

文章编号：0258-0926(2018)03-0013-05; doi:10.13832/j.jnpe.2018.03.0013

棒束通道内混合对流传热实验研究

刘 达, 顾汉洋

上海交通大学核科学与工程学院, 上海, 200240

摘要：以自然循环下堆芯内可能会发生的低流量传热为研究背景，对 5×5 棒束通道内的混合对流传热现象进行了实验研究。实验压力为 6 MPa，质量流量为 25~150 kg/(m²·s)，热流密度为 25~300 kW/m²，实验雷诺数 Re 为 1000~30000，浮升力参数 Bo^* 为 $2 \times 10^{-7} \sim 3 \times 10^{-3}$ 。实验发现，随着 Bo^* 的增大，棒束通道内传热产生先弱化后强化的趋势。浮升力对棒束通道内传热造成影响的起始点为 $Bo^* = 3.5 \times 10^{-6}$ ，当 $Re > 15000$ 时，浮升力依然可对传热造成弱化现象。基于实验数据，提出了适用于棒束通道的混合对流经验关系式。

关键词：混合对流；棒束；浮升力；传热

中图分类号：TK124 **文献标志码：**A

Experimental Study on Mixed Convection Heat Transfer in Rod Bundles

Liu Da, Gu Hanyang

School of Nuclear Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, 200240, China

Abstract: With the background of the low flow rate heat transfer in case of the natural circulation in the reactor, the mixed convection was experimentally studied in a 5×5 rod bundles. The experiment was performed at 6 MPa, the mass flow rate from 25 to 150 kg/(m²·s), the heat flux from 25 to 300 kW/m², Reynolds number from 1000 to 30000, Buoyancy parameter from 2×10^{-7} to 3×10^{-3} . It is concluded that with the increasing of the Buoyancy parameter, the heat transfer in rod bundles was impaired firstly and then followed by enhancement. It is observed that in the rod bundle channel, the influence of the buoyancy force occurs at $Bo^* = 3.5 \times 10^{-6}$. Even when Reynolds number is higher than 15000, the heat transfer could be impaired by the buoyancy force. An empirical correlation used to calculate mixed convection heat transfer in rod bundles was proposed based on the experimental data.

Key words: Mixed convection, Rod bundle, Buoyancy force, Heat transfer

0 前 言

随着对核电系统安全性要求的提高，基于自然循环的非能动安全技术 in 核电研发中得到重视。自然循环时流经堆芯的冷却剂流速通常低于普通压水堆正常运行时的流速。流速较低情况下，浮升力易对流场结构造成影响，使传热进入混合对流状态^[1]。对基于圆形通道的混合对流传热进

行了大量实验及理论研究^[2-5]，但对棒束通道内的传热现象的研究则较为欠缺。仅有的针对棒束通道内混合对流现象的研究皆在低压力下进行，浮升力对传热的影响较弱，未能观测到类似圆形通道中在浮升力影响下的传热变化特性^[6-7]。

本文对 5×5 棒束通道内混合对流传热进行了实验研究，得到了不同浮升力参数下棒束通道内

收稿日期：2017-06-05；修回日期：2018-03-14

作者简介：刘 达（1986—），男，博士研究生，现主要从事反应堆热工水力研究工作

的传热系数。

1 实验系统及本体

1.1 实验系统

本实验是在上海交通大学多功能开式水力回路上进行的,回路流程图见图 1。

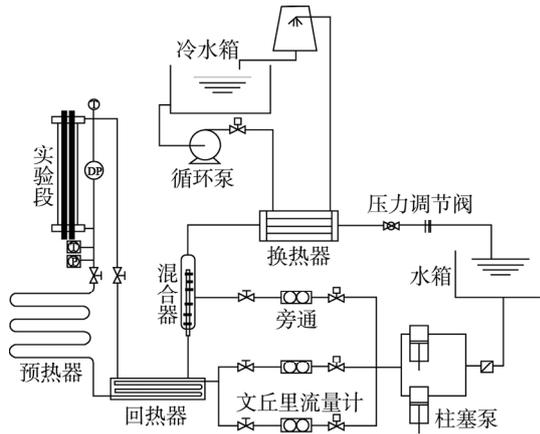


图 1 多功能水力台架回路流程图

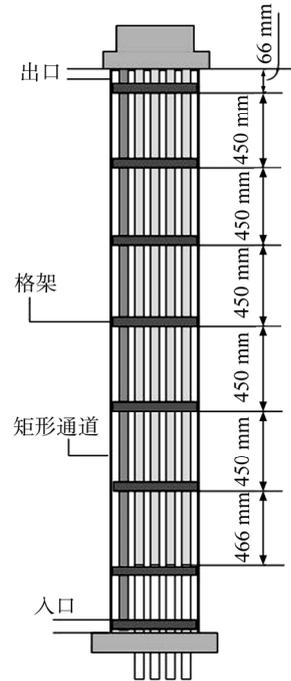
Fig. 1 Scheme of Multipurpose Water Loop

本实验采用去离子水作为冷却剂,冷却剂循环由 2 台三缸柱塞泵驱动。冷却剂流经流量计、回热器以及经过预热器加热到指定温度后进入实验段,由实验段流出的热流体经过回热器后和来自旁通的冷水混合进入换热器,工质被冷却至常温后经过压力调节阀流回水箱,完成循环。本回路允许最大压力达 30 MPa,流量 10 t/h,加热功率 1.2 MW。实验段采用直流电加热,预热器采用交流加热系统加热。

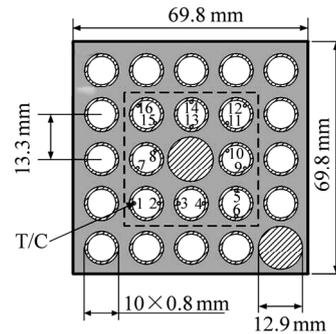
1.2 实验本体

采用 5×5 正方形排列的棒束作为实验段,加热管材料为因科镍-625 合金管,外径 10 mm,径距比为 1.33,加热段长度为 2783 mm。实验段包含 8 个不带搅混翼的普通格架,入口处设置 1 个均匀化入口流场的格架,从下往上第 2 个格架与第 3 个格架间距 466 mm,其他格架间距 450 mm。此外,棒束实验本体中包含 2 根不发热棒,位于中心位置及一个角位置,外径 12.9 mm。实验段截面形状及尺寸如图 2 所示。

实验采用内壁温滑移测量装置测量加热棒束内壁面的温度,单个截面共布置 16 个测温点(图 2b),竖直方向共有 90 个测量截面,每个截面高度差为 25 mm,每个格架跨间共有 18 个测温截



a 实验段整体外形尺寸



b 实验段截面尺寸及热电偶测点(T/C)

图 2 实验段及热电偶截面测点示意图

Fig. 2 Configuration of Test Section and Measuring Points of a Single Section

面,共测量上部 5 个格架跨间的内壁温数据。

2 实验方法及数据处理

本实验压力为 6 MPa,热流密度为 25~150 kW/m²,质量流率为 25~300 kg/(m²·s)。实验回路的流量、压力、入口温度、加热功率均达到工况设定值,各运行参数不再变化后,依次调整热电偶测量高度,得到轴向不同高度测点的壁温数据。将实验采集数据处理得到不同测点高度的换热系数。实验局部努塞尔数(Nu)的计算方法为^[8]:

$$Nu(z) = \frac{\alpha(z)D_h}{\lambda} \quad (1)$$

z 高度的单相换热系数 $\alpha(z)$ 为：

$$\alpha(z) = \frac{q}{t_{w,o}(z) - t_b(z)} \quad (2)$$

$$q = \left(\frac{UI}{23\pi D_o L} \right) \eta ; \eta = \frac{h_{out} - h_{in}}{UI}$$

当地焓值 $h(z)$ 为：

$$h(z) = h_{in} + \frac{23q\pi D_o z}{GA} \quad (3)$$

$t_{w,o}$ 由测得的内壁面温度根据一维导热方法迭代求得。由于加热管管壁较薄，轴向和周向导热带带来的影响较小，因此认为由一维导热方法计算得到的外壁温与实际外壁温的偏差可以忽略。由内壁面温度计算外壁面温度公式为：

$$t_{w,o} = t_{w,i} - \frac{q_v}{4\lambda_w} \left[\left(\frac{D_o}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_i}{2} \right)^2 \right] + \frac{q_v D_i^2}{8\lambda_w} \ln(D_o/D_i) \quad (4)$$

实验测量数据的不确定度见表 1。

表 1 参数不确定度

Table 1 Uncertainty of the Parameters

参数	$P/$ MPa	$G/$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$T_b/$	$T_w/$	$q/\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$	Nu
不确定度 /%	2.17	3.22	0.47	0.40	5.89	5.92

3 实验结果及分析

图 3 为质量流量 $G=75 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ，热流密度 $q=50 \text{ kW}/\text{m}^2$ 时 4 个不同测温点在不同轴向位置的温度对比。图中竖直虚线为格架出口所在位置。可以发现同一截面不同测温点间的温差较小，对于所有工况，同一截面温差最大值小于 3°C 。为了研究棒束通道传热特性，将同一截面数据进行平均。可发现格架下游壁温降低，随着远离格架，

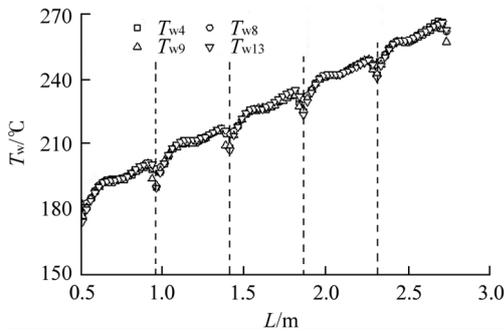


图 3 不同测温点轴向温度分布

Fig. 3 Temperature Distributions for Different Measuring Points

壁温按照某种规律逐渐升高，直至下一格架，壁温再次降低。不同格架跨度壁温变化规律一致。

将中间 3 个格架跨间相同 x/D_h 的 Nu 平均，得到图 4 所示格架下游 Nu 分布。发现传热在格架下游 $x/D_h=23$ 时已达到充分发展。在此，选取所有工况 $x/D_h=23$ 之后的 Nu 作为充分发展的 Nu 。

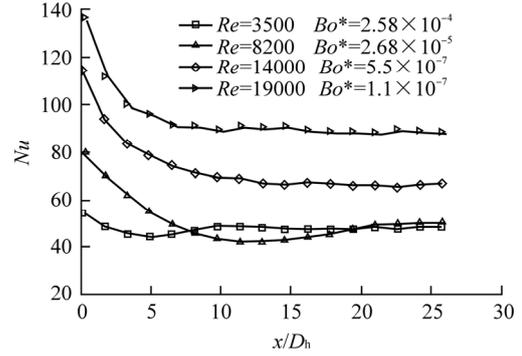


图 4 不同工况格架下游 Nu 分布对比

Fig. 4 Comparison of Nu Distributions Downstream of Spacer Grid for Different Cases

浮升力参数 (Bo^*) 为：

$$Bo^* = \frac{Gr^*}{Re^{3.425} Pr^{0.8}} \quad (5)$$

$$Gr^* = \beta g D_c^4 q / (\lambda v^2)$$

棒束通道湍流强迫对流传热系数可由 Weisman 公式计算得到。Weisman 公式为：

$$Nu = \left[0.042 \left(\frac{P}{D} \right) - 0.024 \right] \left(\frac{D_c G}{\mu} \right)^{0.8} \left(\frac{C_p \mu}{\lambda} \right)^{1/3} \quad (6)$$

图 5 为实验得到的充分发展的 Nu 与 Weisman 公式的比值 (Nu/Nu_{FT}) 与 Bo^* 之间的对应关系。图 5 对比了棒束实验值与 Jackson 等人^[2]基于圆管提出的混合对流传热公式[式 (7)]和 Wu 等人^[4]基于环管提出的混合对流传热公式[式 (8)]。

$$\frac{Nu}{Nu_{FT}} = \left[1 \pm 0.8 \times 10^4 \frac{Gr^*}{Re^{3.425} Pr^{0.8}} \left(\frac{Nu}{Nu_{FT}} \right)^{-2} \right]^{0.46} \quad (7)$$

$$\frac{Nu}{Nu_{FT}} = \left[1 \pm 1.2 \times 10^5 \frac{Gr^*}{Re^{3.425} Pr^{0.8}} \left(\frac{Nu}{Nu_{FT}} \right)^{-2} \right]^{0.46} \quad (8)$$

可以发现在 $Bo^* < 3.5 \times 10^{-6}$ 时 Nu/Nu_{FT} 约为 1，

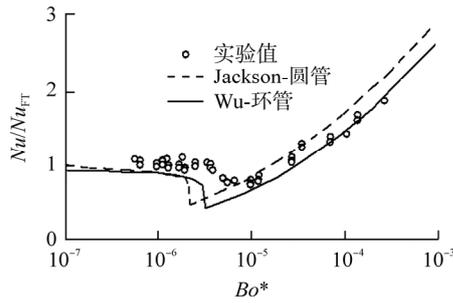


图5 Nu/Nu_{FT} 与浮升力参数 Bo^* 的对应关系
Fig. 5 Nu/Nu_{FT} versus Buoyancy Parameter Bo^*

说明在此浮升力参数区间内棒束通道中传热为强迫对流传热。当 $Bo^* = 3.5 \times 10^{-6}$ 后，随着 Bo^* 的增大，传热出现弱化现象，约在 $Bo^* = 8 \times 10^{-6}$ 时，浮升力对传热造成的弱化约为 30%，随着 Bo^* 的继续增加，传热又出现强化。

通过实验值与 Jackson 公式和 Wu 公式的对比可以发现，棒束通道内的混合对流现象和圆形通道中的混合对流现象有相似之处，但不同通道内浮升力对传热造成影响的起始 Bo^* 存在不同。

图 6 为所有当前实验充分发展的 Nu 与 Re 之间的关系，且与 Weisman 公式的比较。

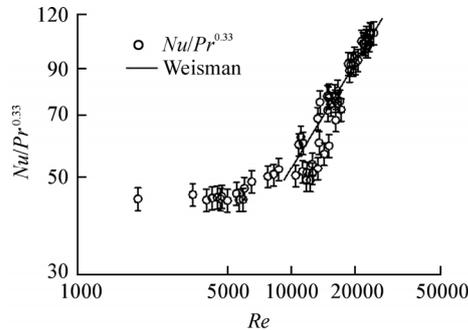


图6 实验数据和 Weisman 公式与 Re 的对比
Fig. 6 Comparison of Experimental Nusselt Numbers and Weisman's Correlation Versus Re

可以发现，实验数据在 $Re > 20000$ 时与 Weisman 公式的预测值相符较好，在 $Re = 15000$ 时，有些数据与 Weisman 公式较为吻合，但有些数据明显小于 Weisman 公式的预测。结合实验 Nu 不确定度与图 5，认为这些工况出现了传热弱化的现象。因此，棒束通道中即使 $Re > 15000$ ，处于普遍被认为的强迫对流区时，浮升力仍可使传热产生弱化。混合对流不能简单的用 Re 和 Pr 来表征其传热关系，本文借鉴 Jackson 等人基于圆形通道提出的混合对流经验关系式的形式，对实

验数据进行拟合（图 7），得到棒束通道中混合对流经验关系式：

$$\frac{Nu}{Nu_{FT}} = \left[1 - 0.7 \times 10^4 Bo^* \left(\frac{Nu}{Nu_{FT}} \right)^{-1.4} \right]^{0.34} \quad (9)$$

式中， Nu_{FT} 取 Weisman 公式计算得到的相应 Re 的 Nu 。

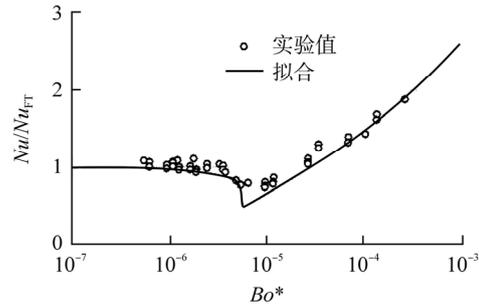


图7 棒束通道混合对流经验关系式的拟合
Fig. 7 Fitting of Mixed Convection Heat Transfer Correlation in Rod Bundles

4 结论

对 5×5 棒束通道内的混合对流现象进行了实验研究，结果表明棒束通道中浮升力对传热具有重要影响。当浮升力较小时，传热为强迫湍流对流传热，实验结果与 Weisman 公式的预测值较为吻合，当浮升力参数 $Bo^* > 3.5 \times 10^{-6}$ 时，浮升力对传热的影响开始显现，传热出现弱化。随着 Bo^* 继续增大，传热出现增强。这一过程与圆形通道加热上升流动混合对流传热过程类似，但圆形通道混合对流经验关系式并不适用于棒束通道，本文给出了棒束通道中混合对流经验关系式。

符号表：

- A : 流通面积, m^2
- Bo^* : 浮升力参数
- C_p : 定压比热, $J/(kg \cdot K)$
- P : 实验压力, MPa
- D : 当量直径, m
- q : 热流密度, kW/m^2
- g : 重力加速度, m/s^2
- G : 质量流率, $kg/(m^2 \cdot s)$
- Gr^* : 基于热流密度的格拉晓夫数
- h : 焓值, J/kg
- I : 电流, A
- L : 长度, m
- Nu : 努塞尔数

Re : 雷诺数

Pr : 普朗特数

t : 温度,

U : 电压, V

x : 到上游格架距离, m

z : 到加热起始点长度, m

希腊字符:

α : 传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$

β : 膨胀系数, $1/K$

η : 热效率

λ : 导热系数, $W/(m \cdot K)$

μ : 动力粘度, $kg/(m \cdot s)$

ν : 运动粘度, m^2/s

下标:

b: 流体平均

e: 水力等效

h: 热力等效

in: 入口;

out: 出口

i: 管内;

o: 管外

w: 壁面

FT: 湍流对流

various single phase natural circulation systems for small and medium sized reactor design[J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, 262: 390-403.

[2] Jackson J D, Cotton M A, Axcell B P. Studies of mixed convection in vertical tubes [J]. International journal of heat and fluid flow, 1989, 10(1): 2-15

[3] 刘峰, 姜培学, S He, 等. 竖直管道内湍流混合对流传热研究[C]// 中国工程热物理学会 2004 年传热传质学学术会议, 中国工程热物理学会, 2004.

[4] Wu T H, Xu Z, Jackson J D. Mixed convection heat transfer to water flowing through a vertical passage of annular cross section: part 2[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2002, 80(3): 246-251.

[5] 陈玉宙, 杨春生, 赵民富, 等. 加热上升混合对流传热实验研究[J]. 核动力工程, 2016(4):138-141.

[6] Hallinan K P, Viskanta R. Heat transfer from a vertical tube bundle under natural circulation conditions [J]. International journal of heat and fluid flow, 1985, 6(4): 256-264.

[7] El-Genk M S, Su B, Guo Z. Experimental studies of forced, combined and natural convection of water in vertical nine-rod bundles with a square lattice [J]. International journal of heat and mass transfer, 1993, 36(9): 2359-2374.

[8] Todreas N E, Kazimi M S. Nuclear systems: thermal hydraulic fundamentals [M]. USA : CRC press, 2012.

(责任编辑: 刘 君)

参考文献:

[1] Wibisono A F, Ahn Y, Williams W C, et al. Studies of