

文章编号: 0253-4339(2013)01-0061-04

doi: 10.3969/j.issn. 0253-4339. 2013. 01. 061

竖直矩形可视化流动沸腾换热实验台的设计及初步研究

郑志皋 陶乐仁 黄理浩 芮胜军 张庆钢 薛维超 高立博

(上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093)

摘 要 为了了解矩形窄通道内流动沸腾及传热现象的机理,建立了单面加热竖直矩形窄通道可视化流动沸腾换热实验台进行了实验。实验结果表明:矩形窄通道流动沸腾过程的换热系数存在最大值;随着干度的增加(即热流密度的增加)其换热系数逐渐降低,转为以液膜蒸发为主的流动沸腾换热,此时需控制热流密度,避免干涸现象的发生。

关键词 流动沸腾;矩形窄通道;液膜蒸发;干涸;可视化

中图分类号: TK124; TQ051.5

文献标识码: A

Design and Preliminary Study on Vertical Rectangle Visualization of Flow Boiling Heat Transfer Experiment Platform

Zheng Zhigao Tao Leren Huang Lihao Rui Shengjun Zhang Qinggang

Xue Weichao Gao Libo

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China)

Abstract A single-side heating apparatus is set up to study the flow boiling and heat transfer in vertical narrow rectangular channel together with high speed video camera to get the flow images in the channel. The experiment results show that: the heat transfer coefficient exists a maximum value; Heat transfer coefficient gradually decreases with increasing thermodynamic vapour quality (heat flux increasing), and flow type turns to liquid film evaporation, at this case it necessarily needs to control heat flux to avoid the occurrence of dry-out.

Keywords flow boiling; rectangular narrow channel; liquid film vaporization; dry-out; visual

制冷剂在小尺寸通道内的沸腾机理主要有两种:核沸腾以及流动沸腾。靠近沸腾起始点是以核沸腾传热机理为主,而此处的换热系数也会较大;伴随着蒸汽干度的增加流动状态向环状流或近似于环状流的流动转变,此时液膜蒸发成为主要的传热机理并抑制核沸腾。随着蒸发过程的持续,可能导致液膜的完全蒸发或在通道的某些位置出现干涸,导致传热系数的急剧下降^[1-6]。

Diaz等^[7]研究了水和碳氢化合物在圆管以及矩形通道的流动沸腾。发现对于纯碳氢化合物,其传热系数在初始区域有一个最大值,表明其传热机理以核沸腾为主;之后随着蒸汽干度的增加,沿通道轴向,其换热系数降低。但是,对于水与碳氢化合物的混合物,伴随着蒸汽干度的增加,其换热系数增加,这是由于其传热机理为流动沸腾。Agostini和Bontemps^[8]研究了R134a在矩形多通道的流动沸腾。他们发现在沸腾数 $Bo \geq 4.3 \times 10^{-4}$ 同时蒸汽干

度 $X \leq 0.4$ 时,蒸汽干度对传热系数的影响极小。因此,这个区域是以核沸腾换热机理为主。对于同样的沸腾数但是蒸汽干度大于0.4,传热系数随着蒸汽干度的增加而降低,说明干涸现象的发生。当 $Bo \leq 4.3 \times 10^{-4}$,传热系数的转变与蒸汽干度没有直接关系。通过分析,核沸腾向流动沸腾的转变公式是: $Bo(1-X) \approx 2.2 \times 10^{-4}$,而不依赖于热量与质量流量。

通过文献分析可知,在矩形狭缝通道的流动沸腾及传热现象是复杂的,并没有充分了解流动沸腾,然而其换热系数可比一般光管提高60%~90%,它能够强化传热,可在较低热流密度下操作,抗活塞能力好于一般圆管,并能消除或减轻两相流的不稳定性^[9],在化工、制冷、核动力等工业部门都有十分广泛的应用^[10]。在此建立竖直矩形窄通道可视化流动沸腾换热实验台,是为了研究传热系数与流型的关系,并能更好的理解其传热机理。

基金项目:国家高科技研究发展计划(2008AA05Z204)资助项目。(The project was supported by the National High-Tech research development plan (No.2008AA05Z204).)

收稿日期:2012年2月14日

1 实验装置设计及工况

实验装置如图1所示。其主要由：蠕动泵、恒温槽、实验段、高速摄像机、电加热片、冷凝器以及水箱等部件组成。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，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。

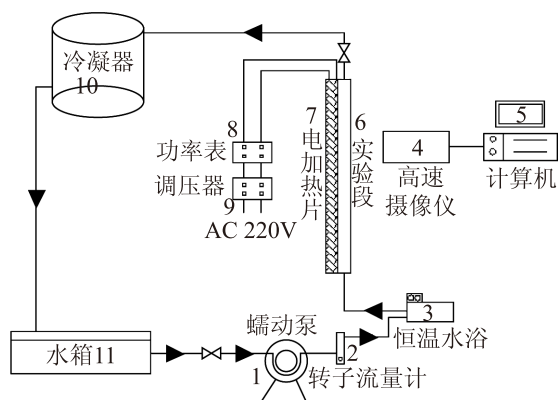
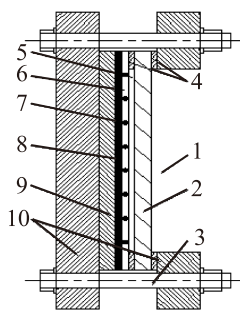


图1 实验装置图

Fig.1 Experiment apparatus

实验段结构如图2。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。矩形窄通道宽度 $W=250\text{mm}$ (与加热宽度一致)，深度 $H=5\text{mm}$ 。通道长度 $L=720\text{mm}$ ，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。



1 可视窗 2 钢化玻璃板 3 螺栓 4 耐高温硅胶垫片
5 矩形窄缝流道 6 铜板 7 T型热电偶 (从上到下依次T1-T8)
8 硅橡胶电加热片 9 保温层 10 铜板

图2 实验段结构示意图

Fig.2 Schematic drawing of experimental section structure

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：2.5~25L/h，精度：2.5级。实验段出口压力由压力表测定。实验段共布置了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%。

表1列出了实验参数范围及其不确定度。

表1 实验参数范围

Tab.1 Experiment parameters

类别	参数范围
压力/MPa	0.101~0.201
质量流量/(kg/(m ² ·s))	68.81~108.12
入口过冷度/℃	27~60
热流密度/(kW/m ²)	0~20
最大蒸汽干度	0.20

2 数据计算

2.1 热平衡

由于实验段温度较高，当环境温度过低时，需要进行热平衡分析，避免因漏热造成数据处理误差较大，而热损失主要是由于实验段向环境的对流换热。根据壁面温度，对流体单相流动，采用能量守恒定律，可以确定热损失。因此，实验中有效的热流密度计算公式：

$$q = (Q - Q_{\text{loss}}) / A \quad (1)$$

当热损失小于15%时，可忽略 Q_{loss} 。对于矩形窄通道流动沸腾，其入口与出口之间存在压降，流体压力也相应变化。因此，沿通道的流体饱和温度也不能忽略。则，根据热平衡，可得过冷段长度， Z_{sat} ：

$$G \times c_p (T_{L,\text{sat}} - T_{L,\text{in}}) = q \times s \times Z_{\text{sat}} \quad (2)$$

沿窄通道轴向位置 Z ，可以确定流体压力及饱和温度 T_{sat} 。饱和状态下的流体及蒸汽，处于压力 $p(Z)$ 下的焓值是确定的。根据能量守恒及质量守恒定律，可以得出位置 Z 的干度 X_e 。公式如下(3)~(6)：

$$T_L(Z) = T_{L,\text{in}} + \frac{q \cdot S \cdot Z}{c_p \cdot G}, \quad Z < Z_{\text{sat}} \quad (3)$$

$$T_L(Z) = T_{\text{sat}}(p(Z)), \quad Z \geq Z_{\text{sat}} \quad (4)$$

$$X_e(Z) = \frac{(h_L(Z) - h_{L,\text{sat}})}{h_{\text{fg}}}, \quad Z < Z_{\text{sat}} \quad (5)$$

$$X_e(Z) = \frac{1}{h_{\text{fg}}} \left(\frac{q \cdot S \cdot Z}{G} + h_{L,\text{in}} - h_{L,\text{sat}} \right), \quad Z \geq Z_{\text{sat}} \quad (6)$$

2.2 局部换热系数

不饱和流动的流体温度 $T_L(Z)$ 可由公式(3)求得，饱和流体温度可由公式(4)。同时，假定电加热片的加热密度沿通道轴向是定值，因而可得位置

Z的局部换热系数 $h_{TP}(Z)$:

$$h_{TP}(Z) = \frac{q}{T_w(Z) - T_L(Z)} \quad (7)$$

3 实验初步结果及分析

图3(a)、(b)及(c)分别为入口水温为27℃, 质量流量68.81kg/(m²·s)、88.47kg/(m²·s)、108.12kg/(m²·s)时, 对应蒸汽干度下的局部换热系数。

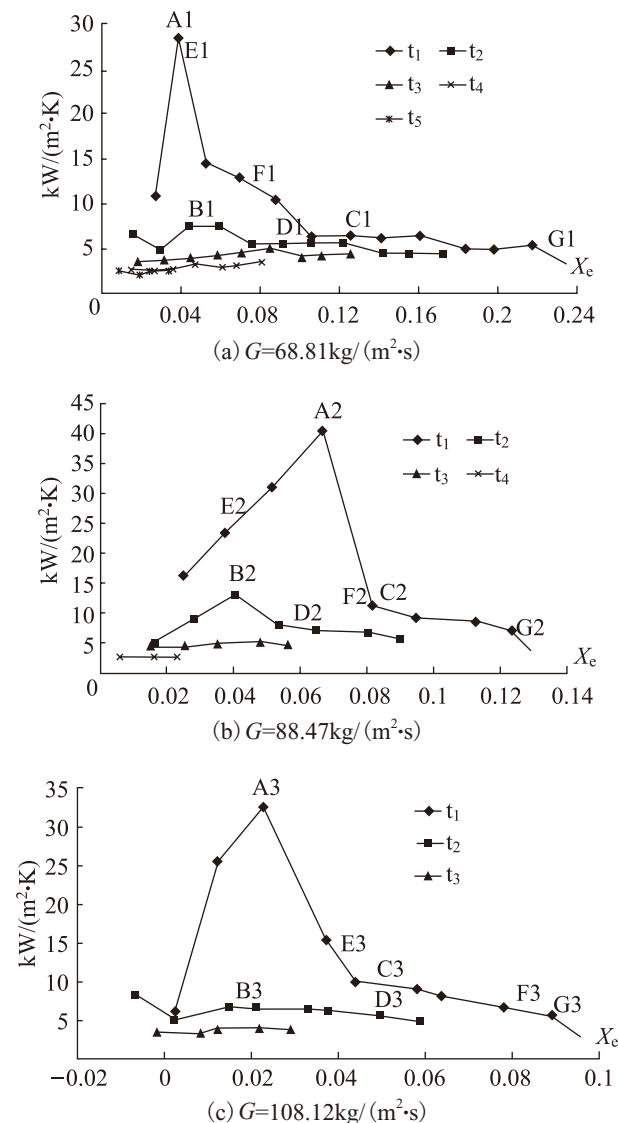


图3 不同质量流量的局部换热系数

Fig 3 Local heat transfer for different mass fluxes

实验段入口水温是过冷的, 27℃, 根据图3(a)、(b)及(c)可知, 随着加热功率的增加, 实验段中水从单相流到泡状流及环状流, 经历了对流传热, 核沸腾及流动沸腾, 因而图3(a)、(b)及(c)中T1(实验段最顶端)的局部换热系数有一个最大值, 此时处于饱和核沸腾区域, 其蒸汽干度也接近于0, 同时也接近于沸腾起始点。图3中(a)A1-C1

或B1-D1(同理(b)及(c)), 由核沸腾向流动核的转变, 同时换热系数也逐渐降低。这是因为, 处于C(C1、C2、C3)及D(D1、D2、D3)区域时, 流体与壁面存在液膜, 导致传热受阻, 其换热系数降低。而随着干度的增加, 在实验段的顶端(虚线区域G1、G2及G3)会出现干涸, 这时换热系数也将会急剧降低, 也意味着电加热功率过大, 这是需要避免的。

其次, 图3(a)、(b)及(c), 是在不同质量流量下的干度与换热系数变化趋势。以 t_1 点(t_2 类同)为例, 对于不同质量流量, 同干度(如干度为0.04(E1,E2,E3), 0.08(F1,F2,F3))的情况下, 其换热系数随着质量流量的增大而减小。这是因为图中流体处下核态沸腾区域, 干度较小, 同干度下, 质量流量越大, 局部换热系数变小。

4 结论

建立竖直接可视化流动沸腾换热实验台, 并进行初步实验, 得出以下结论:

1) 建立单面加热竖直接可视化流动沸腾换热实验台, 并确定了质量流量、入口过冷度及热流密度等参数的实验指标。

2) 经过理论分析, 给出了数据处理的评价公式, 包括过冷段长度、实验段中流体温度及各点蒸汽干度。

3) 经初步实验, 可以知道矩形窄通道流动沸腾过程, 其换热系数存在最大值, 此时以饱和核沸腾为主。随着干度的增加(即热流密度的增加)其换热系数逐渐降低, 转为以液膜蒸发为主的流动沸腾换热, 此时需控制热流密度, 避免干涸现象的发生。

符号说明:

Q —— 功, W	G —— 质量流量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
A —— 加热面积, m^2	q —— 热流密度, W/m^2
T —— 温度, $^\circ\text{C}$	X_c —— 干度
S —— 通道加热周长, m	Z —— 距入口端距离, m
c_p —— 热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	h —— 焓值, kJ/kg
h_{fg} —— 潜热, kJ/kg	h_f —— 饱和液体焓值, kJ/kg

参考文献

- [1] Ewelina Sobierska, Rudi Kulenovic, Rainer Mertz. Heat transfer mechanism and flow pattern during flow boiling of water in a vertical narrow channel—experimental results[J]. International Journal of Thermal Sciences,

- 2007, 46(11):1172-1181.
- [2] S Lin, P A Kew, K Cornwell. Two-phase heat transfer to a refrigerant in a 1 mm diameter tube[J]. *Int. J. Refrigeration*, 2001, 24(1): 51-56.
- [3] C Vlasie, H Macchi, J Guilpart, et al. Flow boiling in small diameter channels[J]. *Int. J. Refrigeration*, 2004, 27(2): 191-201.
- [4] T N Tran, M W Wambsganss, D M France. Small circular-and rectangular-channel boiling with two refrigerants[J]. *Int. J. Multiphase Flow*, 1996, 22(3): 485-498.
- [5] P A Kew, K Cornwell. Confined bubble flow and boiling in narrow spaces[C]// *Proc. 10th Int. Heat Transfer Conf. Brighton*, 1994: 473-478.
- [6] J Bonjour, M Lallemand. Flow patterns during boiling in a narrow space between two vertical surfaces[J]. *Int. J. Multiphase Flow*, 1998, 24(6): 947-960.
- [7] M C Diaz, H Boye, I Hapke, et al. Flow boiling in mini and microchannel[C]// *Proc. 2nd Int. Conf. on Microchannels and Minichannels. Rochester, New York*, 2004: 445-452.
- [8] B Agostini, A Bontemps. Vertical flow boiling of refrigerant R134a in small channels[J]. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 2004, 26(2): 296-306.
- [9] DANILOVA G N, AZARSKOV V M, ZEMSKOV B B, et al. Heat transfer and two—phase flow of freons in evaporators of refrigerators[J]. *Heat Transfer: Soviet Res*, 1986, 18(6): 18-23.
- [10] 蒲鹏飞, 潘良明, 李午申, 等. 竖直矩形狭缝通道内环状流沸腾换热分析模型[J]. *热科学与技术*, 2005, 4(3): 208-212. (Pu Pengfei, Pan Liangming, Li Wushen, et al. Annular flow analysis model for boiling heat transfer in vertical narrow rectangular gap[J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2005, 4(3): 208-212.)

作者简介

郑志皋, 男(1960—), 工程师, 上海理工大学, 制冷及低温工程研究所, 13651889137, E-mail: zhengzhigao@yahoo.com.cn。研究方向: 动力工程测控技术和流体机械。

About the author

Zheng Zhigao(1960—), male, engineer, Refrigeration and cryogenic engineering research institute, University of Shanghai for Science and Technology, 13651889137, E-mail: zhengzhigao@yahoo.com.cn. Research fields: power engineering measurement and control technology, fluid mechanics.

(上接第60页)

- [6] 何学平, 方建良, 赵巍, 等. VRV家用中央空调器 SEER 的计算与分析 [J]. *节能技术*, 2005, 23(1): 37-39. (He Xueping, Fang Jianliang, Zhao Wei, et al. Calculation and Analysis of SEER of VRV Household Central Air Conditioner[J]. *ENERGY CONSERVATION TECHNOLOGY*, 2005, 23(1): 37-39.)
- [7] S A Tassou, T Q Qureshi. Comparative performance evaluation of positive displacement compressors in variable-speed refrigeration applications [J]. *Int. J. Refrig.* 1998, 21(1): 29-41.
- [8] Larry Palmiter, Jun-Hyeung Kim, Ben Larson, et al. Measured effect of airflow and refrigerant charge on the seasonal performance of an air-source heat pump using R-410A[J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(7): 1802-1810.
- [9] 胡健, 曾伟平, 谷波, 等. 基于多标准的空调系统季节能效比计算分析[J]. *流体机械*, 2007, 35(9): 77-81. (Hu Jian, Zeng Weiping, Gu Bo, et al. Analysis on SEER of Air-conditioner Based on Multi-standard[J]. *Fluid Machinery*, 2007, 35(9): 77-81.)

作者简介

张海锋, 男(1971—), 高级工程师, 上海日立电器有限公司技术中心, (021) 50554560, E-mail: zhanghf@shcc.com.cn。研究方向: 制冷及压缩机技术。

About the author

Zhang Haifeng(1971—), male, Advanced Engineer, The technology centre of Shanghai Electrical Co., Ltd., (021) 50554560, E-mail: zhanghf@shcc.com.cn. Research fields: Refrigeration and compressors technology.