

环形容缝通道湍流流动换热特性分析

曾和义¹, 秋德正², 苏光辉²

(1. 哈尔滨工程大学核科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 西安交通大学核能与热能工程系, 陕西 西安 710049)

摘要:对双面加热环形容缝通道内单相流动换热进行分析研究,提出了理论预测模型。基于该模型,对窄缝宽度分别为 1.0、1.5、2.0 mm 的环形通道单相湍流流动换热系数进行了理论计算,并与实验结果进行了对比,理论预测值与实验结果符合较好。研究表明:内外加热热流密度比对环形容缝通道内的湍流流动换热过程有显著影响,在双面加热情况下,窄缝对流动换热过程强化与否,取决于内外管加热热流密度比及流动状态,即 Re 大小。

关键词:环形容缝通道;热流密度比;单相湍流流动;换热特性

中图分类号: TL331 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2009)04-0339-06

Analyses on Heat Transfer Characteristics of Single-Phase Turbulent Flow in Narrow Annular Channel

ZENG He-yi¹, QIU Sui-zheng², SU Guang-hui²

(1. College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Department of Nuclear and Thermal Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Heat transfer characteristics of single-phase turbulent flow in bilaterally heated narrow annular channels were studied and the theoretical model was proposed. Based on the present model, theoretical calculation was performed to predict the convective heat transfer characteristics for the developed turbulent flow in bilaterally heated narrow annular channels with gap sizes of 1.0, 1.5 and 2.0 mm, respectively. Calculations were found in good agreement with experimental data. The results show that the heat-flux ratios, i.e. the ratio of the heating flux of the inner tube to that of the outer tube, have great influences on the characteristics of heat transfer during single-phase turbulent flow in bilaterally heated narrow annular channels. Whether the convective heat transfer is enhanced or deteriorated with reduced gap in bilaterally heated narrow annular channels depends on the combination influence of the heat-flux ratio and the Reynolds number.

Key words: narrow annular channel; heat-flux ratio; single-phase turbulent flow; heat transfer characteristic

收稿日期:2007-12-28;修回日期:2008-03-07

基金项目:哈尔滨工程大学基础研究资助项目(HEUFT07092)

作者简介:曾和义(1965—),男,四川广汉人,教授,博士,核能科学与工程专业

窄缝通道具有换热面积大、结构紧凑等诸多优点,在新型核动力装置、电子元器件、航空航天等工程领域得到了愈来愈广泛的实际应用。近年来,有关窄缝通道内流动与换热特性及其机理得到了国内外许多学者的广泛关注和深入研究^[1-8]。针对双面加热环形窄缝通道内流动换热特性,有关试验结果表明,双侧加热情况下环形通道内管加热对外管的传热、外管加热对内管的传热有着相互的影响^[7]。文献[9]针对双侧加热环形窄缝通道内单相水处于充分发展层流流动情况下的对流换热进行了数值分析与研究,研究结果表明,内、外壁面加热热流密度比对环形窄缝通道内对流换热特性有极其显著的影响。

本文作者曾对环形窄缝通道内流动阻力特性进行了研究,提出了预测环形窄缝通道单相流动阻力系数的模型,并将模型预测值与实验结果进行对比,取得了较为理想的结果^[10]。本研究在此基础上,对双面加热环形窄缝通道内流动换热特性进行计算与分析,以揭示湍流情况下内外加热热流密度比及环形通道间隙的大小对环形窄缝通道内单相湍流流动换热特性的影响。

1 数学模型

忽略沿流动方向的轴向导热、流体粘性耗散的影响,对于常物性流体、充分发展的单相湍流流动,时均后的湍流流动能量平衡方程在径向上可表示为:

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial r} + \overline{\rho v T} \quad (1)$$

其中: q 为径向热流密度; k 为流体导热系数; c_p 为流体比定压热容; ρ 为流体密度; r 为径向坐标; T 为流体温度; $\overline{\rho v T}$ 为流体温度湍流脉动量; v 为流体径向速度脉动量; $\overline{v T}$ 为湍流脉动值交叉乘积项时均平均值。

将式(1)从 r 至外管内壁面 R_2 积分及根据环形通道内流体能量平衡关系,分别可得:

$$2rq + 2R_2 q_{w2} = 2 \int_r^{R_2} \rho u r \frac{\partial T}{\partial z} dz \quad (2)$$

$$2R_1 q_{w1} + 2R_2 q_{w2} = u_m \rho (R_2^2 - R_1^2) \frac{dT_m}{dz} \quad (3)$$

其中: u_m 为流体截面平均速度; T_m 为流体截面

平均温度; q_{w1} 、 q_{w2} 分别为环形通道内管外壁面与外管内壁面加热热流密度。

由式(1)、(2)可得:

$$\frac{-rq + R_2 q_{w2}}{R_1 q_{w1} + R_2 q_{w2}} = \frac{2}{R_2^2 - R_1^2} \int_r^{R_2} \frac{\mu}{u_m} \cdot \frac{\partial T / \partial z}{dT_m / dz} r dr \quad (4)$$

由式(4)可求出 q ,并可化为如下的无量纲关系式:

$$\frac{-q}{q_{w1}} = -\frac{1}{R} + \frac{2(1 + \frac{1}{R})}{R(1 - \frac{1}{R^2})} \int_R^1 \frac{\mu}{u_m} \cdot \frac{\partial T / \partial z}{dT_m / dz} R dR \quad (5)$$

其中: $R = r / R_2$, 为无量纲径向坐标; $\frac{1}{R} = R_1 / R_2$, 为环形通道内外半径比; $\frac{1}{R} = q_{w1} / q_{w2}$, 为环形通道内、外管壁面加热热流密度比。

在内、外管均匀加热情况下,对于流体温度,有 $\partial T / \partial z = dT_m / dz$ 。因此,式(5)可简化为:

$$\frac{-q}{q_{w1}} = -\frac{1}{R} + \frac{2(1 + \frac{1}{R})}{R(1 - \frac{1}{R^2})} \int_R^1 \frac{\mu}{u_m} R dR \quad (6)$$

另一方面,式(1)可化为如下的无量纲化方程:

$$\frac{-q}{q_{w1}} \left[1 - \overline{(T_v)^+} \right] = \frac{dT^+}{dr^+} \quad (7)$$

其中: $T^+ = k \sqrt{w_1} (T_{w1} - T) / \mu_{q_{w1}}$; $\overline{(T_v)^+} = c_p \overline{(T_v)} / q$; $r^+ = r \sqrt{w_1} / \mu_0$ 。

引入湍流普朗特数 Pr_t , 推导可得:

$$\frac{-q}{q_{w1}} = \left[1 + \left(\frac{Pr}{Pr_t} \right) \frac{\overline{(uv)^{++}}}{1 - \overline{(uv)^{++}}} \right] \frac{dT^+}{dr^+} \quad (8)$$

联立式(7)、(8),可得:

$$\frac{Pr_t}{Pr} = \frac{\overline{(uv)^{++}} (1 - \overline{(T_v)^+})}{\overline{(T_v)^+} (1 - \overline{(uv)^{++}})} \quad (9)$$

其中: $\overline{(uv)^{++}} = -\overline{(uv)} / w_1$ 。

由于在环形通道内存在摩擦切应力为零的点 R_0 ,这将导致 $\overline{(uv)^{++}}$ 的奇异性,为此,须作如下处理,即用 $\overline{(uv)^+} = -\overline{(uv)} / w_1$ 代替 $\overline{(uv)^{++}}$,式(9)可变为:

$$\frac{Pr_t}{Pr} = \frac{\overline{(uv)^+} (1 - \overline{(T_v)^+})}{\overline{(T_v)^+} (\overline{uv} / w_1 - \overline{(uv)^+})} \quad (10)$$

由式(10)可解出 $\overline{(T_v)^+}$,代入式(7),并根据无量纲量的定义,可得:

$$\frac{-q}{q_{w1}} = \frac{1}{R^2} \left[1 + \frac{Pr}{Pr_t} \cdot \frac{\overline{(uv)^+}}{\overline{uv} / w_1 - \overline{(uv)^+}} \right] \frac{dT^+}{dR} \quad (11)$$

由式(6)与(11)可得:

$$d T^+ = R_2^+ \frac{2(\frac{+1}{R} + 1)^{-1} \frac{u}{R} R d R - \frac{1}{R}}{1 + \frac{Pr}{Pr_i} \cdot \frac{(u v)^+}{w_1 - (u v)^+}} d R \quad (12)$$

关于湍流普朗特数,本工作采用由 Jischa 和 Rieke 基于实验数据整理提出的经验关系式^[11]予以确定:

$$Pr_i = 0.85 + \frac{0.015}{Pr} \quad (13)$$

上述模型的应用关键是确定通道内流体流速及湍流切应力 $(u v)^+$ 分布,其求解方法详见文献[10]。在此基础上,可由式(6)通过积分计算得到热流密度径向分布情况,再通过积分计算,由式(12)得到无量纲温度沿环形通道内的径向分布。显然,整个计算过程是一迭代求解过程。求得热流密度及无量纲温度径向分布后,即可根据定义求解表征环形通道内、外管与流体换热特性的特征量,即 Nu 。

根据定义,内管与流体换热的 Nu 为:

$$Nu_{i1} = \frac{q_{w1}}{T_{w1} - T_m} \cdot \frac{D_e}{k} = \frac{D_e^+}{T_m^+} \quad (14)$$

其中: $D_e^+ = D_e \sqrt{w_1/\mu}$, $D_e = 2(R_2 - R_1)$, 为环形通道当量水力直径; T_{w1} 为环形通道内管外壁的壁面温度。

外管与流体换热的 Nu 为:

$$Nu_{o2} = \frac{q_{w2}}{T_{w2} - T_m} \cdot \frac{D_e}{k} = \frac{D_e^+}{(T_m^+ - T_{w2}^+)} \quad (15)$$

其中: T_{w2} 为环形通道外管内壁的壁面温度。

环形通道内、外管与流体换热的平均换热系数定义为:

$$h_{av} = \frac{h_1 2 R_1 (T_{w1} - T_m) + h_2 2 R_2 (T_{w2} - T_m)}{2 (R_1 + R_2) \left(\frac{T_{w1} + T_{w2}}{2} - T_m \right)} \quad (16)$$

环形通道与流体换热的平均 Nu 则为:

$$Nu_{av} = \frac{h_{av} D_e}{k} = \frac{T_m^+ Nu_{i1} + (T_m^+ - T_{w2}^+) Nu_{o2}}{(1 +) (T_m^+ - T_{w2}^+/2)} \quad (17)$$

2 模型验证

根据以上模型,对 3 种环形窄缝通道流动换热特性进行了计算,并将计算结果与实验值

进行对比,以验证模型。实验数据取自于文献 [12]、[13]。不同试验段分别由直径不同的金属圆直管组成间隙不同的同心环形通道,内、外金属圆管分别通电加热流体。去离子水作为循环工质,垂直向上流过环形窄缝通道,并被双面加热。有关实验装置及试验段可详见文献[7]。环形窄缝通道几何结构参数列于表 1。

表 1 环形窄缝通道几何结构参数

R_1 /mm	R_2 /mm	δ /mm
3.0	5.0	2.0
3.5	5.0	1.5
4.0	5.0	1.0

图 1 示出了间隙 分别为 1.0、1.5 和 2.0 mm 环形窄缝通道内单相流动换热系数理论计算值与实验结果的比较,包括环形窄缝通道内管换热系数、外管换热系数及平均换热系数的比较。从图 1 可看出,大部分计算值与实验值间的相对偏差小于 30%。考虑到实验测量等方面的不确定性,理论计算值与实验结果还是较好相符的。这一方面表明了实验的成功,也证明本文提出的模型的正确性。

3 换热特性影响因素

图 2 示出了内外管加热热流密度比对环形窄缝通道内外管换热特性的影响。图 3 示出了加热热流密度比对环形窄缝通道内单相湍流流动平均对流换热系数的影响。

从图 2 可看出,加热热流密度比对环形窄缝通道内单相湍流流动对流换热特性有非常大的影响。在给定流动状态(给定 Re)及给定间隙情况下,随着内外管加热热流密度比的增大,环形窄缝通道内管单相湍流流动对流换热系数逐渐减小,而外管对流换热系数则逐渐增大。此外,由图 2 还可看出,间隙大小对环形窄缝通道内单相湍流流动换热特性的影响。间隙对环形窄缝通道内外管单相湍流流动对流换热影响与热流密度比有关。在加热热流密度比较小的情况下,间隙大小仅对环形窄缝通道内管的换

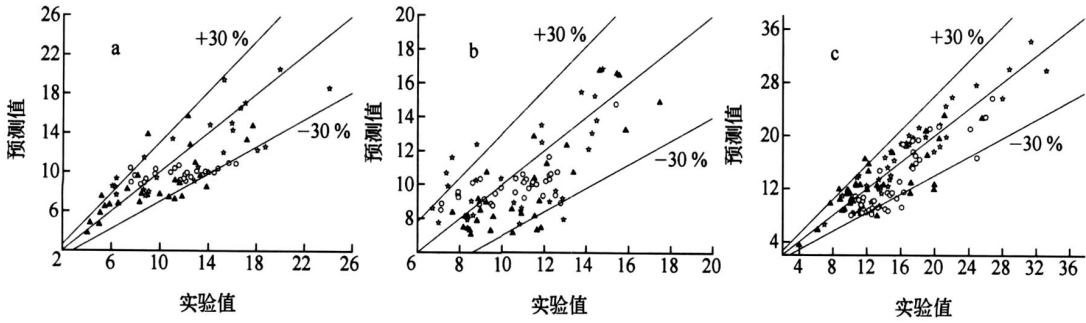


图1 换热系数预测值与实验结果的比较

Fig. 1 Comparison of predicted heat transfer coefficients with experimental data

$\delta, \text{mm}; a-1.0; b-1.5; c-2.0$

$\circ-Nu_{av}; \blacktriangle-Nu_2; \star-Nu_1$

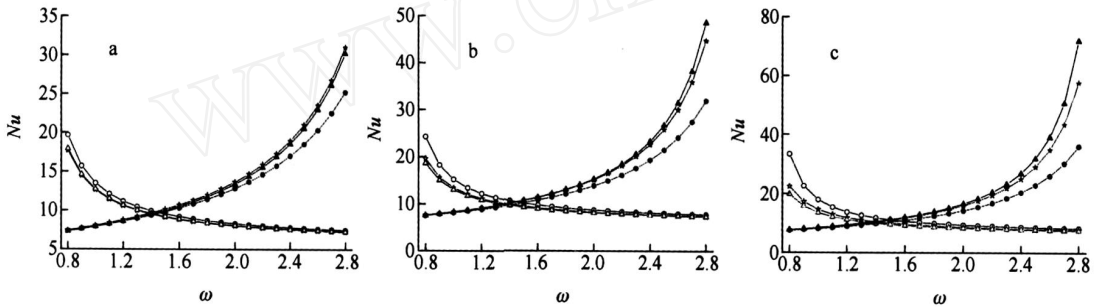


图2 热流密度比对环形窄缝通道内外管换热特性的影响

Fig. 2 Influence of heat-flux ratio on heat transfer performance

$Re; a-3\ 000; b-6\ 000; c-10\ 000$

$\delta=2.0\ \text{mm}; \circ-Nu_1, \bullet-Nu_2; \delta=1.5\ \text{mm}; \star-Nu_1, \blackstar-Nu_1; \delta=1.0\ \text{mm}; \triangle-Nu_1, \blacktriangle-Nu_2$

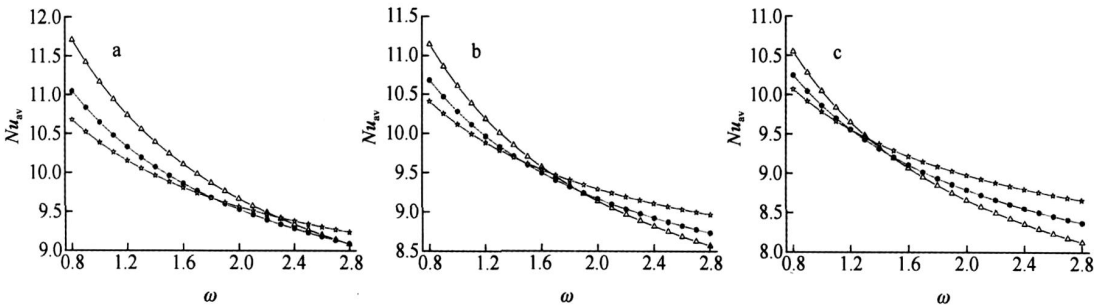


图3 热流密度比对平均换热特性的影响

Fig. 3 Influence of heat-flux ratio on mean heat transfer performance

$Re; a-10\ 000; b-6\ 000; c-3\ 000$

$\delta, \text{mm}; \triangle-2.0; \bullet-1.5; \star-1.0$

热特性有影响,而对外管换热几乎无影响。随着间隙的减小,环形窄缝通道内管的换热系数将降低。随着内外管加热热流密度比的增大,间隙对环形窄缝通道内管换热特性的影响逐渐减弱,而对外管对流换热特性的影响逐渐增强。

当加热热流密度比增大到一定值后,内管的对流换热特性将不受间隙的影响,此时间隙大小仅对外管的换热特性有影响。随着间隙的减小,环形窄缝通道外管的对流换热过程将会得到增强。从图2还可明显看出,加热热流密度

比对环形窄缝通道内外管对流换热特性的不同影响。对于给定间隙的环形窄缝通道,在加热热流密度比较小的情况下,环形窄缝通道内管换热强于外管的换热强度。随着加热热流密度比的增大,环形窄缝通道内管的换热过程将受到削弱,而外管的换热过程则得到强化,且间隙愈小得到的强化程度愈大。当加热热流密度比增大到一定值后,外管的对流换热强度将超过内管的对流换热强度。有关此过程的转换点大小与流动状态(Re 大小)及间隙大小有关。

从图3可看出,随着加热热流密度比的增大,环形窄缝通道平均对流换热性能将下降。此外,更为明显的一个现象是,在加热热流密度比较小的情况下,间隙的减小将导致环形窄缝通道平均对流换热性能的降低;而对于加热热流密度比较大的情况,间隙的减小则会使环形窄缝通道平均换热性能得到强化。这一过程的转化点同样与间隙大小及流动状态有关。随着 Re 的降低,该转化点逐渐地向加热热流密度比小的方向移动。

4 结论

1) 内外管加热热流密度对环形窄缝通道内流动换热有着显著影响。在给定流动状态(给定 Re)及通道间隙情况下,随着内外管加热热流密度比的增大,环形窄缝通道内管单相湍流流动对流换热系数逐渐减小,而外管对流换热系数则逐渐增大。

2) 间隙大小对环形窄缝通道内流动换热特性影响较为复杂,且与内外管加热热流密度比有关。在加热热流密度比较小的情况下,间隙大小仅对环形窄缝通道内管的换热特性有影响,而对环形窄缝通道外管对流换热几乎无影响。随着间隙的减小,环形窄缝通道内管的换热强度将降低。随着内外管加热热流密度比的增大,间隙对环形窄缝通道内管换热特性的影响逐渐减弱,而对外管对流换热特性的影响逐渐增强。当加热热流密度比增大到一定值之后,内管的对流换热特性将不受间隙的影响,此时,间隙大小仅对环形窄缝通道外管的对流换热特性有影响。随着间隙的减小,环形窄缝通道外管的对流换热过程将会得到增强。

3) 加热热流密度比对双侧加热环形窄缝

通道流动换热过程有着显著影响。窄缝对于环形通道流动换热过程强化与否,取决于内外管加热热流密度比及流动状态。

参考文献:

- [1] 路广遥,孙中宁,王经,等.窄缝环形流道内流动传热特性的实验研究[J].中国动力工程学报,2005,25(2):275-279.
LU Guangyao, SUN Zhongning, WANG Jing, et al. Experimental study on heat transfer characteristics of flow in a narrow annular duct [J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2005, 25(2): 275-279 (in Chinese).
- [2] DIRKER J, MEYER J P. Heat transfer coefficients in concentric annuli [J]. Journal of Heat Transfer, 2002, 124: 1 200-1 203.
- [3] 孙中宁,阎昌琪,谈和平,等.窄环隙流道强迫对流换热实验研究[J].核动力工程,2003,24(4):350-353.
SUN Zhongning, YAN Changqi, TAN Heping, et al. Experimental investigation on forced convection heat transfer through narrow annulus [J]. Nuclear Power Engineering, 2003, 24(4): 350-353 (in Chinese).
- [4] 孙中宁,阎昌琪,谈和平,等.双侧加热窄环隙流道强迫对流换热[J].核动力工程,2002,23(4):33-36.
SUN Zhongning, YAN Changqi, TAN Heping, et al. Forced convection heat transfer in narrow annulus with bilateral heating [J]. Nuclear Power Engineering, 2002, 23(4): 33-36 (in Chinese).
- [5] 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.
LI Zhaojun, YAN Changqi, SUN Zhongning. Experimental investigation on the single-phase heat transfer of casing pipe used for once-through steam generator [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2000, 21(5): 322-325 (in Chinese).
- [6] 刘瑞兰,王增辉,苟军利,等.环形狭缝通道中单相水对流换热的数值计算[J].核科学与工程,2002,22(3):229-234.
LIU Ruilan, WANG Zenghui, GOU Junli, et al. Numerical calculation of single phase convective heat transfer in narrow annular channel [J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering,

- 2002, 22(3): 229-234(in Chinese).
- [7] 彭常宏,吴埃敏,郭贇,等. 窄缝环形通道内单相液体传热和压降的试验研究[J]. 核动力工程, 2003, 24(6增刊):92-96.
PENG Changhong, Aye Myint, GUO Yun, et al. Experimental study of flow and heat transfer of narrow annuli with bilateral heating[J]. Nuclear Power Engineering, 2003, 24(6S2): 92-96 (in Chinese).
- [8] 孙中宁,曹夏昕,阎昌琪,等. 竖直窄环缝通道内的强迫对流换热[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(5):828-830.
SUN Zhongning, CAO Xiaxin, YAN Changqi, et al. Forced convection heat transfer in vertical narrow annuli[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(5): 828-830(in Chinese).
- [9] 曾和义,秋穗正,贾斗南. 热流密度比对环形窄缝通道内单相水换热特性的影响[J]. 西安交通大学学报,2006,40(3):307-310.
ZENG Heyi, QIU Suizheng, JIA Dounan. Effect of heat-flux ratio on the heat transfer characteristics of fully developed flow in bilaterally heated narrow annuli[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(3): 307-310(in Chinese).
- [10] 曾和义,秋穗正,苏光辉,等. 环形窄缝通道单相流动特性研究[J]. 原子能科学技术,2007, 41(5):575-579.
ZENG Heyi, QIU Suizheng, SU Guanghui, et al. Study on flow characteristics of single-phase flow in narrow annular channels[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2007, 41(5): 575-579(in Chinese).
- [11] JISCHA M, RIEKE H B. About the prediction of turbulent prandtl and schmidt numbers from modified transport equations [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1979, 22(11): 1 547-1 555.
- [12] 彭常宏. 环形窄缝通道内流动沸腾传热和压降的研究[D]. 西安:西安交通大学能源与动力工程学院, 2005.
- [13] 吴刚. 环形狭缝通道内单相水和过热蒸汽流动与换热特性的实验研究[D]. 西安:西安交通大学能源与动力工程学院, 2005.