

竖直矩形窄通道内饱和沸腾起始点的研究

金程^{1,2}, 陶乐仁^{1,2}, 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: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饱和沸腾起始点进行实验研究。分析了加热热流密度、工质进口温度和质量流量对饱和沸腾起始点位置及饱和沸腾起始点处壁面过热度的影响。在已有饱和沸腾起始点预测关联式的基础上,对实验数据进行非线性回归分析,得到适用于单面加热矩形窄通道饱和沸腾起始点的新关联式。结果表明:新拟合的关联式预测值与实验值的平均相对误差为17.63%,能很好的预测常压、低加热热流密度与低流速条件下的饱和沸腾起始点处壁面过热度与热流密度的关系。

关键词:矩形窄通道;饱和沸腾起始点;两相流;壁面过热度

中图分类号:TK124 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.08.015

[引用本文格式]金程,陶乐仁,黄理浩. 竖直矩形窄通道内饱和沸腾起始点的研究[J]. 热能动力工程,2023,38(8):118-124.
JIN Cheng, TAO Le-ren, HUANG Li-hao. Study on FDB starting point in vertical rectangular narrow channels[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(8):118-124.

Study on FDB Starting Point in Vertical Rectangular Narrow Channels

JIN Cheng^{1,2}, TAO Le-ren^{1,2}, 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: The deionized water was used as the experimental medium and the starting point of fully developed boiling (FDB) in a single side electrically heated vertical rectangular narrow channel with the size of 720 mm × 250 mm × 3.5 mm was experimentally studied. The effects of heating heat flux, working medium inlet temperature and mass flow rate on the position and wall superheat of FDB starting point were analyzed. Based on the existing prediction correlations of FDB starting point, a new correlation applicable to FDB starting point in a single side heated rectangular narrow channel was obtained through nonlinear regression analysis of the experimental data. The results show that the average relative error between the predicted value of the new fitted correlation and the experimental value is 17.63%, which can well predict the relationship between wall superheat and heat flux at FDB starting point under normal pressure, low heating heat flux and low flow rate.

Key words: rectangular narrow channel, FDB starting point, two phase flow, wall superheat

收稿日期:2022-05-13; 修订日期:2022-06-06

基金项目:上海市动力工程多相流动与传热重点实验室研究项目(2019KJFZ201)

Fund-supported Project: Research Project of Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power and Engineering (2019KJ-FZ201)

作者简介:金程(1994-),男,上海理工大学博士研究生。

引 言

近年来,机械压缩式热泵蒸发系统得到迅速发展,蒸发器作为系统中的主要部件也得到广泛关注。板式换热器具有传热系数高、对数平均温差、结构紧凑、污垢系数低等优点,其中板式升膜蒸发器凭借优秀的性能在换热器中使用较多^[1]。板式换热器中的竖直矩形窄通道结构由于流道长度、宽度与窄缝间隙之比较大,对通道内产生气泡形状的限制,因此通道中的两相流动和传热特性与常规通道有很大不同^[2]。窄通道中的流动有单相流动、过冷沸腾、饱和沸腾等过程。其中,单相流动与过冷沸腾的分界点被称为过冷沸腾起始点,即核态沸腾起始点(Onset of Nucleate Boiling, ONB),而沸腾充分发展区的气泡沸腾起始点(Fully Developed Boiling, FDB)为饱和沸腾起始点,是气泡开始挣脱壁面的位置。因此,需要对影响饱和沸腾起始点的因素进行研究并探索其变化规律。

许多国内外学者对竖直矩形窄通道内饱和沸腾起始点进行了相关研究。Wang 等人^[3]与 Al-Yahia 等人^[4]分别在不同尺寸的矩形窄通道中,对饱和沸腾起始点进行了可视化和测量。李祥东等人^[5]建立了竖直通道内各区沸腾传热的机理模型及各区边界的判断标准并进行了数值求解,根据结果可以很方便地判断过冷沸腾及饱和沸腾发生的位置。黄理浩等人^[6]通过改变壁面加热功率密度,工质的质量流量和入口温度分析了竖直矩形窄通道内饱和沸腾起始点的变化规律。周云龙等人^[7]对三面加热窄矩形通道内饱和沸腾起始点进行了实验研究,得到饱和沸腾起始点热通量的经验关系式。

本文以去离子水为工质,搭建了可视化的竖直矩形窄通道实验系统。通过可视化窗口观察并记录饱和沸腾起始点的位置,分析不同因素对其的影响规律,为进一步完善竖直矩形窄通道内流动沸腾的研究和设计高效的板式换热设备提供理论支撑。

1 实验系统

实验段由钢化透明玻璃、电加热片、矩形硅胶密

封圈、保温层及固定装置组成,如图 1(a)所示,通道尺寸为 720 mm×250 mm×3.5 mm。在铜板两侧开孔放入 T 型热电偶,布置如图 1(b)所示。实验系统如图 2 所示。该系统以去离子水为工质,恒压蠕动泵驱动储液罐中的去离子水流经恒温水预热后进入实验段。实验段换热铜板背面均匀布置电加热片,加热功率通过使用调压器调节电加热片两端电压进行控制。在实验段中被加热沸腾的去离子水进入冷凝器被冷凝后流回储液罐,完成整个实验循环。

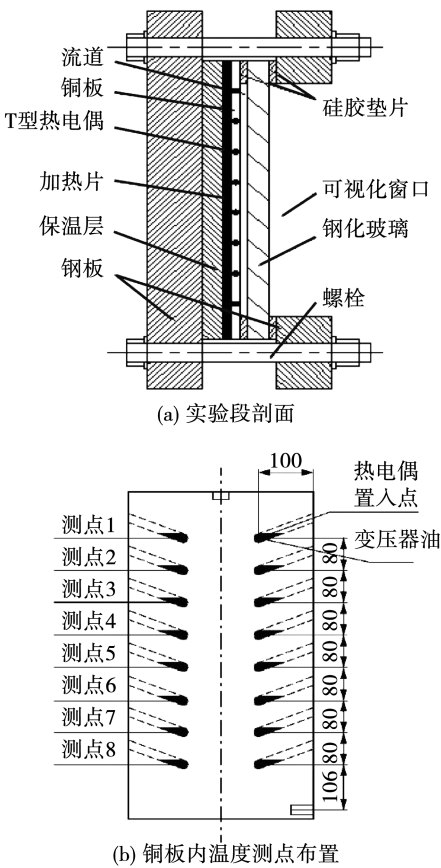


图 1 实验段结构图(mm)

Fig.1 Structure diagram of test section (mm)

2 实验数据分析

实验段除可视化窗口外均加保温,存在不可忽略的热损失,通过实验段内单相流对流换热平衡来计算实验段的热损失。计算公式如下:

$$Q_{\text{loss}} = Q - Q_{\text{sp}} \tag{1}$$

$$Q_{\text{sp}} = mc_p(t_{\text{out}} - t_{\text{in}})/1\,000 \tag{2}$$

$$q = (Q - Q_{\text{loss}}) / A \quad (3)$$

式中: Q_{loss} —热损失, kW; Q —电加热输入功率, kW; Q_{sp} —单相对流换热热量, kW; m —质量流量, g/s; c_p —比定压热容, kJ/(kg·K); t_{out} —实验段出口流体温度, °C; t_{in} —实验段进口流体温度, °C; q —计入热损失的实际热流密度, kW/m²; A —加热面积, m²。

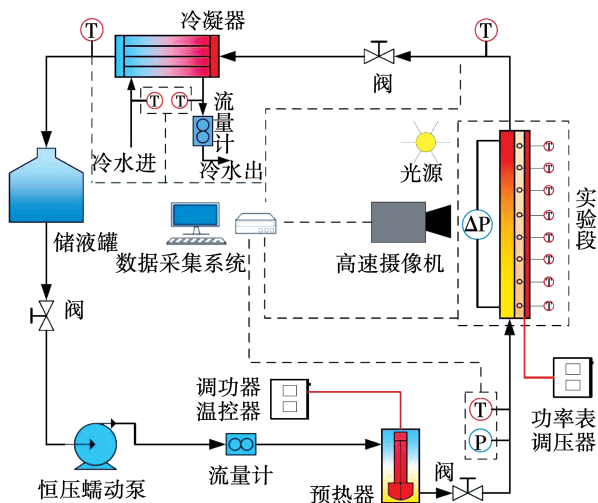


图 2 实验系统图

Fig. 2 Experimental system diagram

流体在矩形窄通道内饱和沸腾区域处于气液两相,在不考虑沿程压降特性的情况下,其平均温度采用出口处压力值所对应的饱和温度。实验段采用单侧壁面电加热,加热铜板上各处的热流密度相同,且变压器油导热性好,忽略壁面导热热阻,壁面温度即热电偶所测温度。为方便通过可视化窗口观测并记录饱和沸腾起始点,在实验段上加上标尺,饱和沸腾起始点处壁面温度由相邻测点处温度线性插值得。则饱和沸腾起始点处的壁面过热度计算公式为:

$$\Delta t_{\text{sat}} = t_{\text{wall}} - t_{\text{sat}} \quad (4)$$

式中: Δt_{sat} —壁面过热度, °C; t_{wall} —壁面温度, °C; t_{sat} —工质饱和温度, °C。

2.1 加热热流密度的影响

在竖直矩形窄通道中,加热热流密度(即加热功率)会使加热壁面温度上升,过热度增大。实验段进口工质温度为 40 °C、质量流量为 2.0 g/s 时壁面温度曲线如图 3 所示。由图 3 可知,在加热热流

密度为 2.74 kW/m²时,工质为单相流动。当加热热流密度上升至 3.72 kW/m²,部分壁温超过了工质的饱和温度,但是过热度很小,还未达到饱和沸腾所需的过热度,所以此时该区域的工质处于过冷沸腾状态。随着加热热流密度的进一步上升,过热度继续增大,工质进入饱和沸腾阶段,且矩形窄通道内工质的过冷段减小,饱和沸腾起始点下移。

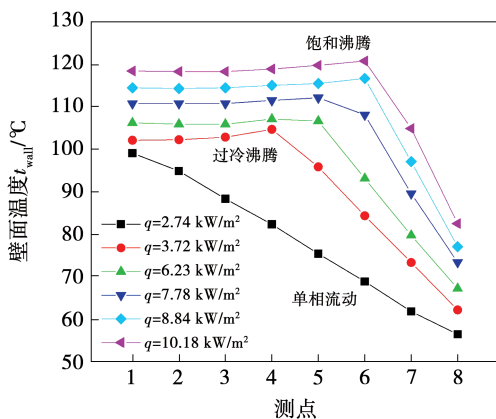


图 3 $t_{\text{in}} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $m = 2.0\text{ g/s}$ 时壁面温度曲线

Fig. 3 Wall temperature curve at $t_{\text{in}} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $m = 2.0\text{ g/s}$

2.2 进口温度的影响

为研究进口温度对饱和沸腾起始点的影响,在保持质量流量分别为 2.0, 2.5 和 3.0 g/s 不变的情况下,改变进口温度为 40, 50 和 60 °C,不同加热热流密度下的饱和沸腾起始点如图 4 所示。从图 4 可以看出,在相同加热热流密度下饱和沸腾起始点随着工质进口温度的上升而下移。当在质量流量为 2.0, 2.5 和 3.0 g/s 不变时,进口温度每提高 10 °C,在不同加热热流密度下饱和沸腾起始点分别平均下移 12.67%, 13.21% 和 11.89%。在加热热流密度较低时,进口温度的增长对饱和沸腾起始点的影响比较显著;在加热热流密度较高时,进口温度的增长对饱和沸腾起始点的影响减弱。这是因为在低热流密度下,入口温度增加会使过冷段显著减小,矩形窄通道内的沸腾段增加;而在高热流密度下,进入矩形窄通道的工质能迅速被加热至饱和温度,所以进口温度的影响被减小。质量流量为 3.0 g/s 时进口温度对壁面过热度的影响如图 5 所示。由图 5 可知,

进口温度的上升会使壁面过热度提高;在保持质量流量为 3.0 g/s 时,进口温度为 40、50 和 60 ℃ 的工况在相同加热热流密度区(6.17 ~ 9.58 kW/m²)所对应的始末壁面过热度的差值分别为 9.7、10.3 和 11.6 ℃,这说明进口温度的升高还会加大壁面过热度的区间。

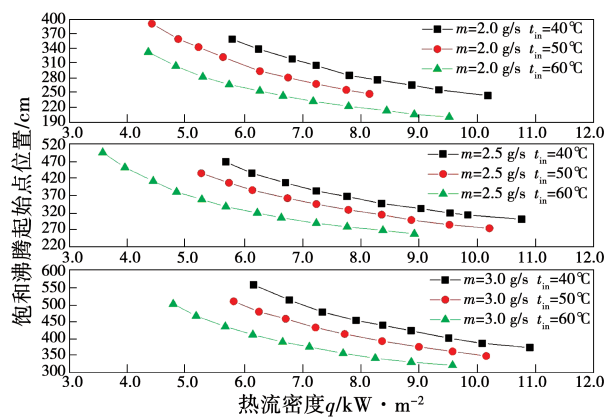


图 4 进口温度对饱和沸腾起始点的影响
Fig. 4 Effect of inlet temperature on FDB starting point

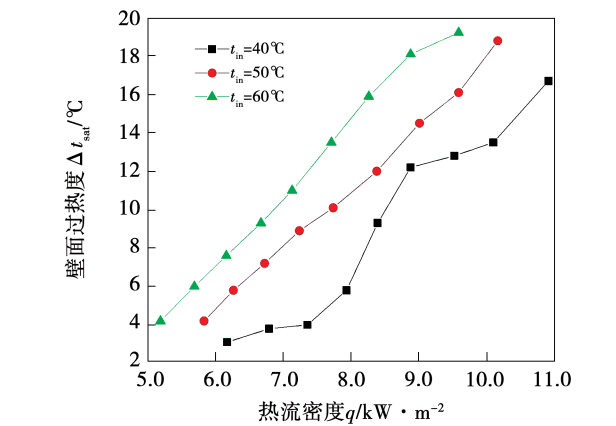


图 5 $m = 3.0$ g/s 时,进口温度对 Δt_{sat} 的影响
Fig. 5 Effect of inlet temperature on Δt_{sat} at $m = 3.0$ g/s

2.3 质量流量的影响

图 6 是保持进口温度分别为 40、50 和 60 ℃ 时,不同质量流量下饱和沸腾起始点随加热热流密度的变化曲线。由图 6 可知,在保持入口温度不变,饱和沸腾起始点在相同加热热流密度下随着工质质量流量的增大而上移。当质量流量每增加 0.5 g/s,在不

同加热热流密度下饱和沸腾起始点分别平均上移 26.53%、27.19% 和 27.75%。这是因为质量流量越大,工质所需到达饱和沸腾起始点的热量越高,工质主体温度上升越慢,所以过冷段也就越长,饱和沸腾起始点随之上移。进口温度为 40 ℃ 时质量流量对壁面过热度的影响如图 7 所示。从图 7 可以看出,工质质量流量的上升会使饱和沸腾起始点处的壁面过热度降低。这是由于流量的增大使工质能够更好的冷却壁面,使壁面过热度变小;在保持进口温度为 40 ℃ 时,质量流量分别为 2.0、2.5 和 3.0 g/s 的工况下在同加热热流密度区(6.25 ~ 10.0 kW/m²)所对应的始末壁面过热度的差值分别为 10.7、10.6 和 10.4 ℃,这说明质量流量的升高会小幅度缩小壁面过热度的区间。

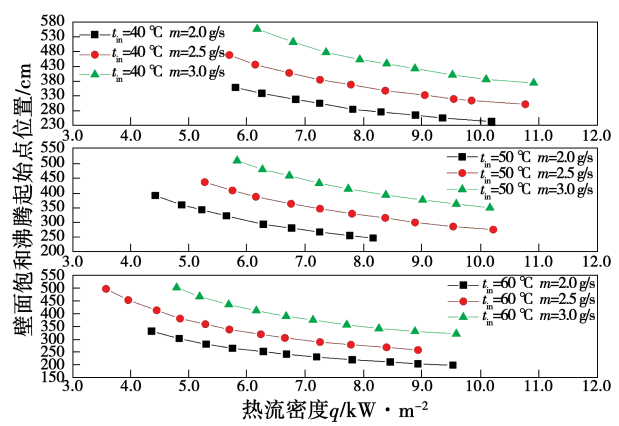


图 6 质量流量对饱和沸腾起始点的影响
Fig. 6 Effect of mass flow on FDB starting point

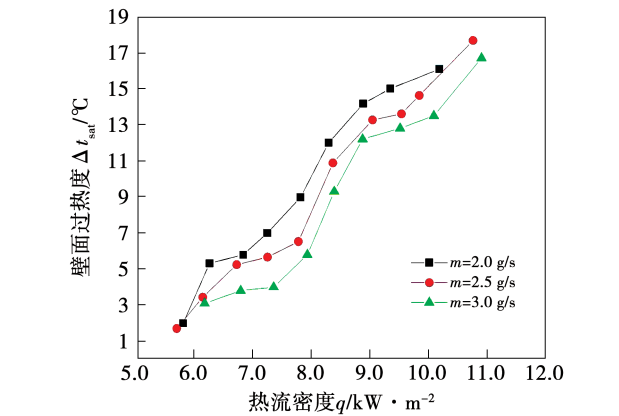


图 7 $t_{\text{in}} = 40$ ℃ 时,质量流量对 Δt_{sat} 的影响
Fig. 7 Effect of mass flow on Δt_{sat} at $t_{\text{in}} = 40$ ℃

3 FDB 预测关联式

专门针对竖直矩形窄通道内饱和沸腾起始点的

预测关联式的研究相对较少,大多为研究圆管或圆环。表 1 为不同文献提出的 FDB 预测关联式及其适用范围。

表 1 FDB 预测关联式
Tab.1 Prediction correlation of FDB

文献	几何尺寸/mm	预测关联式	适用范围
[8]	圆管 $D_h = 4.3 \sim 13.2$	$\Delta t_{\text{sat}} = \left(\frac{q}{C}\right)^{0.26}$	$(150 < q < 2\ 100\ \text{kW/m}^2, 0.21 < P < 0.62\ \text{MPa}$ $0.3 < v < 10.97\ \text{m/s})$
[9]	圆管 $D_h = 3.6 \sim 5.8$	$\Delta t_{\text{sat}} = 25 \left(\frac{q}{10^6}\right)^{0.25} e\left(-\frac{P}{6.2}\right)$	$(q < 12620\ \text{kW/m}^2, 0.6 < P < 17.2\ \text{MPa}$ $0.012 < v < 27.4\ \text{m/s})$
[10]	圆管 $D_h = 12.7$	$\Delta t_{\text{sat}} = 22.65 \left(\frac{q}{10^6}\right)^{0.5} e\left(-\frac{P}{8.7}\right)$	$(248 < q < 1580\ \text{kW/m}^2, 5.2 < P < 11.8\ \text{MPa}$ $1.52 < v < 6.10\ \text{m/s})$
[11]	圆环间隙 $d = 1, 1.5$	$\Delta t_{\text{sat}} = A \left(\frac{q}{10^6}\right)^{0.25} e\left(-\frac{P}{6.2}\right)$	$(q < 126.7\ \text{kW/m}^2, 1.2 < P < 4.0\ \text{MPa}$ $6.86 < m < 20.0\ \text{kg/h})$
[12]	圆环、矩形间隙 $d = 2, 3, 4$	$\Delta t_{\text{sat}} = 0.484 (q)^{0.25} \left(\frac{d - 1.13D_h}{d}\right)^{0.26}$ $D_h = \frac{1.5}{10^4} \left[\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)}\right]^{0.5} \left(\frac{\rho_l c_l T_{\text{sat}}}{\rho_g h_{lg}}\right)^{1.25}$	$(q < 120\ \text{kW/m}^2, 0.139 < P < 0.145\ \text{MPa}$ $0.03 < v < 0.16\ \text{m/s})$
[13]	池沸腾	$\Delta t_{\text{sat}} = 4.57 \left(\frac{q}{10^4}\right)^{0.35} (10P)^{-0.23}$	$(160 < q < 6\ 300\ \text{kW/m}^2$ $0.1 < P < 0.8\ \text{MPa})$

对于这些预测关联式,使用平均相对误差对其预测值进行评价,计算公式为:

$$M = \frac{1}{N} \sum \left| \frac{\Delta t_{\text{sat, pre}} - \Delta t_{\text{sat, exp}}}{\Delta t_{\text{sat, exp}}} \right| \times 100\% \tag{5}$$

式中: M —平均相对误差; N —实验数据点个数; $\Delta t_{\text{sat, pre}}$ —关联式预测壁面过热度,℃; $\Delta t_{\text{sat, exp}}$ —实验壁面过热度,℃。

如图 8 和表 2 所示,文献[10]和[11]关联式与实验值的误差最大,平均相对误差分别为 91.29% 与 81.65%,所有数据点的误差均超过 $\pm 50\%$;文献[9]和[13]关联式准确度稍好,平均相对误差分别为 79.16% 与 65.07%,有少部分数据点在 $\pm 50\%$ 误差之内。其主要原因是文献[9],[10]和[11]关联式主要应用在常规圆管与圆环中,且适用压力较大的工况,而本实验则是在常压下进行;文献[13]关联式则是适用于池沸腾,所以误差也较大。

上述关联式中预测效果较好的为文献[8]和[12]关联式。文献[8]关联式预测值平均相对误差为 57.36%,分别有 23.40% 和 74.47% 的数据点在

误差 $\pm 25\%$ 和 $\pm 50\%$ 以内,均优于文献[12]关联式,即使文献[12]关联式考虑了窄缝宽度的影响。但是关联式所适用的工况与实验工况,尤其加热热流密度与流体流速相差较大,如表 3 所示。所以在其基础上进行修正,通过对实验数据进行多元非线性回归得到了新的关联式为:

$$\Delta t_{\text{sat}} = \left(\frac{q}{2.89}\right)^{2.27} \tag{6}$$

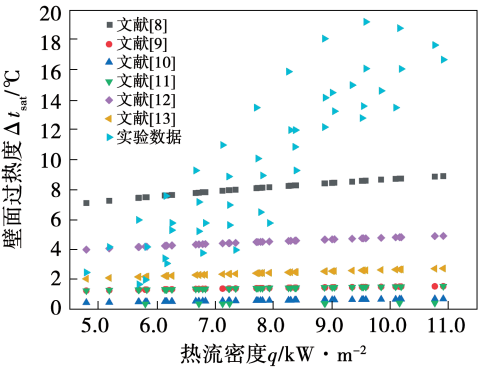


图 8 预测值与实验值的比较
Fig. 8 Comparison of predicted and experimental values

表 2 预测关联式的误差
Tab. 2 Error of prediction correlation

文献	M/%	误差 < ±25%	误差 < ±50%
[8]	57.36	23.40	74.47
[9]	79.16	2.13	4.26
[10]	91.29	0	0
[11]	81.65	0	0
[12]	52.24	21.28	42.55
[13]	66.78	2.13	14.90

表 3 实验工况与文献[8]关联式所适用的工况对比
Tab. 3 Comparison of experimental conditions and conditions applicable to correlation in literature[8]

参 数	实验工况	文献[8]关联式 适用工况
加热热流密度/ $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$	3.0 ~ 12.0	150 ~ 2100
流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.002 3 ~ 0.003 4	0.3 ~ 10.97
系统压力/MPa	0.101	0.21 ~ 0.62

图 9 对比了新拟合关联式的预测值与实验值,其预测值的平均相对误差为 17.63%。72.5%的数据点在 $\pm 25\%$ 误差区间内,100%的数据点在 $\pm 50\%$ 误差区间内,能很好地预测常压、低加热热流密度与低流速条件下饱和沸腾起始点处的壁面过热度与热流密度的关系。

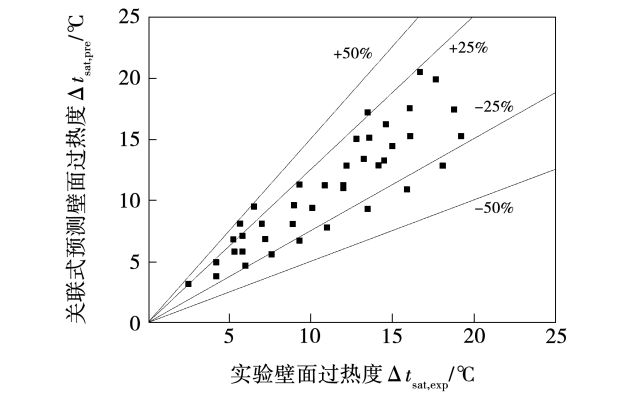


图 9 改进的关系式预测值与实验值的对比
Fig. 9 Comparison of predicted values of modified correlation and experimental values

4 结 论

本实验以去离子水为工质,搭建了可视化的竖

直矩形窄通道实验系统,对通道内饱和沸腾起始点进行了实验研究,结论如下:

(1) 在单面电加热竖直矩形窄通道内,随着加热热流密度与进口温度的增加,通道内的过冷段变短,饱和沸腾起始点下移;随着质量流量的增加,饱和沸腾起始点位置上移。

(2) 通过将进口温度与质量流量对饱和沸腾起始点处壁面过热度的定量分析,表明进口温度与质量流量的变化对壁面过热度均有影响,其中进口温度的影响较为明显,质量流量的影响则较小。

(3) 对已有研究中饱和沸腾起始点处壁面过热度的预测关联式,分析了其对于本实验工况的预测值及误差;选用预测效果较好的文献[8]关联式为基础,建立了新的矩形窄通道内饱和沸腾起始点处壁面过热度的预测关联式,其预测值的平均相对误差为 17.63%,72.50%的数据点在 $\pm 25\%$ 误差区间内,100%的数据点在 $\pm 50\%$ 误差区间内,能很好地预测常压、低加热热流密度与低流速条件下的饱和沸腾起始点处壁面过热度与热流密度的关系。

参考文献:

[1] 刘效德,陶乐仁,郑志皋,等. 垂直矩形窄通道换热特性实验研究[J]. 制冷学报,2014,35(1): 14-19,87.
LIU Xiao-de, TAO Le-ren, ZHENG Zhi-gao, et al. Experimental study for heat transfer characteristics of vertical rectangular narrow channels[J]. Journal of Refrigeration,2014,35(1):14-19,87.

[2] ISHIBASHI E, NISHIKAWA K. Saturated boiling heat transfer in narrow spaces[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,1969,12(8):863-894.

[3] WANG Jun-feng, HUANG Yan-ping, WANG Yan-lin. Visualized study on specific points on demand curves and flow patterns in a single-side heated narrow rectangular channel [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow,2011,32: 982-992.

[4] AL-YAHIA O S, JO D. ONB, OSV, and OFI for subcooled flow boiling through a narrow rectangular channel heated on one-side [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2018,116: 136-151.

[5] 李祥东,汪荣顺,石玉美. 垂直通道内低温液体过冷流动沸腾传热的数值预测模型[J]. 低温工程,2006(1): 6-11,20.
LI Xiang-dong, WANG Rong-shun, SHI Yu-mei. Numerical model for subcooled boiling low of cryogenic liquid in vertical channels [J]. Cryogenics,2006(1): 6-11,20.

[6] 黄理浩,陶乐仁,郑志皋,等. 垂直矩形窄通道内饱和沸腾起始点实验研究[J]. 工程热物理学报,2014,35(8): 1629-1632.

HUANG Li-hao,TAO Le-ren,ZHENG Zhi-gao, et al. Experiment study for the FDB starting point of vertical rectangular narrow channels[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35 (8) : 1629 – 1632.

[7] 周云龙,郭新田,张文超,等. 三面加热窄矩形通道内饱和沸腾起始点的实验研究[J]. 化工学报, 2018, 69 (12) : 4972 – 4978,5406.

ZHOU Yun-long, GUO Xin-tian, ZHANG Wen-chao, et al. Experimental investigation on FDB starting point in three-side heating narrow rectangular channel [J]. CIESC Journal, 2018, 69 (12) : 4972 – 4978, 5406.

[8] MCADAMS W H, KENNEL W E, MINDEN C S, et al. Heat transfer at high rates to water with surface boiling [J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1948, 41 (9) : 1945 – 1953.

[9] JENS W H, LOTTES P A. Analysis of heat transfer, burnout, pressure drop and density data for high-pressure water [R]. Chicago: Argonne National Lab, 1951.

[10] THOM J R S, WALKER W M, FALLON T A, et al. Paper 6: boiling in sub-cooled water during flow up heated tubes or annuli [C] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. London: Sage Publications, 1965.

[11] QIU S, TAKAHASHI M, SU G, et al. Experimental study on heat transfer of single-phase flow and boiling two-phase flow in vertical narrow annuli [C] // Proceedings of the 10th International Conference on Nuclear Engineering. New York: ASME, 2002.

[12] BELHADJ M, ALDEMIR T, CHRISTENSEN R N. Determining wall superheat under fully developed nucleate boiling in plate-type research reactor cores with low-velocity upward flows [J]. Nuclear Technology, 1991, 95 : 95 – 102.

[13] FORSTER H K, GREIF R. Heat transfer to a boiling liquid-mechanisms and correlations [J]. Journal of Heat Transfer, 1959, 81 (1) : 43 – 53.

(姜雪梅 编辑)

(上接第 117 页)

[19] 张盈文,金 晶,张 号,等. 污泥燃烧过程中 NO_x 排放特性的实验研究[J]. 上海理工大学学报, 2015, 37 (3) : 233 – 237.

ZHANG Ying-wen, JIN Jing, ZHANG Hao, et al. Experimental study on property of NO_x emission during combustion of sludge [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2015, 37 (3) : 233 – 237.

[20] 丁 先,吴何来,臧剑南,等. 燃煤耦合城市污泥燃烧特性与 NO_x 生成行为模拟[J]. 动力工程学报, 2022, 42 (3) : 207 – 214, 248.

DING Xian, WU He-lai, ZANG Jian-nan, et al. Numerical simulation on co-combustion characteristics and NO_x formation behavior of coal with municipal sludge [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42 (3) : 207 – 214, 248.

[21] ZHANG L, DONG X, ZHAO Z, et al. Influence of mixed sludge on the operation of coal-fired unit boiler [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 769 (2) : 022019.

[22] 苏 杭. 不同污泥与煤混烧过程中重金属迁移规律及灰渣中重金属浸出特性研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.

SU Hang. Experimental study on the transferring characteristics and leaching behavior of heavy metals during the co-combustion of coal and different sludges [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.

[23] 刘 笑,丹慧杰,房 凡,等. 燃煤耦合污泥发电过程重金属、砷和硒迁移转化试验研究 [J]. 热力发电, 2022, 51 (5) : 65 – 72.

LIU Xiao, DAN Hui-jie, FANG Fan, et al. A test study on migration and transformation of heavy metals, As and Se in coal and sludge co-firing power generation system [J]. Thermal Power Generation, 2022, 51 (5) : 65 – 72.

[24] 王晨平,段钰锋,赵士林,等. 燃烧温度对煤中汞析出特性及形态分布的影响 [J]. 化工进展, 2017, 36 (5) : 1899 – 1905.

WANG Chen-ping, DUAN Yu-feng, ZHAO Shi-lin, et al. Effects of coal combustion temperature on mercury emission and speciation [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36 (5) : 1899 – 1905.

[25] 李 圳,刘 轩,王鹏程,等. 350 MW 低热值煤 CFB 机组掺烧城市污泥的汞排放与迁移特性 [J]. 电站系统工程, 2021, 37 (5) : 57 – 60.

LI Zhen, LIU Xuan, WANG Peng-cheng, et al. Emission and migration of mercury from 350 MW CFB unit using low calorific value coal blended with municipal sludge [J]. Power System Engineering, 2021, 37 (5) : 57 – 60.

[26] 孟 涛,邢小林,张 杰,等. 配风方式对燃煤锅炉掺烧污泥影响的数值模拟研究 [J]. 洁净煤技术, 2021, 27 (1) : 263 – 271.

MENG Tao, XING Xiao-lin, ZHANG Jie, et al. Numerical simulation study on the effect of air distribution on combustion of coal-fired boiler blended with sludge [J]. Clean Coal Technology, 2021, 27 (1) : 263 – 271.

(刘 颖 编辑)