

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.02.001

窄通道内去离子水的沸腾换热特性实验研究

戴杨洋, 陶乐仁, 黄理浩, 郑志皋

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘 要:为了研究矩形窄通道内流动沸腾表面换热系数的影响因素,建立了竖直矩形窄通道流动沸腾传热实验装置,研究了尺寸为720 mm×250 mm×3.5 mm窄通道内离子水的流动沸腾换热特性。采用单侧壁面加热,改变加热热流密度;调节恒温水箱温度,改变工质入口温度;以蠕动泵为动力,改变泵的转速,改变工质流量。实验结果表明:入口温度对流动沸腾表面换热系数基本无影响;流体的紊流度随着质量流量的增加而增加,从而加强了对流换热的强度;在对流沸腾换热阶段,核态沸腾受抑制,表面换热系数随着加热功率的增大反而降低;在完全对流换热阶段,表面换热系数随着加热功率的增大基本不变。该研究为更好地设计板式换热器提供了依据。

关 键 词:升膜板式换热器;两相流;矩形窄通道;流动沸腾换热

中图分类号:TK124 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2017)02-0001-05

Boiling Heat Transfer Characteristics of Deionized Water in Narrow Channel

DAI Yangyang, TAO Leren, HUANG Lihao, ZHENG Zhigao

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

Abstract: In order to study the factors affecting the flow boiling heat transfer coefficient in a narrow rectangular channel to design climbing film plate heat exchanger, a vertical rectangular narrow channel flow boiling heat transfer experimental device was set up. The flow boiling heat transfer characteristics of deionized water was studied, and the size of the channel is 720 mm×250 mm×3.5 mm. The wall on one side was heated to change the heating heat flux. The thermostat tank's temperature was adjusted to change the inlet temperature. A peristaltic pump was used as the driving force, and the mass flow rate was adjusted by changing the pump's speed. The results show that, the inlet temperature has a small effect on the flow boiling surface heat transfer coefficient. The turbulence increases with mass flow's increasing, and it enhances the strength of the convection heat transfer. In the stage of convective heat transfer, the nucleate boiling is restrained, and the surface heat transfer coefficient gradually decreases with the heating power increases. In the stage of fully convective heat transfer, the surface heat transfer coefficient almost unchanges as the heating power increases. The study is helpful to design plate heat exchanger.

Keywords: climbing film plate heat exchanger; two-phase flow; rectangular narrow channel; flow boiling heat transfer

窄通道内沸腾换热作为强化传热常用的结构形式,具有传热性能优异,结构紧凑的独特性^[1]。板式换热器也因窄通道优异的换热性能得到了广泛的应用^[2-3]。随着各国学者对两相流与传热问题的深入研究,汽液两相流与传热已经逐步发展成一门新学科^[4]。从目前的研究来看,认为窄通道中流动沸腾换

热以气泡扰动和液膜蒸发传热这2种机理占主导。吴裕远^[5]等认为窄通道中的沸腾换热机理是以液膜蒸发为主导,热量是通过被挤压的气泡底部的液膜导热传递给液体的。Tran^[6]等研究了内径为2.46 mm的单管内工质R12的流动沸腾特性,分析了质量流量与热流密度等参数对换热系数的影响。窄通道中流动沸

收稿日期:2016-09-02;修回日期:2016-10-12

基金项目:上海市动力工程多相流动与传热重点实验室资助项目(13DZ2260900)。

第一作者简介:戴杨洋(1991),女,江苏扬州人,硕士研究生,主要研究方向为传热传质。E-mail:540264522@qq.com

腾换热的流型有4种:泡状流、弹状流、搅拌流和环状流^[7],但是由于不同的实验工质与通道结构,就会得到不同的实验结论。Cornwell 和 Kew^[8]以 R113 为工质对截面尺寸为 $1.2\text{ mm} \times 0.9\text{ mm}$ 的矩形槽群做了可视化实验研究,观察到孤立气泡区、受限气泡区、环状塞状流区等多种流型,并发现流型的变化和表面换热系数密切相关。各种工况下流动沸腾特性规律有某些共同之处,但也随条件和过程的不同表现出其特殊的方面。

本课题组以光铜板作为研究对象,模拟板式换热器流动状态,建立竖直矩形窄通道实验台,研究入口温度、质量流量对流动沸腾表面换热系数的影响,并能更好地理解其传热机理,不仅可以为工程上的应用提供技术支持,还可以为两相流动沸腾机理的研究提供实验数据。

1 实验装置

实验系统图如图1所示。水箱中的去离子水,以恒压蠕动泵作为驱动力,经恒温水浴预热后进入实验段,通过调压器改变电加热板两端电压,从而改变加热功率,去离子水在试验段中被加热,变成两相流,经冷凝器冷凝,回到水箱,完成循环过程。实验段由钢化透明玻璃、电加热膜片、矩形硅胶密封圈、保温层及固定装置组成。矩形窄通道与加热宽度一致,矩形尺寸为:宽 $S=250\text{ mm}$,长 $L=720\text{ mm}$,深度 $H=3.5\text{ mm}$ 。实验段的测温点从实验段由上而下进行编号采集,测点1~8距离进口处分别为:106,186,266,346,426,506,586 和 666 mm,热电偶具体布置如图2所示。

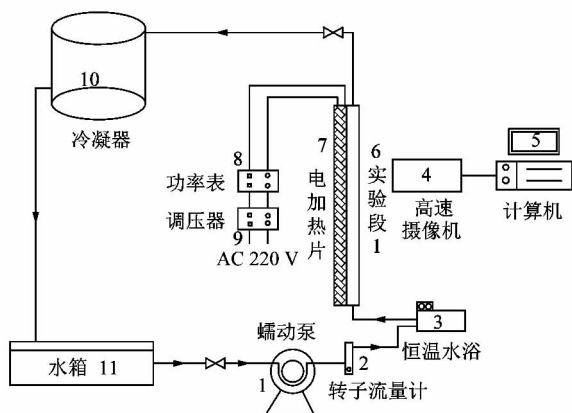


图1 实验回路系统图

Figure 1 System diagram of experimental circuit

2 理论基础

工质在窄通道中的流动沸腾换热现象主要可分为2类:核态沸腾和对流沸腾。如图3 流体被加热时在

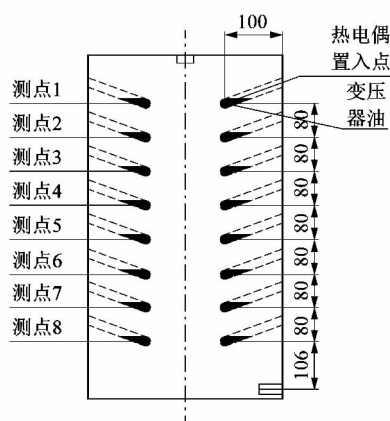


图2 热电偶布置示意图

Figure 2 Layout diagram of thermocouple

不同区域会出现不同的流型,不同的流型对应不同的传热形式。核态沸腾主要以汽泡核化、生长和脱离为特征,汽化核心对换热起着决定性的作用,热量从被加热表面到液体的传递主要通过以下几种机理进行:靠汽泡的汽化潜热;汽泡贴附在壁面上时靠汽泡底部的强烈蒸发和汽泡顶部的凝结;受限汽泡对附着面的扰动引起液体与蒸气间交换;汽泡聚集层之间单相对流的传热。对流沸腾换热主要由含气率、质量流量、工质物性、通道结构等决定,当核态沸腾被抑制,两相流进入以液膜蒸发为特征的环状流时,壁面与两相流的换热是通过液膜的导热对流以及膜界面的强烈蒸发进行的。

3 数据处理

假定电加热片加热热流密度沿实验段通道轴向为定值,壁面温度测量由热电偶所测,忽略壁面导热热阻,根据热量平衡^[9],由壁面温度、不同位置流体温度可得流动沸腾区表面换热系数。本文通过单向流对流换热热平衡来计算实验段热损失:

$$Q_{\text{loss}} = C_p \times G \times (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) \quad (1)$$

式中: C_p 为定压比热容, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; G 为质量流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; $T_{\text{in}}, T_{\text{out}}$ 分别为通道入口和出口水温, K 。

单位面积质量流量:

$$G_v = G/S$$

式中 S 为通道面积, $S = 8.75 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ 。

计入热量损失后的热流密度:

$$q = (Q - Q_{\text{loss}})/A \quad (2)$$

局部换热系数:

$$h = q/(T_w - T_z) \quad (3)$$

表面换热系数:

$$A_i = W \times (Z_i - Z_{i-1}) \quad (4)$$

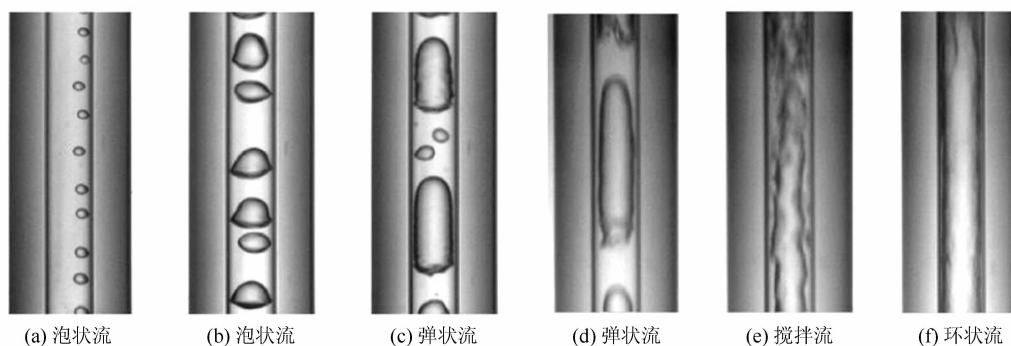


图3 流体在微小通道中的主要流型

Figure 3 Main flow pattern of fluid in tiny channel

$$K_b = \left(\sum_{i=1}^8 h \times A_i \right) / \sum_{i=1}^8 A_i \quad (5)$$

式中: Q 为电加热片输入功率, kW; A 为加热面积, $A = 0.18 \text{ m}^2$; T_w 为通道壁面温度, K; T_z 为通道中不同位置流体温度, K; A_i 为测点各局部面积, m^2 ; W 为铜板的宽度, m; Z_i 为各测点位置, m; q 为热流密度, $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$; K_b 为表面换热系数, $\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

4 实验结果及分析

窄通道中流动沸腾过程流型的变化及气液两相流换热特性很复杂, 实验利用高速摄像设备观察流型变化, 并结合实验数据分析换热特性。实验工况: 工质入口温度为 27, 40 和 60 °C; 单位面积质量流量为 2.22, 2.86 和 3.49 $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$, 加热热流密度为 2 ~ 12 kW/m^2 。

4.1 入口温度对表面换热系数的影响

图 4(a)、(b)、(c) 分别为不同质量流量、入口温度时的表面换热系数随热流密度的变化。从图中可知: 点 A_1 , A_2 和 A_3 分别为各自入口温度、热流密度所对应的单相流与核态沸腾区的最大表面换热系数, 点 B_1 , B_2 和 B_3 以后的阶段对应于对流沸腾区的表面换热系数。单相流阶段, 入口温度增加, 单相流的局部换热系数增大, 但总的表面换热系数基本不变; 核态沸腾阶段, 核态沸腾换热机理较活跃, 流动沸腾受到抑制, 表面换热系数出现最大值, 在相同的质量流量下, 入口温度提高, 表面换热系数的最大值基本不变, 只是过冷段减少, 沸腾起始点随之降低, 较低的热流密度就足以使流体达到核态沸腾状态, 故最大值只是单纯的往左迁移($A_3 \rightarrow A_1$); 随着热流密度的进一步升高, 从 B_1 , B_2 和 B_3 开始, 流体流态转向搅拌-环状流, 流体进入了对流沸腾换热阶段, 通道中局部有少量液膜形成, 换热热阻增加, 气液混合离子水的干度增大, 导致表面换热系数降低, 进入了完全对流换热阶段, B_1 , B_2 和 B_3 点

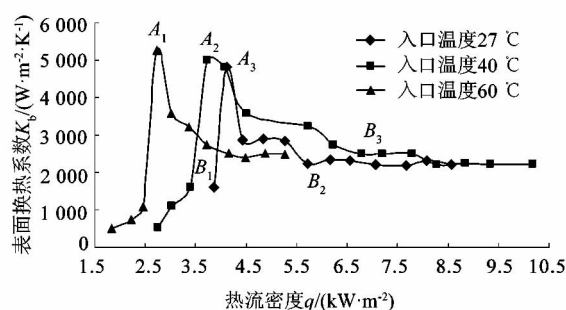
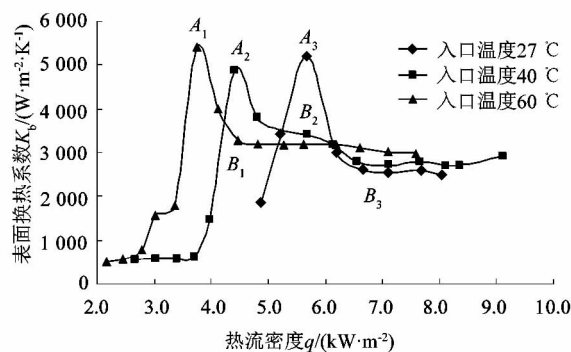
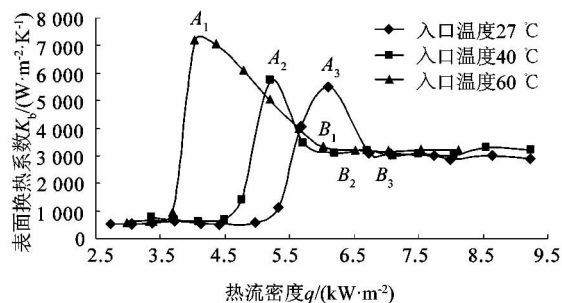
(a) 单位面积质量流量 $2.22 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ (b) 单位面积质量流量 $2.86 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ (c) 单位面积质量流量 $3.49 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$

图4 不同入口温度对表面换热系数的影响

Figure 4 Effects of different entrance temperature on surface heat transfer coefficient

以后表面换热系数有小幅波动,但波动幅度不大,因为热流密度的变化对表面换热的影响变小。虽然表面换热系数最大值处于核态沸腾区域,此时流体处于泡状流或块状流的区域相对较少,大部分处于单相流状态的区域,造成换热系数较低,影响板式换热器的换热,因此适当提高入口温度,换热量也会随之上升,从而使壁面液膜的温度有所提高,液膜温度的升高使介质的黏度和表面张力减小,湍流度增强,有利于强化对流传热,同时也可以充分利用板式换热器的换热面积,节省材料。

4.2 质量流量对表面换热系数的影响

如图 5(a)、(b)、(c) 所示, A_1 , A_2 和 A_3 分别为各自质量流量、热流密度所对应的单相流与核态沸腾区的最大表面换热系数, B_1 , B_2 和 B_3 以后的阶段对应于对流沸腾区的表面换热系数。随着热流密度的增加,表面换热系数先增加到最大值,然后减小,后趋于稳定,相同热流密度下质量流量越大,沸腾起始点越高,要达到核态沸腾状态就需要更大的热流密度,故最大值随着质量流量的增加往右移($A_3 \rightarrow A_1$)。在同一入口温度及低热流密度区,不同质量流量下干度都较低,此时流体处于单相流、泡状流或块状流的区域相对较大,表面换热系数受质量流量影响较大,质量流量增加,导致大量过冷液体进入饱和主流液体中,使得汽化核心处的汽泡遇冷会迅速冷凝并破裂消失,从而导致大流量低热流密度区换热系数较低。其次从 B_1 , B_2 和 B_3 开始,流体进入搅动—环状流区域,在此对流沸腾换热阶段,质量流量越大,局部换热系数越高,主要是由于流速增大会增加流体的紊流度,从而就强化了液膜的对流换热,同时,流体流速越大,液膜的厚度越薄,使得导热系数和蒸发换热强度增大。在完全对流传热阶段,表面换热系数随着加热功率的增大基本不变,由于回流汽液的冲刷和湿润,对流沸腾不再以液膜的传热为主,增大流量对总的表面换热系数影响甚微。用于板式换热器时,流量增加,液体蒸发速度增加,产生大量蒸气,使换热器内压力升高,不同压力对应不同饱和温度,从而导致液膜饱和温度升高,液体的运动黏度下降,液膜流动扰动加剧,有利于膜侧换热,从而增加膜侧蒸发表面传热系数。

5 结语

通过实验,可以得出以下结论:流体表面换热系数在核态沸腾期间存在最大值,此时流型主要以泡状流和块状流交替变化为主;入口温度对流动沸腾表面换热系数基本无影响;质量流量对表面换热系数的影响

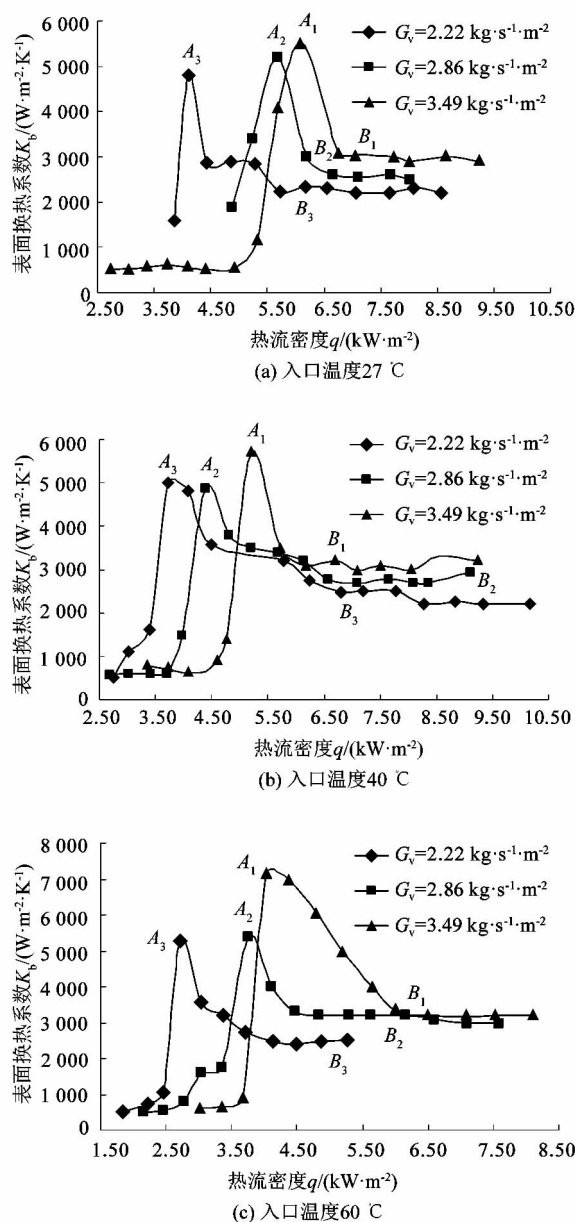


图 5 不同质量流量对表面换热系数的影响

Figure 5 Effects of different mass flow rate on surface heat transfer coefficient

较大,主要体现在对流体紊流度和液膜的对流换热特性 2 个方面的影响;流体流速的变大,由于剪切力的存在,使得液膜的厚度减小,增强了液膜的导热,从而换热系数变大。通过本实验可以了解矩形窄通道内流动沸腾表面换热系数的影响因素,为更好地设计板式换热器做理论依据。本文只研究了表面换热系数的影响因素,对于局部对流换热系数的影响因素,仍可以做进一步研究。

(下转第 10 页)