

文章编号:0253 – 4339(2016) 06 – 0007 – 07
doi:10. 3969/j. issn. 0253 – 4339. 2016. 06. 007

两种不同工质在微通道内沸腾换热特性的实验研究

陈玉敏 刘东尧

(南京理工大学能源与动力工程学院 南京 210094)

摘 要 为研究流体物性、流动和换热过程的状态参量对微通道内沸腾换热特性的影响规律,本文采用去离子水和无水乙醇在当量直径为 0.293 mm 的矩形微通道进行了不同质量流量和热流密度条件下的沸腾换热实验研究,通过对实验数据的计算和处理,分析总结了流体的热物性、质量流量、热流密度、干度和 Bo 数等参量对沸腾换热系数的影响规律。结果表明:沸腾换热系数随着热流密度、干度和 Bo 数的增大而降低,核态沸腾占主导地位;相同的质量流量和热流密度条件下,去离子水的沸腾换热系数明显高于无水乙醇的沸腾换热系数,并且前者的换热系数随质量流量的增大而增大,而后者变化不明显。根据考虑了通道尺寸效应及流体物性参量总结出的换热系数关联式进行了计算,计算结果对去离子水和无水乙醇的平均绝对误差分别为 14.2% 和 16.6%,可认为该关联式适用于微通道内沸腾换热系数的预测。

关键词 微通道;流动沸腾;热流密度;实验研究;换热系数关联式

中图分类号:TK124; TQ051.5

文献标识码: A

Experimental Study on the Boiling Heat Transfer Characteristics in Micro-channel with Two Different Working Medium

Chen Yumin Liu Dongyao

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094, China)

Abstract Experiments are performed in rectangular micro-channels ($d_H = 0.293\text{ mm}$) under the condition of different mass flux and heat flux to evaluate the flow boiling heat transfer characteristics with deionized water and anhydrous ethanol. Research in micro-channels is aimed at studying the influence rule of state parameters of fluid properties, flow and heat transfer process of boiling heat transfer characteristics. According to the calculation and comparison of experimental data, the relationship between boiling heat transfer coefficient and thermal physical properties of fluid, mass flux, heat flux, vapor qualities, Boiling number are presented respectively. The results show that boiling heat transfer coefficient decreases with the increasing of heat flux, vapor qualities and Boiling number. Nucleate boiling is dominant in the process of heat transfer. Under the same condition the boiling heat transfer coefficient of deionized water is obviously higher than the boiling heat transfer coefficient of anhydrous ethanol. The heat transfer coefficient of deionized water increases with the increasing of mass flux, but anhydrous ethanol has no significant changes with mass flux. The results from heat transfer correlation taking scale effect and fluid properties into consideration have 14.2% and 16.6% MAE (Mean Absolute Error) for deionized water and anhydrous ethanol respectively. It proves that the heat transfer correlation has good applicability of predicting the boiling heat transfer coefficient in micro-channels.

Keywords micro-channels; flow boiling; heat flux; experimental study; heat transfer coefficient correlation

随着 MEMS 技术的发展,电子器件的集成化和高频化程度不断提高,同时电子器件的特征尺寸不断减小,导致芯片的热流密度不断增加。微尺度通道内的传热问题自上个世纪 80 年代在高密度微电子器件冷却的工程背景下被提出至今,已在国际上引起了前所未有的研究热潮。传统的冷却技术由于存在换热效率低、出现故障频率高、能量损失高等弊端已不再使用^[1]。尺度微小化为微尺度沸腾换热带来了得天

独厚的优势:一方面,微小的尺度能够满足电子设备和机械设备紧凑化、微型化的发展趋势,弥补了传统冷却散热方式设备体积大、单位空间热流密度低,很难达到有限空间内高效冷却要求的不足;另一方面,微尺度沸腾换热通过相变换热,将沸腾换热特性与微尺度效应相结合,不仅可以充分利用微细通道的强化传热作用以及工质流动沸腾过程中传递大量的汽化潜热,而且可以保持液体温度的恒定,增大换热量,在

不提高换热设备的运行温度的同时保障系统稳定运行。电子器件散热情况的好坏以及表面温度的均匀性直接影响设备运行状况,据研究表明,单个半导体元件的温度每升高 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,系统可靠性将降低 50%,超过 55% 的电子设备失效是由于温度过高引起的^[2]。科技的快速发展、工艺加工水平(光刻技术、微放电加工技术等)的提高和生产的实际需要更是推动了微尺度传热的发展。因此,随着微尺度换热研究的不断深入,必将突破更多的微电子器件和紧凑换热器件的设计技术瓶颈。

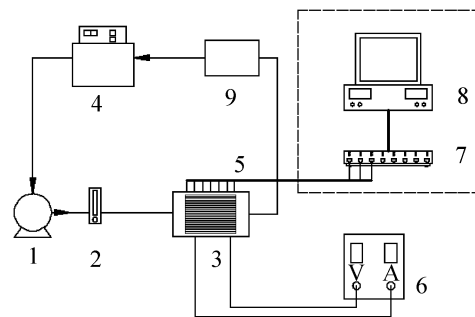
微尺度传热被广泛地用于微电子机械(MEMS 和 MST)和计算机 CPU 的冷却、石油化工的催化反应、航空航天舱内热环境控制、材料加工过程以及低温制冷与机车空调等对换热量要求较大和空间要求苛刻的行业领域。Piasecka M^[3]研究了微针肋槽道中的流动沸腾换热,观察了槽道中介质在发生流动沸腾前的现象。Popov I A 等^[4]实验研究了微结构表面的沸腾换热特性,分析了不同尺寸和形状的微结构表面沸腾换热现象。Yuan W 等^[5]分别针对热流密度、蒸气质量以及通道水力直径对于微空间内沸腾换热的影响进行了研究。郑志皋等^[6]对单面加热竖直矩形窄通道进行了可视化的实验研究,探究矩形窄通道内流动沸腾及传热现象的机制,发现矩形窄通道流动沸腾过程的换热系数存在最大值,此时以饱和核沸腾为主。邓聪等^[7]以制冷剂 R22 为工质在水力直径为 0.92 mm,1.33 mm 和 2 mm 的矩形微通道内进行了流动沸腾及可视化实验,分析和比较了制冷剂在三种水力直径下的传热效果,并拟合出了新的传热系数预测关联式。姜林林等^[8]针对 CO_2 在微细管道内的流动沸腾换热特性及其过程中发生的干涸特性进行了实验与理论研究,采用红外成像观测与换热系数实验研究定量与定性地分析了不同工况下的换热系数。魏进家等^[9]对自主开发的微米级柱状微结构表面强化沸腾换热研究现状进行了综述,与其他强化沸腾换热表面结构进行了对比,总结并分析了各种强化表面结构的优缺点。葛琪林等^[10]在内径为 2 mm 的水平不锈钢微通道内对 R410A 的沸腾特性进行了实验研究发现,当干度大于 0.5 时,随着热流密度的上升,沸腾换热系数显著上升;当干度小于 0.5 时,热流密度对换热系数的影响十分微弱。同时也发现质量流率和饱和温度对换热系数的影响很小。银了飞等^[11]以去离子水为工质,利用可视化手段实验研究矩形截面微通道($1\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$)内发生流动沸腾时气泡的生长和受限现象。通过对比不同运行工况下的气泡受限现象,分析讨论了气泡受限过程中其界面形状变

化规律及影响因素。

虽然国内外对不同结构和尺寸的微通道采用各种常用的或潜在的换热工质进行了较为广泛的实验研究和分析,获得了大量的实验数据,并总结出若干种能预测微通道内沸腾换热的实验关联式。但是,由于实验条件和工况的差异,对实验结果的总结并不能得到令人满意的结论,部分实验数据所体现的规律甚至相互矛盾。Lee H J 等^[12]曾在前人的研究基础上,通过对大量实验数据的总结和分析,归纳出能够以较低平均绝对误差(MAE)计算微通道内沸腾换热的经验关联式。在此基础上,设计了一套多通道并联的小/微通道的沸腾换热实验装置,采用水为工质研究通道特征尺寸、流动和传热条件对沸腾换热特性的影响,并对经验关联式进行修正^[13]。本文主要研究不同工质在当量直径为 0.293 mm 的微通道的沸腾换热特性,通过改变工质种类、流动和换热条件进行实验研究,根据实验数据计算与流动换热相关的参量及其对换热特性的影响,进一步检验经验关联式的适用性。

1 实验装置

研究所用的实验装置和实验步骤与前期实验工作基本相同^[13],图 1 给出了该实验装置系统结构示意图。数显恒流泵 1 将恒温槽 4 内的恒温流体通过玻璃转子流量计 2 送至微通道模块 3;微通道模块底部的加热棒由稳压电源 6 提供加热功率,完成对通道模块的加热;在微通道模块换热面下部采用 T 热电偶组合 5 和 Agilent 数据采集器 7 完成温度的监测,并由计算机 8 保存和显示;沸腾后的流体由微通道模块出口引入冷凝器 9 返回恒温槽 4。



1 数显恒流泵; 2 玻璃转子流量计; 3 微通道模块;
4 恒温槽; 5 热电偶; 6 稳压电源; 7 数据采集器;
8 计算机; 9 冷凝器

图 1 实验装置示意图

Fig. 1 The equipment figure of experimentation

微通道模块的结构及测温点的分布示意图如图

2 所示,微通道实验段通道长度为 52 mm,平行排布了 61 条宽 0.2 mm 和高 0.55 mm 的微通道,每个通道的当量直径为 0.293 mm。

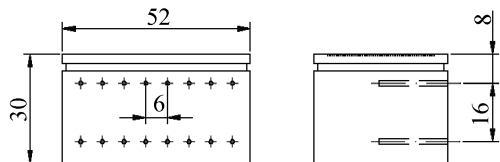


图 2 微通道模块测温点示意图

Fig. 2 Temperature measuring points of micro-channels module

在微通道模块换热面下部沿热流方向上布置 8 组热电偶记录沿流动方向温度的分布和变化;同时在微通道的入口水槽和出口水槽各放置一只热电偶,用来监控流体的入口和出口温度。

2 实验结果与分析

2.1 实验数据处理

实验中 8 组热电偶测点处于传热模块中间位置,并且同时排布了 61 条通道,降低了热量的横向传递对热流的影响。因此,可利用两个测温点间的温差、间距和材料的导热系数,计算对应的热流密度,并根据测点的外插得到微通道换热表面的壁面温度。

根据傅里叶定律,沿两个测点之间从上到下的热流密度可表示为:

$$q'' = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad (1)$$

式中: λ 为导热系数, $W/(m \cdot K)$ 。

对各测点位置处的热流密度的计算表明,沿着流动方向上热流密度的值是变化的。这是因为流体流经通道时,其温度或干度的变化影响了表面上的沸腾换热。为了对每一种加热条件下给出一个确定的热流密度,将各测点的热流密度进行平均,可得到表现整个微通道壁面的热流密度平均值:

$$\bar{q}_x'' = \frac{1}{8} \sum_{x=1}^8 q_x'' \quad (2)$$

式中: q_x'' 为各测点处的热流密度, W/m^2 。

从加热模块横截面上来的热量,除了微通道表面上与流体进行热交换,被流体吸收外,还有部分热量损失到周围环境中。此热量的损失与对应的质量流量和热流密度相关。这里通过确定质量流量调节下的单相流的热平衡计算热效率。

单相流动时流体流过微通道吸收的热量可以用进出口温差和流量计算出来,则热效率为工质吸收的热量与加热模块横截面上的热量之比:

$$\eta = \frac{(T_{out} - T_{in})c_{pm}\dot{m}}{A_{mcb}q_x''} \times 100\% \quad (3)$$

式中: T_{out} 为微通道出口处工质温度, K ; T_{in} 为微通道入口处工质温度, K ; c_{pm} 为工质的定压比热容, $J/(kg \cdot K)$; $\dot{m}$ 为工质质量流量, $kg/(m^2 \cdot s)$; A_{mcb} 为加热模块横截面积, m^2 。

起沸点是微通道内工质达到当地饱和温度时的位置与微通道入口之间的距离,根据能量守恒可得:

$$l_B = \frac{(T_{sat} - T_{in})c_{pm}\dot{m}}{\eta q_x'' D_w} \quad (4)$$

式中: D_w 为加热壁面润湿周长, m ; l_B 为入口与起沸点之间的距离, m ; T_{sat} 为流体的当地饱和温度, K 。

当工质沸腾之后,部分液体吸收壁面的热量并汽化。液体汽化的质量分数称为干度,由能量平衡可得不同位置处的干度的表达式为:

$$X = \frac{\eta \bar{q}_x'' D_w (l_x - l_B)}{\dot{m} h_{fg}} \quad (5)$$

式中: l_x 为所需干度点离入口的距离, m ; h_{fg} 为工质的汽化潜热, J/kg ; X 为 l_x 处的干度。

根据牛顿冷却定律可以推导出微通道内工质沸腾后形成气液两相流流动时沸腾换热系数的表达式^[12]:

$$h_{tp} = \frac{\eta \bar{q}_x'' (w + \delta)}{(T_w - T_{sat})(w + 2\eta_{fin} d)} \quad (6)$$

式中: w 为微通道的宽度, m ; δ 为相邻两微通道间的壁面厚度, m ; d 为微通道的深度, m ; η_{fin} 为表示肋片系数,其计算式为:

$$\eta_{fin} = \frac{\tanh\left(\sqrt{\frac{2h_{tp}}{\lambda_{Cu}\delta}}d\right)}{\sqrt{\frac{2h_{tp}}{\lambda_{Cu}\delta}}d} \quad (7)$$

2.2 实验结果分析

进行不同工质、质量流量和热流密度条件下的换热特性实验研究,测试并记录相关参数。采用前述数据处理方法计算相关参量,分析比较流体物性、质量流量、热流密度、干度和沸腾数等参量对换热特性的影响。

2.2.1 局部沸腾换热系数的变化规律

通过测量微通道换热面下部的 8 组位置处的温度值,可以推导出对应位置处的热流密度和通道表面温度,根据式(6)可以计算对应位置上的局部沸腾换热系数。图 3 和图 4 分别给出了去离子水在 99.4 $kg/(m^2 \cdot s)$ 质量流量条件下和无水乙醇在 79 $kg/(m^2 \cdot s)$ 质量流量下,各测点位置处的局部沸腾换热系数在不同热流密度条件下的变化规律。图中的热流密度值

是已经考虑热量损失以后的沸腾换热段的几个有效热流密度的平均值。

从图3和图4可以看出,不同位置处的局部沸腾换热系数随着两相流体在微通道内的流动逐渐下降,在流体达到饱和温度开始沸腾的起始阶段,沸腾换热系数下降较为明显,这主要是由于流体在微通道中达到沸点后开始汽化,气泡一旦形成将快速发展为达到微通道当量直径的尺寸,导致局部阻塞造成传热恶化;随着气泡沿着通道的流动,将不断合并和扩展,发展形成弹状流和环状流,在没有达到蒸干的条件下,沸腾换热趋于稳定。在其他几种流量条件下,局部沸腾换热系数也有相同特征。

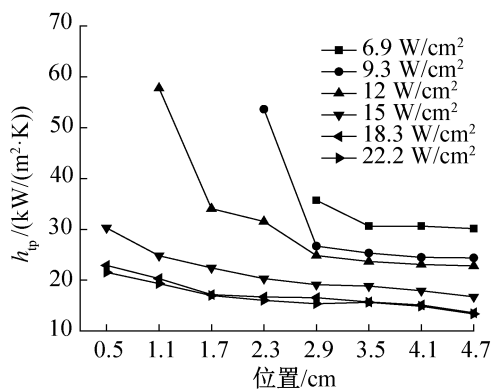


图3 去离子水在 99.4 kg/(m²·s) 时局部沸腾换热系数
Fig.3 The local boiling heat transfer coefficient of deionized water under mass flow rate of 99.4 kg/(m²·s)

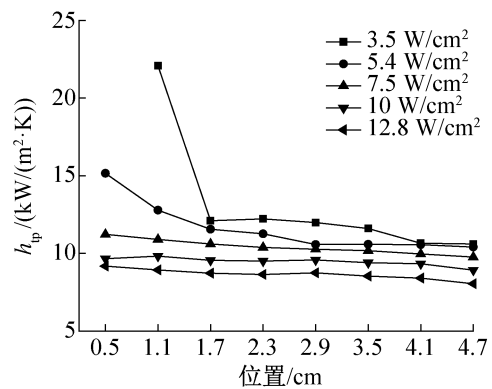


图4 无水乙醇在 79 kg/(m²·s) 时局部沸腾换热系数
Fig.4 The local boiling heat transfer coefficient of anhydrous ethanol under mass flow rate of 79 kg/(m²·s)

将起沸点后各测点的热流密度及通道表面温度取平均值,可以计算对应条件下的两相沸腾换热系数平均值。图5所示为两种工质在不同流量下的平均沸腾换热系数。从图5可以看出,两种工质平均沸腾换热系数随着热流密度的增大而减小;相对于热流密度,质量流量对平均沸腾换热系数影响较小,可以认

为核态沸腾占主导地位。比较两种工质的平均沸腾换热系数可以发现,在相同的质量流量和热流密度条件下,去离子水的换热系数明显高于无水乙醇,作为换热工质,去离子水比无水乙醇更理想。

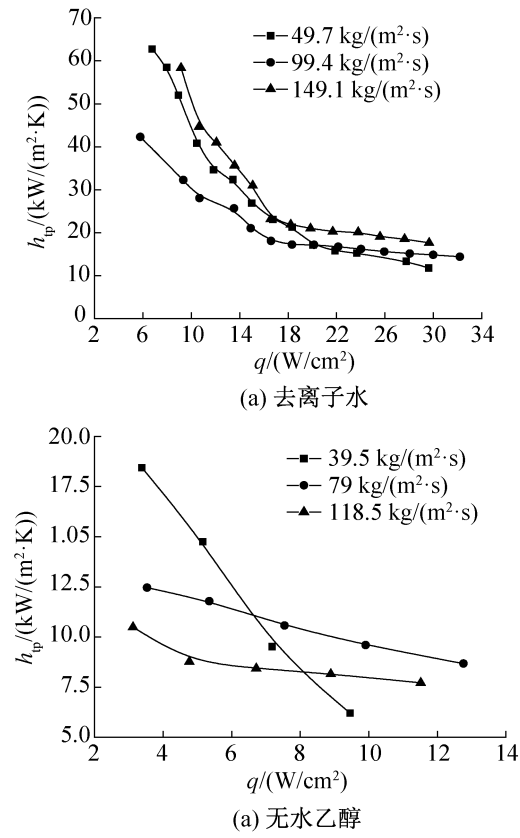


图5 两种工质在不同流量下的平均沸腾换热系数
Fig.5 The average boiling heat transfer coefficient of the working fluid under different mass flow rates

2.2.2 干度对局部沸腾换热系数的影响

由公式5计算出的当地干度可以分析在沸腾过程中随着气相质量的增大沸腾换热系数的变化规律。图6和图7分别给出了去离子水在质量流量为 49.7 kg/(m²·s) 和无水乙醇在质量流量为 39.5 kg/(m²·s) 的条件下局部沸腾换热系数随干度的变化规律。

从图6和图7可以看到,使用去离子水和无水乙醇作为工质的情况相似,随着干度的增加,沸腾换热系数减小;且在刚开始沸腾时,沸腾换热系数减小的趋势非常明显,而随着工质的流动,当干度的数值相对较高之后,沸腾换热系数减小的趋势开始逐渐减缓。在热流密度较低的情况下,干度对传热系数的影响较大,随着热流密度的增大,干度的影响逐渐降低。对于这两种流体的其他几种质量流量的实验数据分析也发现类似的规律。

2.2.3 Bo 数对平均沸腾换热系数的影响

Bo 数(沸腾数)是描述在一定质量流量条件下,

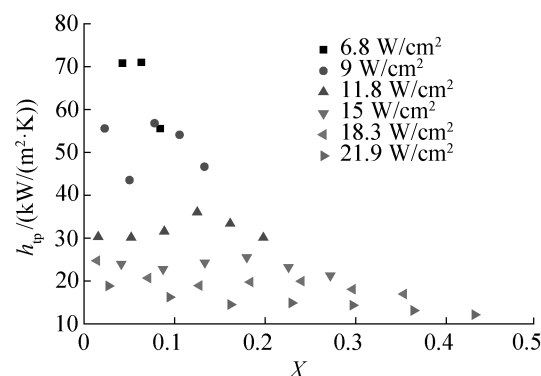


图 6 去离子水在 49.7 kg/(m²·s) 时局部沸腾换热系数随干度变化规律

Fig. 6 Variation of local boiling heat transfer coefficient with dryness of deionized water under mass flow rate of 49.7 kg/(m²·s)

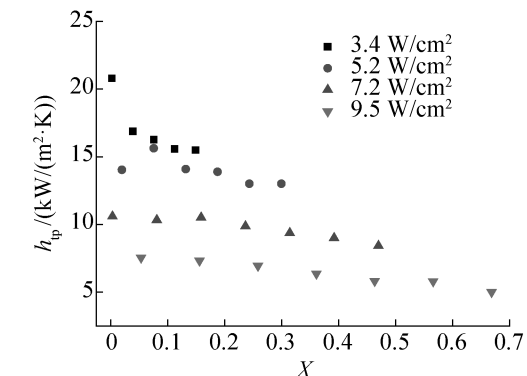


图 7 无水乙醇在 39.5 kg/(m²·s) 时局部沸腾换热系数随干度变化规律

Fig. 7 Variation of local boiling heat transfer coefficient with dryness of ethanol under mass flow rate of 39.5 kg/(m²·s)

流体的吸热量和工质汽化潜热间比例关系的无量纲量,是影响沸腾换热特性的主要因素。根据实验数据可以计算出平均沸腾换热系数随着 Bo 数的变化规律。图 8 给出了去离子水和无水乙醇在微通道内沸腾流动时的沸腾换热系数随着 Bo 数的变化规律。

从图 8 可以看出,两种流体的沸腾换热系数都随 Bo 数的增加而减小,即随着热流密度的增加,沸腾换热系数不断减小。从曲线的变化趋势可以看出,热流密度对沸腾换热系数的影响很大,进一步说明微通道内的沸腾换热以核态沸腾为主。比较不同工质的沸腾换热系数随 Bo 数的变化规律发现:去离子水的沸腾换热系数随着 Bo 数的增大,下降速率更大;随着质量流量的增加,沸腾换热系数降低,但是达到一定质量流量后,去离子水的沸腾换热系数变化不明显;

而对于无水乙醇,虽然随着质量流量的增大沸腾换热系数降低,但是 Bo 数对换热系数的影响逐渐降低。

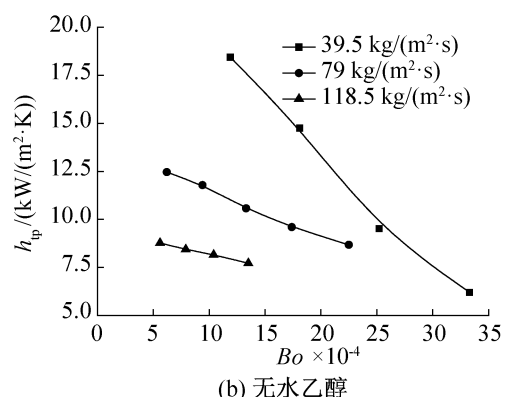
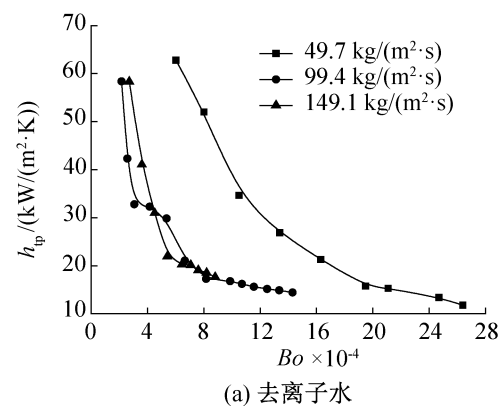


图 8 两种工质的换热系数与 Bo 数的关系

Fig. 8 Relationship among heat transfer coefficient, Bo and mass flux

3 实验关联式的验证计算

由于微通道的尺度效应,工质在通道中的流动沸腾换热现象与常规尺寸有较大的区别,影响流体在微通道流动沸腾换热系数的因素很多,包括通道结构尺寸、工质的物性、实验工况等。很多研究人员根据对实验数据的总结和分析,提出了不同的沸腾传热系数预测模型,也总结了一定的经验关系式。由于目前对于各项因素对传热系数的影响机制尚未达成一致结论,导致所提出的模型不具备广泛的适用性。

在笔者的前期工作中,曾采用去离子水作为工质在不同当量直径的微/小通道中进行实验研究,通过大量的数据分析总结出能以较小平均绝对误差计算沸腾换热系数的经验关系式^[13]:

$$h_{tp} = 22.0Bo^{0.025}Bn^{0.36}We_{lo}^{0.085}X^{0.25}h_{sp,l} \quad (8)$$

式中除了沸腾数、韦伯数外,还引入了考虑与流体表面张力、浮力、通道尺寸相关的无量纲量邦德数(Bn)。将本文实验研究得到的沸腾换热系数实验值 h_{exp} 与关联式(8)计算得到的沸腾换热系数预测

值 h_{pre} 进行比较,结果如图9所示,预测值和实验值的误差绝大部分在 $\pm 25\%$ 范围内;对于水,其平均绝对误差 $MAE = 14.2\%$, 83.1% 的实验值位于预测值的 $\pm 25\%$ 范围内;对于乙醇,其平均绝对误差 $MAE = 16.6\%$, 79% 的实验值位于预测值的 $\pm 25\%$ 范围内。可见,该关联式对本文实验数据的计算结果比较理想,充分考虑了因换热工质热物性不同造成的影响,该式具有较高的精度,能满足工程设计的要求。

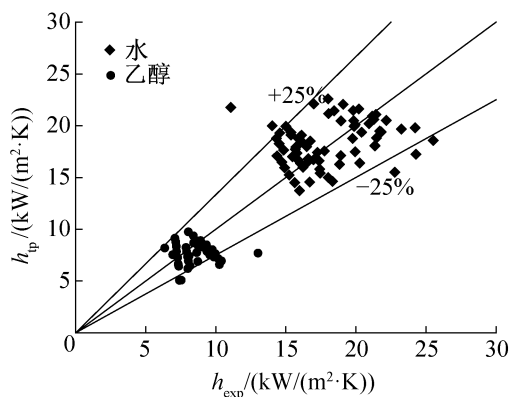


图9 实验值与预测值对比

Fig. 9 The prediction Liu's correlation with experimental data of h_{tp}

4 结论

本文通过在多排并行的 $0.2\text{ mm} \times 0.55\text{ mm}$ 的矩形微通道(当量直径为 0.293 mm)内进行去离子水和无水乙醇的沸腾换热实验研究,根据对实验数据的计算和分析不同热流密度条件下通道内沸腾换热系数的影响因素和变化规律,探讨了流体的种类、热流密度、质量流量对微尺度通道内流动沸腾换热特性的影响,研究结果对理解微通道内沸腾换热机制有着一定的意义。通过分析讨论初步得到以下结论:

1)流体的比热容、沸点、汽化潜热等物性参量的差异对沸腾换热特性有明显影响,在近似的流动和换热条件下去离子水的平均沸腾换热系数为 $11.8 \sim 62.8\text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,无水乙醇的平均沸腾换热系数为 $6.2 \sim 18.4\text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,去离子水的沸腾换热系数明显大于无水乙醇。

2)通道内的沸腾换热系数随着热流密度的增大呈下降趋势,在热流密度较低的情况下,沸腾换热系数随着干度的增加快速下降,随着热流密度的增大,干度对沸腾换热系数的影响逐渐降低;微通道内的传热机制为核态沸腾占主导地位。

3)沸腾换热系数对质量流量的依赖性很小,但

两者的关系依然存在,就所选两种工质来说,质量流量对去离子水的沸腾换热系数影响较小,对无水乙醇的沸腾换热系数影响较大。

4)通过沸腾换热系数的实验值和经验关联式预测值的对比,确定了所总结出的关联式对实验结果的预测计算较为可靠,计算结果对去离子水的平均绝对误差为 14.2% , 83.1% 的实验值位于预测值的 $\pm 25\%$ 范围内,对无水乙醇的平均绝对误差为 16.6% , 79% 的实验值位于预测值的 $\pm 25\%$ 范围内,能满足工程设计的要求。

参考文献

- [1] 张瑞达. 制冷系统中微通道流动沸腾传热特性研究[D]. 广州:华南理工大学, 2014. (ZHANG Ruida. Study on the flow boiling heat transfer characteristics in microchannels of refrigeration system [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.)
- [2] 赵晓军, 余莉. 热管的电子设备冷却技术[J]. 世界科技研究与发展, 2007, 29(6): 19-23. (ZHAO Xiaojun, YU Li. Cooling technology of the electronic equipment in heat pipe [J]. World Science and Technology Research and Development, 2007, 29(6): 19-23.)
- [3] Piasecka M. Flow boiling heat transfer in a minichannel with enhanced heating surface [J]. Heat Transfer Engineering, 2014, 35(10): 903-912.
- [4] Popov I A, Zubkov N N, Kas'kov S I, et al. Heat transfer during the boiling of liquid on microstructured surfaces. Part 1: Heat transfer during the boiling of water [J]. Thermal Engineering, 2013, 60(3): 157-165.
- [5] Yuan W, Sefiane K. Effects of heat flux, vapour quality, channel hydraulic diameter on flow boiling heat transfer in variable aspect ratio micro-channels using transparent heating [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2012, 55(9/10): 2235-2243.
- [6] 郑志皋, 陶乐仁, 黄理浩, 等. 竖直矩形可视化流动沸腾换热实验台的设计及初步研究[J]. 制冷学报, 2013, 34(1): 61-64. (ZHENG Zhigao, TAO Leren, HUANG Lihao, et al. Design and preliminary study on vertical rectangle visualization of flow boiling heat transfer experiment platform [J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(1): 61-64.)
- [7] 邓聪, 罗小平, 冯振飞, 等. 矩形微通道内制冷剂流动沸腾传热特性及可视化研究[J]. 制冷学报, 2015, 36(6): 1-5. (DENG Cong, LUO Xiaoping, FENG Zhenfei, et al. Research on boiling heat transfer characteristics and visualization of refrigerant in rectangular micro-channels [J]. Journal of Refrigeration, 2015, 36(6): 1-5.)

(下转第42页)

- [12] 柳绮年, 贾复, 张蝶丽, 等. 旋风分离器三维流场的测定[J]. 力学学报, 1978(3):14-23. (LIU Yinian, JIA Fu, ZHANG Dieli, et al. The admeasurement of 3-dimension on cyclone separator[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 1978(3):14-23.)
- [13] 汪林. 旋风分离器气固两相流数值模拟及性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [14] 周韬. 旋风分离器的气固两相特性研究与数值模拟[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [15] 朱红钧, 林元华, 谢龙汉. Fluent 流体分析及工程仿真[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
- [16] 李红旗, 冯俊鸿, 金光熹. 润滑油雾化及其对单螺杆压缩机排气温度影响的研究[J]. 流体工程, 1992, 20(8): 14-15. (LI Hongqi, FENG Junhong, JIN Guangxi. Research of oil atomizing and its influence on discharge temperature of single screw compressor[J]. Fluid Engineering, 1992, 20(8): 14-15.)
- [17] 全国冷冻设备标准化技术委员会. GB/T 18430.1—2007 蒸汽压缩循环冷水(热泵)机组第一部分: 工业或商业用及类似用途的冷水(热泵)机组[S]. 北京: 中国

标准出版社, 2007.

- [18] 涂虬, 毛守博, 国德防, 等. 多联机空调系统压缩机贮油量的影响因素分析与试验验证[J]. 制冷学报, 2009, 30(4):14-19. (TU Qiu, MAO Shoubo, GUO Defang, et al. Analysis and experiment of influence on oil storage in compressor[J]. Journal of Refrigeration, 2009, 30(4):14-19.)
- [19] 全国冷冻设备标准化技术委员会. GB/T 5773—2004 容积式制冷剂压缩机性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.

通信作者简介

潘李奎, 男, 研发中心主任, 深圳麦克维尔空调有限公司, 13480801100, E-mail: pan.likui@mcquay.com.cn. 研究方向: 高效空调系统。

About the corresponding author

Pan Likui, male, director of R&D center, Shenzhen McQuay Air Conditioning Co., Ltd., +86 13480801100, E-mail: pan.likui@mcquay.com.cn. Research fields: high energy efficiency air-conditioner system.

(上接第12页)

- [8] 姜林林, 柳建华, 叶方平, 等. 微细管内 CO₂ 流动沸腾换热特性研究[J]. 制冷学报, 2014, 35(6): 58-63. (JIANG Linlin, LIU Jianhua, YE Fangping, et al. Characteristics of heat transfer for CO₂ flow boiling in mini-channel[J]. Journal of Refrigeration, 2014, 35(6): 58-63.)
- [9] 魏进家, 张永海. 柱状微结构表面强化沸腾换热研究综述[J]. 化工学报, 2016, 67(1): 97-108. (WEI Jinjia, ZHANG Yonghai. Review of enhanced boiling heat transfer over micro-pin-finned surfaces[J]. CIESC Journal, 2016, 67(1): 97-108.)
- [10] 葛琪林, 柳建华, 张良, 等. R410A 微通道内沸腾换热实验研究[J]. 制冷学报, 2015, 36(4): 58-65. (GE Qilin, LIU Jianhua, ZHANG Liang, et al. The experimental study of boiling heat transfer of R410A in micro-channel[J]. Journal of Refrigeration, 2015, 36(4): 58-65.)
- [11] 银了飞, 贾力, 管鹏. 微通道流动沸腾气泡受限特性实验研究[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(4): 739-742. (YIN Liaoifei, JIA Li, GUAN Peng. Experimental study on characteristics of confined bubble in microchannel flow boiling[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(4): 739-742.

- [12] Lee H J, Liu D Y, Alyousef Y, et al. Generalized two-phase pressure drop and heat transfer correlations in evaporative micro/minichannels[C]// ASME/JSME 2007 Thermal Engineering Heat Transfer Summer Conference collocated with the ASME 2007 InterPACK Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2007:107-117.
- [13] Liu D Y, Weng X, Xu X G. Experimental study on the heat transfer coefficient of water flow boiling in mini/micro-channels[J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2011, 35(7):1392-1397.

通信作者简介

刘东尧, 男, 研究员, 南京理工大学能源与动力工程学院, (025)84315484, E-mail: liudong@njust.edu.cn. 研究方向: 微尺度条件下的流动和传热机理与应用。

About the corresponding author

Liu Dongyao, male, research fellow, School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, +86 25 84315484, E-mail: liudong@njust.edu.cn. Research fields: study on heat transfer mechanism and applications of flow under the condition of micro-scale.