饱和流动沸腾中孤立气泡行为的三维数值模拟*

王林伟[1†] 徐丰[1] 田婷婷[2] 刘昊[3]
（1 北京交通大学土木建筑工程学院， 100044；
2 中航通飞研究院有限公司， 519040；
3 中国科学院力学研究所先进制造工艺力学重点实验室，100190）

摘要 利用三维数值模拟，在垂直向上流动的条件下，对饱和核态沸腾中孤立气泡的成长与滑移过程进行了研究。模拟中，利用非稳态热传导模型考虑了加热固壁的瞬态热响应。结果显示，主体流动速度与固壁瞬态导热对气泡动力特性及传热特性有着较大影响。

关键词： 流动沸腾 饱和沸腾 孤立气泡 瞬态导热

一、引言

沸腾传热是最有效的传热方法之一，广泛应用在核能发电、火箭推进、电子冷却、化工生产等多个领域[1]。然而，由于沸腾传热涉及到固、液、气三相的耦合，且传热机制相当复杂，至今还未得出完整的理论模型[2]。此外，以实验数据建立的一些经验或半经验关系式基本上只适用于工程中的特定情况，描述的是沸腾传热过程的整体效应，很难刻画流动传热过程的机制[1]。因此，利用数值方法认识和理解沸腾传热过程成为近期研究的一个有效途径，相应的数值结果可以全面地揭示沸腾传热的流动和沸腾机制[3]。

以前的研究显示，通过对壁面处理，已实现了实验控制有效核化位置的技术[4]。在此基础上，利用数值模拟的方法，本文针对核化后的孤立气泡，分析了饱和流动沸腾时的生长和运动过程及其传热特性，特别是加热薄固壁的瞬态热响应。

二、数值模型与计算区域

2.1 数值模型

用有限体积法进行离散化处理，并使用 VOF 方法对气液界面进行捕捉。流体为常压下的水，固壁为具有恒定均匀发热源的铂，并认为液态水与铂的热力学状态参数在沸腾传热过程中随温度恒定。并且假定气泡具有均匀的温度与压力。

气液界面处的质量传递速率运用了分子运动理论模型，其方程为

$$\dot{m} = \Gamma \sqrt{\frac{M_v}{2\pi R_v T}\left(p_{sat,l} - p_v\right)}$$

其中，Γ为调节系数，这里取值为 0.02。

2.2 计算区域

* 国家自然科学基金（批准号：11142015 和 11272045）资助的课题。

† 报告人简介：1988.08-，流体力学，研究生：wanglinwei@outlook.com

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

计算区域如图 1 所示，$y=0$、$\mathrm{y}=5\mathrm{mm}$与$x=5\mathrm{mm}$平面为对称平面。加热铂金固壁位于$x=0$平面左侧，厚度δ为 0.2mm，发热功率为$1.6\times10^{7}\mathrm{W/m^{3}}$，初始过热度为 5.3K。初始气泡半径$r=0.16\mathrm{mm}$，位于$x=0$，$y=0$，$z=2mm$处。沿$z$轴正向的三种主流速度分别为$W=0\ \mathrm{m/s}$，$W=0.089\ \mathrm{m/s}$，$W=\ 0.21\mathrm{m/s}$。气泡生长（$t=0$）之前，速度边界层与温度边界层都已达到完全发展状态。取静态接触角为45°，且不考虑接触角滞后效应。

三、结果

在主流速度为$W=0.21\mathrm{m/s}$的情况下，当$t=5\mathrm{ms}$时，气泡开始沿壁面滑移，此时液体的温度分布如图 2 所示。

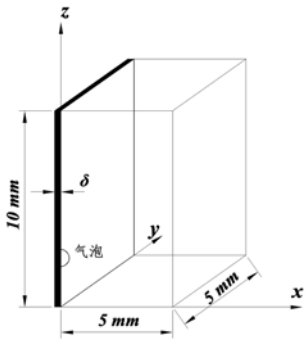

图 1　计算区域示意图

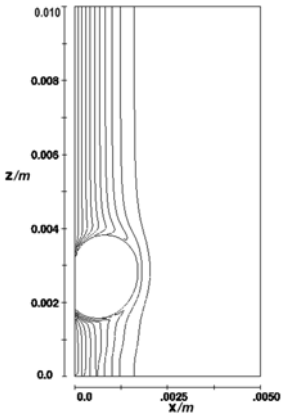

图 2　$t=5ms$时液体的温度分布

四、结论

本文对垂直向上流动时饱和核态沸腾条件下孤立气泡的成长与滑移进行了数值研究，得到了与实验相一致的气泡生长与滑移过程。气泡的成长速率受主体流速的影响较小，但滑移开始时间随着主体流速的增大而提前；气泡基底下的固壁温度分布差异较小，但会在三相接触线处存在突降。

参　考　文　献

1　Dhir V K, Warrier G R, Aktinol E. Journal of Heat Transfer, 2013; 135(6): 061502
2　Kim J. International Journal of Multiphase Flow, 2009; 35(12): 1067~1076
3　Dhir V K. Journal of Heat Transfer, 2006; 128(1): 1~12
4　Nam Y, Wu J, Warrier G, Ju Y S. Journal of Heat Transfer, 2009; 131(12): 121004

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net