

研究论文

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20170747

棒束通道内自然循环流动阻力特性

朱智强, 阎昌琪, 王建军, 田春平

(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: 在自然循环条件下, 进行了棒束通道内的流动阻力特性实验研究。结果表明, 棒束通道内的流动摩擦阻力系数小于 Cheng & Todreas 关系式的预测值, 且转捩现象不如圆管明显, 转捩点 Reynolds 数为 800 左右。根据实验结果拟合了层流区的摩擦阻力系数计算关系式, 该关系式仍然符合圆管中层流摩擦阻力系数的计算形式。另外, 棒束通道的流动在自然循环条件下仍具有宽广的过渡区。通过实验还发现, 加热段的热通量会影响棒束通道的摩擦阻力, 摩擦阻力系数随热通量的增大而减小, 并根据实验结果提出了不同热通量下摩擦阻力系数的黏度修正计算式。棒束定位格架的局部阻力没有明显的转捩现象, 并根据局部阻力系数的变化规律拟合了 $Re < 1500$ 和 $Re > 2000$ 时的局部阻力系数计算关系式。

关键词: 棒束通道; 层流; 过渡; 流体力学; 自然循环; 流动阻力; 热通量

中图分类号: TL 334

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2018) 04—1398—07

Flow resistance characteristics in rod bundle channel under natural circulation condition

ZHU Zhiqiang, YAN Changqi, WANG Jianjun, TIAN Chunping

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

Abstract: Rod bundle channel is widely applied as reactor core coolant passage, in which the flow characteristic is of great significance for safe operation of the reactor, it is necessary to do some experimental investigations on it. The flow resistance characteristics experiments were performed under natural circulation condition. It was found that the friction factor is less than predicted value by Cheng & Todreas correlation and has no obvious rise when the flow transition happens, which is different from the results in regular channel. A correlation to calculate the friction factor in laminar regime was proposed and it also has the same form with the correlation in regular channel. In addition, there is still a large transition region for friction factor in rod bundle channel under natural circulation condition. Based on the experimental results with different heat flux, it was found that the friction factor decreased with the rise of heat flux and viscosity revision was considered. As for local resistance at the spacer grid, no obvious flow transition occurred and correlations for local resistance calculation were fitted in different range of Reynolds number.

Key words: rod bundle channel; laminar flow; transition; fluid mechanics; natural circulation; flow resistance; heat flux

2017-06-09 收到初稿, 2017-10-13 收到修改稿。

联系人: 王建军。第一作者: 朱智强 (1993—), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11675045)。

Received date: 2017-06-09.

Corresponding author: Prof. WANG Jianjun, wangjianjunheu@163.com

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (11675045).

引言

棒束通道广泛存在于工业换热设备以及核反应堆燃料组件中,由于其特殊的几何结构,流体流过棒束通道时的流型及阻力特性与常规通道有较大区别,作为反应堆芯冷却剂的主要通道形式,棒束通道内的流动特性对反应堆的安全运行有重要意义。因此有必要对棒束通道开展流动阻力研究。

关于棒束通道的阻力特性研究已经进行了几十年,但是由于通道截面的结构比较复杂,未能得到棒束通道内摩擦阻力系数的理论解。因此公开发表的棒束通道摩擦阻力系数计算式均是在一定的理论分析的基础上通过实验数据拟合得出。Rehme等^[1-2]将棒束通道截面分为边角子通道、边界子通道和中心子通道。通过简化 Navier-Stokes (N-S) 方程给出了不同子通道的摩擦阻力系数计算式,并根据不同的棒束结构提出了计算阻力系数的几何因子,从而进一步得到整个棒束通道的摩擦阻力计算式,并指出在层流摩擦阻力系数已知的前提下,可以预测湍流的摩擦阻力系数。Cheng & Todreas^[3]、Marek等^[4]、Eifler等^[5]、Hooper等^[6-7]、Chi等^[8]、Yang等^[9]和 Zarling^[10]分别对棒束通道内不同流态的摩擦阻力系数进行了研究,指出棒束通道的几何结构(比如棒中心距与棒直径之比)和子通道的种类是计算摩擦阻力系数的重要因素。并且提出了适用于三角形排列的无限大棒束通道内层流摩擦阻力系数的计算关系式,但是由于实际通道流道壁面对流体的切应力不能忽略,因此限制了其适用范围。其中 Cheng-Todreas 针对正方形和三角形布置的棒束通道提出了光滑棒束及绕线式棒束通道内的摩擦阻力系数的计算方法并给出了棒束通道的流态划分以及转捩点 Reynolds 数的计算式。Lee^[11]、Su等^[12]、Bae等^[13]和 Möller^[14]通过对通道内的速度场进行积分,提出了棒束通道内湍流摩擦系数的计算式,该方法不需要预先知道该通道的层流摩擦阻力系数。Yan等^[15]对摇摆条件下 3×3 棒束通道内的阻力特性进行了实验研究,指出摇摆条件下的时均摩擦阻力系数与稳态结果没有明显区别。并根据实验结果给出了稳态和摇摆条件下的摩擦阻力系数的计算关系式。

目前棒束通道内的流动阻力研究主要通过理论推导结合部分实验研究来得出摩擦阻力系数的计算关系式,但是受限于棒束通道结构的复杂性,并没有得到一个较为统一的结果。另外,现有的棒束通道实验研究主要针对强迫循环流动,随着自然循

环的应用愈加广泛,许多学者开始了对自然循环条件下不同通道内流动阻力的研究,如 Ishii 等^[16]、Zvirin^[17]、Vijayan 等^[18-19]、Tan 等^[20-21]、Yan 等^[22-23]、杨瑞昌等^[24]、田春平等^[25-26]和杨辉涛^[27],给出了一些自然循环条件下流动阻力的实验结果并与强迫循环进行了比较。但是针对自然循环条件下棒束通道内的流动阻力研究仍然比较少见,而棒束通道普遍应用于核反应堆中,本文以此为背景对自然循环条件下 3×3 棒束通道内的流动阻力特性进行研究。

1 实验装置

实验装置如图 1 所示,主要由主循环回路和冷却回路组成。主循环回路主要包括预热器、棒束通道实验段、冷却换热器、主循环泵、稳压器、电磁流量计以及相关阀门管道。冷却回路主要包括冷却换热器、水箱、冷却塔以及冷却水循环泵。循环回路高 3.5 m,顶部水平段长 2 m,实验段安装位置在回路下半部分,上升段长 2 m,保证自然循环有足够的高度差。本实验中,系统压力为 0.3 MPa,入口过冷度为 30~90 K,加热功率为 0.2~28 kW。

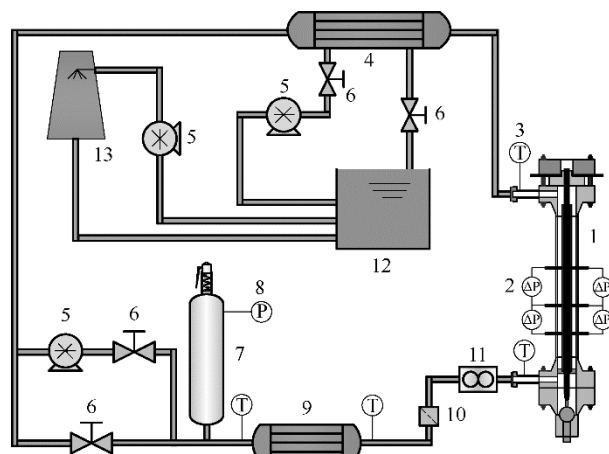


图 1 实验装置

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

1—test section; 2—differential pressure transmitter; 3—thermocouple;
4—cooler; 5—pump; 6—valve; 7—pressurizer; 8—pressure transmitter; 9—preheater; 10—filter; 11—electromagnetic flowmeter;
12—water tank; 13—cooling tower

实验段如图 2 所示,棒束通道由 3×3 棒束以及陶瓷隔板组成。9 根相同的空心加热棒按正方形排列,根据常见燃料组件的节径比(中心距 P 与棒外径 D 之比)范围和实验件加工条件等,本棒束通道的节径比为 1.38。两个定位格架分别布置在靠近流道进口和出口的位置。棒两端与上部铜板和下部

铜柱连接并通过一个低压直流电源加热, 最大加热功率为 45 kW。棒束通道的外面设置了隔离腔室, 外筒表面也包覆了保温层。在稳态工况下, 估算的散热量不到加热功率的 0.2%, 因此认为可以忽略热损失。

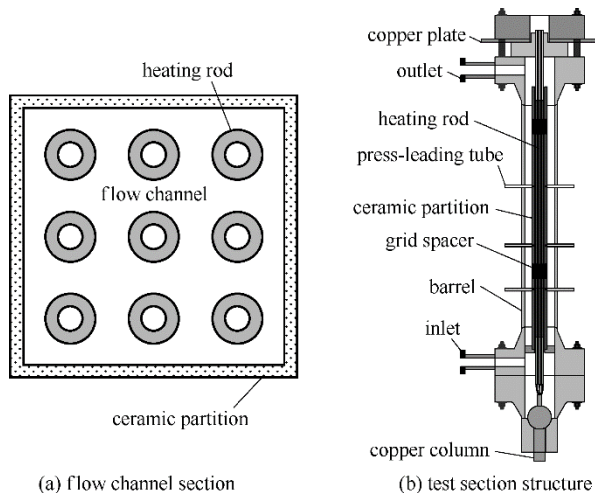


图 2 棒束实验段

Fig.2 Rod bundle test section

在加热棒内部不同的轴向位置处布置了一系列 I 级精度的 N 型热电偶, 以获得不同位置处的加热壁面温度。实验段进出口水温由 I 级精度的 T 型热电偶进行测量。通道沿轴向一共有两个测压段, 测压段 I 包含定位格架, 测压段 II 用于测量沿程的摩擦压降。两段测压段的压差分别由横河 EJA110E 和罗斯蒙特 3051CD2 压差传感器测量。量程分别为 $-1 \sim 4$ kPa 和 $-1 \sim 3$ kPa, 测量精度分别为 $\pm 0.065\%$ 和 $\pm 0.05\%$ 。实验段流量通过科隆 OPTIFLUX4300 电磁流量计测量, 量程和精度分别为 $-0.5 \sim 1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $\pm 0.3\%$ 。根据 Kline & McClintock^[28] 方法, 计算得到的摩擦阻力系数相对误差范围是 3.2%~10.5%, 局部阻力系数的相对误差范围是 2.8%~6.1%

$$U_F = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial p_i} u_{p_i} \right)^2} \quad (1)$$

其中, F 为变量 p_i 的函数, U_F 为计算结果的误差, u_{p_i} 为变量 p_i 的误差。

2 数据处理

对于测压段 I (含定位格架), 测压段的总压降 ΔP_t 包含重位压降 ΔP_g 、棒束摩擦压降 ΔP_f 、加速压降 ΔP_a (对于单相实验, 认为加速压降可以忽略) 和定位格架局部压降 ΔP_{sg} 。 ΔP_m 为压差计测量值。摩擦压降根据测压段 II 的结果给出, K_{sg} 为定位格架

局部阻力系数。 L 为测压段长度, ρ_{tu} 和 ρ_{tl} 分别为引压管内和棒束通道内水的密度, G 为实验段质量流速。

$$\Delta P_t = \Delta P_g + \Delta P_f + \Delta P_a + \Delta P_{sg} \quad (2)$$

$$\Delta P_t = \Delta P_m + \rho_{tu} g L \quad (3)$$

$$\Delta P_g = \rho_n g L \quad (4)$$

$$\Delta P_a = G^2 \left(\frac{1}{\rho_h} - \frac{1}{\rho_l} \right) \quad (5)$$

$$K_{sg} = \frac{2 \rho_n \Delta P_{sg}}{G^2} \quad (6)$$

对于测压段 II (不含定位格架), 总压降不包含定位格架局部压降, 则根据上式可以求出摩擦压降 ΔP_f , De 为通道当量直径, 摩擦阻力系数 λ 则为

$$\lambda = \frac{2 De \Delta P_f \rho_n}{G^2 L} \quad (7)$$

3 实验结果与讨论

3.1 自然循环摩擦阻力结果

在系统压力 0.3 MPa, 实验段加热功率 3 kW, 入口欠热度 30~90 K 的工况范围内进行了自然循环流动阻力实验, 结果如图 3 所示。

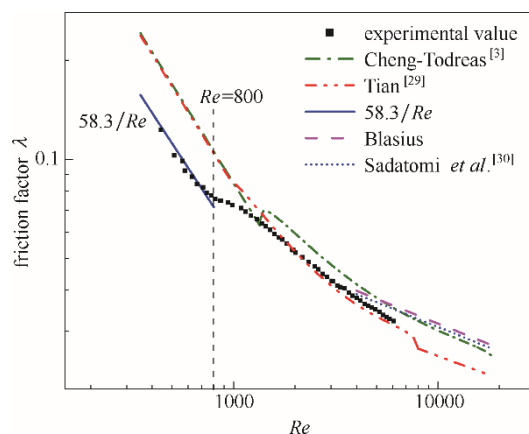


图 3 自然循环条件下摩擦阻力系数

Fig.3 Friction factor experimental results in natural circulation condition

对于棒束通道内单相流动摩擦阻力系数的预测, Cheng & Todreas 关系式应用较为广泛, 其将棒束通道内层流和湍流摩擦阻力系数分别表示为

$$\lambda_L = C_L / Re \quad (8)$$

$$\lambda_T = C_T / Re^{0.18} \quad (9)$$

其中, C_L 和 C_T 可根据文献[3]表 5 求出, 转捩 Reynolds 数 Re_L 和 Re_T 可由 P/D 求出。

$$\lg(Re_L/300) = 1.7(P/D - 1) \quad (10)$$

$$\lg(Re_L/10000) = 0.7(P/D - 1) \quad (11)$$

过渡区的摩擦阻力系数 λ_{tr} 计算公式为

$$\lambda_{tr} = \lambda_L(1-\varphi)^{1/3} + \lambda_T\varphi^{1/3} \quad (12)$$

$$\varphi = \frac{\lg(Re) - \lg(Re_L)}{\lg(Re_T) - \lg(Re_L)} \quad (13)$$

式中, φ 为间歇因子, λ_L 、 λ_T 分别为层流区和湍流区的转捩 Reynolds 数对应的摩擦阻力系数。田齐伟^[29]基于实验结果拟合了 3×3 棒束通道内摩擦阻力系数的计算关系式, 在低 Reynolds 数时与 Cheng & Todreas 关系式符合较好, 但是随着 Reynolds 数增加, 结果逐渐低于 Cheng & Todreas 关系式。另外, 基于圆管和非圆形通道的 Blasius 和 Sadatomi 关系式^[30]的计算值也大于实验结果。

实验结果表明, 棒束通道摩擦阻力系数实验值低于 Cheng & Todreas 关系式的预测值, 但在高 Reynolds 数时与田齐伟拟合关系式较为接近, 说明在低 Reynolds 数区域, 棒束通道内的摩擦阻力系数在等温强迫循环和自然循环条件下存在明显差异。在 Reynolds 数为 800 附近, 摩擦阻力系数发生了明显的变化, 认为棒束通道的转捩 Reynolds 数为 800, 这一结果符合通常棒束通道的转捩 Reynolds 数范围。由于棒束通道横向尺度相对较大, 存在由于径向压差或者湍流引起的横向流动, 因此转捩点与常规通道有较大差异。当 $Re < 800$ 时为层流区, $Re > 800$ 时为过渡区。在层流区, 摩擦阻力系数 λ 与 Reynolds 数 Re 仍基本满足式 (7) 的形式。根据实验结果, 拟合了本实验中棒束通道内的层流摩擦阻力关系式

$$\lambda = 58.3/Re \quad (14)$$

拟合关系式与实验值的相对误差在 5% 以内, Reynolds 数范围为 300~800。同时当 Reynolds 数接近 7000 时仍未出现流态从过渡区进入湍流区的转捩, 说明自然循环条件下棒束通道的过渡区范围仍然较大, 这与 Cheng & Todreas^[3]的结论也基本一致, 棒和流道壁面的黏滞力使得流态完全转变比较困难。通道内的流态转捩是由中心向壁面处逐渐发展的过程。

3.2 热通量对摩擦阻力的影响

为了探究热通量对于摩擦阻力的影响, 在系统压力 0.3 MPa, 入口欠热度 100 K, 实验段加热功率 0.2~28 kW (热通量 $1 \sim 200 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$) 的工况范围内, 进行了多组不同热通量条件下的自然循环流动阻力实验, 并与图 3 实验结果进行对比, 结果如图 4 所示。

实验结果表明, 在变热通量的工况下, 通道的转捩 Reynolds 数仍在 800 左右, 即热通量的变化对

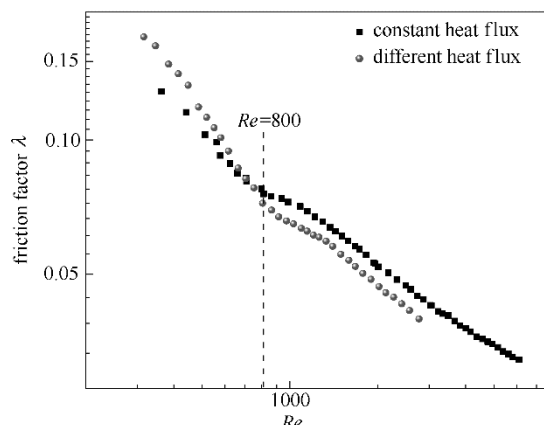


图4 变热通量时的摩擦阻力系数

Fig.4 Friction factor experimental results with different heat flux

棒束通道的流态转捩没有明显影响。但是在加热功率小于 3 kW 时, 摩擦阻力系数比定热通量的实验值大; 当加热功率大于 3 kW 时, 摩擦阻力系数比定热通量的实验值小。这是由于当热通量增大时, 换热温差增大, 近壁面处的流体黏度减小, 使得壁面黏滞力减小, 阻力系数也随之减小。因此需要对摩擦阻力系数进行修正。以壁温和主流温度为定性温度, 得到对应温度下的壁温黏度和水温黏度, 将二者黏度之比作为修正因子对变热通量工况的摩擦阻力系数进行修正, 修正结果如图 5 所示。可以看出修正后的摩擦阻力系数与热通量不变时的实验结果较为一致。相对误差均在 5% 以内, 如图 6 所示。

$$Q < 3 \text{ kW}, \quad \lambda_{re} = 0.72 \lambda_{exp} \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0.8} \quad (15)$$

$$Q > 3 \text{ kW}, \quad \lambda_{re} = \lambda_{exp} \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (16)$$

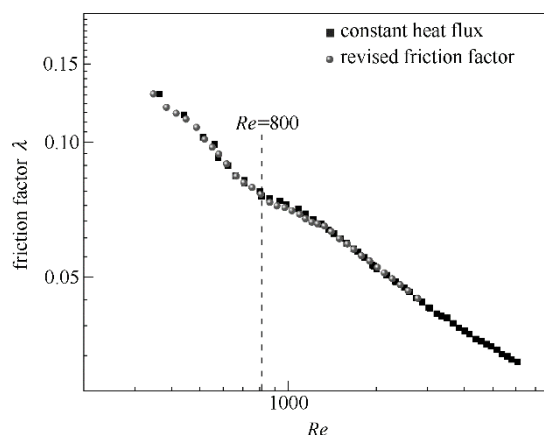


图5 黏度修正后变热通量时的摩擦阻力系数

Fig.5 Friction factor experimental results with different heat flux after viscosity revision

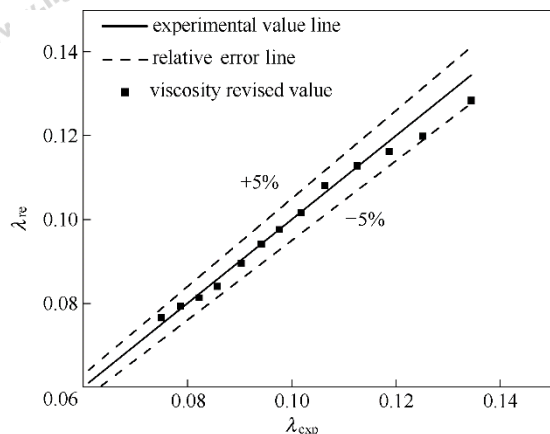
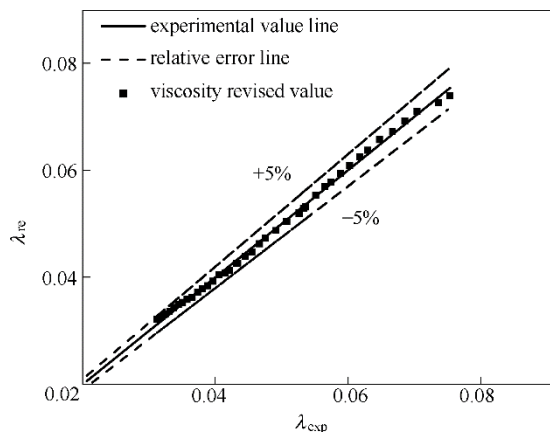
(a) $Q < 3 \text{ kW}$ (b) $Q > 3 \text{ kW}$

图 6 黏度修正结果与实验值的相对误差

Fig.6 Relative error between revised friction factor and experimental value

上一组实验是在相同入口温度, 不断调节加热功率的条件下进行的, 为了进一步验证热通量对阻力系数的影响, 考虑进行多组定热通量的实验。在系统压力 0.3 MPa, 实验段加热功率 1~5 kW, 入口欠热度 40~60 K 的工况范围内进行了多组定热通量的自然循环流动阻力实验。实验结果如图 7 所示。可以看出, 加热功率为 4 和 5 kW 时, 阻力系数小于功率为 3 kW 时的值; 而功率为 1 kW 时, 则大于功率为 3 kW 时的值。这与图 4 中变热通量的实验结果是一致的。

同样地, 考虑通过式 (12)、式 (13) 对上述的摩擦阻力系数结果进行修正, 结果如图 8 所示, 修正结果与图 3 中的自然循环实验结果符合程度较好, 相对误差在 10% 以内。

3.3 定位格架局部阻力结果

与常规通道相比, 棒束通道内的定位格架会影响通道内的流动特性。但是由于定位格架的结构复杂多样, 很难用单一的关系式计算定位格架的局部

阻力系数, 因此目前大多定位格架的局部阻力系数都是通过实验测定。图 9 给出了与图 3 相同工况的定位格架局部阻力系数的实验结果。

从图 9 可以看出定位格架局部阻力系数并没有

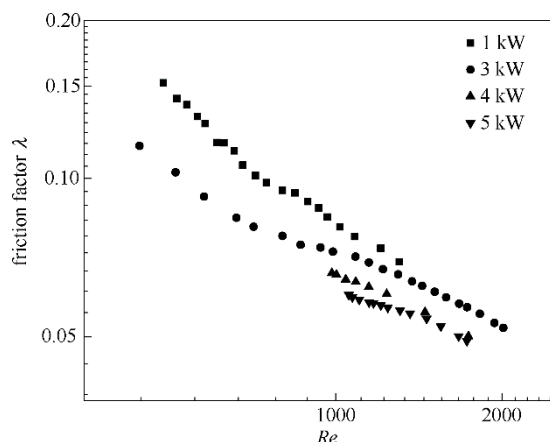


图 7 不同工况下定热通量的摩擦阻力系数

Fig.7 Friction factor results with constant heat flux in different condition

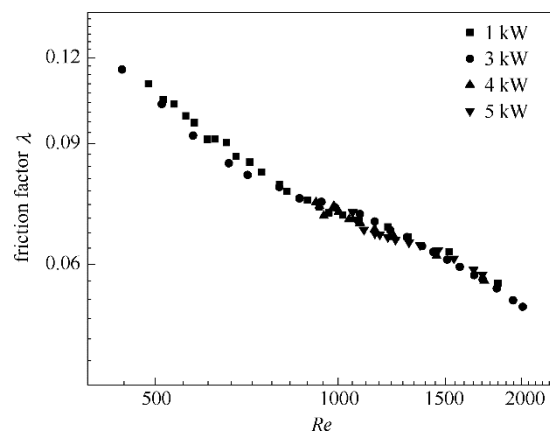


图 8 黏度修正后不同工况下定热通量的摩擦阻力系数

Fig.8 Friction factor results with constant heat flux in different condition after viscosity revision

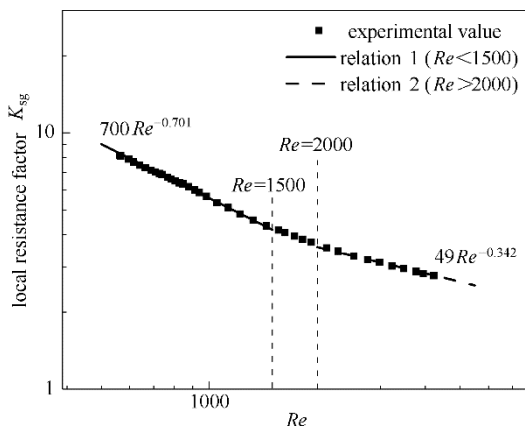


图 9 定位格架局部阻力系数

Fig.9 Local resistance factor at spacer grid

明显的转捩现象,只是随 Reynolds 数有不同的变化趋势,因此在 $Re < 1500$ 和 $Re > 2000$ 时分别拟合了局部阻力系数的计算关系式。拟合关系式与实验值的相对误差均在 5% 以内。

$$K_{sg1} = 700Re^{-0.701} \quad (17)$$

$$K_{sg2} = 49Re^{-0.342} \quad (18)$$

4 结 论

(1) 自然循环条件下,棒束通道摩擦阻力系数低于 Cheng & Todreas 关系式的预测值。转捩现象不如常规通道明显,转捩 Reynolds 数与 Cheng & Todreas 关系式相比也略有提前,为 800 左右。

(2) 加热段的热通量会影响摩擦阻力系数。热通量增大时,阻力系数会减小,并给出了热通量变化时的黏度修正关系式。

(3) 根据实验结果,拟合了棒束通道内的层流摩擦阻力关系式以及定位格架的局部阻力关系式,该关系式对本文范围内的摩擦阻力系数的预测值与实验结果相对误差在 5% 以内。

符 号 说 明

- D —— 棒外径, m
 De —— 通道当量直径, m
 G —— 质量流速, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
 g —— 重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
 K_{sg} —— 定位格架局部阻力系数
 L —— 测压段长度, m
 P —— 棒中心距, m
 ΔP_a —— 加速压降, Pa
 ΔP_f —— 摩擦压降, Pa
 ΔP_g —— 重力压降, Pa
 ΔP_m —— 压差计测量值, Pa
 ΔP_{sg} —— 定位格架局部压降, Pa
 ΔP_t —— 测压段总压降, Pa
 Q —— 实验段加热功率, kW
 Re —— Reynolds 数
 μ_f —— 水温动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$
 μ_w —— 壁温动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$
 λ —— 摩擦阻力系数
 ρ —— 密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

下角标

- exp —— 实验值
 fl —— 流体参数
 h —— 测压段上部引压孔处参数
 L —— 层流
 l —— 测压段下部引压孔处参数

- re —— 修正值
 T —— 湍流
 tu —— 引压管内参数

References

- [1] REHME D. Laminarströmung in Stabbündeln[J]. Chemie Ingenieur Technik, 1971, **43**(17): 962-966.
- [2] REHME K. Simple method of predicting friction factors of turbulent flow in non-circular channels[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1973, **16**(5): 933-950.
- [3] CHENG S, TODREAS N. Hydrodynamic models and correlations for bare and wire-wrapped hexagonal rod bundles — bundle friction factors, subchannel friction factors and mixing parameters[J]. Nuclear Engineering & Design, 1986, **92**(2): 227-251.
- [4] MAREK J, MAUBACH K, REHME K, *et al.* Heat transfer and pressure drop performance of rod bundles arranged in square arrays[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1973, **16**(12): 2215-2228.
- [5] EIFLER W, NIJSING R. Experimental investigation of velocity distribution and flow resistance in a triangular array of parallel rods[J]. Nuclear Engineering & Design, 1967, **5**(1): 22-42.
- [6] HOOPER J, WOOD D. Fully developed rod bundle flow over a large range of Reynolds number[J]. Nuclear Engineering & Design, 1984, **83**(1): 31-46.
- [7] HOOPER J, REHME K. Large-scale structural effects in developed turbulent flow through closely spaced rod arrays[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1984, **145**(145): 305-337.
- [8] CHI Y, CHANG H, WANG K, *et al.* Pressure drop in dual-cooled annular and cylindrical solid fuel assemblies for pressurized water reactor[J]. Nuclear Engineering & Design, 2012, **250**(3): 287-293.
- [9] YANG J. Note on turbulent-laminar transition for flow in triangular rod bundles[J]. Nuclear Science and Engineering, 1977, **62**(3): 579-582.
- [10] ZARLING J. Laminar-flow pressure drop in symmetrical finite rod bundles[J]. Nuclear Science and Engineering, 1976, **61**: 2.
- [11] LEE K. Analytical prediction of subchannel friction factor for infinite bare rod square and triangular arrays of low pitch to diameter ratio in turbulent flow[J]. Nuclear Engineering & Design, 1995, **157**(1/2): 197-203.
- [12] SU J, FREIRE A. Analytical prediction of friction factors and Nusselt numbers of turbulent forced convection in rod bundles with smooth and rough surfaces[J]. Nuclear Engineering & Design, 2002, **217**(1): 111-127.
- [13] BAE J, PARK J. Analytical prediction of turbulent friction factor for a rod bundle[J]. Annals of Nuclear Energy, 2011, **38**(2/3): 348-357.
- [14] MÖLLER S. Single-phase turbulent mixing in rod bundles[J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 1992, **5**(1): 26-33.
- [15] YAN C, CAO X, YAN C, *et al.* Effects of rolling on resistance characteristics of single-phase flow in a 3×3 rod bundle[J]. Progress in Nuclear Energy, 2015, **78**: 231-239.
- [16] ISHII M, KATAOKA I. Scaling laws for thermal-hydraulic system under single phase and two-phase natural circulation[J]. Nuclear Engineering & Design, 1984, **81**(3): 411-425.
- [17] ZVIRIN Y. A review of natural circulation loops in pressurized water reactors and other systems[J]. Nuclear Engineering & Design, 1981, **67**(2): 203-225.

- [18] VIJAYAN P. Experimental observations on the general trends of the steady state and stability behaviour of single-phase natural circulation loops[J]. *Nuclear Engineering & Design*, 2002, **215**(1): 139-152.
- [19] VIJAYAN P, SHARMA M, SAHA D, *et al.* Steady state and stability characteristics of single-phase natural circulation in a rectangular loop with different heater and cooler orientations[J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2007, **31**(8): 925-945.
- [20] TAN S, SU G, GAO P, *et al.* Experimental and theoretical study on single-phase natural circulation flow and heat transfer under rolling motion condition[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, **29**(14): 3160-3168.
- [21] 谭思超, 张红岩, 庞凤阁, 等. 摇摆运动下单相自然循环流动特点[J]. *核动力工程*, 2005, (6): 554-558.
- TAN S C, ZHANG H Y, PANG F G, *et al.* Characteristics of single-phase natural circulation under rolling[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2005, (6): 554-558.
- [22] YAN B, YU L. Theoretical research for natural circulation operational characteristic of ship nuclear machinery under ocean conditions[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2009, **36**(6): 733-741.
- [23] 鄢炳火, 于雷, 张杨伟, 等. 海洋条件下核动力装置自然循环流动特性的无量纲分析[J]. *核动力工程*, 2009, (1): 36-39.
- YAN B H, YU L, ZHANG Y W, *et al.* Dimensionless analysis of natural circulation characteristics of nuclear installations under ocean condition[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2009, (1): 36-39.
- [24] 杨瑞昌, 刘涛, 钟勇, 等. 自然循环传热部件内单相水流动阻力的实验研究[J]. *核动力工程*, 2003, (s2): 75-78.
- YANG R C, LIU T, ZHONG Y, *et al.* Experimental study on friction of single phase liquid flow in a natural circulation system[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2003, (s2): 75-78.
- [25] 田春平, 阎昌琪, 王建军, 等. 倾斜对窄矩形通道内流动阻力特性影响[J]. *化工学报*, 2016, **67**(9): 3633-3639.
- TIAN C P, YAN C Q, WANG J J, *et al.* Effect of inclination on flow resistance characteristic in narrow rectangular channel[J]. *CIESC Journal*, 2016, **67**(9): 3633-3639.
- [26] TIAN C, YAN M, WANG J, *et al.* Experimental investigation of flow and heat transfer for natural circulation flow in an inclined narrow rectangular channel[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2017, **98**: 266-276.
- [27] 杨辉涛. 自然循环阻力特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- YANG H T. Study on flow resistance under natural circulation[J]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010.
- [28] KLINE S J, MCCLINTOCK F A. Describing uncertainties in single-sample experiments[J]. *Mechanical Engineering*, 1953, **75**(1): 3-8.
- [29] 田齐伟. 摇摆条件下棒束通道内流动阻力特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
- TIAN Q W. Investigation on flow resistance in rod bundle under rolling condition[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015.
- [30] SADATOMI M, SATO Y, SARUWATARI S. Two-phase flow in vertical noncircular channels[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1982, **8**(6): 641-655.