

文章编号: 1000-8055(2006)02-0303-05

底部封闭倾斜细管内沸腾临界 热流密度的实验

刘振华, 张彤

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200030)

摘要: 用实验方法对浸没在饱和液体中的底部封闭倾斜细管内的沸腾临界热流密度进行了实验研究, 考察了管内径、管长、倾斜角和工质对临界热流密度的影响。实验条件是: 加热管内径2.1 mm、3.2 mm 和4.0 mm 3种; 管长100 mm 和300 mm 两种; 倾斜角从90°到0°。实验工质为水和R-113两种液体。本文考虑倾斜角对重力的影响, 对前人提出的用于预示底部封闭垂直管内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倾斜角对沸腾临界热流密度的影响。

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; TK123

文献标识码: A

Critical Boiling Heat Flux in Inclined Small Tubes at Zero Inlet Flow

L U Zhen-hua, ZHANG Tong

(School of Mechanical and Power Engineering,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: An experimental study was carried out to investigate the nucleate boiling characteristics and the Critical Heat Flux (CHF) of countercurrent boiling in the inclined small tubes at zero inlet flow. Both saturated water and R-113 were used as working liquids. The inner diameters of the tested tubes ranged from 2.1 mm to 4.0 mm, the tube lengths changed from 100 mm to 300 mm, the inclination angles varied from 90° to 0°. The experimental results show that CHF decreases with the decrease of the inclination angle. A semi-theoretical correlation for the CHF of countercurrent boiling in the vertical tube with sealed bottom was modified for considering the effect of the inclined angle. The modified correlation can reasonably well predict the CHF for the inclined tube.

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

在重力型热管、核反应堆冷却、地热利用、电子设备冷却等领域都可能遇到各种底部封闭园管内的沸腾传热问题。在各类沸腾传热问题中, 临界

热流密度(CHF)作为热流传递的极限而受到特别关注。底部封闭的垂直管内的沸腾临界热流密度问题已经是一个经典的传热学问题。在底部封闭

收稿日期: 2005-06-28; 修订日期: 2005-11-02

基金项目: 国家自然科学基金资助(50376037)

作者简介: 刘振华(1956-), 男, 江苏无锡人, 上海交通大学机械与动力工程学院航空航天系教授, 博士生导师, 主要从事传热传质学的研究

的零入流条件下,管道内的气相工质脱离加热面向上运动,液相工质受重力作用沿壁面向下运动,形成气液逆向流。在气芯摩擦力的作用下液膜中部分液体发生回流并被气体夹带到比液体流入点更高的位置,这就是溢流现象。溢流现象使液体不能顺利地流入润湿加热面,导致加热面下部严重缺液,传热恶化,CHF 发生。对溢流导致的 CHF 现象研究人员进行了多年研究,提出了一些半理论半经验型预测式^[1~4]。

Tien 等人根据溢流理论提出了如下的底部封闭圆管临界热流密度半经验公式^[1]:

$$Ku = \frac{D}{4L} \frac{3.2}{[1 + (\rho_l/\rho_v)]^2} \quad (1)$$

式中: D 为管内径, L 为管长, ρ 为密度; 下标 l 为液相, v 为气相。

Imura 等提出了底部封闭圆管临界热流密度经验公式^[2]:

$$Ku = 0.16 \frac{D}{L} \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0.13} \quad (2)$$

Smirnov 提出的底部封闭通道内的溢流临界热流密度经验公式^[3]:

$$Ku = 0.64 \frac{D}{4L} \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0.1} \quad (3)$$

Monde^[4]运用流动不稳定分析法,算出最大降膜流量,最后得出底部封闭圆管临界热流密度半经验公式:

$$Ku = 0.103 \frac{D}{L} \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{1/7} Bo^{1/8} \quad (4)$$

式中:

$$Bo = \frac{D}{[\sigma/g(\rho_l/\rho_v)]^{1/2}}$$

其中: σ 为气液界面张力, g 为重力加速度。

相对于垂直管路,对底部封闭的倾斜管路内的沸腾 CHF 的研究还非常少,而这类倾斜管路设置在实际工程中也会时常遇到。本研究对浸没在水和 R-113 两种饱和液体中的倾斜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,加热长度,倾斜角和工质对临界热流密度的影响;重点是倾斜角的影响。通过理论分析,考虑倾斜角对重力的影响后对垂直管的 CHF 预示公式进行了修正。得到了新的预示底部封闭的倾斜细管内的沸腾临界热流密度的半经验计算公式,并和实验数据进行了比较。

1 实验装置和实验方法

图1所示为实验装置的基本构造。实验工质是

饱和水和 R-113。实验压力为常压。加热管是薄不锈钢管;内径分别为 2.1 mm, 3.2 mm 和 4.0 mm;管长分别为 100 mm 和 300 mm。薄不锈钢管直接通电加热。管外包裹 10 mm 厚的硅胶绝热层。实验管用两块厚 20 mm 的电木板托架固定在一直径 0.1 m, 长 1.0 m 的不锈钢圆筒内。圆筒的倾角可以调节。圆筒下部装有辅助加热器用来加热实验液体到达饱和温度,并用温控装置维持液体饱和温度。实验管的电加热功率由一台可控硅直流电源提供,并由分电阻装置测量电功率。热电偶在 $\Phi 4$ mm 实验管上的布置如图2所示。共有 7 根 $\Phi 0.5$ mm 的铠装式热电偶焊接在管外壁上监测轴向和圆周方向的壁温变化。对其他实验管只监测轴向壁温变化。实验时首先调节热负荷到计算值的 60% 左右,然后以 5% 的幅度逐渐增大热负荷。在未出现 CHF 现象时,壁温过热度不超过 20 K,而且在数分钟内实现稳定。当热流密度到达或超过 CHF 时,管顶部温度急剧升高,壁温无法稳定,当壁温过热度第一次超过 100 K 时温控

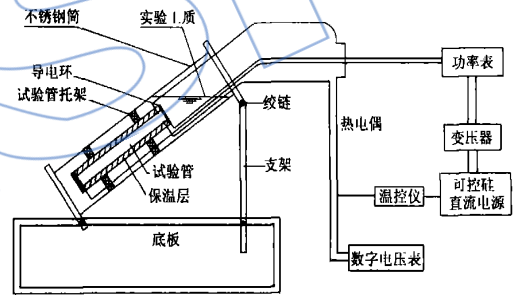


图1 实验装置示意图

Fig 1 Schematic diagram of experimental apparatus

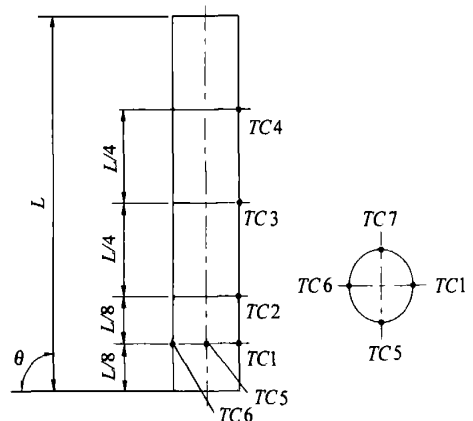


图2 实验管上热电偶布置图

Fig 2 Locations of measuring thermocouples on tested tubes

仪自动切断电源。然后从前次稳定状态时的热负荷开始再以1%的幅度逐渐增大热负荷,当壁温过热度再次超过100 K时温控仪自动切断电源。实验停止。以前次稳定状态时的热负荷换算成CHF。由仪表误差、传热面积误差、管外壁面散热损失和实测截断误差推算壁面热流密度和CHF的实验测量误差不超过5%。热电偶最大校正误差为0.2 K,沸腾曲线的壁面过热度最大相对误差可达到50%左右。实验中所用的纯净水和R-113液体均在实验前先加热一个小时以上,进行脱气以消除不凝气体对实验造成的影响。工质注入圆筒后,保证液面高出管入口10 cm左右。

实验条件如下:实验管内径有2.1 mm, 3.2 mm和4.0 mm 3种;管长有100 mm和300 mm 2种;倾斜角从90°变化到0°,共7种角度。每种工质共有42个CHF测量数据。

2 结果和讨论

2.1 倾斜角影响的理论分析

Monde^[4]对竖直放置的底部封闭圆管内临界热流密度提出了最大降膜流量分析法。作者在Monde模型的基础上,将竖直模型推广到倾斜放置的情况,在竖直模型中加入了倾斜角的影响。假定在倾斜放置后重力导致液膜在细小圆管横截面周向不均匀分布的影响可以忽略,即假定气液界面表面张力、液膜波动产生的液滴周向输送和沸腾流搅拌使得液膜在横截面周向厚度均匀,即CHF的发生和圆周方向无关。则可近似得到如下方程^[5]:

$$Ku_{\theta} = Ku_{\text{ver}} (\sin \theta)^{1/2} \quad (5)$$

式中: Ku 为 Kutateladze 数,下标 θ 为倾斜管, ver 为垂直管。

$$Ku = \frac{q_c / h_{fg} \rho_v}{[\sigma g (\rho_l - \rho_v) / \rho_v^2]^{1/4}}$$

其中: q_c 为临界热流密度, h_{fg} 为蒸发潜热。

本实验通过对距管底部1/8L位置处的4根热电偶测温数据分析,确认了在CHF发生前后倾斜管圆周方向的壁温是十分均匀的。即CHF的发生和圆周方向无关。这一结论的适用范围还需进一步研究。

2.2 临界热流密度发生的位置

前人的大量实验已经指出竖管的CHF首先发生在靠近管底部位置。图3显示了倾斜管在CHF发生前后轴向壁温变化。可以看出,距管底

部1/8L的位置的壁温首先突然升高,同时距管底部1/4L的位置的温度也有跃升,这说明在1/8L的位置发生了干涸,干涸点的确切位置应当位于1/8L和1/4L之间靠近1/8L的某处。由于连带效应,热电偶放置于1/8L~1/4L之间的区域内均能精确捕捉到临界热流密度的发生,而不会造成由于热电偶布置位置不同产生的CHF测量误差。

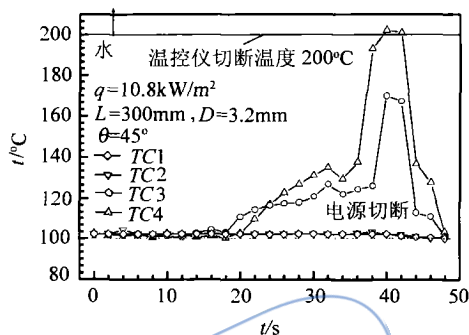


图3 倾斜管在CHF发生前后轴向壁温变化

Fig. 3 Wall temperature changes when CHF occurred

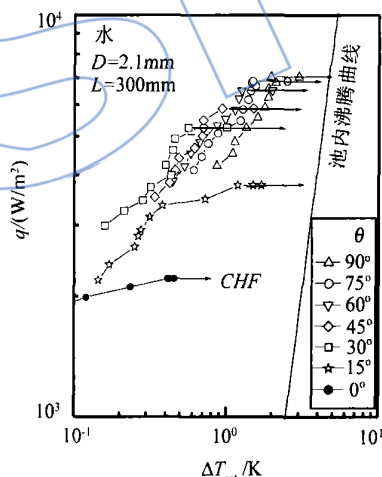


图4 水在D=2.1mm细管内的不同倾角下的沸腾曲线

Fig. 4 Boiling curves of water in tube of under different inclined angles

2.3 沸腾曲线

图4给出了水在内径2.1 mm细管内,热电偶位置1/8L处测得的不同倾角下的沸腾曲线。由于壁面过热度十分小,造成壁面过热度的测量误差很大,因此沸腾曲线的测量精度较差。从图中可以看出,不同倾角下的沸腾曲线都位于池内沸腾曲线的左侧,说明细管具有强化换热的效果。且随着倾斜角的减小,沸腾曲线向着偏离池内沸腾曲线方向移动,说明随着角度的减小,管内换热系数增

大, 换热效果增强。这可以解释为: 随着倾斜角的减小, 长成的气泡在管内停留的时间变长, 成长为大的合体气泡。合体气泡与壁面间产生的薄膜蒸发强化了换热效果。同时由于气泡的滞留, 更容易在壁面局部生成干斑, 为临界热流密度的产生创造了条件。这也是为何倾斜角变小, 临界热流密度降低的原因。从图中沸腾曲线可以明显看出在 CHF 点前后, 壁温缓慢增加, 没有出现跳跃, 表现出干涸引起沸腾危机的特点。应该指出, 不同的热电偶位置测得的沸腾曲线是有所不同的, 尤其是管上部位置的沸腾曲线在临界热流密度附近与管下部位置的沸腾曲线有较大不同。本文重点是研究临界热流密度, 对不同热电偶位置产生的沸腾曲线的差异不做详细分析。

2.4 CHF 实验数据和预示式的比较

前人对竖管的研究集中在管径大于5 mm 的大管径范围, 对细管的研究尚未见报道。图5给出了本研究中竖直细管 CHF 实验数据和公式(1)~(4)的比较结果。可以看出实验数据和公式(1)吻合较好, 最大相对误差不超过25%。本文以公式(1)作为竖直细管 CHF 的预示式。微细尺度和常规尺度的界定一般用 Bo 数来反映。当 $Bo < 1$ 时, 重力相对于表面张力的效应相对比较弱, 建立在重力控制型基础上的传统气液两相流与沸腾理论在该种尺度下已不再适用。本实验的 Bo 数范围在临界值以上, 属于常规尺寸向微细尺寸过渡的范围, 沸腾换热仍然受到以重力为主的力系支配。

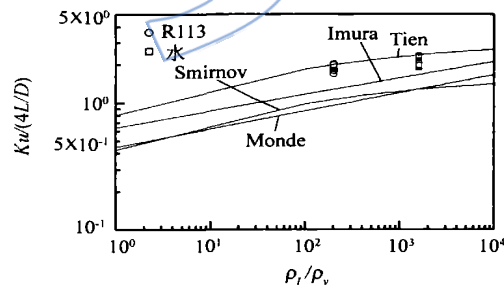


图5 竖直细管 CHF 实验数据和公式(1)~(4)的比较结果

Fig 5 Comparisons between experimental data of CHF and correlations for vertical tubes

图6和图7分别给出了管长300 mm 时, 水和 R-113两种工质的倾斜管 CHF 实验数据与公式(5)和(1)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。从图中可见: 在倾

斜角等于和大于15 时, 实验数据和公式(5)吻合很好。最大相对误差达到25% 左右。不同倾斜角条件下实验数据和公式(5)的相对误差与垂直条件下的相对误差基本相同, 说明公式(5)合理的预示了倾斜角的影响。

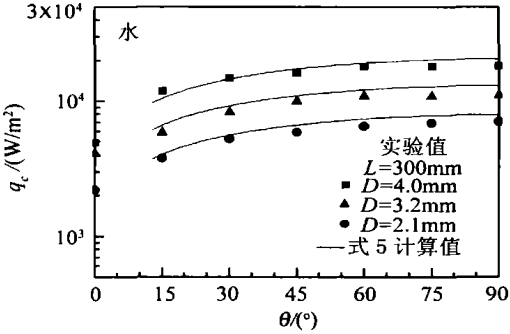


图6 水的倾斜管 CHF 实验数据和公式(5)比较结果

Fig 6 Comparisons between experimental data and Eq (5) for CHF of water in inclined tubes

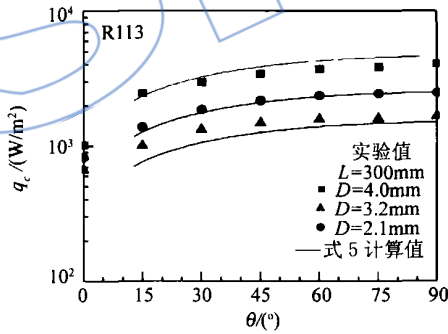


图7 R-113的倾斜管 CHF 实验数据和公式(5)的比较结果

Fig 7 Comparisons between experimental data and Eq (5) for CHF of R-113 in inclined tubes

管长100 mm 时, 水和 R-113两种工质的垂直管和倾斜管 CHF 实验数据与公式(1)和(5)也同样吻合很好, 管长对公式(5)的适用范围没有影响。由于篇幅限制, 实验结果不再图示。

3 结 论

对浸没在水和 R-113两种液体中的底部封闭倾斜细管内的沸腾临界热流密度进行了实验研究, 研究结果证实对于细小垂直管, 前人提出的针对大管的临界热流密度预示半经验公式依然适用。对细小倾斜管, 只需对重力项作修正后垂直管

临界热流密度预示公式即可使用。当倾斜角等于和大于15 时修正后的公式能较好的预示本实验结果。

参考文献

[1] Tien C L , Chung K S. Entrainment L in its in Heat Pipes[J]. *A IAA Journal*, 1979, 17(6): 643~ 646

[2] Imura H, Sasaguchi K, Kozai H. Critical Heat Flux in a Closed Two-Phase Themosophon [J]. *Int J. Heat M ass Transfer*, 1983, 26(4): 1181~ 1188

[3] Smimov Ye L. Critical Heat Flux in Flooding in Vertical Channels[J]. *Heat Transfer Soviet Research*, 1984, 16 (2): 227~ 236

[4] Monde M. Analytical Study of Critical Heat Flux in Two-Phase Themosophon: Relationship Between Maximum Falling Liquid Rate and Critical Heat Flux[J]. *Trans ASME, Journal of Heat Transfer*, 1996, 118(2): 422~ 428

[5] 张彤. 底部封闭倾斜细管内逆向流沸腾临界热流密度的实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2005