

侧载及加热方位对槽道内临界 热流密度影响

李 冈¹, 宋保银¹, 张 钊¹, 王 洪^{1,2}, 宋军辉¹

(1. 南京航空航天大学 航空宇航学院, 南京 210016;

2. 中国人民解放军 69008 部队, 新疆 五家渠 831300)

摘 要: 为了研究侧载以及加热方位对矩形窄缝槽道内临界热流密度特性的影响,在旋转平台上进行了两相流的超重力实验.以蒸馏水为工质,通过改变质量流速、入口温度、侧载大小以及加热方位,获得了发生临界换热现象时的质量流速、实验段压降和壁温的变化趋势,考察了侧载和加热方位对临界热流密度的影响规律,并对侧载下两相流不稳定性进行了简析.实验表明:发生临界换热时,壁温迅速上升,有效加热热流开始减少,关闭加热电源后,实验段压降下降、质量流速回升较明显;侧载以及不同的加热方位对临界热流密度有明显影响;临界热流密度发生前后,蒸汽回流导致进口温度上升,增加了流动的不稳定性.

关 键 词: 侧载; 加热方位; 窄缝槽道; 流动沸腾; 临界热流密度

中图分类号: V245.3; TK124

文献标志码: A

Influences of side load and heating orientation on critical heat flux in a rectangular groove

LI Gang¹, SONG Bao-yin¹, ZHANG Zhao¹,

WANG Hong^{1,2}, SONG Jun-hui¹

(1. College of Aerospace Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. No. 69008 Unit,

People's Liberation Army of China, Wujiaqu Xinjiang 831300, China)

Abstract: An experimental investigation into the effects of side load and heating orientation on the critical heat flux of flow boiling in a narrow rectangular groove was performed with a rotational platform. Using distilled water as working fluid, the change trend of mass velocity, the pressure drop in test section and its outlet wall temperature before and after reaching critical heat flux were obtained, the effects of side load and heating orientation on critical heat flux were investigated at different mass velocities, inlet temperatures, dynamic loads and heating orientations. Flow instability was briefly analyzed. The results show that in addition to the rapid wall temperature rise, the effective heat flux decreases as the critical heat transfer occurs. The pressure drop in test section decreases and mass velocity rebounds obviously after power cutoff. The effects of side load and heating orientation on critical heat flux are obvious. Not soon before and after the critical heat transfer occurs, the back flowing vapor increases the inlet fluid temperature, thus enhancing the flow instability.

收稿日期: 2014-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(50576035); 高等学校博士学科点专项科研基金(20040287017);

江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 李冈(1990—),男,河南商丘人,硕士生,主要从事两相流动与传热研究.

Key words: side load; heating orientation; narrow groove; flow boiling; critical heat flux

现代高性能军用机的超声速巡航、隐身、电子对抗等性能要求机载电子设备的集成度越来越高,其结果使得设备的发热量越来越大,传统的空气循环制冷很难满足其制冷需求^[1]. 蒸发制冷循环系统具有制冷能力强、性能系数高等优点,逐渐受到人们的重视. 飞行器进行机动飞行时,必然会对蒸发制冷循环系统中制冷剂的流动产生影响,使其在超重力状态下工作. 超重力作用下的汽液两相流流动与传热特性与常规重力场下的有着明显的不同^[2-6],其临界热流密度决定着整个循环系统的运行安全. 因此,探索超重力作用下临界热流密度特性,获取该过程的实验数据,不仅可以拓宽两相流的研究领域,推动传热传质学科的发展,更重要的是为我国机载蒸发制冷循环系统的研制提供理论依据.

对流动临界热流密度的研究,国内外学者从实验和理论方面出发,目前研究方向主要集中在微通道、微重力以及不同流体质工上. 周继军等^[7]实验研究了微通道内的临界热流密度,发现了微通道中临界热流密度的产生主要是由于微通道的蒸汽阻塞所导致. Konishi 等^[8]采用单侧面加热的矩形窄缝通道,研究了不同加热方位下两相流的临界热流密度,并使用高速摄像机将不同工况下临界热流密度触发机制记录下来. 研究发现,在不同的质量流速下流动方位对临界热流密度的影响不同. 通过对比得到的数据,发现界面分离模型能够高精度的吻合实验数据. Zhang 等^[9]利用美国国家航空航天局(NASA)KC-135 飞机作抛物线飞行时产生的超重力(1.8g)、微重力(分别为0.377g,0.17g, 10^{-6} g),记录了非常规重力下沸腾临界热流密度的触发机制,并提出在空间系统中运用在地球环境中实验得出的微重力下的临界热流密度的数据、关联式是安全的. Zhang 等^[10]还对质量力、表面张力和惯性力对临界热流密度的影响予以了实验研究,获得了加热方位、过冷度等对临界热流密度及其分布的影响数据. Roday 等^[11-12]研究了微管内实验工质分别为水和 R123 两相流动的沸腾临界热流密度状况,分析了质量流速、过冷度、出口含汽率、加热长度以及管径对临界热流密度的影响.

为了探究侧载及加热方位对矩形槽道内临界热流密度影响,本实验利用旋转平台产生的离心

力模拟飞行过载,并在上面搭建两相流实验系统. 以蒸馏水为实验工质,对侧载为 0~2.5g 范围内不同加热方位下矩形槽道内临界热流密度进行了实验研究,获取了侧载和加热方位对临界热流密度影响的部分实验数据.

1 实验装置及方法

图 1 所示为实验装置简图. 整个实验装置由工质循环系统、加热设备、冷凝器、数据采集与无线传输系统和旋转平台控制系统组成.

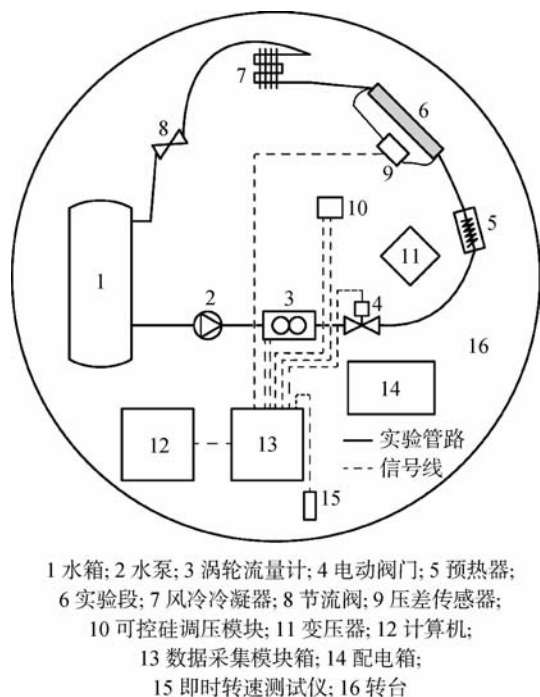
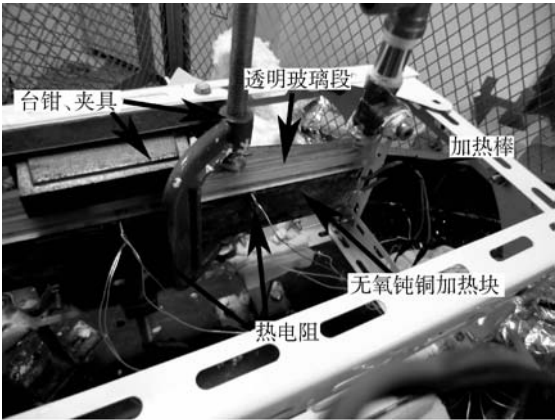
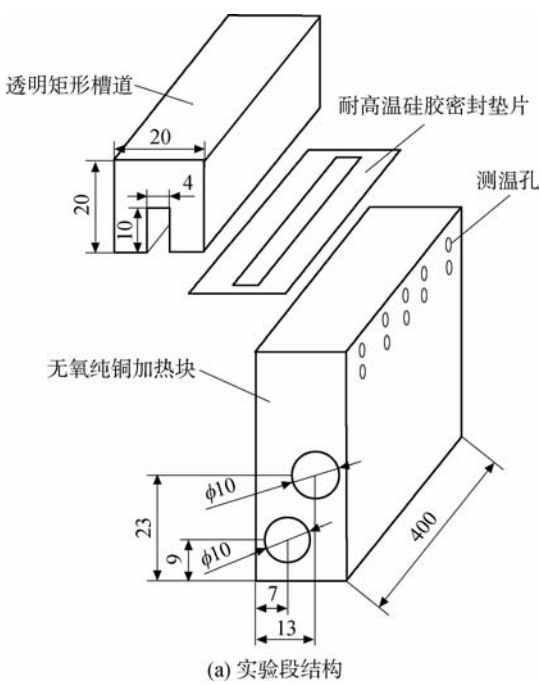


图 1 实验装置简图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

实验段结构如图 2 所示. 透明实验段由 3 块耐高温高硼硅钢化玻璃通过硅胶 705 均匀黏接而成,形成横截面为 10 mm×4 mm 的矩形槽道. 加热块采用长为 400 mm、纯度为 99.99% 的铜块(无氧化). 为了对加热块进行均匀加热,在加热块副侧面插入 2 根双头出线、直径为 10 mm、长为 430 mm、功率为 1800 W 的加热棒. 在加热块的主侧面开有上下对应的 10 个直径为 2 mm 的圆孔,孔深为 10 mm,用于安装铠装 Pt100 热电阻. 为了满足密封要求,加热块与高硼硅钢化玻璃间采用耐高温硅胶垫片,通过台钳和夹具挤压对整体进行固定密封. 整个实验段由内到外采用耐高温超

细玻璃棉和普通保温棉包裹,并在普通保温棉表面裹有铝箔,减少空气对其对流换热和辐射热损失。



(a) 实验段结构

(b) 未保温的实验段实物图

图 2 实验段(单位:mm)

Fig. 2 Test section (unit:mm)

由加热棒所产生的热量必然会有部分散至环境中,为减少依据加热功率计算矩形通道底部加热热流所带来的误差,通过布置的几对热电阻测量加热块上的壁面温度,根据一维稳态导热方程得到有效热流密度

$$q''_{\text{eff}} = \lambda \frac{t_d - t_u}{\delta}$$
 (1)

式中 λ 为铜的导热系数,391 W/(m·℃), δ 为热电阻对上下间距, $\delta=10$ mm; t_d 和 t_u 分别为布置于下部和上部的热电阻测量的温度值(℃)。

实验在常压下进行.实验过程中,蒸馏水由水泵抽出流经涡轮流量计,进入预热段,经过预热后进入实验段,再经冷凝器,最终流回水箱.特别需要指出的是侧载的增大会使管路的质量流速下降^[13-15],故本次实验通过遥控电动阀门,使得质量流速的初始值在每个侧载下保持一致.实验首先将水箱中蒸馏水烧至所需温度,调节电动阀门使质量流速达到实验工况值.接着调节预热器功率,使实验段入口温度稳定在预定值.然后调节实验段加热功率,使其缓慢地上升.当出口附近壁面温度突升时,此时实验段的热流密度就是临界热流密度,通过遥控开关关闭实验段的加热电源,保证实验装置的安全.启动控制旋转平台的调频器,在不同的侧载下重复静止时的实验步骤.整个实验过程用数据采集系统实时记录质量流速、压力、温度等相关参数.完成一个加热方位下的实验之后,取下加热块,用150#细砂纸对其表面进行打磨,除去因实验管路等原因产生的水垢,确保表面光滑.再改变其加热方位,继续进行实验.实验在4种不同的加热方位下进行的,如图3所示.图中黑色方块代表加热块, g 为重力加速度, G_x 为侧载。

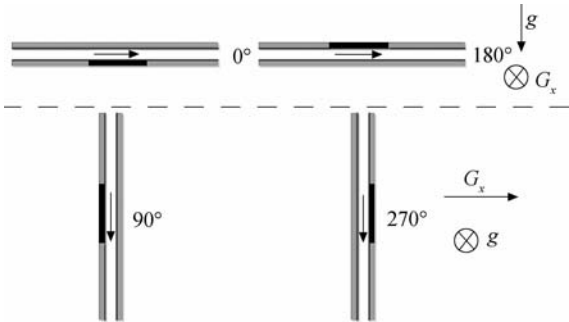


图 3 流动方位命名图

Fig. 3 Flow orientation nomenclature

2 实验结果及分析

本文实验条件如下:入口温度 t_{in} 为70,80,90℃;质量流速 G (文中出现的 G 全部为初始质量流速)为167.5~392.5 kg/(m²·s);侧载 G_x 为0~2.5 g ;加热方位 θ 为0°,90°,180°,270°。

2.1 临界实验典型数据

图4所示为在侧载 $G_x=1.5g$,质量流速 $G=392.5$ kg/(m²·s),入口温度 $t_{in}=90$ ℃,加热方位 $\theta=0^\circ$ 条件下,整个实验过程中实验段出口附近壁面温度、实验段压降、质量流速和加热热流随时间变化关系。

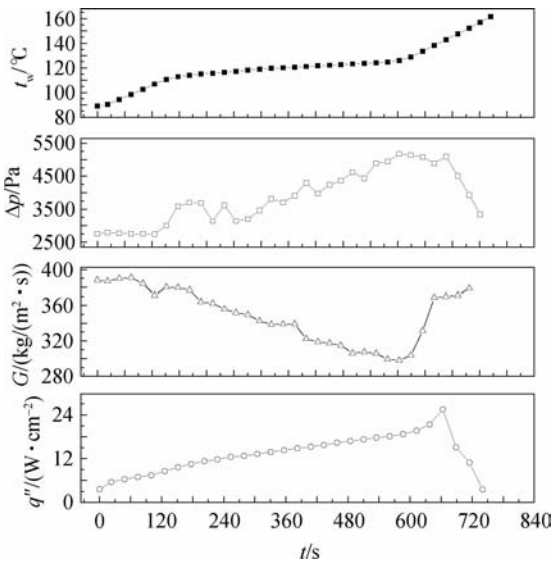


图 4 壁面温度、压降、质量流速和加热热流随时间的变化
Fig. 4 Variations of wall temperature, pressure drop, mass velocity and heat flux input with time

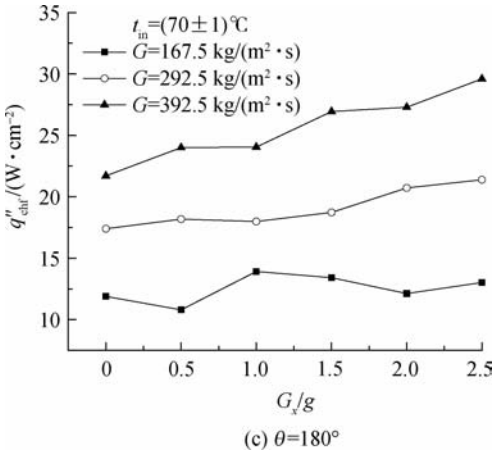
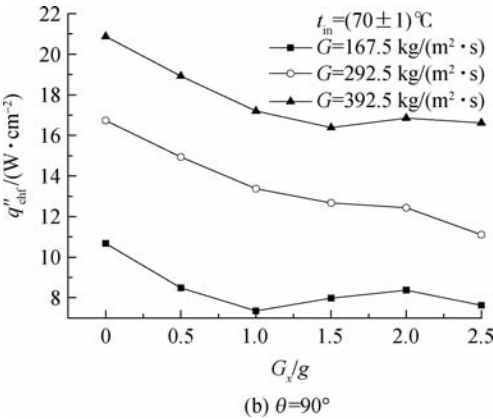
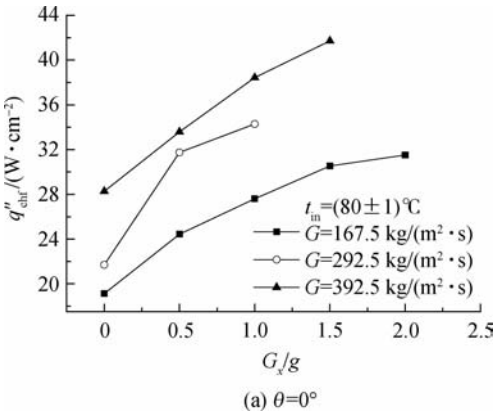
为了节省实验所需时间,实验段加热电压从某一基数开始增加.从图 4 中可以看出,在 0~125 s 内,壁面温度上升迅速,实验段压降及质量流速相对波动较小,大约 125 s 后,壁面温度上升缓慢,实验段压降开始上升,质量流速缓慢减小.主要原因是前 125 s 内属于单相对流换热,传热系数较低,换热量小,而大约 125 s 后,此时相变换热逐渐成为主体,换热量增多.随着实验的进行,加热热流以每分钟约 4 W/cm² 的速率逐渐增大,有效热流密度不断增大,导致沸腾的加剧.加热面上的气泡生长由低热流密度下的分散状态,逐渐相互重叠并聚合形成大气泡或者大气块,并且汽化相变导致体积膨胀,这些都阻碍了液体的流动,导致实验段压降增大.在实验回路中,水泵压头是一定的,由于流动阻力增大,导致流动减弱,质量流速减小.在实验进行到 660 s 左右时,壁面温度急剧升高,有效加热热流开始减少,传热开始恶化,此时局部壁面被烧干,临界换热现象发生.加热电源再经过大约 60 s 后关闭,此时由于热惯性,壁面温度会持续上升,但此时沸腾换热剧烈程度已开始下降,沸腾两相压降开始降低,质量流速回升.

2.2 侧载下质量流速对临界热流密度的影响

图 5 给出了 4 种加热方位下,不同质量流速和侧载对临界热流密度的影响.从图中可以看出,临界热流密度随着质量流速的增大而增大.这是由于质量流速的增大,导致槽道内流动扰动程度增强,主流液相对气泡的拖拽力增强,促使加热面

上的气泡脱离速度加快,同时使更多的主流液相接触加热面,从而需要更大的临界热流密度值.从能量守恒分析,和较小质量流速相比,大的质量流速加热到实验段出口处的烧干状态需要更大的加热功率——即热流密度.

从图 5(a)、图 5(c)、图 5(d)看出,临界热流密度随侧载的增大都有增大的趋势.在加热方位 $\theta=180^\circ$ 下,当侧载较小时,临界热流密度随侧载的变化较小,随着侧载变大,高质量流速下临界热流密度增加幅度开始增大,曲线斜率增大.在加热方位 $\theta=270^\circ$ 下,临界热流密度随侧载的增大而增加的幅度比其他两个加热方位的大很多.从图 5(b)可



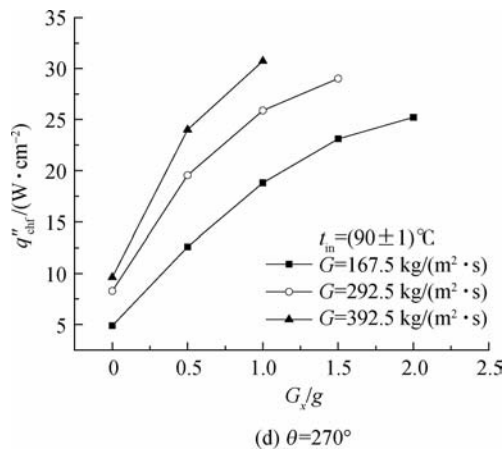


图 5 4 种加热方位下质量流速和侧载对临界热流密度的影响

Fig. 5 Effects of mass velocity and side load on critical heat flux in four heating orientations

见,在 $\theta=90^\circ$ 下,临界热流密度随侧载的增大而减小,小质量流速 $G=167.5\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 和大质量流速 $G=392.5\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时,临界热流密度呈现随着侧载的增加先降低又缓慢增加的趋势.

从流体质点受力的角度进行分析,图 6 为流体质点在侧载下的受力分析图. a 为质点受到的向心加速度, G_x 为侧载, G_h 为侧载与重力加速度的合加速度, ω 为旋转平台的角速度, β 为 G_h 与 g 的夹角. 随着旋转平台角速度 ω 的增大,即侧载 G_x 不断增大,则流体质点所受合力不断增大, β 也不断增大. 原因可归纳为

1) 在 $\theta=0^\circ$ 下, 汽泡受离心力的作用, 相当于受到一个侧拽力, 侧载越大时, 此侧拽力越大, 汽泡从加热面脱离频率增大, 导致临界热流密度增大.

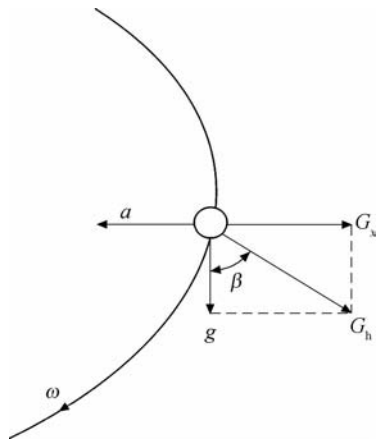


图 6 流体质点在侧载下的受力分析图

Fig. 6 Schematic of force acting on fluid particle under side load

2) 在 $\theta=90^\circ$ 下, 主流液相受到合力 G_h 的作用, 有远离加热面趋势, 侧载越大, 这种远离趋势越明显, 而汽泡受浮升力的影响向加热面聚集, 形成膜态沸腾, 因此随着侧载的增大所需临界热流密度值下降. 侧载超过约 1 g 后, 随着侧载的增大, 靠近加热面压力降低, 又使得汽泡易于脱离加热面, 导致热流密度有所增加.

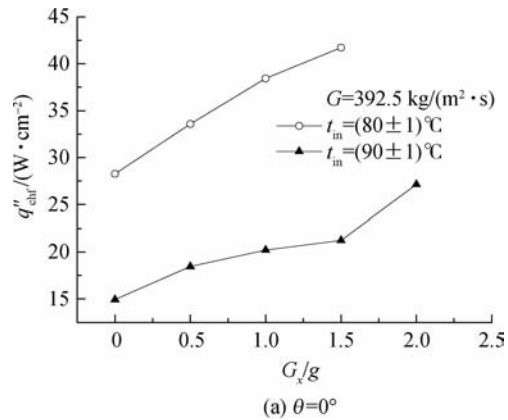
3) 在 $\theta=180^\circ$ 下, 小侧载下, 有助于流动趋于稳定, 且在液相质量力和汽泡浮升力作用下, 不利于汽泡从加热面上的产生和脱离, 导致临界热流密度值增幅缓慢, 大侧载下汽泡受合力 G_h 的作用逐渐成为主体, 开始大于浮升力的作用, 汽泡脱离加热面的速度加快, 临界热流密度增幅开始增大.

4) 在 $\theta=270^\circ$ 下, 随着侧载的增大, 在合力 G_h 的作用下, 主流液相不断地涌向加热面, 破坏加热面汽化核心, 破坏沸腾汽泡, 强化换热, 不易形成膜态沸腾, 因而临界换热现象需要在较大的热流密度下才能发生. 侧载越大, 主流液相所受合力 G_h 越大, 气泡的形成和成长越困难, 临界热流密度增幅越为明显.

2.3 侧载下入口温度对临界热流密度的影响

图 7 为不同加热方位下, 入口温度和侧载对临界热流密度的影响. 从图 7 中可以看出, 随着入口温度的增加, 临界热流密度值减小. 原因可归纳为: 由于入口温度增加, 会相应地减弱主流液相与汽泡的相变换热, 汽泡的冷凝速率下降, 加热面上容易产生更多的汽化核心数从而使得单个汽泡发生聚合, 产生大气泡或者大气块的概率增大, 发生临界热流密度现象时所需的加热量减小.

除了 $\theta=90^\circ$ 时, 随着侧载的增大临界热流密度值减小外, 其他 3 种加热方位下均是随着侧载的增大临界热流密度值增大. 其原因与质量流速对临界热流密度的影响随侧载的变化相类似, 这



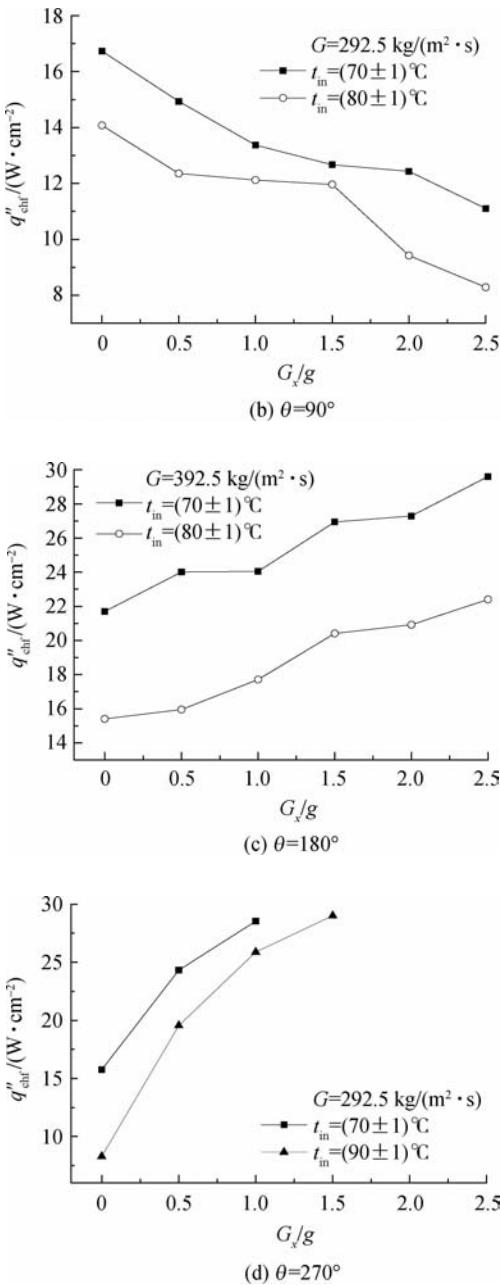


图 7 4 种加热方位下入口温度和侧载对临界热流密度的影响

Fig. 7 Effects of inlet temperature and side load on critical heat flux in four heating orientations

里不再赘述。

2.4 侧载下系统流动不稳定性分析

图 8 为在侧载 $G_x=2g$ 、质量流速 $G=392.5\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、入口温度 $t_{\text{in}}=80\text{ }^\circ\text{C}$ 、加热方位 $\theta=90^\circ$ 条件下，入口温度随实验时间的变化。从图中可以看出，在临界热流密度现象发生前后，工质进口温度开始呈上升趋势。这种现象在其他实验工况下均遇到，较为普遍。这与文献[7,16]的实验结果相一致。其主要原因是，在大热流密度下，槽道

内产生的过热蒸汽未能及时有效从实验段出口排出，开始向实验段上游膨胀，形成蒸汽倒流现象。这些间歇蒸汽层被分成许多小气泡，充分与主流液相进行混合。在实验段进口端，主流液相与这些气泡的相互作用直接显现为流体进口温度的上升，增加了流动不稳定性。

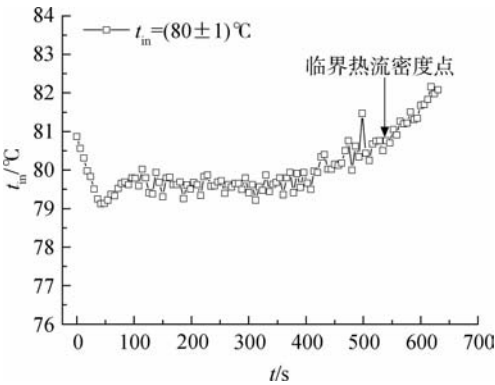


图 8 流体入口温度随时间的变化
Fig. 8 Historical variation of fluid temperature at the inlet of test section

由于旋转状态下的坐标系为非惯性系统，不仅要考虑具有保守力性质的重力，还要考虑离心力、哥式力等非保守力，再加上浮升力、表面张力和界面力的影响，整个流场受力呈非均匀化的特点。这些都导致侧载作用下两相流流动不稳定性更加复杂。图 4 的压差跳跃和质量流速波动也反映了流动的不稳定性。

2.5 实验误差分析

在本次实验中，根据各测量仪器说明书和校验数据，对测量参数进行误差分析。进出口压力变送器测量精度为 0.5%；压差传感器的精度为 0.075%；铠装热电阻的绝对测量误差为 $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$ ；涡轮流量计的精度为 1%；调频器的精度为 0.2%；可控硅调压模块精度为 1%。

尽管实验段外覆盖有绝热保温材料，由于侧载及环境温度的影响，仍然会有部分热损失。为了验证实验系统热平衡，在不同的侧载下进行单相流动加热计算。根据加热棒输入功率 Q 和实验工质获得的热功率 Q' 的偏差，计算系统热损失率。其中

$$Q' = Gc_p(t_{\text{out}} - t_{\text{in}}) \tag{2}$$

式中 t_{in} 和 t_{out} 分别代表工质的进出口温度。系统热损失率^[17]为

$$\varepsilon = \frac{|Q - Q'|}{0.5(Q + Q')} \tag{3}$$

经过计算,系统最大热损失率不大于 7%。

本次实验工质虽然采用蒸馏水,但由于实验管路等原因,实验一段时间后,加热块表面仍会有水垢出现,厚度从入口到出口逐渐增加,如图 9 所示。有资料报道,其对临界热流密度的影响不会超过 15%^[18]。为了分析水垢对临界热流密度的影响,在每个加热方位下的实验完成后重复其最初的实验工况,对比实验结果可知,最大误差为 5%。

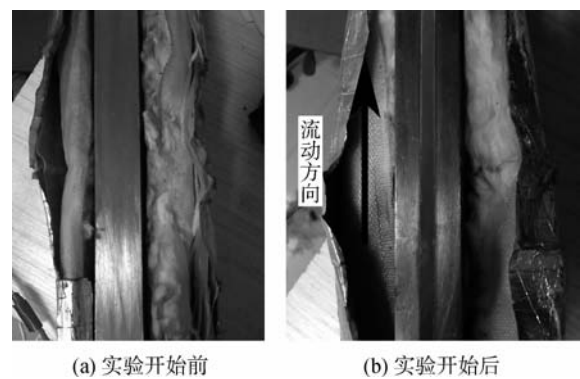


图 9 加热块表面
Fig. 9 Surface of the heating block

3 结 论

以蒸馏水为实验工质,对矩形窄槽道尺寸为 10 mm×4 mm 内的临界热流密度进行了实验研究,探究了侧载以及加热方位对临界热流密度的影响,分析了临界热流密度随质量流速、入口过冷度等因素的变化特性,得到如下结论:

1) 随着热流密度的增加,质量流速下降,实验段压降升高。当临界换热现象发生后,实验段出口端壁面温度迅速上升,有效加热热流开始减少;关闭电热电源后,质量流速回升,实验段压降降低。

2) 在 $\theta=0^\circ, 180^\circ$ 时,侧载增大了汽泡从加热面的脱离频率,使得临界热流密度值增大。在 $\theta=90^\circ$ 时,随着侧载的增大,主流液相受离心力的作用远离加热面,临界热流密度减小。在 $\theta=270^\circ$ 时,侧载产生的离心力促使主流液相不断补充到加热面上,导致临界热流密度值增幅较大。

参考文献:

[1] Sprouse J. F-22 environmental control/thermal management fluid transport optimization[R]. SAE Technical Paper, SAE-2000-01-2266, 2000.
[2] YAO Qiuping, SONG Baoyin, MA Liangjun, et al. Experi-

mental investigation of flow characteristic of air-water two-phase flow under high gravity[J]. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 2009, 52(175): 29-35.
[3] YAO Qiuping, SONG Baoyin, ZHAO Mei, et al. Effects of dynamic load on flow and heat transfer of two-phase boiling water in a horizontal pipe[J]. Heat and Mass Transfer, 2009, 45(9): 1205-1213.
[4] XIE Liyao, XIE Yaoqi, WU Hongwei, et al. High gravity influence on boiling heat transfer in helical coils[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 73: 706-715.
[5] XU Yu, FANG Xiande, LI Guohua, et al. An experimental investigation of flow boiling heat transfer and pressure drop of R134a in a horizontal 2.168 mm tube under hyper-gravity. Part I frictional pressure drop[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 75: 769-779.
[6] XU Yu, FANG Xiande, LI Guohua, et al. An experimental investigation of flow boiling heat transfer and pressure drop of R134a in a horizontal 2.168 mm tube under hyper-gravity. Part II heat transfer coefficient[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 80: 597-604.
[7] 周继军, 徐进良, 甘云华, 等. 微通道中临界热流密度的实验研究[J]. 自然科学进展, 2005, 15(5): 585-590.
ZHOU Jijun, XU Jinliang, GAN Yunhua, et al. Experimental investigation on critical heat flux in microtube[J]. Progress in Natural Science, 2005, 15(5): 585-590. (in Chinese)
[8] Konishi C, Mudawar I, Hasan M M. Investigation of the influence of orientation on critical heat flux for flow boiling with two-phase inlet[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 61: 176-190.
[9] Zhang H, Mudawar I, Hasan M M. Flow boiling CHF in microgravity[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(15): 3107-3118.
[10] Zhang H, Mudawar I, Hasan M M. Experimental assessment of the effects of body force, surface tension force, and inertia on flow boiling CHF[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(20): 4079-4095.
[11] Roday A P, Jensen M K. Study of the critical heat flux condition with water and R-123 during flow boiling in microtubes. Part I experimental results and discussion of parametric effects[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(13): 3235-3249.
[12] Roday A P, Jensen M K. Study of the critical heat flux condition with water and R-123 during flow boiling in microtubes. Part II comparison of data with correlations and establishment of a new subcooled CHF correlation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(13): 3250-3256.
[13] 赵枚, 宋保银, 姚秋萍. 动载作用下管内汽水两相流传热特性[J]. 航空动力学报, 2009, 24(3): 542-546.
ZHAO Mei, SONG Baoyin, YAO Qiuping. Heat transfer

characteristic of steam-water two-phase pipe flow under high gravity[J]. Journal of Aerospace Power,2009,24(3): 542-546. (in Chinese)

[14] 单绍荣,宋保银,马启成.侧载和管径对管内沸腾两相流性能影响实验[J].航空动力学报,2011,26(11):2522-2527. SHAN Shaorong,SONG Baoyin,MA Qicheng. Experiment on the effects of side load and pipe diameter on the characteristic of boiling two-phase pipe flow[J]. Journal of Aerospace Power,2011,26(11):2522-2527. (in Chinese)

[15] 马启成,宋保银,单绍荣.顺载和管径对管内水沸腾两相流流动性的影响[J].北京航空航天大学学报,2011,37(8): 943-947. MA Qicheng,SONG Baoyin,SHAN Shaorong. Effects of driving load and pipe diameter on flow characteristic of two-phase boiling water[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2011,37(8):943-947. (in Chinese)

[16] Qu W,Mudawar I. Measurement and correlation of critical heat flux in two-phase micro-channel heat sinks[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47 (10):2045-2059.

[17] 费业泰.误差理论与数据处理[M].北京:机械工业出版社,1995.

[18] 庞凤阁,高璞珍,王兆祥,等.摇摆对常压水临界热流密度(CHF)影响实验研究[J].核科学与工程,1997,17(4): 367-371. PANG Fengge,GAO Puzhen,WANG Zhaoxiang, et al. Experimental investigation on effect of rolling upon critical heat flux for water at atmosphere pressure[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering,1997,17(4): 367-371. (in Chinese)

(编辑:秦理曼)