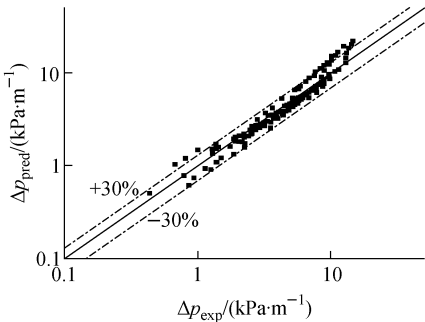


图 4 摩擦压降梯度修正关系式计算值与实验值对比
Fig. 4 Comparison between predicted values by new correlation and experimental data of frictional pressure drop gradient

5 结论

以常温常压下的空气和水为工质,对竖直 3×3 棒束通道内的两相流动摩擦阻力特性进行了实验研究,并对 8 种两相摩擦压降计算方法的适用性进行了评价,得出的主要结论如下:

- 1) 在两相流速较高时,气液两相搅浑明显,均相模型的预测精度较高,而两相流速较低时,由于浮力作用,滑速比偏大,均相模型预测偏差较大。
- 2) Friedel 模型和 Lombodi-Pedrocchi 模型的预测结果偏差很大,不适用于计算常温常压下棒束通道内气液两相流动的摩擦压降。
- 3) Chisholm C 模型、Zhang-Mishima 模型、Chisholm B 模型、Mishima-Hibiki 模型及 L. Sun 模型的预测值与实验值的平均相对误差介于 20%~30% 之间,预测精度相差不大,

但在一定参数范围内,偏差较大。

4) 基于实验数据,以 Chisholm C 模型为基础,对 C 系数进行了修正,修正方法的计算值与实验值的平均相对误差为 15.45%,对气液流速较低工况的预测效果较好。

本实验以空气和水为工质,对棒束通道内两相流动摩擦阻力特性进行了研究。相对于空气和水的两相流动,加热或冷凝实验中的气水两相流动由于相变而产生的传热和传质等过程,其流动特性更为复杂。对于加热及冷凝通道内的两相流动摩擦阻力特性的预测大多基于绝热通道阻力关系式,并考虑热平衡含气率等因素的影响。本实验研究可为加热或冷凝条件下的棒束通道内气水两相流动提供实验上的参考。

参考文献:

[1] CODDINGTON P, MACIAN R. A study of the performance of void fraction correlations used in the context of drift-flux two-phase flow models [J]. Nuclear Engineering and Design, 2002, 215: 199-216.

[2] CHEXAL B, LELLOUCHE G, HOROWITZ J, et al. A void fraction correlation for generalized applications [J]. Progress in Nuclear Energy, 1992, 27(4): 255-295.

[3] 陆廷济,忽的敬,陈铭南. 物理实验教程[M]. 上海:同济大学出版社,2000:14-15.

[4] 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.

- [5] FRIEDEL L. Improved friction pressure drop correlations for horizontal and vertical two-phase pipe flow[C]//European Two-Phase Flow Group Meeting, Paper E2. [S. l.]: [s. n.], 1979.
- [6] HETSRONI G. 多相流动和传热手册[M]. 鲁钟琪,等译. 北京:机械工业出版社,1993.
- [7] ZHANG W. Study on constitutive equations for flow boiling in mini-channels[D]. Japan: Kyoto University, 2006.
- [8] MISHIMA K, HIBIKI T. Some characteristics of air-water flow in small diameter vertical tubes [J]. Int J Multiphase Flow, 1996, 22: 703-712.
- [9] SUN L C, MISHIMA K. Evaluation analysis of prediction methods for two phase flow pressure drop in mini-channels [J]. Int J Multiphase Flow, 2009, 35(1): 47-54.
- [10] CHENG S K, TODREAS N E. Hydrodynamic models and correlations for bare and wire-wrapped hexagonal rod bundles-bundle friction factors, subchannel fraction factors and mixing parameters[J]. Nuclear Engineering and Design, 1986, 92: 227-251.
- [11] REHME K. Pressure drop performance of rod bundles in hexagonal arrangements [J]. Int J Heat Mass Transfer, 1972, 15: 2 499-2 517.
- [12] CHEN I Y, CHEN Y M. Two-phase flow pattern and frictional performance across small rectangular channels[J]. Applied Thermal and Fluid Science, 2002, 26(2): 389-407.