

文章编号: 1000-8055 (2004) 03-0342-04

倾斜管内自然对流沸腾临界 热流密度的研究

刘振华, 杨荣华, 秋雨豪
(上海交通大学 航空航天系, 上海 200030)

摘要: 用实验方法对浸没在饱和液体中的倾斜加热细管内的自然对流沸腾临界热流密度进行了研究, 考察了管径, 管长, 倾斜角和工质对临界热流密度的影响。实验条件是: 管内径从0.9 mm 到8 mm; 管长从100 mm 到400 mm; 倾斜角从90 到30 °实验工质使用了水和 R-11两种液体。本研究中考虑倾斜角对重力的影响, 对作者过去提出的用于预示垂直加热管内自然对流沸腾临界热流密度的半理论半经验式进行了修正, 修正后的公式能较好的预示本实验结果。

关键词: 航空、航天推进系统; 沸腾; 临界热流密度; 倾斜管

中图分类号: V 231.1; TK 123

文献标识码: A

Critical Heat Flux during Natural Convective Boiling in Inclined Tubes

LIU Zhen-hua, YANG Rong-hua, QIU Yu-hao
(Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: An experimental study was carried out to investigate the critical heat flux (CHF) during natural convective boiling in the uniformly heated, inclined tubes submerged in the saturated liquids at atmospheric pressure. The inner diameters of the test tubes varied from 100 mm to 400 mm; the heated lengths of the tubes ranged from 0.9 mm to 8 mm; the inclination angles varied from 90 ° to 30 °. The test fluids were pure water and R-11. A semi-theoretical correlation used originally for predicting of the critical heat flux during natural convective boiling in vertical tubes was modified to predict the critical heat flux which occurs in the inclined tubes. The modified correlation agrees reasonably well with the present experimental data.

Key words: aerospace propulsion system; boiling; critical heat flux; inclined tube

符号表

$CHF / (W/m^2)$	临界热流密度
D / m	管内径
$g / (m/s^2)$	重力加速度
$h_{fg} / (J/kg)$	蒸发潜热
$q / (W/m^2)$	壁面热流密度

L / m	管长
$\sigma / (N/m)$	气液界面张力
$\rho / (kg/m^3)$	密度
Bo	Bond 数
	$Bo = \frac{D}{[\sigma / g(\rho - \rho_v)]^{1/2}}$
Φ	Kutateladze 数

$$\Phi = \frac{CH F / h_{fg} \rho_v}{[\sigma_g (\rho_l - \rho_v) / \rho_v^2]^{1/2}}$$

$\theta / (^\circ)$	倾斜角
脚标	
0	池内沸腾
l	液相
v	气相

窄缝沸腾传热技术是一种十分有效的强化传热方法，光滑传热表面在窄缝沸腾条件下可以达到商用强化面的沸腾传热效果。由于传热面是光滑面，在通道内高速气泡流的冲刷下，不会产生杂质沉淀污染传热面使传热特性逐渐劣化。而且结构紧凑，加工简单。由于这些原因，窄缝沸腾传热技术在航空航天，微电子机械系统，核反应堆和热能工程中得到广泛应用。在窄缝沸腾时，中低热流密度时即能产生旺盛沸腾，但在高热流密度时容易出现由于供液不足而产生的慢性沸腾危机。因此，窄缝内自然对流沸腾临界热流密度(CHF)的预示是一个重要的研究课题。对垂直流路(园管，环形套管，长方形)内的自然对流沸腾临界热流密度，针对不同的实验范围，很多研究者已经提出了一些经验型计算式^[1~8]。本文作者之一也提出了两个半理论半实验计算式^[9,10]。

相对于垂直流路，对图1所示的倾斜管路内的自然对流沸腾特性以及临界热流密度的研究还非常少。本研究对浸没在水和 R-11 两种饱和液体中的倾斜加热管内的自然对流沸腾临界热流密

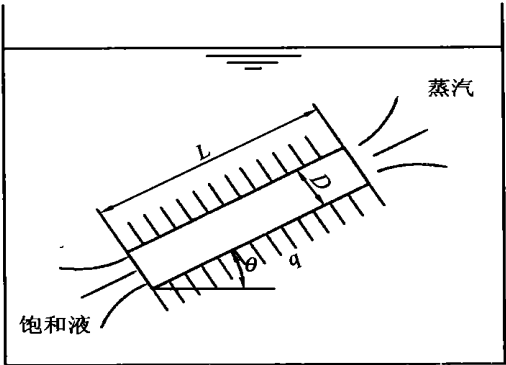


图1 研究系统示意图

Fig. 1 The schematic diagram of the analytical system

度进行了研究，考察了管径，管长，倾斜角和工质物性对临界热流密度的影响。在考虑倾斜角对重力的影响后，对原用于垂直管路的计算式进行了修正。修正后的公式能较好的预示本实验结果。

1 实验装置和实验方法

实验装置的基本构造如图2所示。实验工质是纯水和 R-11。实验压力为常压。实验管外包裹硅胶保温层。不锈钢实验管用两块电木板托架固定在一直径100 mm，长1.0 m 的不锈钢桶内。不锈钢桶的倾角可以调节。本研究使用不锈钢管直接通电加热进行稳态核沸腾实验测量临界热流密度。不锈钢管两端部外壁面焊接厚1 mm 的铜环连接硅整流直流电源。在离管顶部5 mm 处焊接

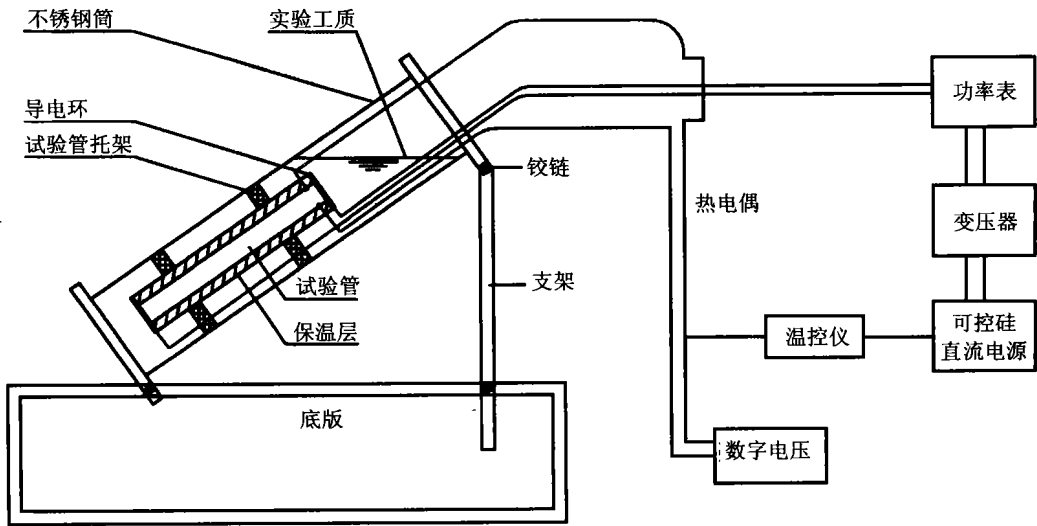


图2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

两根0.5 mm 铠装式热电偶监测管顶部两处壁温变化。实验时首先调节热负荷到计算值的60%左右,然后以3%的幅度逐渐增大热负荷,每次间隔10 min左右。在未出现沸腾临界危机现象时,壁面过热度不超过30 K,而且在数分钟内迅速实现稳定。当热流密度超过临界热流密度时,管顶部温度急剧升高,壁温无法稳定,当壁面过热度超过100 K时温控仪自动切断电源,实验停止。由于实验点不可能准确的位于临界热流密度位置,而是在最后两个实验点之间,本实验将前次稳定状态时的实验点所对应的壁面热流密度作为临界热流密度值。壁面热流密度等于电功率除以管内壁壁面面积。壁面面积的测量误差不超过0.5%,电功率测量仪表误差不超过0.5%。管外壁散热损失经过修正后不超过1%,CHF的测量误差不超过5%。

本实验中,临界热流密度点对应的壁面过热度在20 K至30 K之间。壁面报警温度设定值只要超过这一温度区间,报警温度的设定值对临界热流密度的测量没有影响。报警温度设定过高时管子会出现变形,因此本实验中报警温度设在壁面过热度等于100 K的位置。

实验条件是:管内径0.9、3.0、5.0和8.0 mm 4种;管长100、200和400 mm 3种;倾斜角从90°变化到30°;共5种角度。每种工质共有60个临界热流密度测量数据。

2 结果和讨论

对于垂直细管,作者等人根据均相流模型,对垂直细长流路内的自然对流沸腾临界热流密度提出了一个半经验半理论型计算式^[8,9]:

$$CHF = \left[\frac{Dh_{fg}}{4L} \right] \left[\frac{gL\rho_l\rho_v}{1 + 0.01(L/D)} \right]^{1/2} \quad (1)$$

式(1)的无量纲形式是:

$$\Phi = 0.25 \left[\frac{L}{D} + 0.01 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \right]^{-1/2} Bo^{-1/2} \quad (2)$$

对于一般的垂直管,大多数相关文献提出了下列的经验计算式^[1~6]:

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = \frac{1}{c(L/D)} \quad (3)$$

$$\Phi = 0.16 \quad (4)$$

式中: c 是经验常数, Φ 是池内核沸腾的无量纲CHF。

在式(1)的推导中,浮力 $g(\rho_l - \rho_v)$ 是气液混相流上升的驱动力。如果倾斜细管内的气液流

动在临界热流密度点附近依然近似于均相流模型,只要将浮力项表达为 $g(\rho_l - \rho_v) \sin\theta$,式(1)经过修正后依然能够使用。

$$CHF = \left[\frac{Dh_{fg}}{4L} \right] \left[\frac{gL\rho_l\rho_v \sin\theta}{1 + 0.01(L/D)} \right]^{1/2} \quad (5)$$

对一般倾斜管路,流型不再是均相流,上式不能使用。但是可以采用和垂直流路相同的修正方法^[10]。假定式(3)的经验形式仍然适用,但是经验常数不是一个常数,而是一个函数形式。式(2)和式(4)分别是管长趋于无穷大和零时的两条渐近线,则得到:

$$\Phi = \frac{0.16}{1 + 0.064(L/D)(B \sin\theta)^{0.5}} \quad (6)$$

$$CHF = \Phi D h_{fg} \rho_v \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\rho_l} \right]^{1/4} \quad (7)$$

图3和图4分别给出了水和R-11两种工质的临界热流密度实验数据和式(7)的比较结果。因为本研究重点是倾斜角的影响,图中横坐标取倾斜角。为了更直观的对临界热流密度有一个数量级了解,纵坐标取有量纲的临界热流密度值。本研

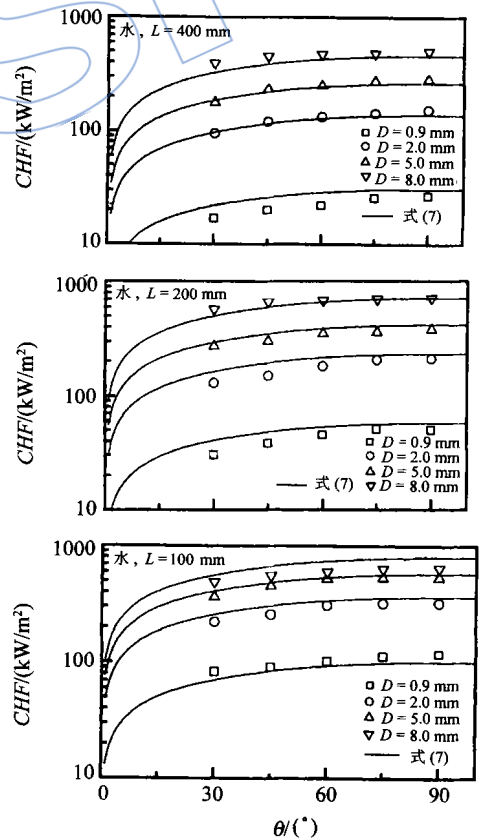


图3 水的临界热流密度实验数据和计算值的比较

Fig. 3 Comparisons between the CHF experimental data and Eq. (7) for water

究的实验数据和式 (7) 的相对误差最大不超过 ± 25%。不同倾斜角条件下实验数据和式 (7) 的相对误差与垂直条件下的相对误差基本相同。从图中也可以看出倾斜角对临界热流密度的影响很小。

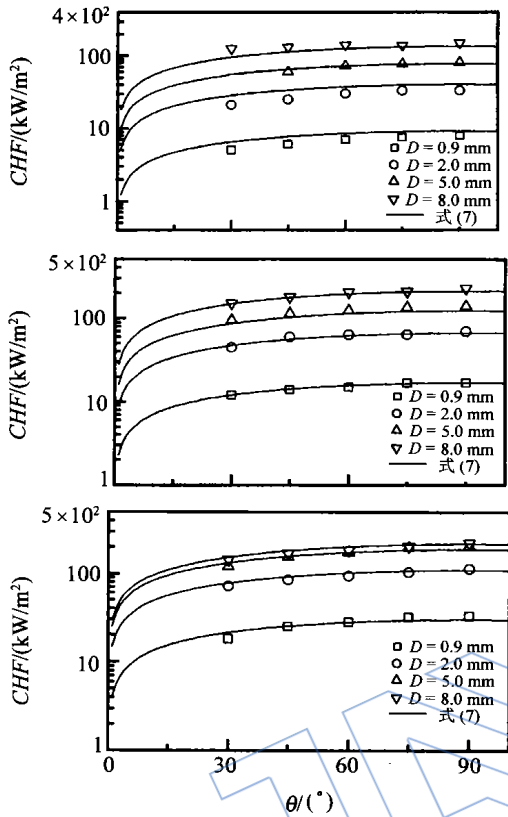


图4 R-11的 CHF 实验数据和计算值的比较
Fig. 4 Comparisons between the CHF experimental data and Eq. (7) for R-11

当管径较大时, 不同倾斜角条件下的临界热流密度值几乎相同。根据式 (6), 只有在小倾角情况时临界热流密度才开始迅速下降。而在小倾斜角范围, 气液流动将从同向流过渡到逆向流, 式 (6) 已经不再适用。因此对小倾角情况, 需要新的理论模型。

本实验结果说明对倾斜角大于30°的倾斜管路, 针对垂直管路提出的理论模型和数学处理方法依然适用。原有的计算式只需对浮力项作修正后即可使用。随着倾斜角进一步减小, 浮力将不再是唯一的气液驱动力, 气液流动将从同向流过渡到逆向流, 式 (6) 不再适用。式 (6) 和 (7) 应该有一个适用下限, 这需要进一步的深入研究。

3 结 论

对浸没在水和 R-11 两种液体中的倾斜加热细管内的自然对流沸腾临界热流密度进行了实验研究, 研究结果证实临界热流密度随管长与管径比值的增加和倾斜角的降低而减小, 倾斜角对临界热流密度的影响并不显著。针对垂直流路提出的半理论半实验公式依然适用, 只需对浮力项作修正后即可使用。当倾斜角等于大于30°时修正后的公式能较好的预示本实验结果。

参考文献:

[1] Chyu M C. Prediction of Boiling Dry out Flux for Restricted Annular Crevice [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1988, 31: 1993- 1998.

[2] Fujita Y, Ohta H, Uchida S. Nucleate Boiling Heat Transfer and Critical Heat Flux in Narrow Space Between Rectangular Surfaces [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1988, 31 (2): 229- 239.

[3] Kato Y, Kawamura S. Critical Heat Flux During Natural Convective Boiling in Vertical Uniformly Heated Tubes Submerged in Saturated Liquid [J]. Trans. JSME, Bseries, 1981, 47 (423): 2186- 2190.

[4] Kim S H, Beek W P, Chang S H. Measurement of Critical Heat Flux Narrow Annuli Submerged in Saturated Water [J]. Nuclear Engineering Design, 2000, 199: 41- 48.

[5] Monde M, Mitsutake Y. Critical Heat Flux During Natural Convective Boiling in Uniformly Heated Annular Tubes Submerged in Saturated Liquid [J]. J. Heat Transfer, 1990, 112: 218- 222.

[6] Monde M, Mitsutake Y. Critical Heat Flux of Natural Circulation Boiling in a Vertical Tube (Effect of Oscillation and Circulation on CHF) [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2002, 45: 4133- 4139.

[7] Xia C, Hu W, Guo Z Y. Natural Convective Boiling in Vertical Rectangular Narrow Channles [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1996, 12: 313- 324.

[8] Liu Z H, Chen Y M. Study of Critical Heat Flux During Natural Convective Boiling in Vertical Tubes and Vertical Annular Tubes Submerged in Saturated Liquids [J]. JSME International Journal, Fluid and Thermal Engineering, 1999, 42 (4): 731- 736.

[9] 刘振华. 竖直套管内自然对流沸腾临界热通量的研究 [J]. 上海交通大学学报, 1996, 30 (12): 41- 45.

[10] 刘振华. 短粗竖直流路内自然对流沸腾临界热通量的研究 [J]. 上海交通大学学报, 1997, 31 (7): 31- 35.