

窄缝环形通道内单相液体传热和压降的实验研究

彭常宏¹, 吴埃敏¹, 郭 贇¹, 贾斗南¹, 秋穗正¹, 苏光辉¹, 聂常华²

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室; 710049;

2. 中国核动力研究设计院空泡物理自然循环国家级重点实验室; 成都, 610041)

摘要:在间隙为 1.5mm 的垂直环形窄缝通道内, 通过内外管双面通电来加热流体, 进行环形窄缝内单相液体传热和压降的研究。通过实验得出, 内管和外套管的 Nu 数准则式, 双面加热时, 内管对外管、外管对内管传热的影响, 单相压降计算公式以及传热和流动的联系。

关键词: 环形窄缝; 单相传热; 单相压降

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A

1 前言

国内外对单相换热和流动的研究主要针对普通的圆管和较大尺寸的非圆形管道, 有关小尺寸通道的单相对流换热和压降的研究也主要集中于圆形通道或者矩形通道。环形窄缝的传热和压降和普通圆管有着很多的不同, 现有文献和资料中的结论不仅定量不同, 定性研究也相互矛盾。文献[1]认为, 双侧加热使流道内侧的换热加强, 外侧削弱的结论。文献[2]认为: 在 $Re < 2000$ 时, 窄环隙流道具有强化传热的特点。文献[3]得出窄缝环管内管外壁换热系数大于外管内壁的换热系数的结论。文献[4]给出了窄缝环形通道中, 管内层流向紊流转化的 Re 数为 500~1000。文献[5]提出, 层流时, 单相摩擦系数与圆管相同, 紊流时小于普通圆管的计算值。

本文在间隙为 1.5mm 的垂直环形窄缝通道内, 通过内外管双面通电来加热流体, 进行环形窄缝内单相液体传热和压降的研究。

2 试验装置和试验方法

本实验在西安交大核能与热能系的高压水回路上进行, 实验装置及实验工作段的结构见图 1 和图 2。实验段是将内管(7×1mm)置于外管(14×2mm)中, 形成具有 1.5mm 间隙的同心窄缝通道。为了测量实验工作段内的流动总压降, 在

实验工作段的外管上开有 2 个测压孔, 测压引管与 1151HP 型高静压差压变送器相连, 测出两测点之间的总压降的信号, 输至采集板。

3 数据处理

3.1 单相传热

相对于圆管, 环形通道具有两个不同的 Nu 数, 即 Nu_i 和 Nu_e , 这是因为内外两表面可以单独加热, 也可以同时加热。

3.1.1 单面加热 当内管或外管单独加热时:

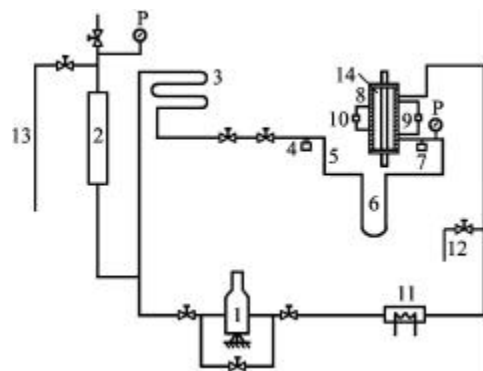


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Sketch Map of Experiment Equipment

1—主泵; 2—稳压器; 3—蛇型预热器; 4—流量计; 5—电加热预热器; 6—U 型预热器; 7—压力传感器; 8—实验段; 9, 10—压差变送器; 11—冷却器; 12—一次侧进水系统; 13—稳压器进水系统; 14—环形通道

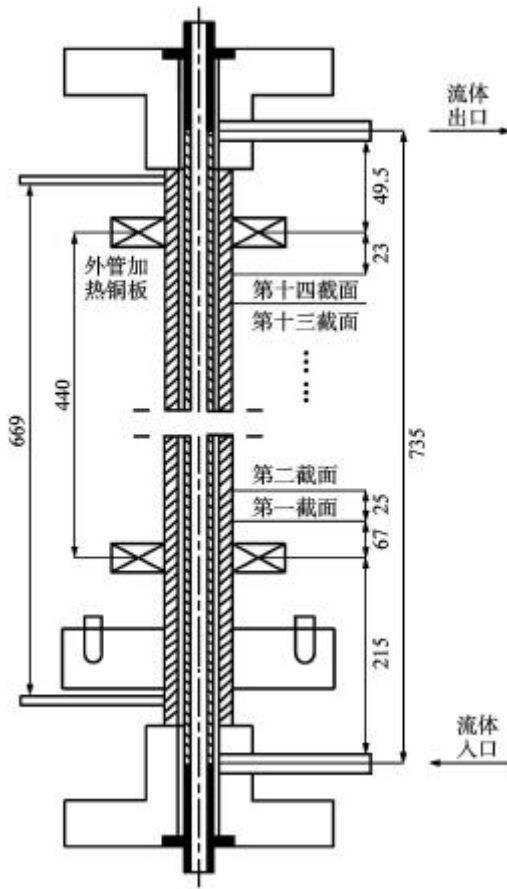


图2 实验段简图
Fig. 2 Sketch Map of Experiment Section

$$\text{内管: } Nu_{ii} = \frac{h_i D_e}{k}$$

$$\text{外管: } Nu_{oo} = \frac{h_o D_e}{k}$$

$$\text{式中, } h_i = \frac{q_i}{T_i - T_f}; h_o = \frac{q_o}{T_o - T_f}$$

图3给出了内管和外管单独加热时, Nu 数与 Re 数和 Pr 数的关系。

通过线性回归, 得到以下的计算式:

$$\text{内管: } Nu_{ii} = 0.014 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

$$\text{外管: } Nu_{oo} = 0.021 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

3.1.2 双面加热 双面加热时, 内管和外管的换热必然受到另一侧加热的影响, 图4给出在双面加热时内管和外管各自的换热情况。从图4可以看出: 内管的 Nu 数略有增强, 而外管的 Nu 数略有减少, 与文献[3]的结果不一致。

双面加热的换热公式为:

$$\text{内管: } Nu_i = 0.016 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

$$\text{外管: } Nu_o = 0.019 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

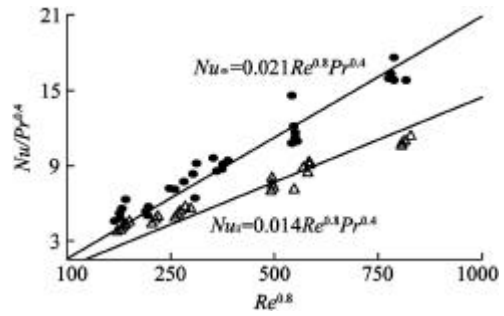


图3 单面加热时的换热特性
Fig. 3 Heat Transfer Characteristics when Inner or Outer Tube Heated Alone

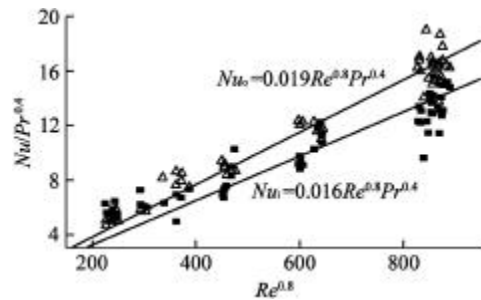


图4 双面加热时的换热特性
Fig. 4 Heat Transfer Characteristics with Bilateral Heating

双面加热时, 其相互影响必然与内外管的热流密度之比有关, 在入口的 Re 数和 Pr 数保持不变、外管的热流密度恒定时, 改变内管的热流密度, 外管 Nu 数的变化如图5所示; 即内管热流密度增大时, 外管的 Nu 数稍有减小。在入口的 Re 数和 Pr 数保持不变, 内管的热流密度恒定时, 改变外管的热流密度, 内管的 Nu 数的变化如图6所示, 即外管的热流密度增大时, 内管的 Nu 数却有较明显的增大, 与文献[1]的结果相一致。

为了计算双面加热时(内外管的热流密度之比为0.4~2.5)的换热量, 将内外管的热流密度平均起来考虑, 即

$$q_{av} = (pd_i L q_i + pd_o L q_o) / (pL d_i + pL d_o),$$

平均换热系数为

$$h_{av} = q_{av} / [(T_i + T_o) / 2 - T_f],$$

平均 Nu 数: $Nu_{av} = h_{av} D_e / k$, 其与 Re 数和 Pr 数的关系如图7所示。由此, 可以得到如下的关系式

$$Nu_{av} = 0.01754 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

3.2 单相压降

管内单相流动沿轴向的总压降

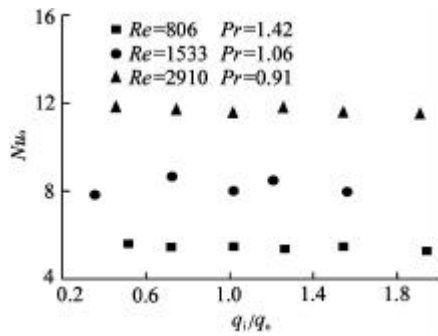


图5 外管 Nu_o 数随热流密度之比的变化
Fig. 5 Nu_o as a Function of q_o/q_i

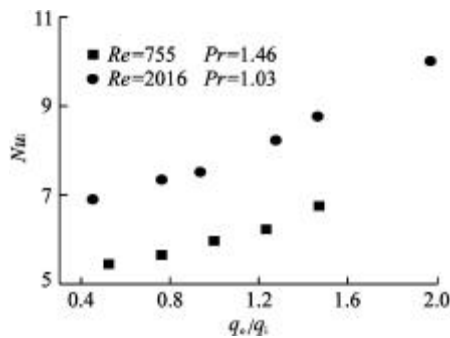


图6 内管 Nu_i 数随热流密度之比的变化
Fig. 6 Nu_i as a Function of q_o/q_i

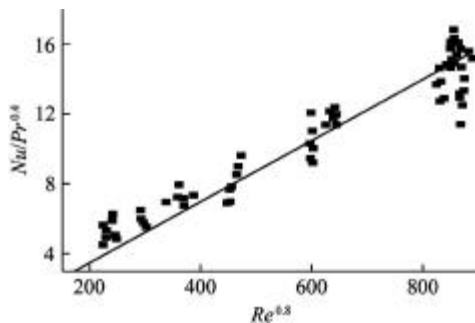


图7 双侧加热时的平均换热特性
Fig. 7 Average Heat Transfer Characteristics with Bilateral Heating

所以，

$$\Delta P_{total} = \Delta P_f + \Delta P_g + \Delta P_a$$

$$\Delta P_f = \Delta P_{total} - \Delta P_g - \Delta P_a$$

$$\Delta P_f = f(L/D_e)(G^2/2r)$$

$$\Delta P_g = rgh$$

式中， ΔP_{total} 为总的压降； ΔP_f 为摩擦阻力压降； ΔP_g 为重位压降； ΔP_a 为加速压降。

由于是单相流动，加速压降可以忽略。因而由测得的总压降，减去重位压降，得出摩擦压降，进而计算出摩擦系数 f 。

摩擦系数与 Re 数即流动状态(层流还是紊流)

相关。对于同心圆环通道，层流时，可以从理论上推得

$$f = \frac{64}{Re} C_1 \left(\frac{d_i}{d_o} \right)$$

对于本实验， $d_i/d_o = 0.7$ 时， $f = 95.36/Re$ 。

对于非圆管通道的紊流，M. Sadatomi 等通过实验得出修正后的 Blasius 公式^[7]

$$f = C_1 Re^{-0.25}$$

$$\frac{C_1}{C_{1o}} = 0.85 + \sqrt[3]{0.0154 \frac{C_1}{C_{1o}} - 0.012}$$

式中， C_1 是非圆管紊流时的系数； C_{1o} 是圆管紊流系数，对于水力光滑管为 0.3164； C_1 是非圆管层流时的系数，对于 $d_i/d_o = 0.7$ 的环形通道，其值为 95.36； C_{1o} 是圆管层流系数，取值 64。

因此， $d_i/d_o = 0.7$ 的环形通道，按 M. Sadatomi 的公式计算得到： $f = 0.3392 Re^{-0.25}$ 。图 8 为本试验 1.5mm 间隙的环形窄缝流动的摩擦阻力的实验结果，并根据实验点得出单相液体摩擦阻力的计算式

$$f = 95.36/Re \quad (Re < 800)$$

$$f = \frac{0.2493}{Re^{0.25}} \quad (800 < Re < 4800)$$

层流向紊流转化的 Re 数为 800 ~ 1000。

由此可见：层流时的实验数据与理论值符合得很好，表明本试验是成功的；紊流时，实验拟合公式的摩擦系数小于 M. Sadatomi 公式的摩擦系数；但 M. Sadatomi 公式是对间隙为 7.5mm 的环管，而本试验的环隙是 1.5mm，说明缝隙小，摩擦系数减小。再与 Ekberg 等^[5](环隙为 1.0mm) 上的计算公式相比，无论是层流还是紊流，本实验的摩擦系数均大于它，这也符合随着间隙减小，

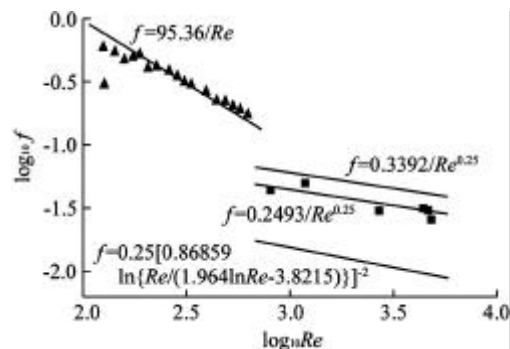


图8 环形窄缝通道的流动特性
Fig. 8 Flow Characteristic of Narrow Annuli

摩擦系数减小的趋势。

3.3 动量传递和热量传递的比拟

应用动量传递与热量传递的比拟原理，利用紊流阻力系数来推算紊流换热系数是求解换热问题的一种有效的方法。由 T. H. Chilton 和 A. P. Colburn 的修正雷诺比拟， $Nu = fRePr^{1/3}/8$ 。由压降实验已得到：对于 1.5mm 的环形窄缝通道，紊流时， $f = 0.2493/Re^{0.25}$ ，代入修正的雷诺比拟公式可得： $Nu = 0.03116Re^{0.75}Pr^{1/3}$ ，并将其与实验测得的平均 Nu 数进行比较(图 9)。从图 9 可以看出，在环形通道中，可以利用阻力系数计算换热系数。

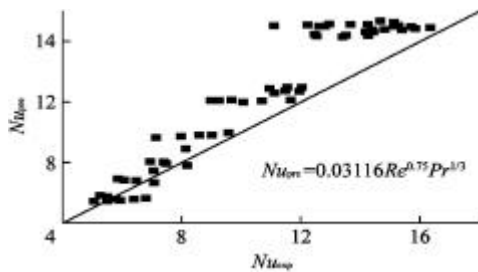


图 9 Nu 数对比图
Fig. 9 Comparison of Nu

4 结论

- (1) 垂直的环形窄缝中，单独加热时，外管 Nu 数大于内管 Nu 数。
- (2) 双面加热时，外管的 Nu 数略有下降，内管的 Nu 数增强。
- (3) 环形窄缝实验中单相流体从层流转为紊流的 Re 数为 800 ~ 1000。
- (4) 间隙为 1.5mm，内外直径之比为 0.7 的环形窄缝在层流区，流动特性与常规环管相同，与

理论公式一致；在紊流区，摩擦系数的计算公式为 $f = 0.2493/Re^{0.25}$ 。

符号表：

- d ：直径，m
- D_e ：环管的水力当量直径，m
- h ：换热系数， $W/(m^2 \cdot K)$
- k ：水的导热系数， $W/(m \cdot K)$
- L ：加热长度，m
- q ：热流密度， W/m^2
- T ：温度，K

角标：

- av：双面加热时的平均
- f：流体
- i(o)：双面加热时的内管(外管)
- ii(oo)：单独加热时的内管(外管)

参考文献：

- [1] 孙中宁，阎昌琪，谈和平等. 双侧加热窄缝环流道强迫对流换热[J]. 核动力工程，2002，23(4)：33 ~ 36.
- [2] 李兆俊，阎昌琪，孙中宁. 直流蒸发器换热元件单相对流传热的实验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报，2000，21(5)：322 ~ 325.
- [3] 李 斌，何安定，周芳德. 窄缝环形通道内流动和传热德试验研究 单相强制流动换热[J]. 化工机械，2001，28(1)：1 ~ 4.
- [4] 李 斌，何安定，王跃社等. 窄缝环形通道内流动和传热德试验研究 摩擦阻力特性[J]. 化工机械，2001，28(2)：67 ~ 70.
- [5] Ekberg N P, Ghiaasiaan S M. Gas-Liquid Two-Phase Flow in Narrow Horizontal Annuli [J]. Nuc Eng Des. 1999, 192: 59 ~ 80.
- [6] 张 弛. 垂直窄缝环形通道内饱和沸腾的实验研究 [J]. 核动力工程，25(6 增刊).
- [7] Sadatomi M, Sato Y, Saruwatari S. Two-Phase Flow in Vertical Noncircular Channel[J]. Int J Multiphase Flow, 1982, 8(6), 641-655.

Experimental Study of Flow and Heat Transfer of Narrow Annuli with Bilateral Heating

PENG Chang-hong¹, Aye Myint¹, GUO Yun¹, JIA Dou-nan¹, QIU Sui-zheng¹,
SU Guang-hui¹, NIE Chang-hua²

(1. National Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, 710049, China;

2. National key Laboratory of Bubble Physics & Natural Circulation, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610041, China)

Abstract: Experiments were conducted to study the single-phase forced convection heat transfer and flow in vertical 1.5mm annuli. The test section can be simultaneously heated from inner and outer tubes by electricity. Based on these data, the Nu number and the friction factor correlations were obtained. A comparative analysis on heat transfer between bilateral and unilateral heating was carried out. At last, the analogy of momentum and heat transfer was carried out.

Key words : Narrow annuli ; Single-phase heat transfer ; Single-phase pressure drop

作者简介 :

彭常宏(1978—),男,1999年毕业于西安交通大学核能工程系,获学士学位。在读博士,从事反应堆热工水力研究。

吴埃敏(1960—),男,西安交通大学核能系在读博士生。从事反应堆热工水力研究。

郭 贇(1979—),男,2002年毕业于西安交通大学核能系,获学士学位。在读硕士,从事反应堆热工水力研究。

(责任编辑:孙华平)

(上接第 87 页)

Review of Correlation FC-2000 for Critical Heat Flux Calculation

CHAI Guo-han , WANG Xiao-hai , CHEN Zhao-lin , TAO Shu-sheng

(Nuclear Safety Center , State Environment Protection Administration , Beijing , 100088 , China)

Abstract : The review process of critical heat flux calculation correlation FC-2000, the main review issues and opinions are introduced, and the restrictions to the application of FC-2000 are given.

Key words : Critical heat flux ; Calculation correlation ; FC-2000 ; Review

作者简介 :

柴国旱(1967—),男,高级工程师。1991年毕业于清华大学反应堆工程及反应堆安全专业,获硕士学位。现从事反应堆系统及事故分析方面的安全审评和研究工作。

王小海(1966—),男,工程师。1989年毕业于清华大学工程力学系工程热物理专业。现从事系统与事故分析。

陈召林(1966—),女,工程师。1989年毕业于厦门大学半导体专业。现从事系统与事故分析。

(责任编辑:孙华平)

(上接第 91 页)

rated boiling heat transfer in vertical annular gap is stronger than that in circular tubes founded on the heated equivalent diameter. Based on experimental data, a new correlation is proposed for this special saturated boiling heat transfer in the special heated annular gap.

Key words : Vertical annular gap ; Saturated boiling heat transfer ; Heated equivalent diameter

作者简介 :

张 弛(1978—),男,2003年毕业于西安交通大学核能科学与工程获硕士学位。现从事核安全审评与监督工作。

吴埃敏(1960—),男,西安交通大学核能科学与工程系博士研究生。

苏光辉(1966—),男,教授。1997年毕业于西安交通大学核能科学与工程专业,获博士学位。现从事反应堆热工水力和安全的教学与科研工作。

(责任编辑:孙华平)