

竖直矩形窄通道内流动沸腾局部换热特性实验研究

顾晟杰¹, 陶乐仁^{1,2}, 金程¹, 黄理浩^{1,2}

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室 上海 200093)

摘要: 为了明确竖直矩形窄通道内各阶段流动沸腾的换热特性, 优化换热器性能, 以去离子水为工质, 对尺寸为 720 mm × 250 mm × 3.5 mm 的单面电加热竖直矩形窄通道内的流动沸腾换热进行实验研究, 分析了质流密度、进口温度、热流密度对流动沸腾局部换热特性的影响。并在已有流动沸腾传热关联式的基础上, 对实验数据进行非线性回归分析, 得到适用于实验工况下的新流动沸腾传热关联式。结果表明: 质流密度增大对流动沸腾段换热特性有强化作用, 对核态沸腾段换热特性有削弱作用; 热流密度对核态沸腾影响剧烈, 但对流动沸腾的影响不明显; 入口温度越高, 流体会越早进入过冷沸腾阶段, 但对局部传热系数的影响不明显; 新流动沸腾传热关联式与实验值的平均相对误差为 23.87%, 其中 74.19% 的预测值在 ±25% 内, 83.87% 的预测值在 ±50% 以内, 能很好地预测本实验工况下矩形窄通道内流动沸腾的局部传热系数。

关键词: 窄通道; 两相流; 传热系数; 传热关联式

中图分类号: TK124 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.08.011

[引用本文格式] 顾晟杰, 陶乐仁, 金程, 等. 竖直矩形窄通道内流动沸腾局部换热特性实验研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38(8): 87-94. GU Sheng-jie, TAO Le-ren, JIN Cheng, et al. Experimental study on local heat transfer characteristics of flow boiling in vertical rectangular narrow channels[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(8): 87-94.

Experimental Study on Local Heat Transfer Characteristics of Flow Boiling in Vertical Rectangular Narrow Channels

GU Sheng-jie¹, TAO Le-ren^{1,2}, JIN Cheng¹, HUANG Li-hao^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093;
2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power and Engineering, Shanghai, China, Post Code: 200093)

Abstract: In order to clarify the heat transfer characteristics of flow boiling in a narrow vertical rectangular channel at each stage and optimise the performance of the heat exchanger, an experimental study was carried out on the flow boiling heat transfer in a single-sided electrically heated narrow vertical rectangular channel with dimensions of 720 mm × 250 mm × 3.5 mm, using deionised water as the working medium, and the effects of mass flux, inlet temperature and heat flux on the local heat transfer characteristics of flow boiling were analyzed. Based on the existing flow boiling heat transfer correlation formula, a non-linear regression analysis of the experimental data was carried out to obtain a new flow boiling heat transfer correlation formula applicable to the experimental conditions. The results show that the increasing mass flux has a strengthening effect on the heat transfer characteristics of the flow boiling section and a

收稿日期: 2022-10-09; 修订日期: 2022-11-10

基金项目: 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室窄通道内液膜生成机理研究项目(2019KJFZ01)

Fund-supported Project: Research Project of Formation Mechanism of Liquid Film in Narrow Channels of Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power and Engineering (2019KJFZ01)

作者简介: 顾晟杰(1999-), 男, 上海理工大学硕士研究生.

通讯作者: 陶乐仁(1962-), 男, 上海理工大学教授.

weakening effect on the heat transfer characteristics of the nucleate boiling section; the heat flux has a strong effect on the nucleate boiling but not on the flow boiling; the higher the inlet temperature is, the earlier the fluid will enter the subcooling boiling stage, but the effect on the local heat transfer coefficient is not obvious; the average relative error between the new flow boiling heat transfer correlation formula and the experimental value is 23.87%, of which 74.19% of the predicted values are within $\pm 25\%$, and 83.87% of the predicted values are within $\pm 50\%$, which can well predict the local heat transfer coefficient of flow boiling in a narrow rectangular channel under this experimental condition.

Key words: narrow channel, two phase flow, heat transfer coefficient, heat transfer correlation

引 言

两相流动广泛存在于各种工业过程中,与人类生活息息相关。窄通道的流动沸腾换热具有沸腾过热度低、换热性能好、流动压降升高和结构紧凑等特性。随着科技的发展,矩形窄通道已经成为强化换热常用的结构形式之一^[1],被广泛应用于各种换热设备,如大型蒸发系统的板式蒸发器或紧凑型反应堆中。

对于窄通道沸腾换热的研究主要包括流型及换热机理的研究。在流型研究方面,常规通道内的流型主要有泡状流、弹状流、搅浑流和环状流^[2]。Julia 等人^[3]对竖直管束的流型进行了研究;杨丽辉等人^[4]针对竖直矩形窄通道内水沸腾换热的流型进行研究并提出流型转变标准;Yuan 等人^[5]根据漂移流模型和力平衡分析得出了适用于矩形窄缝通道内的流型转变准则。在换热机理方面,Kim 等人^[6]基于对核沸腾和对流沸腾的叠加作用,提出了一种新的流动沸腾换热预测模型;郭新田等人^[7]研究饱和沸腾起始点的影响因素发现,进口欠热度对饱和沸腾起始点壁面过热度无明显影响,质量流速对饱和沸腾起始点壁面过热度的影响较大,并得到饱和沸腾起始点热流密度的计算关系式;Pulvirenti 等人^[8]的研究表明,矩形通道内沸腾机理由核态沸腾和对流沸腾机理共同作用,并探究了沸腾传热系数的影响因素。流动沸腾过程中包括 3 个阶段:单相流阶段、部分发展的核态沸腾阶段和完全发展的核态沸腾阶段^[9]。单相流阶段由大块流体运动产生的强迫对流换热机制占主导地位;部分发展成核态沸腾阶段的换热同时受到强迫对流换热和核态沸腾换热的影响;在完全发展的成核沸腾阶段,大部分通道壁面

成为汽化核心位置,这导致核态沸腾换热对总换热起主导作用。两相流动中不同流型和不同点处的换热机理不同,因此窄通道内流动沸腾换热机理非常复杂^[10]。上述研究并未很好地将流型研究与各局部位置的换热机理研究相结合,对于不同阶段的局部换热特性研究不够深入。因此,对于流动沸腾的局部换热特性及影响因素仍然需要进一步研究。

本文采用电加热方式,对竖直矩形窄通道内流动沸腾局部换热特性进行实验研究,通过改变质流密度、进口温度和热流密度对通道内流动沸腾换热的影响因素进行研究。结合不同流型下各局部位置主导的换热机理,分析局部换热特性,并与已有流动沸腾传热关联式进行对比,建立适合实验工况的新的流动沸腾传热关联式,为换热器的设计优化提供理论依据。

1 实验系统

实验装置如图 1 所示。该装置主要由储液罐、蠕动泵、流量计、实验段、冷凝器以及高速摄像机组成。实验使用去离子水,从储液罐流出,由蠕动泵驱动,经预热器预热后进入实验段,流量计与恒温水箱用以控制质流密度及实验段入口水温。实验段采用电加热,使用钢化玻璃密封观察沸腾现象。去离子水经过实验段后,进入冷凝器冷凝,最后返回储液罐完成循环。

实验段结构如图 2 所示。该结构由钢板和螺栓固定,由电加热片、硅胶垫片、铜板、钢化玻璃板组成,并外包有绝热材料以保证隔热效果,减小热损失。矩形窄通道尺寸为 720 mm × 250 mm × 3.5 mm。实验段共等距布置了 8 个 T 型热电偶,从上到下记为 TC1 ~ TC8,测量被加热铜壁面的温度,忽略壁面导热热阻,壁面温度即热电偶所测温度。

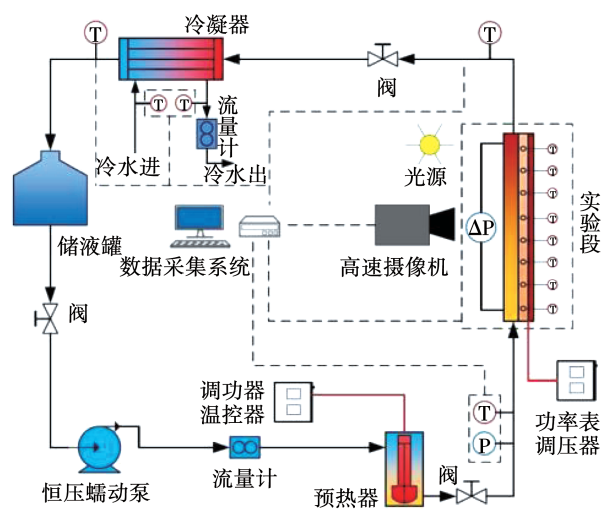


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

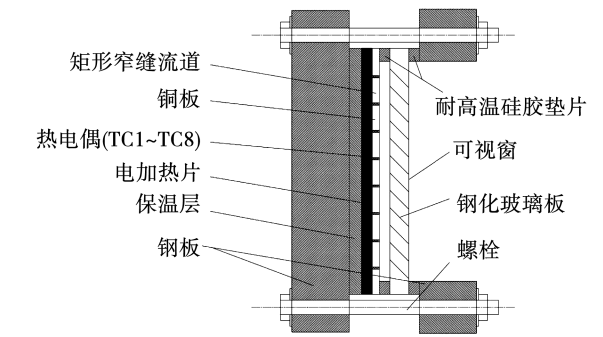


图 2 实验段结构

Fig. 2 Structure diagram of experimental section

2 数据处理

考虑到实验中存在热损失(主要由实验段与空气的对流换热所导致),通过单相对流换热热平衡可确定热损失,计算实验段有效热流密度:

$$q = \frac{Q - Q_{loss}}{A} \tag{1}$$

$$Q_{loss} = Q - Q_f \tag{2}$$

$$Q_f = c_p GF(t_{out} - t_{in}) \tag{3}$$

式中: q —计入热损失的实际热流密度, kW/m^2 ; Q —电加热片输入功率, kW ; Q_{loss} —热损失, kW ; A —加热面积, m^2 ; Q_f —单相对流换热量, kW ; c_p —比定压热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; G —质流密度, $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; F —过流面积, m^2 ; t_{in}, t_{out} —通道入口和出口水温, $^{\circ}\text{C}$ 。

实验采用单侧壁面均匀加热,各点的加热密度视为一致,壁面温度测量由热电偶所测,忽略壁面导

热热阻。过冷段长度可通过热平衡,用下式计算:

$$L_{sub} = \frac{c_p GF(t_{sat} - t_{in})}{qS} \tag{4}$$

位置 Z 处的干度为:

$$x = \frac{qS(Z - L_{sub})}{GFH_r} \tag{5}$$

局部传热系数定义为:

$$K = \frac{q}{t_w - t_{sat}} \tag{6}$$

式中: L_{sub} —过冷段长度, m ; t_{sat} —通道出口压力下的饱和温度, $^{\circ}\text{C}$; S —加热壁面宽度, m ; x —无因次干度; Z —局部测温点距通道入口的距离, m ; H_r —水的蒸发焓值, kJ/kg ; t_w —通道壁面温度, $^{\circ}\text{C}$; K —局部传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

实验参数范围及测量不确定度如表 1 所示。

表 1 实验参数范围及测量不确定度

Tab. 1 Experimental parameter range and measurement uncertainties

参 数	范 围	精 度	不确定度/%
入口水温/ $^{\circ}\text{C}$	27 ~ 60	$\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$	1.33
质流密度/ $\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$	2.22 ~ 3.49	2.5 级	0.25
热流密度/ $\text{kW}\cdot\text{m}^2$	0 ~ 12	$\pm 8\%$	0.46
出口压力/ MPa	0.101 ~ 0.201	0.4 级	0.72
流通面积/ mm^2	875	—	—
加热面积/ cm^2	1 800	—	—

3 实验结果及分析

3.1 质流密度对传热系数的影响

沿着实验段方向,会出现单相流、泡状流、搅拌-环状流,TC5 ~ TC8 主要位于单相流区域,TC1 ~ TC4 主要位于饱和沸腾起始点以上,因此选取 TC1 ~ TC4 处局部传热系数进行分析。图 3 为热流密度为 $8.4\text{ kW}/\text{m}^2$ 、入口温度为 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、质流密度分别为 2.22 和 $2.86\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时,TC1 ~ TC4 的局部传热系数,以及热流密度为 $7.1\text{ kW}/\text{m}^2$ 、入口温度温度为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、质流密度分别为 $2.22, 2.86$ 和 $3.49\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时,TC1 ~ TC4 处的局部传热系数。从图中趋势可以看出,随着质流密度的增加,TC1 ~ TC3 处的局部传热系数明显提高,但在 TC4 处质流密度的增加导致局部传热系数的下降。这是因为 TC1 位于通道

出口处,主要出现环状流,处于流动沸腾段;TC4 位于通道中部,更加靠近沸腾起始点,处于核态沸腾段。两者的沸腾机理不同,因此需要对 TC1 和 TC4 处进行深入分析以研究不同沸腾机理时的换热特性。

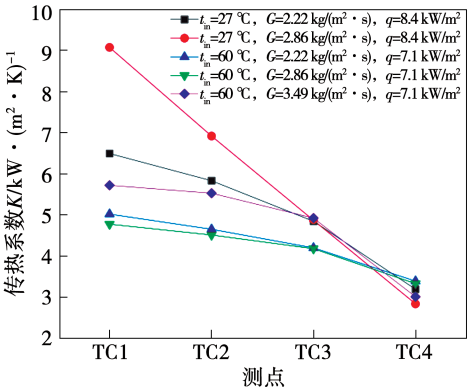


图 3 不同工况下的局部传热系数
Fig. 3 Local heat transfer coefficient under different working conditions

图 4 是 TC1 处在入口温度为 40 和 50 °C 时,不同质流密度下的局部传热系数。TC1 位于通道的出口处,距离汽化核心最远,沸腾机理主要为流动沸腾。由图 4 可知,传热系数随着干度的增加逐渐降低后趋于稳定,不再发生变化,这是因为 TC1 处核态沸腾受到抑制,以对流沸腾为主。随着质流密度的增加,传热系数逐渐增大,这是因为流动沸腾主要受液膜厚度的影响,流速的增加减薄了液膜的厚度,削弱了热阻,使壁面能通过导热和对流的方式更好地将热流传递给流体,同时质流密度的增加也增加了对流体的扰动,进一步加大了流动沸腾的传热系数。

图 5 是 TC4 在入口温度为 40 和 50 °C 时,不同质流密度下的局部传热系数。TC4 位于通道中部,沸腾机理以核态沸腾为主。由于核态沸腾换热主要依靠气泡带走壁面热量,干度的增加有利于汽化核心的增长,从而生成更多气泡传递热量。气泡的生成会增加扰动,有助于换热,因此传热系数随着干度的增加呈增长趋势。但质流密度的增加减小了传热系数,这是因为过冷的流体增多,还没有经过充分预热就进入主流区,抑制气化核心的生成,从而削减传热系数。

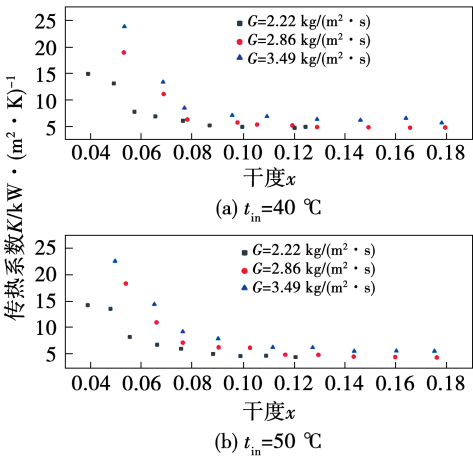


图 4 TC1 处质流密度对传热系数的影响
Fig. 4 Effect of mass flux at TC1 on heat transfer coefficient

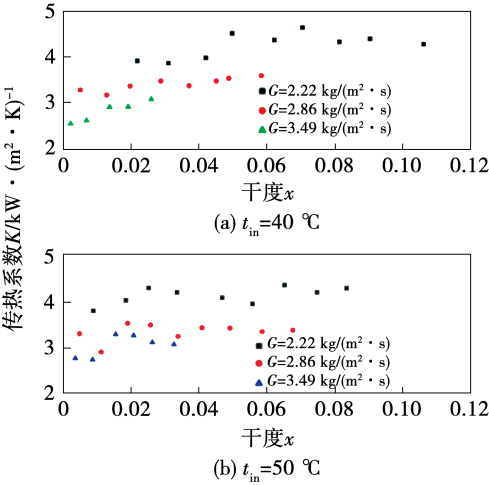


图 5 TC4 处质流密度对传热系数的影响
Fig. 5 Effect of mass flux at TC4 on heat transfer coefficient

3.2 热流密度对传热系数的影响

图 6 为入口温度 27 °C、质流密度为 2.22 kg/(m²·s)、热流密度在 4.5 ~ 10.1 kW/m² 范围内时热流密度及对应干度与传热系数的关系。图中实心图例对应传热系数,空心图例对应干度。由图 6 可知,随着热流密度的增大,干度也逐渐增加,实验段水经历过冷沸腾、核态沸腾及流动沸腾。以 TC1 处为例,在热流密度较小时,流型主要为泡状流,传热系数随着干度的增加会出现 1 个峰值,干度接近零,这是因为过冷沸腾逐渐转变为核态沸腾,气泡的产生使传热系数快速升高。随着热流密度和干度的继续增加,传热系数逐渐降低,此时流型主要为搅拌

- 环状流,核态沸腾向流动沸腾转变,受壁面处液膜热阻的影响,传热系数减弱并趋于稳定,热流密度的进一步增加对传热系数影响不大。因此,热流密度对核态沸腾的影响剧烈,但对流动沸腾的影响不明显。

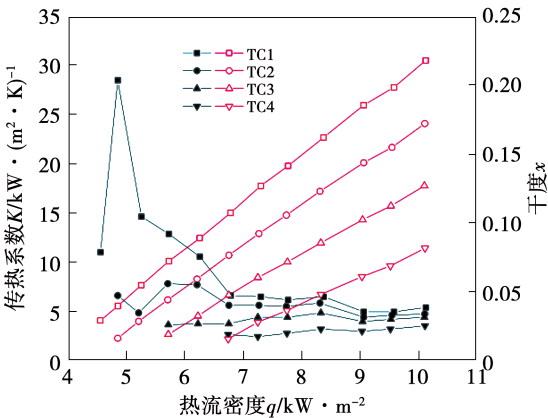


图 6 热流密度对局部传热系数的影响

Fig.6 Effect of heat flux on local heat transfer coefficient

3.3 入口温度对传热系数的影响

图 7 为质流密度 3.49 kg/(m²·s)、热流密度 9.55 kW/m²、入口温度在 40 ~ 60 °C 范围内时 TC1 ~ TC5 处传热系数的变化。从图中可以看出,不同入口温度的曲线变化趋势基本一致,入口温度对局部传热系数的影响不明显。

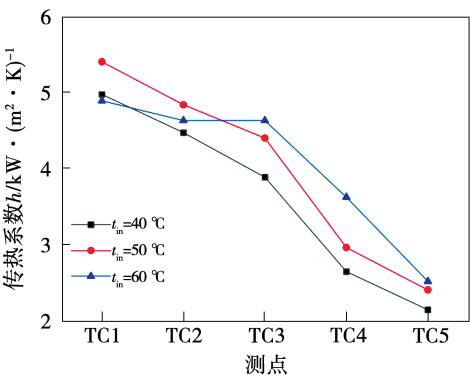


图 7 入口温度对局部传热系数的影响

Fig.7 Effect of inlet temperature on local heat transfer coefficient

同样以位于流动沸腾区域的 TC1 处及位于核态沸腾区域的 TC4 处为分析对象,图 8 和图 9 为质量流量相同的情况下,入口温度对 TC1 和 TC4 处局部传热系数的影响。由图 8 和图 9 可以看出,TC1

和 TC4 处不同入口温度关于干度的散点图高度重合,因为沸腾区域传热系数主要受气化核心、气泡扰动、液膜厚度影响,入口温度对沸腾区域的传热系数影响很小。但入口温度可以改变传热状态,入口温度越高,流体会越早进入过冷沸腾阶段。

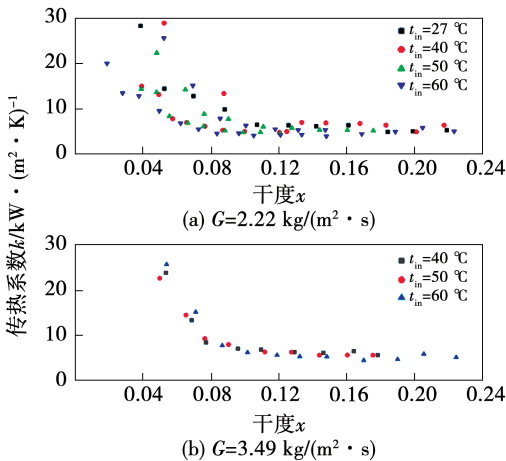


图 8 TC1 处入口温度对传热系数的影响

Fig.8 Effect of inlet temperature at TC1 on heat transfer coefficient

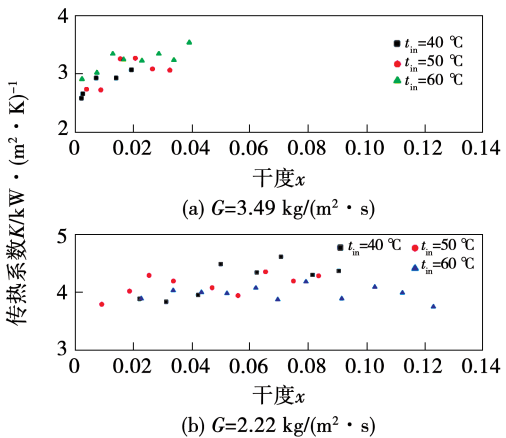


图 9 TC4 处入口温度对传热系数的影响

Fig.9 Effect of inlet temperature at TC4 on heat transfer coefficient

4 流动沸腾传热关联式

以往文献中专门针对竖直窄矩形通道局部传热系数提出的流动沸腾传热关联式相对较少,大多针对研究圆管或圆环,其传热模型主要可以分为传热叠加模型和无量纲模型。传热叠加模型^[11]主要认为该通道内流动沸腾换热由对流沸腾换热和核态沸

腾换热叠加而成;无量纲模型^[12]则对核态沸腾进行修正,利用无量纲数的组合对传热系数进行预测。

表 2 列出了文献[13–19]提出的传热关联式,并利用实验值与其预测值进行了比较。

表 2 相关公式的特征

Tab. 2 Characteristics of correlation formulas

文献	公式	类型	工质	几何尺寸 D_h/mm	适用范围
[13]	$K_{\text{tp}} = Eh_{\text{conv}} + Sh_{\text{nb}}$	传热叠	水, R11,	2.95 ~ 32	垂直流动、水平流动
	$E = 1 + 24\,000Bo^{1.16} + 1.37(1/X_{\text{tt}})^{0.86}$	加模型	R12, R113		$0.67 \times 10^2 \sim 6.15 \times 10^2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
	$S = \frac{1}{1 + 1.15 \times 10^{-6}E^2Re_1^{1.17}}$				$1.1 \times 10^3 \sim 2.28 \times 10^6 \text{ kW}/\text{m}^2$
	$K_{\text{conv}} = 0.023Re_1^{0.8}Pr^{0.4}\frac{\kappa}{D}$				
	$K_{\text{nb}} = 55(P/P_{\text{critical}})^{0.12}[\log_{10}(P/P_{\text{critical}})]^{-0.55}M^{-0.5}q^{0.67}$				
[14]	$K_{\text{tp}} = 22.9(boRe_1^{0.5})^{0.355}\frac{\kappa}{D}$	无量纲	水, R11, R12,	0.19 ~ 3	垂直流动、水平流动
		模型	R123, R134a, R410a		$0.0203 \times 10^3 \sim 1.5 \times 10^3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ $1 \sim 300 \text{ kW}/\text{m}^2$
[15]	$K_{\text{tp}} = 6\,400\,000Bl^{0.54}We^{0.3}(\rho_l/\rho_g)^{-0.4}$	无量纲	水,	2.98	水平流动
		模型	乙二醇		$50 \sim 151 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
[16]	$K_{\text{tp}} = 138.9Re^{0.46}N_{\text{conf}}^{0.4}Bo^{0.38}Pr^{0.38}\frac{\kappa}{D}$	无量纲	水	环形狭缝	垂直流动
		模型		1 ~ 2	$45 \sim 180 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ $40 \sim 210 \text{ kW}/\text{m}^2$
[17]	$K_{\text{tp}} = K_{\text{conv}}[1 + 80(\chi^2 - \chi^6)e^{-0.6Co}] + K_{\text{nb}}(1 - \chi)$	传热叠加	R134a	0.54 ~ 1.09	垂直流动、水平流动
	$K_{\text{nb}} = 55(P/P_{\text{critical}})^{0.12-0.2\log_{10}Re_p}[\log_{10}(P/P_{\text{critical}})]^{-0.55}$	模型			$20 \sim 350 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
	$K_{\text{conv}} = K_{\text{conv},l}(1 - \chi) + h_{\text{conv},v}\chi$				$5 \times 10^4 \sim 2.2 \times 10^6 \text{ kW}/\text{m}^2$
[18]	$K_{\text{tp}} = EK_{\text{conv}} + SK_{\text{nb}}$	传热叠加	水, R12,	2.9 ~ 32	垂直流动、水平流动
	$E = \left[1 + \chi Pr\left(\frac{\rho_l}{\rho_v} - 1\right)\right]^{0.35}$	模型	乙二醇		$12.4 \sim 8\,179.3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
	$S = (1 + 0.055E^{0.1}Re^{0.16})^{-1}$				$0.349 \times 10^3 \sim 2.62 \times 10^3 \text{ kW}/\text{m}^2$
	$K_{\text{conv}} = 0.023\frac{\kappa}{D}Re^{0.8}Pr^{0.4}$				
	$K_{\text{nb}} = 55(P/P_{\text{critical}})^{0.12}[\log_{10}(P/P_{\text{critical}})]^{-0.55}M^{-0.5}$				
[19]	$K_{\text{tp}} = 30Re^{0.857}Bo^{0.714}\frac{\kappa}{D}$	无量纲	R113	3.1	垂直流动
		模型			$0.125 \times 10^2 \sim 7.50 \times 10^2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ $0.14 \times 10^2 \sim 3.80 \times 10^2 \text{ kW}/\text{m}^2$

对于这些传热关联式,使用平均相对误差对其预测值进行评价,计算公式为:

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|K_{\text{cal},i} - K_{\text{exp},i}|}{K_{\text{exp},i}} \right) \times 100\% \tag{7}$$

式中: M —平均相对误差,%; n —实验数据点个数; $K_{\text{cal},i}$ —局部传热系数的预测值, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; $K_{\text{exp},i}$ —局部传热系数的实验值, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

表 3 为流动沸腾传热关联式的预测误差。图 10 为文献[13–19]经验关系式传热系数预测值 K_{cal}

与实验值 K_{exp} 的比较。由表 3 和图 10 可知,在传热叠加模型方面,文献[13,17–18]关联式的预测效果较差,平均相对误差分别为 177.71%,70.73% 和 58.86%,数据点偏差在 $\pm 50\%$ 内占比分别为 16.13%,0 和 29.03%。无量纲模型中,文献[19]关联式的预测结果偏小;文献[14–16]提出的关联式预测效果较好,平均相对误差分别为 39.88%,65.86% 和 48.19%,有 50.81%,51.61% 和 67.74% 的数据点在 $\pm 50\%$ 误差之内。

表 3 流动沸腾传热关联式的预测误差 (%)

Tab. 3 Prediction error of correlations for flow boiling heat transfer (%)

文献	M	误差 $\pm 25\%$ 以内	误差 $\pm 50\%$ 以内
[13]	177.71	9.68	16.13
[14]	65.86	32.26	51.61
[15]	39.88	38.71	50.81
[16]	48.19	38.71	67.74
[17]	70.73	0	0
[18]	58.86	0	29.03
[19]	80.60	0	0

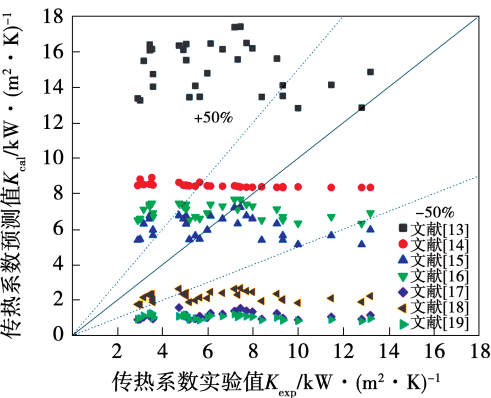


图 10 传热系数预测值与实验值的比较

Fig. 10 Comparison of predicted and experimental values of heat transfer coefficients

传热叠加模型中,文献[13]的预测结果偏大,关联式计算得到的两相沸腾传热系数接近核态沸腾传热系数,由于抑制因子过大,因此随着干度的增加,预测结果愈发偏离实验值;文献[17-18]的预测结果偏小,由于增强因子过小而导致计算值较实验值偏小,尤其是在干度小的区域。因为本实验工况质流密度较小,文献[13,17-18]关联式计算偏差较大。

无量纲模型中,文献[19]的关联式主要以核态沸腾为主要机理建立,预测结果偏小,其认为沸腾传热系数对热流密度有很强的依赖性,而蒸汽干度不影响流动沸腾换热,无法较好地预测产生间歇性干涸的流动沸腾状态,与实验值偏差较大。文献[15]认为,小通道中的流动沸腾换热与大通道有明显区别,成核换热机制优于对流换热机制,小通道中的沸腾换热更依赖于热流密度,引入韦伯数 We 能更加

清楚地反映表面张力在强迫对流沸腾换热中的重要作用,从而提高预测准确度。但因其关联式针对水平通道,与本实验垂直到动方向不符,预测结果存在偏差。文献[16]考虑了狭缝流动沸腾传热时表面张力和当量直径的影响,认为狭缝间隙对狭缝流动沸腾传热的影响比液体蒸发量大。因此,引入限制数 N_{conf} ,能够说明流体在沸腾流动过程中受狭缝限制所能达到的最大气泡尺寸,同时考虑了狭缝间隙和液体蒸发量对传热的影响。但由于其研究的窄缝形状为环形,与本实验竖直矩形窄缝不同,预测结果也有偏差。文献[14]考虑了小通道饱和流沸腾与传统的宏观通道不同,小通道使用液相的雷诺数进行计算比采用流体的雷诺数精度更高,但该关联式在雷诺数较高的区域误差仍然较大,所以有必要对其进行修正。通过对实验数据进行多元非线性回归,得到新的关联式为:

$$K_{ip}=1.086\,72\times10^{-4}\left(bo^{3.325\,07}Re_1^{-0.884\,35}\right)^{9.196\,96}\frac{\kappa}{D}$$

(8)

式中: bo —邦德数; Re_1 —液相雷诺数; κ —导热系数, $W/(m\cdot K)$; D —水力直径, m 。

图 11 对比了新流动沸腾传热关联式的预测值与实验值。由图可知,平均相对误差为 23.87%,关联式对流动沸腾的预测性能良好,74.19%的预测值在 $\pm 25\%$ 内,83.87%的预测值在 $\pm 50\%$ 以内。预测值与实验值的一致性较好,新拟合的关联式能很好地预测该工况范围内的窄矩形通道内的流动沸腾传热系数。

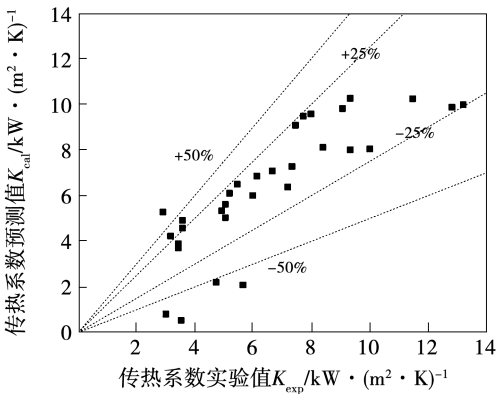


图 11 新关联式预测值与实验值的比较

Fig. 11 Comparison of predicted and experimental values of new correlation formula

5 结 论

通过电加热方式,对竖直矩形窄通道内流动沸腾局部换热特性进行了实验研究,针对质流密度、热流密度、入口温度对局部传热系数的影响进行了分析,并建立新的流动沸腾传热关联式,得到如下结论:

(1) 液体受核态沸腾和流动沸腾机理共同作用,窄通道换热中核态沸腾机理更加活跃。通道顶端出口处主要为流动沸腾,质流密度的增加会削减液膜厚度并加强流动扰动,对于流动换热有强化作用。而靠近汽化核心处主要机理为核态沸腾,流量增大会导致液体未充分预热就流入饱和主流液体中,使得气泡遇冷湮灭,对核态沸腾有削弱作用。随着热流密度的增大,干度也逐渐增加,实验段的水经历过冷沸腾、核态沸腾及流动沸腾,传热系数随着干度的增加会出现 1 个峰值,干度接近零。此时流体过渡到核态沸腾阶段,热流密度的进一步增加对局部传热系数影响不大,热流密度对核态沸腾的影响剧烈,对流动沸腾的影响不明显。入口温度越高,流体越早进入过冷沸腾阶段,但对传热系数的影响不明显。

(2) 对比 7 个已有关联式的换热特性预测效果,文献[14-16]提出的关联式预测效果较好。传热叠加模型中,文献[13]关联式预测值接近核态沸腾传热系数。由于抑制因子过大,随着干度的增加,预测结果偏离实验值。由于文献[17-18]关联式增强因子过小而导致计算值较实验值偏小,尤其是在干度小的区域。无量纲模型中,文献[19]的预测结果偏小,没有考虑蒸汽干度在流动沸腾换热中的影响,与实验值偏差较大。

(3) 选用预测效果较好的文献[14]关联式为基础,建立了新的适用于矩形窄通道内流动沸腾传热系数的传热关联式,其预测值与实验值的平均相对误差为 23.87%,其中 74.19% 的预测值在 $\pm 25\%$ 内,83.87% 的预测值在 $\pm 50\%$ 以内,能很好地预测本实验工况下矩形窄通道内流动沸腾的局部传热系数。

参考文献:

- [1] 王增辉,贾斗南,刘瑞兰. 狭缝通道两相流强化换热研究综述[J]. 热能动力工程,2002,17(4):329-331.
WANG Zeng-hui, JIA Dou-nan, LIU Rui-lan. A review of the intensified heat exchange research of two-phase flows in a narrow-gap channel[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2002, 17(4): 329-331.
- [2] 周云龙,陈旭,郭新田,等. 三面加热窄矩形通道内气液两相流流型研究[J]. 原子能科学技术,2018,52(7):1262-1267.
ZHOU Yun-long, CHEN Xu, GUO Xin-tian, et al. Study of gas-liquid two-phase flow pattern in three-side heating narrow rectangular channel[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(7): 1262-1267.
- [3] JULIA J E, HIBIKI T. Flow regime transition criteria for two-phase flow in a vertical annulus[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2011, 32(5): 993-1004.
- [4] 杨丽辉,陶乐仁,黄理浩,等. 竖直矩形窄通道内水沸腾换热的流型研究[J]. 热能动力工程,2014,29(6):622-626.
YANG Li-hui, TAO Le-ren, HUANG Li-hao, et al. Study of the water boiling heat exchange flow pattern in a vertical rectangular narrow channel[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2014, 29(6): 622-626.
- [5] YUAN P, DENG J, PAN L, et al. Air-water two-phase flow regime and transition criteria in vertical upward narrow rectangular channels[J]. Progress in Nuclear Energy, 2021, 136: 103750.
- [6] KIM S M, MUDAWAR I. Universal approach to predicting saturated flow boiling heat transfer in mini/micro-channels, part II: two-phase heat transfer coefficient[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 64: 1239-1256.
- [7] 郭新田. 三面加热窄矩形通道内汽水两相流动及沸腾传热特性的研究[D]. 吉林:东北电力大学,2019.
GUO Xin-tian. Study on steam-water two-phase flow and boiling heat transfer characteristics in three-sides heating narrow rectangular channel[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2019.
- [8] PULVIRENTI B, MAATALONE A, BAARUCCA U. Boiling heat transfer in narrow channels with offset strip fins: application to electronic chipsets cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(14/15): 2138-2145.
- [9] LIM J H, PARK M. Dimensional analysis on incipient flow instability in one-side high heat loaded rectangular flat heat sink under sub-cooled flow boiling conditions[J]. International Journal of Advanced Nuclear Reactor Design and Technology, 2022, 4(2): 43-59.