

竖直方管内两相流动临界热流密度的实验研究

郭亚军¹, 徐应坤¹, 毕勤成², 高彬²

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055;

2. 西安交通大学能源与动力工程学院多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要:本实验以氟利昂-113 作为工作流体, 对竖直方管内向上两相流动的临界热流密度(Critical Heat Flux, CHF)进行了实验研究. 实验主要参数的范围为: 质量流速 650~1 800 kg/(m²s); 进口压力 380~550 kPa; 入口干度, 过冷~1.0. 重点分析了质量流速, 压力, 进出口干度对 CHF 值的影响. 实验结果表明: CHF 值随质量流速的增大而增大, 随压力的升高有所减小, 随进口干度的增加基本呈现线性下降趋势, 同时在发生临界热流现象后, 出口干度基本保持不变.

关键词:方管; 临界热流密度(CHF); 质量流速; 压力; 干度

中图分类号:TK 124

文献标志码:A

文章编号:1006-7930(2013)01-0126-04

在各种沸腾换热设备中, 临界热流密度是一个非常重要的监测参数. 当发生临界热流现象时, 会导致传热恶化、壁温飞升, 甚至烧毁换热设备, 并直接影响整个热力系统的安全运行. 由此, 研究者从实验和理论各个方面都已经对临界热流现象进行了研究. 卢冬雪等^[1]在扁矩形通道内进行了上升流和下降流临界热流密度的研究, 得到了 CHF 值随质量流速和出口含气量的变化规律. 秋穗正等^[2]通过实验研究了液钠发生临界热流现象时气泡爆炸和液膜撕裂或局部蒸干的两种传热恶化机理. 陈常念等^[3]以 R134a 为介质研究了压力、流量、干度等参数对 CHF 值的影响. 罗小平等^[4]实验研究了矩形微槽中临界热流密度随质量流速、进口过冷度和出口过冷度的增加而呈现的变化趋势. 熊万玉等^[5]对矩形窄缝通道轴向非均匀加热临界热流密度进行了实验研究. A. P. Roday 等^[6]研究了微管内水和 R123 两相流动的临界热流密度状况. Chirag R. Kharangate 等^[7]对垂直向上通道内的临界热流密度进行了理论和实验的研究.

本实验以 R113 为实验介质, 主要研究在竖直正方形管内两相流动沸腾换热中, 质量流速、压力、进出口干度分别对临界热流密度的影响.

1 实验系统及实验方法

1.1 实验系统

实验系统如图 1 所示, 整个 R113 循环系统主要由储液罐、循环泵、电磁流量计、预热段、实验段、冷凝器、阀门、测温测压仪表组成, 属于闭式系统. 其中, 实验段采用的是内孔边长为 8 mm 的正方形不锈钢管, 预热段用的是不锈钢圆管, 实验段和预热段都用绝热材料保温. 此外, 为保证泵出口工质温度基本恒定, 分别在旁路和循环泵入口管段上设置了套管冷却器.

1.2 实验方法

实验过程中, 通过调节主路调节阀和背压阀, 保证工质质量流量和系统压力基本稳定. 然后维持预热段的加热功率不变, 使 R113 在实验段进口处达到一定的干度, 逐渐加大实验段的加热功率, 直到临界热流现象出现, 即实验段出口截面出现传热恶化, 此处管壁温度迅速飞升, 此时的实验段的热流密度即临界热流密度(CHF). 通过计算机数据采集系统记录各项实验参数. 以此通过改变质量流量、系统压力或进口干度来进行多次实验.

收稿日期: 2011-11-01 修改稿日期: 2012-12-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50576076)

作者简介: 郭亚军(1966-), 女, 陕西西安人, 博士, 副教授, 主要从事多相流动与传热研究.

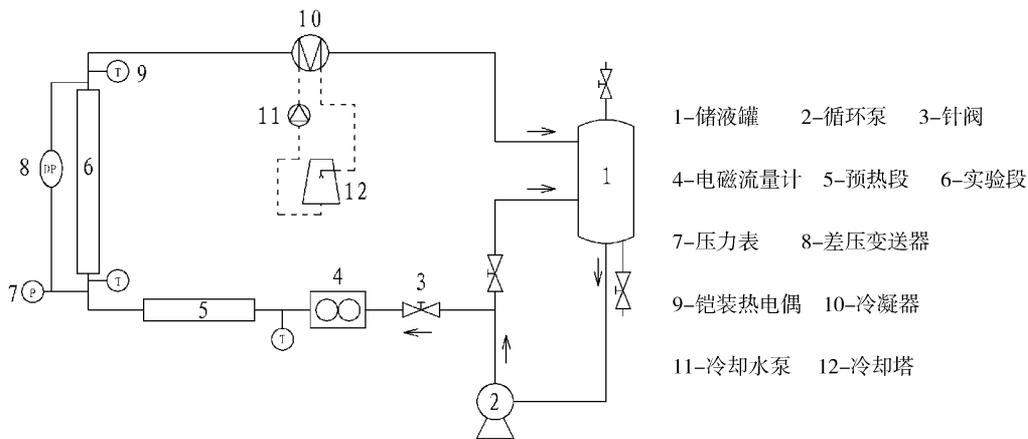


图 1 实验系统图

Fig. 1 Experimental system diagram

1.3 实验参数测量

实验段外壁温测量采用铜-康铜 T 型热电偶, 进口压力和进出口压差采用罗斯蒙特 3051 型压力变送器和差压变送器测量, 工质的质量流量是通过科氏力式流量计测量的。

主要参数范围为: 质量流速 $650 \sim 1800 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$; 进口压力: $380 \sim 550 \text{ kPa}$; 入口干度: 过冷 ~ 1.0 。

2 实验数据处理

2.1 热流密度的计算

根据实验条件可推导出管内壁的热流密度: $q = \frac{\eta Q_E}{4dL}$ (1)

其中: η 为电加热效率(在达到热平衡后利用工质焓增与电加热功率的比值得到, 由实验数据计算, 取 0.9 作为预热段和实验段的热效率进行计算); Q_E 为电加热功率; d 为加热管内当量直径; L 为加热段长度。

2.2 干度的计算

实验段进口焓: $h_{in} = h_0 + \frac{\eta_{pre} P_{pre}}{GA}$ (2)

由工质流经实验段进出口热平衡可得, $GA(h_{out} - h_{in}) = \eta_{test} P_{test}$ (3)

式(2)、(3)中, η_{pre} 和 η_{test} 分别为预热段和实验段的电加热效率, 由实验数据计算, 确定 $\eta_{pre} = 0.9$, $\eta_{test} = 0.9$ 。

根据干度的定义可以导出, $x_{in} = \frac{[h_0 + \eta_{pre} P_{pre}/(GA)] - h_{sat,L}}{h_{sat,G} - h_{sat,L}}$ (4)

$x_{out} = \frac{[h_{in} + \eta_{test} P_{test}/(GA)] - h_{sat,L}}{h_{sat,G} - h_{sat,L}}$ (5)

当 $x < 0$ 时, 工质处于过冷状态; 当 $0 < x < 1$ 时, 工质为两相共存状态; 当 $x > 1$ 时, 工质为过热水蒸气。

3 实验结果与分析

3.1 质量流速对 CHF 的影响

图 2 给出了三种不同压力 ($P=380 \text{ kPa}, 460 \text{ kPa}, 550 \text{ kPa}$) 下, CHF 值随质量流速的变化规律。当实验段入口处 R-113 过冷度相同(过冷度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$) 的情况下, 随着流量的增大, 临界热流密度值也增大。这是由于质量流速 G 增大时, 加强了管内流动的扰动程度, 促使气泡从管壁表面脱离, 同时主流液相能及时接触壁面, 不易形成膜态沸腾, 从而使得 CHF 值增大。

3.2 压力对 CHF 的影响

从图 3 可以看出, 某一固定质量流速 ($G=1800 \text{ kg}/\text{m}^2 \text{ s}$), 在 $380 \sim 550 \text{ kPa}$ 的压力范围内, 同一进

口干度时,CHF 值随压力的升高有所减小.这主要是因为压力的升高会使工质 R-113 的汽化潜热降低,在相同的热负荷下,工质的蒸发率升高,这样便较容易形成膜态沸腾,从而导致 CHF 值随压力的升高而减小.

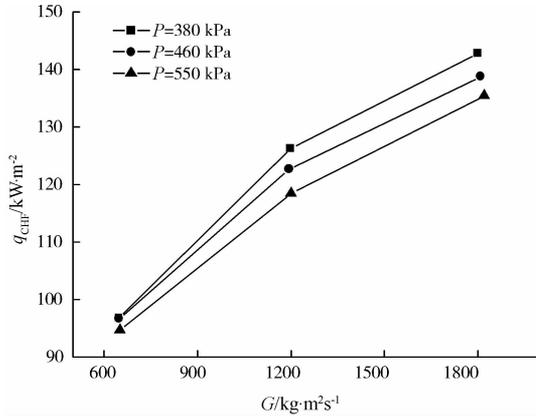


图 2 质量流速对 CHF 的影响

Fig. 2 Effects of mass velocity on CHF

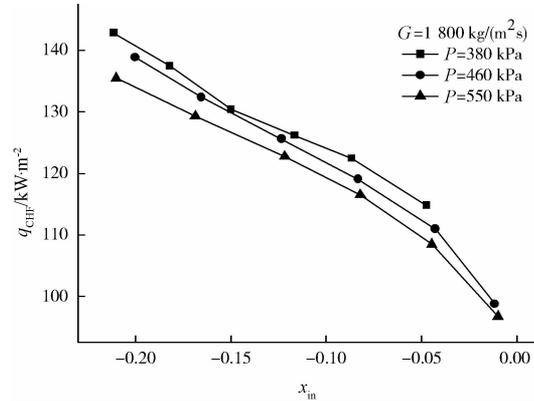


图 3 压力对 CHF 的影响

Fig. 3 Effects of pressure on CHF

3.3 进口干度对 CHF 的影响

图 4 显示了工质 R-113 进口干度对 CHF 值的影响.三条曲线同时表明,在相同的质量流速和压力下,随着工质进口干度的增大(即进口过冷度的减小),临界热流密度值都基本呈线性下降的趋势.这种现象也很容易理解,当进口干度增大时,主流区域会有更高的汽相流速和更强的液相夹带,液膜的厚度随之变薄,这样更容易使液膜烧干,出现临界热流现象.

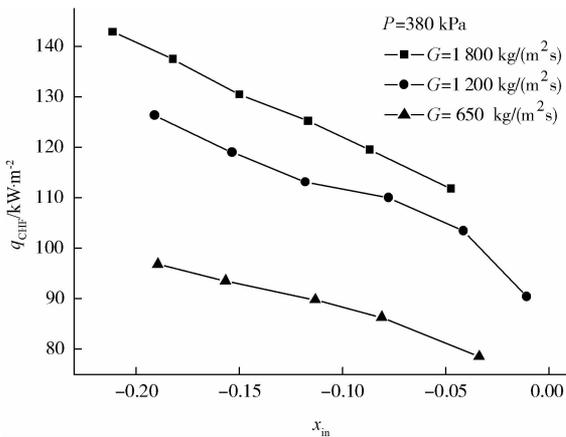


图 4 进口干度对 CHF 的影响

Fig. 4 Effects of inlet dryness on CHF

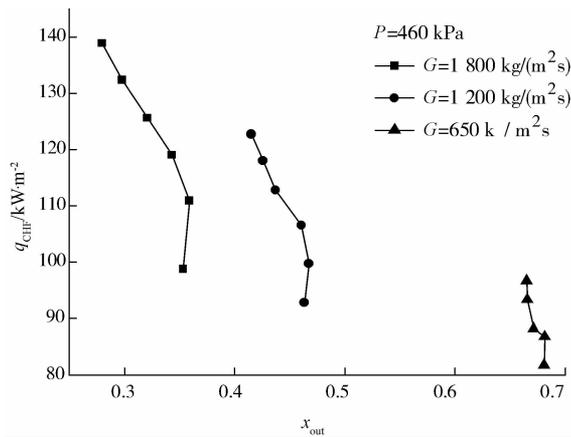


图 5 出口干度对 CHF 的影响

Fig. 5 Effects of outlet dryness on CHF

3.4 出口干度对 CHF 的影响

图 5 给出了三种不同质量流速($G=650$ kg/m²s, 1200 kg/m²s, 1800 kg/m²s)下,CHF 与出口干度之间的变化特性.实验结果表明,随着质量流速的减小,出口干度会有所增大,同时 CHF 值减小.但在同一质量流速和压力的条件下,当发生临界热流现象时,临界热流密度值发生了较大变化,而出口干度的变化不大.可以认为,此时流动已经充分发展,传热不受距离的影响,而只是局部参数的函数.

4 结 论

- (1) 在竖直向上方管内,发生两相流动临界热流现象时,临界热流密度值随质量流速的增大而增大.
- (2) 在 380~550 kPa 的压力范围内,CHF 值随压力的升高有所减小.
- (3) 在相同的质量流速和压力下,随着工质进口干度的增大,临界热流密度值都基本呈线性下降的趋势.

(4)在同一质量流速和压力的条件下,当发生临界热流现象时,临界热流密度值发生了较大变化,而出口干度的变化不大。

参考文献 References

- [1] 卢冬雪,白雪松,黄彦平,等. 扁矩形通道 CHF 试验研究及其 CHF 关系式的分析评估[J]. 核科学与工程,2004,24(3):242-248.
LU Dong-hua, BAI Xue-song, HUANG Yan-ping, et al. Study on CHF in thin rectangular channels and evaluation of its empirical correlations[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering,2004,24(3):242-248.
- [2] 秋穗正,张维忠,廖义香,等. 液钠沸腾两相流型与临界热流密度(CHF)机理实验研究[J]. 核科学与工程,2001,21(3):232-237.
QIU Sui-zheng, ZHANG Wei-zhong, LIAO Yi-xiang, et al. Experimental Study on Two-phase Flow Pattern and Critical Heat Flux(CHF) Mechanism of Liquid Sodium Boiling[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering,2001,21(3):232-237.
- [3] 陈常念,韩吉田,邵莉,等. R134a 卧式螺旋管内流动沸腾 CHF 特性研究[J]. 核动力工程,2010,31(5):76-80.
CHEN Chang-nian, HAN Ji-tian, SHAO Li, et al. Study on Dry-out CHF Characteristics of R134 Flow Boiling in Horizontal Helically-coiled Tubes[J]. Nuclear Power Engineering, 2010,31(5):76-80.
- [4] 罗小平,唐杨. 矩形微槽道饱和沸腾临界热流密度特性[J]. 低温与超导,2010,38(6):66-70.
LUO Xiao-ping, TANG Yang. Properties of saturated flow boiling critical heat flux through rectangular micro-channel[J]. Cryo and Supercond,2010,38(6):66-70.
- [5] 熊万玉,王飞,肖泽军,等. 矩形窄缝通道轴向非均匀加热临界热流密度实验研究[J]. 核动力工程,2007,28(4):34-38.
XIONG Wan-yu, WANG Fei, XIAO Ze-jun, et al. Test of Critical Heat Flux with Non-Uniform Axial Power Shapes in Rectangle Narrow Channel[J]. Nuclear Power Engineering,2007,28(4):34-38.
- [6] RODAY A P, JENSEN M K. Study of the critical heat flux condition with water and R123 during flow boiling in microtubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2009,52:3250-3256.
- [7] CHIRAG R Kharangate, ISSAM Mudawar, MOHAMMAD M Hasan. Experimental and theoretical study of critical heat flux in vertical up-flow with inlet vapor void[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2011,50:360-374.

Experimental study on critical heat flux of two-phase flow in a vertical square tube

GUO Ya-jun¹, XU Ying-kun¹, BI Qin-cheng², GAO Bin²

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An experimental study was conducted on the critical heat flux of two-phase upward flow in a vertical square tube, using Freon-113 as the working fluid. The main parameters of experiment were performed with the mass velocity ranging from 650 to 1 800 kg/(m²s), the inlet pressure from 380 to 550 kPa, and the inlet dryness from super-cooling to 1.0. The effects of mass velocity, pressure and dryness on the critical heat flux were obtained in this paper. The results show that CHF values increase with the mass velocity, CHF values have been reduced when the pressure or the inlet dryness increases, and the outlet dryness hardly change after the critical heat flux phenomena occur.

Key words: square tube; critical heat flux (CHF); mass velocity; pressure; dryness