

平板滞止区内饱和液体喷流沸腾的临界热流密度

秋雨豪, 刘振华

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200030)

摘 要:对高温平板滞止区内饱和液体的圆形喷流冲击沸腾的临界热流密度进行了系统的稳态实验研究。考察了不同液体、流速和喷流直径等系统条件对喷流沸腾临界热流密度的影响。建立了一个预示临界热流密度的半理论半经验型方程,其基本形式采用过去的研究结果,方程系数由本研究的实验数据拟合得到。研究结果证明,饱和液体喷流冲击沸腾的临界热流密度取决于液体物性、滞止冲击速度和喷流直径。本研究得到的半理论半经验公式在广泛的实验范围内能很好的预示喷流沸腾的临界热流密度。

关 键 词:喷流; 沸腾; 临界热流密度

中图分类号: TK124 文献标识码: A

1 引 言

高温壁面上液体喷流冷却是在核动力装置紧急冷却, 电子装置高效冷却及钢铁工业中应用十分广泛的一种高效冷却方法。临界热流密度(CHF)是表达喷流沸腾传热特性的一个非常重要的特性值。平板上喷流沸腾可以根据喷流流束断面与传热面面积之比分成两类模式: 喷流流束断面与传热面面积之比很小时称为 A 模式(既喷流滞止区尺寸大大小于传热面尺寸); 喷流流束断面与传热面面积之比相等或很大时称为 B 模式。A 模式下的饱和液体和过冷液体的临界热流密度研究已经比较充分, 典型的是 Katto 提出的 CHF 半理论半经验计算式^[1]和 Monde 提出的 CHF 经验计算式^[2]。而对 B 模式下的临界热流密度的系统研究则比较缺乏, 大多数实验是水的非稳态冷却实验, 在整个沸腾区域的数据中包含一些 CHF 数据。文献[3]指出: 滞止区内非稳态喷流冷却时的核沸腾特性及 CHF 与壁温变化率有强相关性, 而壁温变化率不仅取决于喷流条件, 更取决于加热体条件, 这是一个非系统参数。对于稳态喷流冷却, CHF 只取决于喷流条件, 同时稳态喷流冷却

的 CHF 作为一种基准值, 在学术和工程上有重要研究价值。文献[4]对高温平板滞止区(B 模式)内饱和水圆柱垂直喷流沸腾的临界热流密度进行了理论解析和稳态实验测定, 建立了一个预示饱和水临界热流密度的半理论半经验方程。这一方程是否适用于水以外的液体还有待确认。

本研究在过去的研究基础上, 对高温平板滞止区(B 模式)内各类饱和液体圆柱垂直喷流沸腾的临界热流密度进行了系统的稳态实验研究。考察了液体物性、流速和喷流直径等系统条件对冲击沸腾的临界热流密度的影响。建立了一个预示临界热流密度的半理论半经验方程。方程基本形式采用过去的理论研究结果^[4], 方程系数由本研究的实验数据拟合得到。研究结果证明饱和温度液体喷流冲击沸腾的临界热流密度取决于液体物性, 滞止冲击速度和喷流直径。该半理论半经验方程能较好的预示实验结果。

2 实验装置和实验过程

图 1 给出了实验装置简图。它由供液箱、不锈钢实验箱、实验加热件、实验工质循环系统、测量系统和电源系统组成。图 2 给出了实验加热件简图。工质在供液箱内被加热到设定温度, 经过供液泵, 调节阀, 流量计从垂直圆管做成的喷嘴中向下流出。在管出口有辅助加热器调节工质出口温度, 同时出口热电偶测量工质出口温度。喷嘴距离传热面 5 mm。传热体为一竖直铜柱, 上部做成一圆锥体, 上部尺寸缩小, 上平面作为传热面。竖直铜柱外面包裹一层云母片, 云母片上绕上电阻丝作为主加热器。铜柱放在一个电炉圈内, 电炉圈内装有电加热丝作为辅助加热器。加热件四周添满石棉绝热。传热面和不锈钢盖板间用硅胶密封绝热。实验时, 首先设

收稿日期: 2004-06-03; 修订日期: 2004-12-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50176029)

作者简介: 秋雨豪(1976-)男, 陕西乾县人, 上海交通大学博士研究生。

定主加热器功率, 然后仔细调节辅助加热器功率, 使主加热器产生的热量全部从铜柱上部传热面传出。传热面表面温度和热流密度由水平方向插入铜柱上部, 到达中心垂线的 3 根热电偶的测量读数换算得出。热电偶插孔用线切割法精确加工。顶部热电偶距传热面距离 2.0 mm, 热电偶之间距离 3.0 mm。在铜柱底部也插入一个热电偶监测铜柱内部温度。所有热电偶连接温度控制器, 热电偶读数由数值采集系统处理后输入计算机, 即时显示传热面表面温度和热流密度。实验压力是大气压。实验中使用了水、乙醇、R11 和 R113 四种实验工质。喷流直径有 12 mm、10 mm、8 mm、6 mm、4 mm 和 3 mm 共 6 种。喷流速度范围是 0.5 ~ 10 m/s。喷嘴出口处液体过冷度保持在 0.3 ~ 0.5 K。在实验中, 当热流密度接近 CHF 时, 控制壁面热流密度以 5% 的速率增加, 当壁面过热度出现大幅度跳跃超过 100 K, 也就是出现沸腾烧毁危机时, 电源自动断开。然后从前一次稳定状态时的热流密度开始再次以 1% 的速率缓慢增加壁面热流密度直到出现沸腾烧毁危机, 以最新一次稳定状态时的热流密度作为临界热流密度。此外, 当铜柱内部温度超过 500 °C 时电源自动断开。本实验热电偶最大校正误差为 0.2 K。热电偶间距离最大相对误差为 3% 左右。热流密度的最大测量相对误差为 12% 左右。

误差, 本研究中壁面热流密度和壁温使用 3 根热电偶的 3 个测量值的平均值。

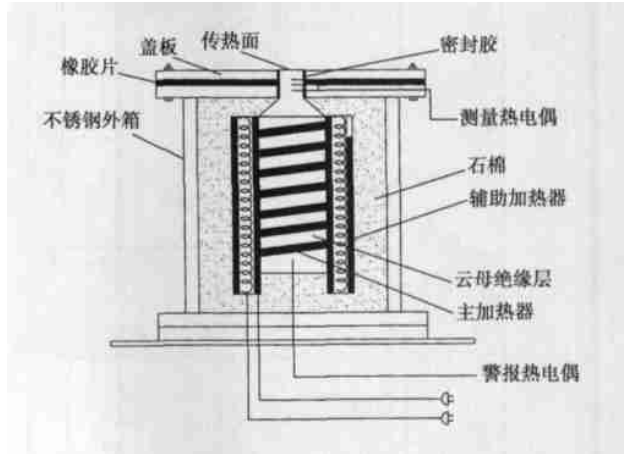


图 2 加热实验件示意图

图 3 给出了在 $d=8\text{ mm}$ 时的乙醇喷流核沸腾实验曲线。水平箭头代表 CHF 位置。图中斜直线是从文献[5]的池内核沸腾经验公式得到的乙醇池内核沸腾计算曲线:

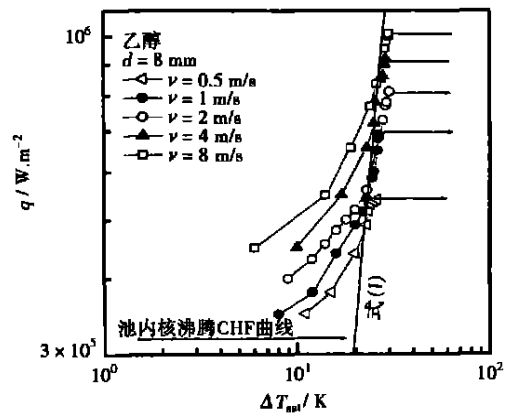


图 3 乙醇沸腾曲线

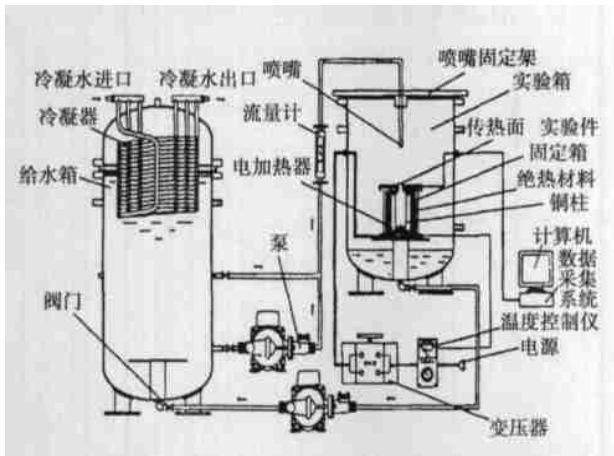


图 1 实验系统图

3 实验结果和讨论

从实验数据中已经确认对各种实验条件, 加热体内 3 根热电偶的测温值始终保持良好的线性关系, 加热体内的垂直方向传热很好的符合一维导热特性。3 根热电偶的测量值可以得到 3 个壁面热流密度, 相互间的相对误差不超过 2%, 为减小测量

$$\frac{q}{\Delta T_{\text{sat}} \lambda_l} \sqrt{\frac{\sigma}{N_g (\rho_l - \rho_v)}} = 7.0 \times 10^{-4} Pr_l^{0.35} \left[\frac{q}{\rho_v h_{fg} v_l} \sqrt{\frac{\sigma}{N_g (\rho_l - \rho_v)}} \right]^{0.7} \left[\frac{p}{\sigma} \sqrt{\frac{\sigma}{N_g (\rho_l - \rho_v)}} \right]^{0.7} \quad (1)$$

式中: q —热流密度; ΔT_{sat} —过热度; h_{fg} —蒸发潜热; ρ_v 和 ρ_l 分别是蒸气和液体密度; σ —气液表面张力; λ_l 和 v_l —液体的导热系数和动粘性系数; Pr_l —液体普朗特数; P —压力。

与池内沸腾相比, 喷流核沸腾曲线大幅度向上延长, 这是由于喷流强制对流抑制了气泡产生和成

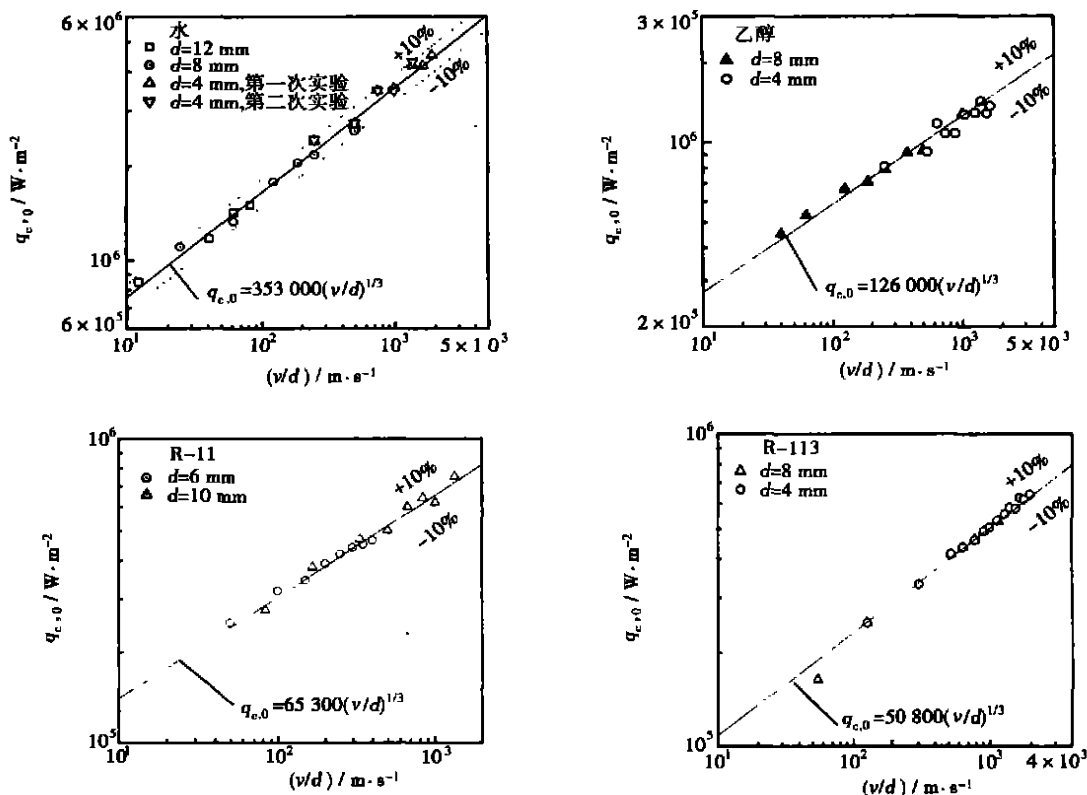


图 4 四种实验工质的 $q_{c,0}$ 和 v/d 间的实验关系

长造成的。随着喷流速度增加，CHF 值也迅速增加，显示出流速对 CHF 有强烈影响。因为本文侧重于 CHF 研究，对喷流核沸腾区域换热特性不再讨论。

对滞止区饱和水喷流 CHF，文献[4]已经提出了一个如下的半理论半经验式：

$$\frac{q_{c,0}}{Gh_{fg}} = c \left[1 + \frac{\rho_v}{\rho_l} \right]^{1/3} \left[\frac{\sigma \rho_l}{G^2 d} \right]^{1/3} \left[\frac{\rho_v}{\rho_l} \right]^{1.4/3} \quad (2)$$

式中： $q_{c,0}$ —饱和液体 CHF； G —质量流量； d —喷流直径； c —方程系数，由实验决定。

本研究将在广泛的实验范围内使用四种工质的数据确认式(1)中各准则数的指数的合理性，如不合理则适当修正，同时确定方程系数。

因为确定压力下饱和液体的物性是常数，从式(2)中可以得到式(3)所示的理论关系：

$$q_{c,0} \propto (v/d)^{1/3} \quad (3)$$

式中： v —喷流速度($v = G/\rho_l$)。图 4 给出了分别对应与 4 种实验工质的 $q_{c,0}$ 和 v/d 间的实验关系。图中可以发现对于 4 种实验工质， $q_{c,0} \propto (\rho_v/\rho_l)^{1/3}$ 的关系都能得到很好满足。

当实验压力远离临界压力时， $(\rho_v/\rho_l) \ll 1$ ， $(1 - \rho_v/\rho_l)^{1/3} \approx 1$ 。从式(2)中可以得到 $q_{c,0} \propto$

$(\rho_v/\rho_l)^{1.4/3}$ 的关系。图 5 给出了 $q_{c,0}$ 和 (ρ_v/ρ_l) 间的实验关系。图 4 可以发现，在一个宽广的范围内， $q_{c,0} \propto (v/d)^{1.4/3}$ 的关系能得到很好满足。

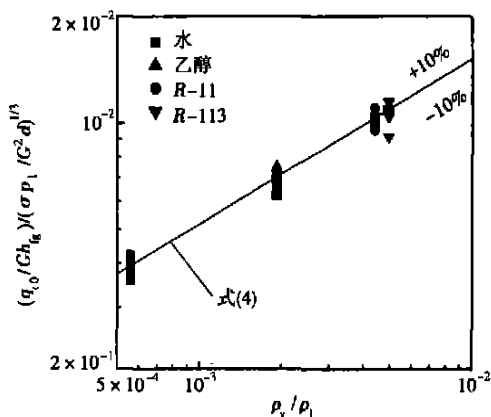


图 5 CHF 实验值和 (ρ_v/ρ_l) 之间的关系

使用最小二乘法整理 82 个实验数据得到方程系数： $c = 0.130$ 。由此得到：

$$\frac{q_{c,0}}{Gh_{fg}} = 0.130 \left[\frac{\sigma \rho_l}{G^2 d} \right]^{1/3} \left[\frac{\rho_v}{\rho_l} \right]^{1.4/3} \quad (4)$$

式(4)与实验数据的算术平均误差为 0.008, 绝对值平均误差为 0.032, 均方根平均误差为 0.002。图 5 也给出了实验数据和式(4)的比较, 可以看出二者吻合很好, 绝大多数数据在 10% 的相对误差范围内和式(4)吻合。

在过去的实验中^[4], 使用不锈钢薄片直接通电加热的方法, 由水的实验数据中得到 $c = 0.132$, 比本实验得到的 c 值大 1.5% 左右, 这一偏差很小。从两个实验结果可以确认, 对金属加热面, 还没有发现材料特性对喷流 CHF 有影响。

4 结 论

(1) 在大气压条件下, 对滞止区内饱和液体喷流沸腾的临界热流密度进行了实验研究, 在更广泛的范围内建立了预示临界热流密度的经验方程。方程系数由本研究的稳态实验数据拟合得到。

(2) 临界热流密度与喷流速度和喷流直径的比值有较强相关性, $q_c \propto (v/d)^{1/3}$ 。临界热流密度与工

质物性的相关性与理论预示一致。

(3) 由实验结果得到预示饱和液体喷流沸腾的临界热流密度的式(4), 该式具有很好的预示精度。

参考文献:

- [1] KATTO Y, SHINIZU M. Upper limit of CHF in the saturated forced convection boiling on a heated disk with a small impinging jet [J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1979, **101**: 265—269.
- [2] MONDEM, OKUMA Y. Critical heat flux of saturated forced convection boiling on a heated disk with an impinging jet-CHF in L-regime [J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 1985, **28**: 547—553.
- [3] ZHAO Y H, YUAN Z X, MA C F, *et al.* Experimental investigation to transient boiling heat transfer of sudden jet impingement on a hot surface [J]. *Chinese Journal of Engineering Thermophysics*, 2000, **21**(1): 101—104.
- [4] LIU Z H, ZHU Q Z. Prediction of critical heat flux for convective boiling of saturated water jet impingement on the stagnation zone [J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 2002, **12**(6): 1125—1130.
- [5] 徐济望. 沸腾传热和气液两相流[M]. 北京: 原子能出版社, 2001.

(渠 源 编辑)

Flownex 通用网络分析代码

据《Turbomachinery International》2004 年 3~4 月号报道, 大尺度的三维计算流体动力学(CFD)代码不能把整个装置模拟为一个单一的综合系统。Flownex 在精度、复杂性和速度之间提供了一个折衷的解决方法, 它允许在可接受的计算机时间内综合模拟整个装置。

由南非波切夫斯特鲁姆市 M 技术工业公司开发的 Flownex 是一个通用的网络分析代码, 能求解大型任意结构热流体网络内的流量、压力和温度分布。与比例、积分、微分控制器算法充分结合, 它允许对复杂的热流体系统进行详细的稳态和瞬态模拟。Flownex 可以考虑非理想气体特性和可压缩性的影响。

Flownex 使用节点和元素表示热流体网络。元素用圆圈表示并代表诸如管道、阀门、压气机或热交换器等部件。节点是元素的端点并且用方格表示。Flownex 求解对于每个元素基本的动量方程和在每个节点处的质量和能量守恒方程, 这就使 Flownex 能够预测复杂的流动现象。

Flownex 具有各种专门针对涡轮机开发的通用性能。它能以文本格式规定压气机或涡轮的性能图, 包括压比与质量流量的关系曲线、效率与质量流量的关系曲线。然后, 它可以根据这些曲线图进行插值, 以便确定在规定运行点处的性能。可以把任何数目的单级模型连接到一起, 以便估算多级涡轮机的性能。它也能把许多压气机、涡轮或负荷(如发电机)放置在一个单轴上, 这使得用户能建立复杂的涡轮机模型。

这种模拟包括轴转动动力学的分析, 它允许在改变负荷条件下估算轴转速的瞬变。Flownex 也有能力处理漏泄流动和涡轮叶片冷却流动。它允许压气机和涡轮的几何定标并具有用于齿轮箱、曲径密封和旋转通路内装的模型。

(吉桂明 供稿)

nozzle with fine adaptability to incidence and a good transonic performance represents a key technology of variable-geometry power turbine design for a naval gas turbine. In view of this, on the basis of the numerical calculation results, the authors' analysis has been focused on the aerodynamic performance and the flow field structure of the variable-area nozzle stage. **Key words:** naval gas turbine, variable area nozzle, variable-geometry power turbine, three-dimensional viscous flow field, numerical investigation

两套后部加载叶栅的对比实验研究 = **Contrast Experimental Study of Two Kinds of Rear-loaded Cascades** [刊, 汉] / YUE Guo-qiang, HAN Wan-jin, LU Wen-cai (College of Energy Science & Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), LI Dian-xi (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(2). — 125 ~ 129

To investigate the impact of blade front-edge diameter and load distribution on the aerodynamic performance of rear-loaded cascades, a contrast blow-down test was conducted of two sets of rear-loaded cascades with different front-edge diameters and load distribution. Detailed measurements were taken of the flow field parameters and surface static pressure at the following incidences: 0° , $+20^\circ$, -20° . The results of the investigation indicate that through a proper selection of the front and rear edge diameter and a rational matching of outlet inverse-pressure stage length and inverse pressure gradient magnitudes it is possible to effectively reduce the secondary flow losses of the cascades and enhance the adaptability of cascades to incidence variation, thus resulting in a more uniform distribution of outlet flow-field aerodynamic parameters along the blade height. **Key words:** rear loading, experimental investigation, incidence, cascade

平板滞止区内饱和液体喷流沸腾的临界热流密度 = **Critical Heat flux Density of the Jet Flow Boiling of a Saturated Liquid in a Flat-plate Stagnation Zone** [刊, 汉] / QIU Yu-hao, LIU Zhen-hua (College of Mechanical & Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China. Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(2). — 130 ~ 133

A systematic steady-state experimental study was conducted with respect to the critical heat-flux density of a round jet-flow impingement boiling of a saturated liquid in a high-temperature flat-plate stagnation zone. Investigated was the influence of the various system conditions, such as different liquids, flow velocities and jet flow diameter, etc. on the critical heat-flux density of the jet-flow boiling. A semi-theoretical and semi-empiric equation was established for forecasting the critical heat-flux density. The basic form of the equation was obtained by adopting available former research results. The coefficients of the equation were derived by a fitting of the experimental data of the present study. The study results indicate that the critical flow-flux density of the saturated fluid jet-flow impingement boiling depends on the physical properties of the liquid, stagnation impingement speed and jet flow diameter. By using the semi-theoretical and semi-empirical formula obtained as a result of the present study it is possible in a extensive range of tests accurately predict the critical heat-flux density of the jet-flow boiling. **Key words:** jet flow, boiling, critical heat-flux density

制冷剂 R-134a 在螺旋环形通道内凝结换热的实验研究 = **Experimental Investigation of the Condensation Heat Exchange of Refrigerant R-134a in a Spiral Ring-shaped Channel** [刊, 汉] / HAN Ji-tian, SU Guo-ping (College of Energy & Power Engineering under the Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(2). — 134 ~ 137, 141

The role played by refrigerant R-134a in the condensation heat exchange in spiral tubes and its pressure-drop characteris-