

细铂丝表面池沸腾临界热流尺度效应研究

赵建福¹ 鲁仰辉² 李晶¹

(1. 中国科学院力学研究所微重力重点实验室 (国家微重力实验室), 北京 100190;
2. 国家核电技术研发中心, 北京 100190)

摘要 本文实验研究了地面重力环境中过冷度和加热铂丝直径对 FC-72 和丙酮池沸腾传热临界热流现象的影响。实验结果表明, 临界热流具有明显的尺度效应, 其特征随 Bond 数范围的不同而不同, 但具体的分区准则依赖于工质的物性。在中等和大的 Bond 数区域, 过冷度对临界热流的影响与铂丝直径无关; 而在小 Bond 数区域, 过冷度效应与尺度明显相关。

关键词 池沸腾; 临界热流; 尺度效应; 过冷度; 丝状加热器

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2010)11-1879-04

SCALING BEHAVIORS OF CHF IN POOL BOILING ON THIN PLATINUM WIRES

ZHAO Jian-Fu¹ LU Yang-Hui² LI Jing¹

(1. Key Laboratory of Microgravity (National Microgravity Laboratory), Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. State Nuclear Power Technology Research & Development Center, Beijing 100190, China)

Abstract The influence of subcooling and heating platinum wire diameter on the phenomenon of pool boiling heat transfer of FC-72 and Acetone in normal gravity environment has been studied in the present paper. The experimental results indicate that there are some obvious scaling effects on CHF and the character is different with the change of the range of Bond number, and the actual subarea relies on the material properties. For normal and large Bond numbers, the influence of subcooling on CHF is independent of the platinum wire diameter, however, for the small Bond number, the subcooling effect significantly correlates with the wire scaling.

Key words pool boiling; CHF; scaling effect; subcooling; wire

0 引 言

沸腾传热是一种高效的热传递方式, 在日常生活和各种工程技术领域中经常会遇到, 具有重要的应用价值和学术意义。临界热流 (CHF) 是沸腾过程中十分重要的现象, 准确预测其大小对沸腾传热应用设备安全有着至关重要的意义, 因此备受关注, 迄今已提出多种不同的机制予以解释, 并结合大量精心设计的实验所获结果构建了相应的预测模型。不过, 无论哪种模型, 最后往往都可表示成如下的 Zuber-Kutateladze 关联式^[1]:

$$q_{\text{CHF}} / \{ \rho_v^{1/2} h_{\text{lv}} [(\rho_l - \rho_v) g \sigma]^{1/4} \} = K \quad (1)$$

常数 K 通常被称为 Kutateladze 数。对于大尺寸加热器饱和沸腾, Kutateladze 建议 K 的取值范围为

0.13~0.16, 而 Zuber 则建议为 0.12~0.15。文献中一般将 $K = \pi/24 \approx 0.131$ 时的临界热流预测值称为 Zuber 临界热流。

对于小尺寸加热器饱和沸腾, 临界热流将随加热面尺寸而变化, 一般以 Bond 数 $Bo = \frac{(\rho_l - \rho_v) g d^2}{\sigma}$ 或 Bond 数的平方根(对于柱状加热元件即无量纲半径 R') $R' = \sqrt{Bo} = R \sqrt{\frac{(\rho_l - \rho_v) g}{\sigma}}$ 的函数来表征该尺度效应(图 1)。

显然, 加热元件尺寸大小事实上还依赖于重力加速度, 重力的降低对应于尺寸的减小。但微重力实验表明, IV 区可以扩大到 $R' = 10^{-3} \sim 10^{-4}$, 这和地面常重力环境中基于尺寸变化的临界现象尺度

收稿日期: 2009-12-23; 修订日期: 2010-10-18

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No.10972225)

作者简介: 赵建福 (1967-), 男, 河南南阳人, 研究员, 博士, 主要从事微重力气液两相流动与传热研究。

效应的研究结果存在明显差异。

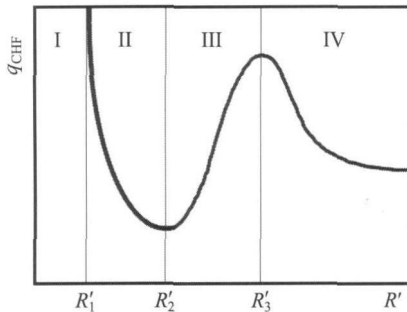


图 1 地面重力环境中临界热流的尺度效应示意图
Fig. 1 Scaling of CHF in pool boiling on cylinder

另一方面, 过冷沸腾中, 过冷度的提高会增加临界热流。此外, You 等^[2]发现在小 Bond 数情况下, 过冷度甚至影响到临界热流产生机制, 并认为其发现和 Kutateladze 的观察相符 (图 2)^[3]。该图显示在小 Bond 数时过冷度和尺度间存在交叉影响。

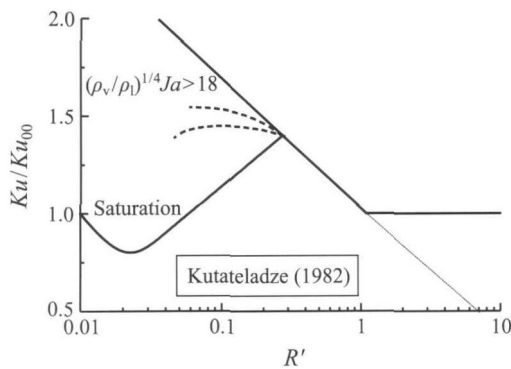


图 2 不同过冷度条件下临界热流的尺度效应
Fig. 2 Scaling behaviors of CHF in pool boiling on cylinder at different subcooling

本文实验研究了常重力环境细铂丝表面的池沸腾 (尤其是临界热流) 现象, 探讨了加热元件尺寸、过冷度及实验工质等因素对临界热流的影响, 以促进对上述差异及相关机制的认识, 服务于地面和空间应用。

1 实验装置和实验原理

实验设备如图 3 所示。恒温水浴用来调控液体工质的过冷度。液池由石英玻璃制造, 内径 92 mm, 高 151 mm。液池顶部与橡胶气囊连通, 以便维持内部压力恒定 (1 个大气压)。作为电加热元件的细铂丝长度 30.0 mm, 直径分别为 25、60 和 100 μm , 同时又作为电阻式测温元件来测量加热表面平均温度。实验工质为 FC-72 和丙酮。

实验前需要先反复加热 - 冷却以尽可能排除液体工质中溶解的不凝气体, 然后预热 1.5 h 左右实现液池内温度的均匀、稳定分布。实验中, 人工调节直流电源电压步进式升高或降低, 获得单相自然对流、沸腾起始、核态沸腾、临界热流、双模态过渡沸腾及膜态沸腾等。为获得稳态沸腾传热特性, 每个加热电压均保持约 20~30 s。铂丝两端电压及通过电流采用 Agilent 34401A 测量, 用于计算铂丝发热功率和电阻, 从而确定传递给液体的热流密度, 并利用铂丝温度 - 电阻标定曲线计算加热面平均温度与相应过热度。热流密度和壁面过热度测量的不确定度分别不大于 20 kW/m^2 和 3 $^\circ\text{C}$ 。

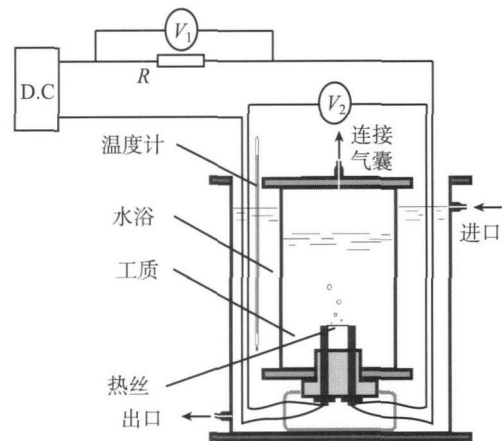


图 3 实验装置简图
Fig. 3 Schematic representation of the experimental apparatus

2 实验结果与讨论

单相自然对流传热实测结果与常用的 Kuhen-Goldstein 关联式^[4]预测结果的比较显示, 绝大部分实验数据位于 $\pm 20\%$ 误差范围, 表明本文所采用的实验装置与数据采集系统是可靠的 (图 4 示例性显示了 60 μm 铂丝在 FC-72 中的单相自然对流传热特性比较结果)。

图 5 则示例性地展示了 60 μm 铂丝在不同过冷度条件下的 FC-72 中的沸腾传热曲线。可以看到: (1) 沸腾起始温度基本不受过冷度影响; (2) 过冷度的增加会强化单相自然对流与核态沸腾的传热性能; (3) 不同过冷度条件下的充分发展的核态沸腾具有基本相同的变化趋势, 只不过临界热流会随着过冷度而提高。

与 FC-72 沸腾实验不同, 丙酮实验中, 60 μm 和 100 μm 的铂丝在低过冷度 (2.5~10 $^\circ\text{C}$) 情况下都出现了从自然对流直接进入双膜态沸腾现象 (图 6)。

不过,降低加热电压膜态沸腾将跳转为核态沸腾;此时若再次增高加热电压,沸腾曲线会沿常规核态沸腾曲线上升,经临界热流转换为膜态沸腾;而且,在最细的铂丝表面并未观测到类似的直接向膜态沸腾的转换。此外,对图像的分析也并未显示临界热流机制变化的迹象。这和 Bakhru 和 Lienhard^[5] 以及 You 等^[2] 观测并不一致。

图 7 表明,FC-72 中的 CHF 值比 Lienhard-Dhir 模型^[6] 预测结果略低,但定性地依然可用 Lienhard-Dhir 模型进行描述,尽管相比于该模型原始的适用范围 $R' \geq 0.15$,目前数据范围已扩大了 1~2 个数量级。与 You 等^[2] 和 Di Marco 等^[7] 实验结果相比,除最细铂丝 (0.025 mm 或 $R' = 0.0173$) CHF 值明显偏高外,其他两组实验结果相互符合较好。总体趋势显示在 $0.017 \leq R' \leq 0.069$ 区间内,CHF 值随 R' 的增加而减小,与文献报道数据显示出的总体趋势相比,本文实验数据仍然处于区域 IV。

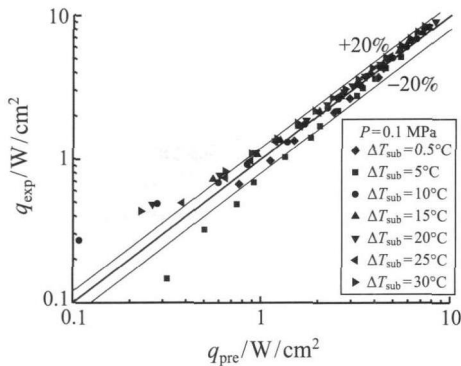


图 4 单相自然对流传热实测结果与 Kuhen-Goldstein 关联式预测结果的比较 (0.060 mm)

Fig. 4 Comparison between the measured and predicted single-phase convection of FC-72 on the wire of 0.060 mm dia.

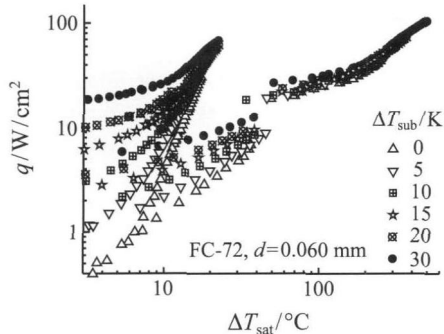


图 5 FC-72 沸腾曲线 (0.060 mm 铂丝)

Fig. 5 Typical pool boiling curves of FC-72 on wire of 0.060 mm dia. at different subcoolings

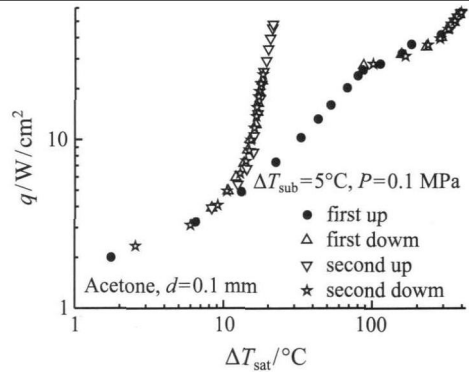


图 6 丙酮轻微过冷 (5°C) 沸腾中向膜态沸腾的直接转换 (0.100 mm 铂丝)

Fig. 6 Direct transition to film boiling of acetone on wire of 0.100 mm dia. at slight subcooling (5°C)

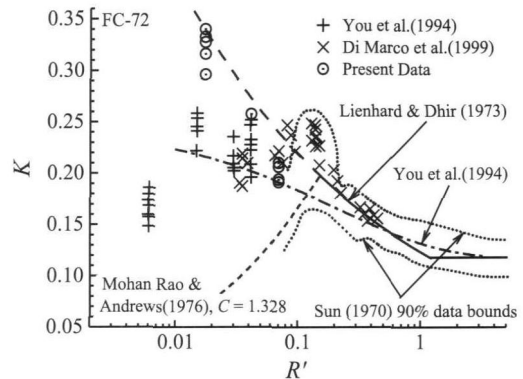


图 7 临界热流尺度效应 (FC-72)

Fig. 7 Scaling behavior of CHF in pool boiling of FC-72

图 8 显示了丙酮 CHF 的尺度效应。可以看到,在本文较大尺度实验数据接近文献报道的最小尺度结果,显示出良好的一致性。在本文实验范围 ($0.0076 \leq R' \leq 0.0305$) 内,临界热流尽管同样随 R' 的减小而增加,但与文献报道数据显示出的总体趋势相比,明显处于区域 II,这显然与 FC-72 不同。

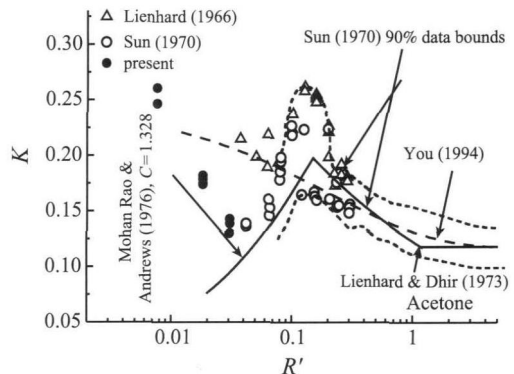


图 8 临界热流尺度效应 (丙酮)

Fig. 8 Scaling behavior of CHF in pool boiling of acetone

图 9 显示了 FC-72 中过冷度对不同尺寸铂丝临界热流的影响。作为比较,目前文献中常用的过冷度效应模型的预测结果也一并显示在图上。尽管最细铂丝情形中曲线斜率略有下降,显示了微弱的尺度效应,但总体来看,在低过冷度区域中,实验数据近似线性变化,且与文献中常用的线性模型相一致。随过冷度的升高,临界热流随过冷度的增加开始变缓,曲线偏离直线,呈现出非线性特征。结合图 2,可进一步确认本文报道的 FC-72 实验数据确实位于第 IV 区域。

图 10 则显示了丙酮中过冷度对不同尺寸铂丝临界热流的影响,目前文献中常用的过冷度效应模型

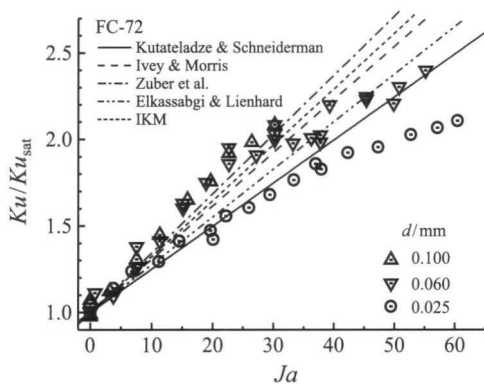


图 9 过冷度对 CHF 的影响 (FC-72)

Fig. 9 Dependence of CHF on the subcooling of pool boiling of FC-72

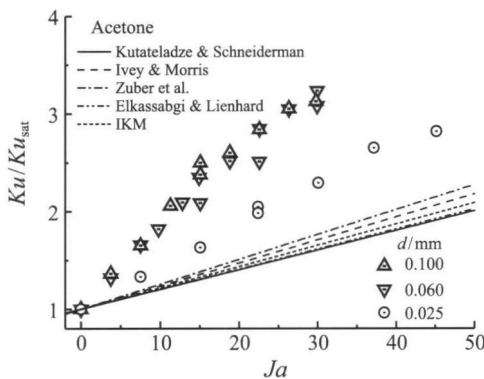


图 10 过冷度对 CHF 的影响 (丙酮)

Fig. 10 Dependence of CHF on the subcooling in pool boiling of acetone

的预测结果也同样显示在图上以便进行比较。同样,最细铂丝情形中曲线斜率比其他情形明显下降,而且在低过冷度线性区域,曲线斜率明显高于文献中常用的线性模型预测结果,表现出显著的耦合效应。结合图 2,可进一步确认本文报道的丙酮实验数据确实位于第 II 区域。

3 结 论

本文实验研究了池沸腾过程中丝状加热面临界热流的过冷度效应、尺度效应及其耦合效应,得到如下结论:

常重力条件下,饱和沸腾中临界热流的尺度特征可按照 Bond 数划分为不同区域,但分界位置明显与物性有关,即小 Bond 数情形中,物性参数也将影响着临界热流的尺度行为特征。

过冷度对临界热流的影响在小过冷度时呈线性增加的趋势,随过冷度增大其增加幅度逐渐降低,呈现出非线性变化特征。但在小 Bond 数情形,过冷度效应有可能受尺度效应的影响而进一步强化。

参 考 文 献

- [1] 林瑞泰. 沸腾传热 [M]. 北京: 科学出版社, 1988
LIN Ruitai. Boiling Heat Transfer [M]. Beijing: Science Press, 1988
- [2] You S M, Hong Y S, O'Connor J P. The Onset of Film Boiling on Small Cylinders: Local Dryout and Hydrodynamic Critical Heat Flux Mechanisms [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1994, 37: 2561-2569
- [3] Kutateladze S S. Thermophysical Similitude Analyses [M]. Novosibirsk: Science Press, 1982
- [4] Kuehn T H, Goldstein R J. Correlating Equations for Natural Convection Heat Transfer Between Horizontal Circular Cylinders [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1976, 19: 1127-1134
- [5] Bakhru N, Lienhard J H. Boiling from Small Cylinders [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1972, 15: 2011-2025
- [6] Lienhard J H, Dhir V K. Hydrodynamic Prediction of Peak Pool-Boiling Heat Fluxes from Finite Bodies [J]. J. Heat Transfer, Trans. ASME, 1973, 95: 152-158
- [7] Di Marco P, Grassi W. About the Scaling of Critical Heat Flux with Gravity Acceleration in pool boiling [C]//Ferrara: 17th UIT Nat Heat Transfer Conf. 1999: 139-149