

垂直矩形窄通道流动沸腾换热特性实验研究

黄理浩, 陶乐仁, 芮胜军, 郑志皋

(上海理工大学 能源与动力工程学院 上海 200093)

摘 要: 流动沸腾换热是典型的两相流问题。窄通道与常规通道相比较, 其流动沸腾换热系数有较大提高, 换热机理也更加复杂。针对截面为 250 mm × 5 mm 的竖直矩形窄缝通道, 在低压、入口温度过冷、不同质量流速及加热功率密度的条件下, 对水流动沸腾换热特性进行实验研究。通过实验分析可知: 入口温度 27 ~ 60 °C、质量流速 2.22 ~ 3.49 kg/(m² · s) 及加热功率密度 0 ~ 12 kW/m² 对饱和和沸腾起始点和过冷段长度有重要影响; 高的空泡份额和通道结构的限制使汽液两相流动不稳定而影响换热系数, 换热系数随着功率的增大而减小, 流体进入完全对流沸腾阶段; 由于实验段通道顶部结构的限制, 干度的增加不会出现干涸点, 换热不会得到恶化, 换热系数随着功率的增大基本不变。

关 键 词: 流动沸腾; 窄通道; 沸腾起始点; 空泡份额; 干度

中图分类号: TK124 文献标识码: A

引 言

流动沸腾换热广泛应用于化工、石油、食品以及航空等领域的各类换热器中, 是伴随着气泡的核化、生长、合并和破裂等现象进行的。流动沸腾换热是典型的两相流问题, 对于窄通道换热器而言, 发生流动沸腾时, 减小通道尺寸会直接影响气泡在通道中的流动特性, 由于通道的间隙与气泡的尺寸接近, 所以气泡会受到挤压、变形, 此时气泡会带走大量的潜热和引起汽液界面的扰动, 从而其换热性能及机理都会发生变化^[1]。因此, 与常规通道相比较, 窄通道的流动沸腾换热系数有较大提高^[2], 其换热机理也更加复杂。

对窄通道流动沸腾换热机理的研究是近年来国内外研究的热点。文献 [3 ~ 8] 的研究成果总结发现, 关于窄通道中流动沸腾换热机理的研究成果很多, 也获得了较多的实验数据, 但还没有形成统一的关于沸腾换热机理的认识。通过实验发现窄通道的流动沸腾换热是一个复杂多变的两相流过程, 在这个过程中可能有几种机理同时作用, 在发生沸腾的

不同阶段, 各机理对换热的主导作用不同。

1 实验装置原理及计算

1.1 实验装置原理

实验装置主要部件有: 蠕动泵、恒温槽(即预热器)、实验段、高速摄像仪、电加热片、冷凝器以及水箱。流量计与恒温水浴布置在泵的出口处。实验段使用钢化玻璃密封, 用于可视化, 观察沸腾特性。实验中使用的去离子水, 由蠕动泵驱动, 经恒温槽预热, 达到实验段设定的入口温度, 如图 1 所示。

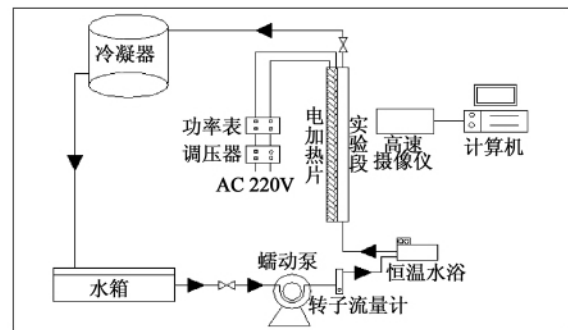


图 1 实验装置图

Fig. 1 Test rig drawing

实验段由电加热片、钢化玻璃、矩形硅胶密封圈、保温层以及固定装置, 如图 2 所示。矩形窄通道宽度 $W = 250$ mm (与加热宽度一致), 深度 $H = 5$ mm。通道长度 $L = 720$ mm, 与加热长度一致。实验段以绝缘材料包裹使其绝热, 最大可能的降低热损失。

实验段入口的质量流量由玻璃转子流量计测量, 其型号: LZB-6, 流量范围: 2.5 ~ 25 L/h, 精度: 2.5 级。实验段出口压力由压力表测定。实验段从上到下共布置了 8 个 T 型热电偶, 测量被加热铜壁面温度。实验段使用电加热方式, 加热均匀, 误差较

收稿日期: 2012-05-18; 修订日期: 2012-09-03

基金项目: 国家高科技研究发展计划基金资助项目(2008AA05Z204)

作者简介: 黄理浩(1983-), 男, 福建建阳人, 上海理工大学博士研究生。

小。实验开始前以单相流体,对漏热进行标定,在以环境温度为 25℃ 时,热平衡达到 85%。

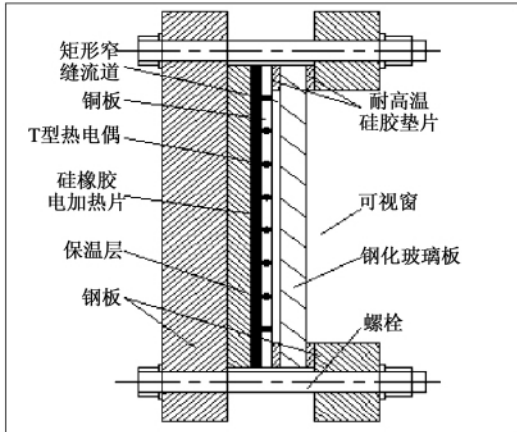


图 2 实验段结构示意图

Fig. 2 Schematic drawing of the structure of the test section

表 1 实验参数范围

Tab. 1 Range of the test parameters

	参数范围	最大不确定度
压力/MPa	0.101 ~ 0.201	1.5 级
质量流量/kg · m ⁻² · s ⁻¹	2.22 ~ 3.49	2.5 级
入口温度/℃	27 ~ 60	—
热流密度/kW · m ⁻²	0 ~ 20	± 8%
最大蒸汽干度	0.20	—

1.2 局部换热系数

假定电加热片的加热密度沿通道轴向是定值,根据位置 Z 壁面温度 T_L(Z) 及位置 Z 饱和流体温度 T_w(Z),因而可得位置 Z 的局部换热系数 h_{TP}(Z):

$$h_{TP}(Z) = \frac{q}{T_w(Z) - T_L(Z)} \quad (1)$$

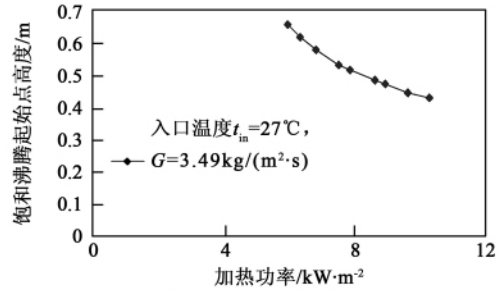
2 实验结果及分析

通过在垂直矩形窄通道中进行实验研究,得出了不同入口水温(过冷度)、流速和加热功率密度对换热特性影响的实验数据。

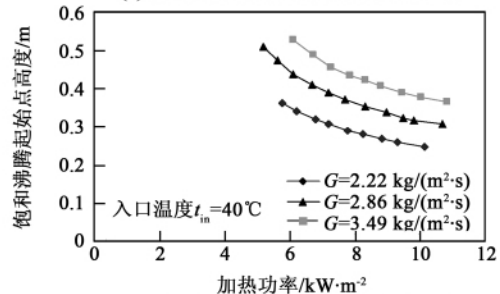
2.1 气泡沸腾起始点的变化

如图 3(a) 所示,在垂直窄通道中,随着加热功率密度的增大,加热壁面温度逐渐升高,过热度增大,沿流动方向流体会经历单相流、过冷沸腾和饱和沸腾等阶段。在饱和沸腾点,液体会迅速达到饱和

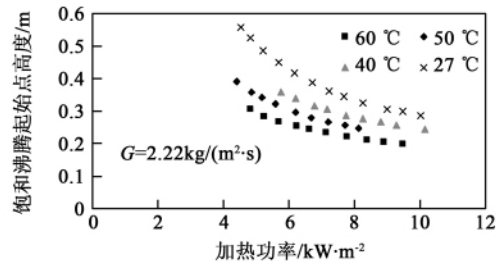
温度,继续增大加热功率密度,在单相流和过冷沸腾阶段(过冷段)壁面过热度变大,逐渐达到饱和沸腾所需的过热度,此时过冷段减少,饱和沸腾段增加,饱和沸腾点位置下移。



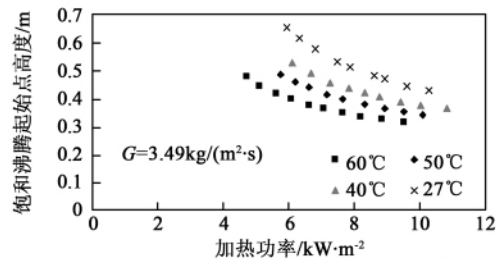
(a) 功率密度对饱和和沸腾起始点的影响



(b) 质量流速对饱和和沸腾起始点的影响



(c) 入口温度对饱和和沸腾起始点的影响



(d) 入口温度对饱和和沸腾起始点的影响

图 3 功率密度(a)、质量流速(b)和入口温度(c)及(d)对饱和和沸腾起始点的影响
Fig. 3 Influence of the power density(a), mass flux (b) and inlet temperature on the saturated boiling starting point

图 3(b) 是入口温度 40℃ 时,不同流速下饱和沸腾起始点高度随加热功率密度的变化。窄通道中流速对饱和沸腾起始点高度的影响较大,流速增大时从入口流入的过冷液体与饱和沸腾点后的饱和液

体混合, 主流液体温度降低, 壁面温度随之降低, 从图中可得出, 流速越大, 过冷段增大, 饱和沸腾段减小。因此, 流速增大, 达到热平衡后, 饱和沸腾点上移。图 3(c) 及图 3(d) 是在入口流速不变的情况下, 不同入口温度对通道中流体饱和沸腾起始点的影响。从图中可以得出, 在低热流密度下, 入口温度对饱和沸腾起始点影响较大, 入口温度增加, 通道中流动流体饱和沸腾段增加, 饱和沸腾起始点下移; 在高热流密度下, 入口温度对饱和沸腾起始点的影响较小, 这是由于在高热流密度下, 过冷液体进入通道后能迅速被加热到饱和温度, 从而饱和沸腾起始点的变化相对于低热流密度时较小。

2.2 饱和流动沸腾换热系数实验研究

实验主要研究了实验段中饱和流动沸腾局部换热系数, 而对单相流动和过冷沸腾换热系数则不作重点考察。在通道中, 沿流体流动方向只有部分点达到饱和沸腾, 如图 4(a) ~ 图 4(c) 中, 温度测点 1、2、3、4、5 点达到饱和沸腾; 图 4(d) 中由于入口温度增加, 过冷段长度减少, 温度测点 1、2、3、4、5 和 6 点达到饱和沸腾。

在图 4 中测点 1 在低加热功率下, 局部换热系数随着加热功率增大逐渐减小; 在高加热功率下, 局部换热系数达到一定值后基本不随加热功率的增大而变化, 加热功率对换热系数的影响甚微。温度测点 1 靠近出口位置, 为通道顶部测点。通过分析, 饱和沸腾阶段, 在低加热功率下, 测点 1 处干度较小, 由实验观察可知, 此处流型主要为搅拌流后期, 出现类似环状流特征, 通道中局部有少量液膜形成, 核态沸腾受到抑制, 流体主要通过液膜的导热、对流和液膜的蒸发进行换热, 流体进入对流沸腾换热阶段; 继续增大功率后, 干度逐渐增大, 结合可视化实验可知, 通道顶部的回流对搅拌流的影响较大, 汽-液相扰动剧烈, 汽-液界面模糊不清, 发生了上下振动现象。加上流动的液体不断冲刷加热侧的铜板上形成的液膜, 液膜逐渐受到破坏。所以, 高的空泡份额和通道结构的限制使汽液两相流动不稳定而影响换热系数, 换热系数随着功率的增大而减小, 流体进入完全对流沸腾阶段; 继续增大加热功率, 干度进一步增大, 此时液膜随着热流密度的增大而蒸发, 通道中趋于产生烧干区域, 但由于回流的作用, 大量的气液混合物到达顶部后会返回到通道中重新冲刷湿润加热壁面, 通道中没有出现干涸点, 所以在对流沸腾换热阶段, 换热系数基本不随加热功率的变化而变化, 这种现象与常规的窄通道换热实验中由于出现干涸点

而导致在对流沸腾换热阶段换热系数下降是有区别的。

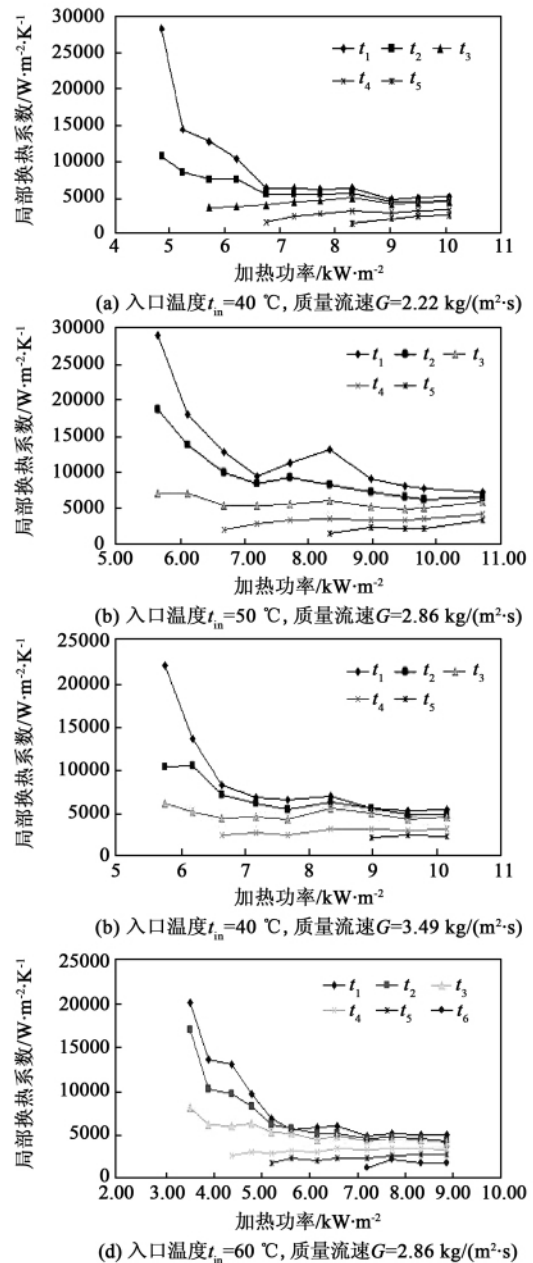


图 4 不同质量流速, 入口温度和加热功率对局部换热系数的影响

Fig. 4 Influence of the mass flow speed, inlet temperature and heating power on the local heat exchange coefficient

测点 2 处换热系数变化曲线与测点 1 类似。在低加热功率工况下, 干度较小, 测点 2 核态沸腾换热受到抑制, 流体进入对流沸腾阶段; 在高加热功率工况下, 干度较大, 流体处于完全对流沸腾阶段。由于

测点 2 处于测点 1 下方,在相同加热功率下,测点 2 处干度小于测点 1 处,从而导致在核态沸腾抑制阶段时两者的换热系数相差较大,而在完全对流沸腾阶段换热系数相差较小。

测点 3 在图 4(a)~图 4(c)中以核态沸腾换热为主,换热系数随着功率增大有小幅度增加,但变化不太明显。而在图 4(d)中,换热系数变化曲线则与测点 1、2 类似,随着功率的增加,流体进入对流沸腾阶段,换热系数逐渐减小。测点 3 在不同工况下出现不同的换热曲线规律,主要是由于入口温度和流量质量的变化导致干度的不同。

由图可知,测点 4、5、6 的换热系数变化较为明显,达到饱和沸腾后,处于通道入口处附近,靠近汽化核心点,换热系数随着加热功率的增大逐渐变大。通过实验观察,通道中有大量汽泡产生和汽泡合并现象,流型主要为泡状流末期和块状流,此时主要以核态沸腾为主导机理。

3 结 论

通过实验对垂直矩形窄通道中的流动沸腾换热进行了实验研究,得到以下结论:

(1) 发生饱和和流动沸腾时,以入口温度 $27 \sim 60^\circ\text{C}$ 、质量流速 $2.22 \sim 3.49 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 及加热功率密度 $0 \sim 12 \text{ kW}/\text{m}^2$ 的变化,对汽泡沸腾起始点的研究发现:随着加热功率的增大饱和沸腾起始点下移,过冷段长度减小,饱和沸腾段长度增加;增大质量流量,达到热平衡后,饱和沸腾起始点上移,过冷段长度增加,饱和沸腾段长度减小;饱和沸腾段随着入口温度的增大而增加,入口温度对饱和和沸腾点的影响在低热流密度较大,而在高热流密度时则相对较小。

(2) 通过对饱和和流动沸腾换热特性进行分析发现:窄通道中的流动沸腾换热由核态沸腾和对流沸腾共同作用。在核态沸腾区域,局部换热系数随着功率的增大而增大;在对流沸腾区域,核态沸腾受到抑制,局部换热系数随着功率的增大而降低,在完全对流换热阶段,由于通道顶部的回流作用,干度的增加不会出现干涸点,换热不会得到恶化,换热系数随着功率的增大基本不变。

参考文献:

- [1] 沈秀中,宫崎庆次,徐济鳌.在垂直环形窄缝通道中的沸腾传热特性研究[J].核科学与工程,2001,21(3):231-251.
SHEN Xiu-zhong,MIYAZAKI Keiji,XU Ji-jun. A study of the boiling heat transfer characteristics of a vertical annular slim flow passage [J]. Nuclear Science and Engineering, 2001, 21(3): 231-251.
- [2] 吴裕远,陈流芳,杜建通,等.液氮在狭缝中热虹吸两相流传热的强化实验研究[J].西安交通大学学报,1994,28(9):104-110.
WU Yu-yuan, CHEN Liu-fang, DU Jian-tong, et al. Experimental study of the intensified heat transfer of the thermosyphon two-phase flow of liquefied nitrogen in a narrow slot [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1994, 28(9): 104-110.
- [3] 夏春林.狭窄空间内沸腾传热机理[J].航空学报,1994,15(7):274-276.
XIA Chun-lin. Mechanism governing the boiling heat transfer in a narrow space [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1994, 15(7): 274-276.
- [4] Guo T W, Zhu T Y. Experimental research on the enhancement of boiling heat transfer of liquid helium in narrow channel [J]. Cryogenics, 1997, 37(2): 67-70.
- [5] 潘良明.垂直矩形窄缝流动过冷沸腾时的汽泡行为和换热[D].重庆:重庆大学,2002:33-47.
PAN Liang-ming. Bubble behavior and heat exchange of the flow during the undercooled boiling in a vertical narrow rectangular slot [D]. Chongqing: Chongqing University, 2002: 33-47.
- [6] 刘冬,彭晓峰,王补宣.微尺度沸腾的压力扰动模型[J].工程热物理学报,2000,21(2):191-195.
LIU Dong, PENG Xiao-feng, WANG Bu-xuan. Pressure perturbation model for microscale boiling [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2000, 21(2): 191-195.
- [7] 杜建通.窄通道强化沸腾换热的方法综述[J].低温工程,1997,96(2):20-23.
DU Jian-tong. Survey of the methods for intensified boiling heat exchange in a narrow passage [J]. Cryogenic Engineering, 1997, 96(2): 20-23.
- [8] 徐济鳌.沸腾传热和汽液两相流[M].北京:原子能出版社,2001:15-18,183-188,273-275.
XU Ji-jun. Boiling heat transfer and gas-liquid two-phase flow [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2001: 15-18, 183-188, 273-275.

(辉 编辑)

垂直矩形窄通道流动沸腾换热特性实验研究 = **Experimental Study of the Boiling Heat Exchange Characteristics of a Flow in a Vertical Rectangular Narrow Channel** [刊 汉] HUANG Li-hao ,TAO Le-ren ,RUI Sheng-jun ,ZHENG Zhi-gao(College of Energy Source and Power Engineering ,Shanghai University of Science and Technology ,Shanghai ,China ,Post Code: 200093) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 ,28 (1) . - 53 ~ 56

The flow boiling heat exchange pertains to a typical two phase flow problem. When a narrow channel is compared with a conventional one ,the flow boiling heat exchange coefficient of the former is markedly higher than that of the latter and the heat exchange mechanism of the former is much more sophisticated. Under the condition of a low pressure ,a supercooling inlet temperature ,different mass flow rates and heating power densities ,the water flow boiling heat exchange characteristics of a vertical rectangular narrow channel with a cross section of 250 mm × 5 mm were experimentally studied. The experimental and analytic results show that the inlet temperature(27 - 60℃) ,mass flow rate(2. 22 - 3. 49 kg/m²s) and heating power density(0 - 12 kW/m²) have an important influence on the saturated boiling starting point and the length of the supercooling section. A high void fraction and limitation of the structure of the channel make the steam-liquid two phase flow unstable and affect the heat exchange coefficient. The heat exchange coefficient will decrease with an increase of the power and the fluid enters into its total convection-based boiling stage. Due to the limitation of the top structure of the section under the test ,with an increase of the dryness ,there will not emerge a dry-out point ,the heat exchange will not get worsened and the heat exchange coefficient will be basically constant with an increase of the power. **Key words:** flow boiling ,narrow channel ,boiling starting point ,void fraction ,dryness

液包式雾化喷嘴出口锥角优化实验研究 = **Experimental Study of the Optimization of the Outlet Cone Angle of a Liquid Bag Type Atomization Nozzle** [刊 汉]ZHANG Jing-zheng ,LIU Ding-ping(College of Electric Power ,South China University of Science and Technology ,Guangzhou ,China ,Post Code: 510640) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 ,28(1) . - 57 ~ 60

The liquid bag type atomization nozzle represents a novel type desulfurization atomization nozzle and its outlet cone angle directly affects the atomization performance. The test rig as shown in Fig. 3 was used and a nozzle with a cone angle at the outlet was chosen to conduct a test. The atomization characteristics were tested by using a Winner 318 type laser particle diameter analyzer. The test results show that a change of the inner cone angle conspicuously affects the atomization angle while a change of the outer cone angle basically does not influence the atomization angle. A change of the inner and outer cone angle basically has no influence on the mean atomization particle diameter. Both atomization angle and mean atomization particle diameter of the nozzle will decrease with an increase of the gas/liquid pressure ratio. After the gas/liquid pressure ratio has reached 1. 5 ,the influence of the gas/liquid pressure ratio will become smaller. **Key words:** gas-in-liquid ,nozzle ,cone angle ,atomization characteristics

壁面材料对微火焰熄火影响的实验研究 = **Experimental Study of the Influence of the Wall Surface Material**