

微重力下高热流时池内双组分核态沸腾*

清华大学 柴立和** 彭晓峰

【摘要】 本文基于 Helmholtz 不稳定性原理建立了微重力下双组分高热流时核态沸腾的双层气泡结构模型。由于浮力很小, 这种结构能维持到 CHF 状态。通过对该结构的深入分析, 导得了汽柱面积占总面积的百分比及液体层初始厚度的表达式, 在此基础上发展了 CHF 模型。分析结果同实验结果及地面条件下的结果作了比较, 对异同之处作出了合理的解释。

主题词: 传热 沸腾 汽泡动力学
分类号: V513

自由词: 微重力 双组分

1 引言

微重力下高热流时的核态沸腾现象在太空热能工程中至关重要, 既是太空换热设备所必须考虑的一个重要方面, 也是太空换热设备安全运行所要考虑的关键性问题。现有的文献调研表明, 目前这方面的研究还相当缺乏, 理论研究几乎尚属空白。

地面条件下的实验结果表明^[1], 在热流密度为 $0.6q_c$ 到 q_c 时, 活化核心中连续产生的汽泡在垂直方向上会发生聚合, 从而形成一连续汽柱, 随后汽柱与汽柱之间也会发生聚合, 从而在距离壁面一定距离处形成一大汽泡, 如图 1 所示, 汽柱中的汽体源源不断地溶入大汽泡, 由于浮力的存在, 大汽泡往往会周期地脱离和生成, 当脱离周期大于下面液层蒸发所需时间时, 临界热流现象即产生。微重力条件下, 浮升力作用极大削弱, 甚至成为可以忽略不计因素。可以预计此时沸腾特性会不同于地面重力环境中的情况。认识和理解这种现象, 对航天热控制和相关技术应用都会提供重要的理论依据。

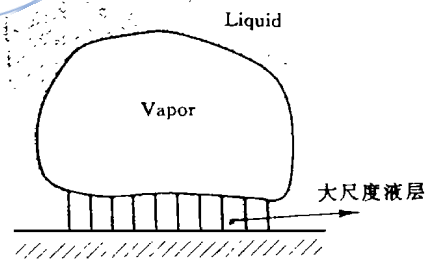


图 1 双层气泡结构示意图

本文将对微重力下双组分高热流时核态沸腾进行理论分析, 考察这种特殊条件下的沸腾特性, 探索基本规律, 在此基础上发展临界热负荷模型。

2 物理描述

对于界面存在相对剪切速度的情况, 文献[1]给出了 Helmholtz 不稳定性判据:

1997 年 10 月收稿; 1998 年 1 月收到修改稿。

* 本文系国家自然科学基金(编号: 59586004)和国家教委优秀青年教师基金资助项目(编号: 59625612)

** 男 26 岁 博士生 北京清华大学热能工程系热工教研室 100084

$$|\bar{u}_l + \bar{u}_v| > [\sigma a (\rho_l + \rho_v) / \rho_l \rho_v]^{1/2} \quad (1)$$

式中: $\bar{u}_l$ 和 $\bar{u}_v$ 分别为液相和汽相的宏观平均速度, a 为波数, ρ_l 和 ρ_v 分别为液、汽相密度, σ 为表面张力。

显然, 如果各种波长的扰动均存在的话, 那么总有一些长波长的扰动会放大, 从而使得界面不稳定。高热流时, 微楔形层的界面将向外移动, 显然当界面与加热面成 90 夹角时, Helmholtz 不稳定的产生不可避免。伴随着不稳定而来的是连续汽泡的聚合, 从而形成双层汽泡结构, 如图 1 所示。大汽泡之下和汽柱之间所夹的液体称为大尺度液层, 这种结构也被 Y. Abe et al^[2] 的微重力下双组分实验观察所证实。在微、零重力环境中, 这种结构与地面条件下的双层汽泡现象不同之处就在于, 由于浮力很小, 这种结构一旦形成, 就能维持到 CHF 状态。

双层汽泡结构形成以后的传热主要靠液体层的蒸发, 在地面条件下, 靠近加热面的液体不断蒸发产生的蒸汽在浮升力作用下向上流动, 而液体靠重力流向加热面, 在微重力情况下, 由于重力的大大减小, 要维持这种结构, 必然有其它的作用机制。液体层离壁面越近处, 温度越高, 蒸发越快, 因而易挥发组分浓度越低, 从而在液层界面上形成一浓度梯度, 对于正双组分来说, 这种浓度梯度会使得表面张力自上而下递增, 尽管界面上的温度梯度与浓度梯度对表面张力系数的作用相反, 但总的效果仍然取决于浓度梯度^[3]。因此, 正是自上而下递增的表面张力促使液体返回壁面补充被蒸发了的液体, 维持双层汽泡结构。

3 数学描述

考虑如图 2 所示的液体层与汽柱, 假设壁面传热全部转化为液层蒸发潜热, 则能量平衡给出如下结果:

$$u_v = (q / \rho_v h_{fg}) / (A_v / A_w) \quad (2)$$

$$\text{连续性方程为: } u_l / u_v = \rho_v A_v / \rho_l A_l \quad (3)$$

上式中 A_w 为加热面总面积, A_v 为汽柱总面积, A_l 为液体总面积。

联立(1)~(3)式, 并认为 $u_l + u_v \approx u_v$, 即当 u_l 与 u_v 相加时 u_l 与 u_v 相比可忽略, 于是得到 Helmholtz 不稳定临界波长为:

$$\lambda_H = 2\pi\sigma[(\rho_l + \rho_v) / \rho_l \rho_v] (A_v / A_w)^2 (\rho_v h_{fg} / q)^2 \quad (4)$$

从双层汽泡结构形成的机理来看^[1], 汽柱之间在第一个波峰相遇时聚合的可能性极大, 因而初始液层的厚度可认为是 $\lambda_H / 2$, 因此, 初始液层厚度可表示为:

$$\delta_0 = \pi\sigma[(\rho_l + \rho_v) / \rho_l \rho_v] (A_v / A_w)^2 (\rho_v h_{fg} / q)^2 \quad (5)$$

A_v / A_w 对于研究 CHF 现象非常重要, 式(5)中也含有未知数 A_v / A_w , 因此, 非常有必要对 A_v / A_w 进行估计。

$$\text{液层的功能守恒为: } c(1/2)\rho_l A_l \delta u_l^2 = (\partial\sigma / \partial x_1)(x_c - x_b)(4A_v / D)\delta \quad (6)$$

式中: 左边项为动能, 右边项为功, x_c 为液层最底部界面易挥发组分浓度, x_b 为液层最顶部易挥发组分浓度, 可以认为是主液体中易挥发组分浓度, D 为汽柱直径, 它由稳定性分析可确定为 $D = \pi\sigma(\rho_l + \rho_v) / [(u_l + u_v)^2 \rho_l \rho_v]$, c 为一反映液层中液体向汽柱底部渗透的参数, δ 为液层厚度。Straub^[4]也指出高热流时的沸腾, 汽柱界面并不是圆柱形, 而是在汽柱底部存在一薄液层(见图 2), 液体总是渗透到汽柱底部而蒸发的。

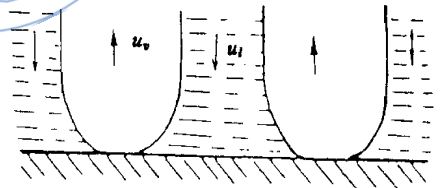


图 2 汽柱和大尺度液层相间结构

将 D 的表达式代入式(6) 可得:

$$\frac{w}{u_v} = \frac{8(\partial\sigma/\partial x_1)(x_c - x_b)\rho_v A_v}{c\pi\sigma(\rho_l + \rho_v)A_l} \quad (7)$$

联立(3) 和(7) 式, 得:

$$\frac{A_v}{A_l} = \frac{8\rho_l^2(\partial\sigma/\partial x_1)(x_c - x_b)}{c\pi\sigma(\rho_l + \rho_v)\rho_v} \quad (8)$$

$$\frac{A_v}{A_w} = \frac{8\rho_l^2(\partial\sigma/\partial x_1)(x_c - x_b)}{c\pi\sigma(\rho_l + \rho_v)\rho_v + 8\rho_l^2(\partial\sigma/\partial x_1)(x_c - x_b)} \quad (9)$$

从流体动力学角度, Zuber et al^[5]提出了临界热流密度的表达式:

$$q_c = 0.131h_{fg}\rho_v^{1/2}[\sigma(\rho_l - \rho_v)g]^{1/4} \quad (10)$$

通过以上物理分析, 不难看出, 微重力下双组分高热流情况下的沸腾与地面条件下的沸腾有相同的特性, 达到 CHF 的机理也极为类似, 只不过在微重力环境下, 促使液体返回加热面的不是浮升力 $(\rho_l - \rho_v)g$, 而是表面张力梯度。表面张力梯度的存在使界面受一剪切力作用, 而浮升力作用的本质是由于重力的存在使界面压力不平衡而宏观上产生力的作用。重力与表面张力梯度的类比也常出现在文献中, Straub^[6]就把表面张力梯度引起的 Marangoni 对流称为第二自然对流, 文献[7] 在分析表面张力梯度的影响时, 就把表面张力梯度和重力放在同一位置上。式(10) 以表面张力梯度代替浮升力, 在微重力下双组分沸腾的 CHF 可由式(10) 修正表示为:

$$q_c = 0.131h_{fg}\rho_v^{1/2}\left[\sigma\frac{(\partial\sigma/\partial x_1)(x_c - x_b)}{\delta_c^2}\right]^{1/4} \quad (11)$$

从后面的计算可以看出, 该式能较好地计算微重力双组分沸腾的 CHF。

由式(5) 和(11) 可得:

$$\frac{A_v}{A_w} = \frac{0.131[(\partial\sigma/\partial x_1)(x_c - x_b)]^{1/4}}{\pi[(\rho_l + \rho_v)/\rho_l]^{1/2}\sigma^{1/4}} \quad (12)$$

对比(9) 和(12) 式可定出常数 c 。 c 通常是一较大的数, 这就反应了液体确实是渗透到汽柱底部而蒸发的。表面张力梯度随浓度的变化可由文献[3] 的方法求得。

4 结果与讨论

上面从不同角度导出了 A_v/A_w 的表达式, 即式(9) 和(12) 都表明, A_v/A_w 仅与液体组成和物性有关, 而与热流无关, 这可理解为, q 越大时, 汽柱数量会越多, 但汽柱直径会减小, 因而 A_v/A_w 保持常数是可能的。

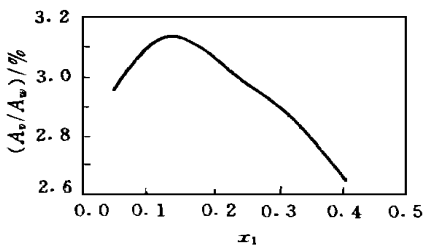


图3 乙醇—水的 A_v/A_w 与组分浓度的关系

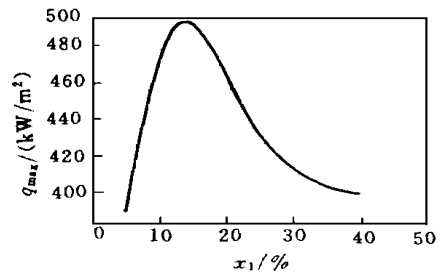


图4 乙醇—水的临界热负荷与乙醇浓度的关系

由于 A_v/A_w 仅与物性有关, 因而组分浓度对其影响极大, 图3 给出了乙醇—水混合液沸腾时 A_v/A_w 随组分浓度的变化关系, 在 $x_1 = 15\%$ 左右, A_v/A_w 达到一最大值。另外, 分析表明, 微重力下的 A_v/A_w 比地面条件下的 A_v/A_w 要大的多, 因而达到 CHF 状态也更为容易。

由式(5)和(12)式可得液体层厚度, $x_1 = 4.75\%$ 时, 计算得热流自 260 kW/m^2 到 400 kW/m^2 , 液体层厚度自 4.8 mm 到 2.1 mm 变化, $x_1 = 12.8\%$ 时, 计算得热流自 360 kW/m^2 到 500 kW/m^2 , 液体层厚度自 1.45 mm 到 0.75 mm 变化, 该结果比地面条件下的结果大一个数量级之多^[8], 这可解释为微重力下汽相和液相速度都较小, 因而 Helmholtz 不稳定性波长更大, 从而使得液体层厚度也较大。

式(11)具有明确的物理意义, 可计算微重力下双组分混合液沸腾时的临界热流密度, 对于乙醇-水混合液的沸腾来说, 计算结果如图4所示, 从图中可以看出在乙醇初始摩尔浓度分别为 $x_1 = 4.75\%$ 和 $x_1 = 12.8\%$ 时, q_c 分别为 390 kW/m^2 和 500 kW/m^2 左右, Y. Abe et al^[2] 等对这两种浓度下的实验结果分别为 400 kW/m^2 和 515 kW/m^2 左右, 说明计算结果和实验结果是基本吻合的。这个结果大约为地面条件下结果的 $60\% \sim 80\%$ 。显然这个结果比人们想象的要大得多, 这就说明热毛细力的作用确实是非常可观的。在微重力环境下, 对于双组分混合液的核态沸腾来说, 正是由于热毛细力引起的绕气泡的 Marangoni 流动的存在, 促进了液体向加热面的流动, 及时地补充蒸发了的液体, 有效冷却加热面, 大大减小了气泡在加热面上聚合的可能性, 从而也大大提高了临界热流密度的值。当然对于微重力下纯净物的沸腾来说, 热毛细对流也是存在的, 但它的热毛细对流仅仅是由于温度不均匀引起的^[3], 因而对临界热流密度所起的作用也非常有限, 因而, 微重力下单组分溶液沸腾时的临界热流密度值要比双组分混合液的值小得多, 这种现象也被 Y. Abe et al^[2] 的实验结果所证实。总之, 这一切都说明了对于双组分, 其 Marangoni 对流是比较剧烈的, 在地面条件下, 也有考虑的必要。

5 结束语

本文从理论上对微重力下双组分高热流时核态沸腾现象进行了分析, 提出了双层气泡结构的分析模型, 导得了汽柱面积占加热面总面积的百分比和初始微层厚度的表达式, 计算结果与地面条件下的结果作了比较, 对异同之处作了合理的解释。发展了微重力下双组分混合液核态沸腾临界热负荷模型。本文的研究无疑可为工程设计提供一些依据。

参 考 文 献

- 1 Carey V P. Liquid Vapor Phase Change Phenomena. Hemisphere Publishing Corporation, 1992
- 2 Abe Y, Oka T, Mori Y H. Pool Boiling of a Non-Azeotropic Binary Mixture under Microgravity. Int. J. Heat Mass Transfer, 1994, 37(16): 2405-2413
- 3 柴立和, 彭晓峰. 浓度边界层中生长气泡的界面特性. 工程热物理学报, 1998, 19(2): 213-217
- 4 Straub J. The Role of Surface Tension for Two-Phase Heat and Mass Transfer in the Absence of Gravity. Exp. Thermal Fluid Sci., 1994, 9: 213-233
- 5 Zuber N. On the Stability of Boiling Heat Transfer. J. Heat Transfer, 1958, 80: 711
- 6 Straub J. Interfacial Heat Transfer in Microgravity. Heat Transfer Science and Technology 1996. Edited by Bu-Xuan Wang. High Education Press. Beijing. 1996: 11-28
- 7 McGillis W R, Carey V P. On the Marangoni Effects on the Critical Heat Flux for Pool Boiling of Binary Mixtures. J. Heat Transfer, 1996, 118(1): 103-109
- 8 Rajvanshi A K, Saini J S, Prakash R. Investigation of Macrolayer Thickness in Nucleate Pool Boiling at High Heat Flux. Int. J. Heat Mass Transfer, 1992, 35(2): 343-350

(责任编辑 杨再荣)

CONTROL OF BLADE TIP CLEARANCE WITH SHAPE MEMORY ALLOYS

Zhang Xueren, Nie Jingxu, Zhang Chiming

(4th Dept. *Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing* 100083)

ABSTRACT

An adaptive sealing ring is developed to control the blade tip clearance of compressors with the help of shape memory alloys. Such a ring can change the blade tip clearance in adaption to the working conditions of engine. Its control mechanism is described. The structural design of the adaptive sealing ring is completed. The deformation of the adaptive ring is calculated and analyzed according to the constitutive relation of shape memory alloys.

Key Words Shape memory alloys Tip clearance Sealing rings

NUCLEATE BOILING OF BINARY MIXTURE AT HIGH HEAT FLUX UNDER MICROGRAVITY

Chai Lihe and Peng Xiaofeng

(*Thermal Engineering Department, Tsinghua University, Beijing* 100084)

ABSTRACT

An analytical model for nucleate pool boiling heat transfer of binary mixtures in high-flux regime is formulated according to Helmholtz instability theory of vapor-liquid interface. The nucleate pool boiling for binary mixtures at high heat flux under microgravity is also characterized by the existence of a liquid layer known as macrolayer between the heater surface and the vapor mass. The dual-bubble layer structure can maintain up to CHF condition due to less buoyancy. The expressions for fraction of bubble contact area on the heater surface and initial macrolayer thickness are derived in term of the thermophysical properties or/and the heat flux. A CHF model based on hydrodynamics is provided. The predicted results are compared with experimental data and theoretical analysis. Some important conclusions are drawn as follows: The fraction of bubble contact area on the heater surface is independent of the input heat flux, but much greater than that at terrestrial conditions; Initial macrolayer thickness is much greater than that at terrestrial conditions due to less velocities of vapor phase and liquid phase; The CHF values for binary mixtures under microgravity are about 60~80% of those at terrestrial conditions, but are much greater than those of single components under microgravity.

Key Words Heat transfer Boiling Bubble dynamics of boiling

CALCULATION OF HEAT CONVECTION IN COMPLEX 3D GEOMETRIES

Zhu Songlin (*Huazhong University of Science and Technology*)

Zhu Fangyuan (*7th Dept. Northwestern Polytechnic University, Xi'an* 710072)

ABSTRACT

A simulation method is presented for heat convection in 3D complex geometries. For a non-orthogonal coordinate formulation of the governing equations with cartesian velocity components, pressure and temperature, a finite volume method is uti-