

文章编号:1007-6735(2010)05-0409-04

均匀电场作用下气泡变形的研究

董智广¹, 郁鸿凌², 董伟², 李瑞阳²

(1. 上海应用技术学院 城市建设与安全工程学院, 上海 200235; 2. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 为进一步探索电场强化沸腾换热的机理, 利用高速摄像机拍摄了气泡在不同场强作用下的实验图像, 并对气泡脱离壁面时的形态进行了定量分析. 实验结果表明, 电场作用下气泡沿场强方向伸长, 随着场强的升高, 气泡的脱离长径比增大, 变形量增大. 并对气泡界面所受的电应力进行了计算, 计算结果显示, 气泡变形是由于气泡受到电应力的作用, 电应力在赤道方向压缩气泡, 在极轴方向拉伸气泡, 使得气泡沿场强方向变细变长.

关键词: 电水动力学; 气泡; 电应力; 沸腾换热

中图分类号: TK 124 **文献标志码:** A

Study on deformation of bubble under the action of uniform electric field

DONG Zhi-guang¹, YU Hong-ling², DONG Wei², LI Rui-yang²

(1. School of Urban Construction and Safety Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 200235, China;
2. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to make further study on the electrohydrodynamic enhancement mechanism of boiling heat transfer, the bubbles images in various electric fields were obtained with a high-speed camera, and the bubble dynamic behaviors at departure were quantitatively analyzed. Experimental results show that the bubble elongates along the direction of the electric field. The bubble's aspect ratio and deformation rate increase with the increase of electric field intensity. The electric stress acting on the bubble surface was calculated, which indicates that the bubble deformation results primarily from the effect of electric stress acting on bubble surface. The bubble becomes slender and longer along the direction of the electric field because of that the electric stress compresses the bubble in the equatorial direction and extends the bubble along the axial direction.

Key words: *electrohydrodynamics; bubble; electric stress; boiling heat transfer*

EHD(electrohydrodynamic)强化传热技术是一种利用电场、流场和温度场的相互作用来达到强化传热目的的主动强化传热方式. 由于 EHD 技术具有强化效果显著、设备简单、容易控制热流和温度、功耗低及应用面广等优点, 越来越受到人们的重视. 特别是近 10 年来有了较大发展, 取得了较多的研究

成果^[1,2].

以往的研究认为 EHD 强化沸腾换热的主要原因在于两个方面, 一方面是电场对流体的电对流作用; 另一方面是电场的施加使汽泡的行为发生变换. 而前者的研究早在 20 世纪 70 年代就已起步, 并有了长足的进展^[3,4]. 但对于汽泡行为的研究, 由于沸

收稿日期: 2010-01-08

基金项目: 上海市青年科技启明星资助项目(06QA14035); 上海市教育委员会科研创新资助项目(08YZ92)

作者简介: 董智广(1973-), 男, 讲师. E-mail: dongzhiguang08@163.com

腾过程中温度场、速度场和电场耦合的复杂性,使目前对此方面的研究多集中在实验和定性分析上^[5,6],此方面的理论研究非常有限,还有待进一步的深入研究.为了更直观地研究电场对气泡的作用,在本实验研究中隔离了温度场的影响,采用注入气泡进行研究.本文通过对电场作用下气泡变形的研究,以明确电场对气泡的作用规律,为进一步研究沸腾换热气泡在电场作用下的行为特性及电场强化沸腾换热的机理提供理论基础.

1 实验装置

实验装置如图1所示,主要由气泡发生系统、高压电系统和图像采集系统组成.测试部件由换热平板和电极组成.高压电极采用网状电极,以使上升的气泡能穿过网面,防止其聚集在上极板附近,影响电场分布,尺寸为190 mm×150 mm,电极板平行于换热面,网格与平板电极间的距离为10 mm.下极板采用一次浇铸成型的黄铜板,尺寸与铜网相同,厚度为20 mm,铜板安放在绝缘、绝热的环氧树脂底座中,铜板与环氧树脂板间以环氧树脂胶密封.严格地说,两无限大平行平板之间的电场才可能产生均匀电场,由于实验条件的限制,忽略边界条件的影响,认为本实验中的网格-平板电极结构产生的电场为均匀电场.

高压电源为美国 GLASSMAN 公司制造,型号为 ER/DM,可以产生-50~50 kV 连续可调直流高压电源.

实验中使用高速摄像仪对气泡的运动进行拍摄,型号为 MotionPro X3,采用的帧频为1 000 帧/s.

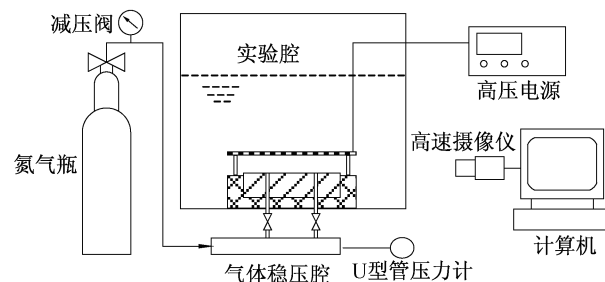


图1 实验系统图

Fig.1 Schematic diagram of experimental system

2 实验结果

利用高速摄像仪拍摄到的气泡在不同场强作用下的生长图像如图2所示.由图2可知,不加电场作用时,气泡基本上呈球形;而外加电场后,气泡呈椭球状,而且随着场强 E 的增加,气泡脱离壁面时气泡的椭球外形更加明显.

定义气泡在脱离时刻的长轴为 d 和短轴为 w ,如图3所示.并且定义气泡的脱离长径比 $A = d/w$.在电场作用下,气泡脱离时长径比随场强的变化关系如图4所示.

长径比的相对误差

$$\frac{\Delta A}{A} = \sqrt{\left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta w}{w}\right)^2}$$

本实验测量气泡的长径比的相对误差为1%.

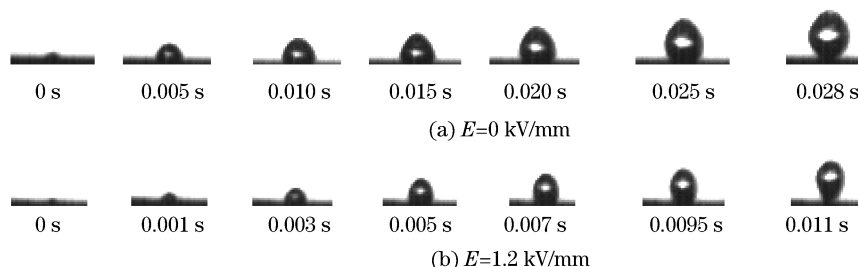


图2 气泡的生长图示

Fig.2 Schematic diagram of bubble growth

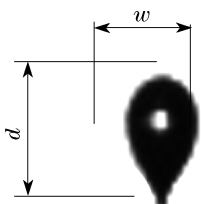


图3 实验中气泡的测量参数

Fig.3 Bubble measure parameters in experiment

从图4可见,随着场强的增大,气泡脱离时的长径比增大,即在电场作用下气泡沿场强方向伸长.在本实验条件下,气泡的最大长径比可达1.2,这主要是因为电场对气泡界面的电场力作用引起气泡在两极受拉而在赤道方向受压的结果.

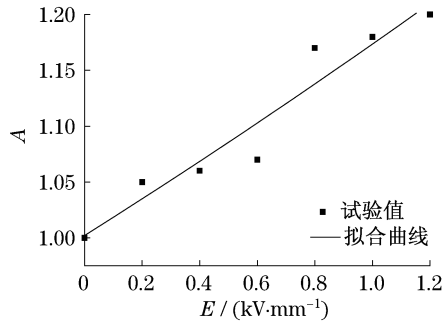


图4 气泡脱离壁面时的长径比随场强的变化

Fig.4 Variation of aspect ratio with electric field strength at bubble departing the wall

3 电场作用下的气泡受力分析

本文研究在各向同性电介质中下极板接地、上极板接正电压的一个系统,如图5所示.并且假设气泡为球形.考虑到气泡内外工质的介电常数不同,在外电场作用下气泡表面有极化电荷产生.气泡界面自由电荷的正负取决于电场的方向、电场强度的大小、液汽介电常数的比值和液汽电导率的比值.当上极板施加正电压时, X 为液汽电导率之比, Y 为液汽介电常数比值,如果 $XY < 1$,则气泡上部感应出负电荷,下部感应出正电荷;如果 $XY > 1$,则气泡上部感应出正电荷,下部感应出负电荷.上极板施加负电压时的情况和上极板接正电压时的情况相反.对于本文研究的工质 R123, $XY < 1$,所以,在气泡上部感应出负电荷,下部感应出正电荷.

根据电磁学理论^[7],电场中的流体所受到的电场力为

$$\mathbf{F}_E = q\mathbf{E} - \frac{1}{2}\mathbf{E}^2 \nabla \epsilon + \frac{1}{2} \nabla \left[\mathbf{E}^2 \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial \rho} \right)_T \rho \right] \quad (1)$$

式中, $\mathbf{F}_E$ 为所受的电场力; $\mathbf{E}$ 为电场强度; q 为自由电荷密度; ϵ 为工质的介电常数; ρ 为流体的密度.

根据 Gauss 定理将式(1)表达成 Maxwell 应力张量形式

$$f_j = \epsilon_j (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E})_j \cdot \mathbf{E}_j - \frac{\epsilon_j}{2} \mathbf{E}_j^2 \left(1 - \frac{\rho}{\epsilon} \frac{d\epsilon}{d\rho} \right) \mathbf{n}_j \quad (2)$$

式中,下标 j 取 1 时表示为液相,取 v 时表示为气相; $\mathbf{n}_j$ 为各相的单位法向分量.

根据气泡界面上的条件 $\mathbf{n}_l = -\mathbf{n}_v$, $\mathbf{t}_l = -\mathbf{t}_v$. 其中, $\mathbf{t}_l, \mathbf{t}_v$ 分别为液、气两相的切向分量,则可以得到作用于汽液界面的合力为^[8]

$$\mathbf{f} = \frac{1}{2} \left[\epsilon_l (\mathbf{E}_{ln}^2 - \mathbf{E}_{lt}^2) - \epsilon_v (\mathbf{E}_{vn}^2 - \mathbf{E}_{vt}^2) + \rho_l \mathbf{E}_l^2 \frac{d\epsilon_l}{d\rho_l} - \rho_v \mathbf{E}_v^2 \frac{d\epsilon_v}{d\rho_v} \right] \mathbf{n}_l + (\epsilon_l \mathbf{E}_{ln} \mathbf{E}_{lt} - \epsilon_v \mathbf{E}_{vn} \mathbf{E}_{vt}) \mathbf{t}_l \quad (3)$$

式中,下标 n, t 分别为法向分量、切向分量.

由静电学理论可得两种不同介质界面的静电场边界条件为 $\epsilon_l \mathbf{E}_{ln} - \epsilon_v \mathbf{E}_{vn} = q_{es}$, $\mathbf{E}_{lt} = \mathbf{E}_{vt}$, 其中, q_{es} 为界面的极化电荷量. 根据汽液介质的边界条件及介质中的场强分布,可得气液界面上法向电应力 f_n 和切向电应力 f_t 分别为

$$f_n = \frac{9\epsilon_0 \mathbf{E}^2}{2(2+X)^2} \left\{ \frac{(\epsilon_{rl} - 1)^2}{3} \left[\left(\frac{\epsilon_{rl}^2 + 4\epsilon_{rl} - 2}{3} \right) X^2 - \left(\frac{\epsilon_{rl}^2 - 2\epsilon_{rl} + 4}{3} \right) \right] \cos^2 \theta \right\} \quad (4)$$

$$f_t = \frac{9\epsilon_0 \epsilon_{rv} \mathbf{E}^2}{(2+X)^2} (XY - 1) \sin \theta \cos \theta \quad (5)$$

式中, θ 为汽泡界面上的点所在半径同 z 轴的夹角; $\epsilon_0, \epsilon_{rl}, \epsilon_{rv}$ 分别为真空介电常数、液体相对介电常数和气体相对介电常数.

将法向力和切向力分别沿水平方向和垂直方向分解为 $f_{n,x}, f_{n,z}, f_{t,x}, f_{t,z}$, 如图5所示. V_0 为电压.

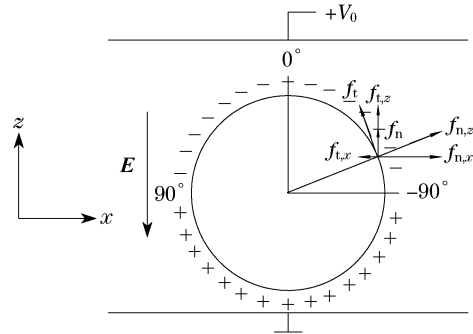


图5 电场中作用于气泡表面的电应力分布

Fig.5 Distribution of the electric stress acting on the bubble surface

计算气泡界面所受的电场力合力的垂直分力 f_z 、水平分力 f_x 分别如图6和图7所示(见下页). 计算中所取各参数值分别为 $E = 15 \text{ kV/cm}$, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$, $\epsilon_{rl} = 3.42$, $X = 0.25$, $Y = 3.42$.

从下页的图6和图7来看,在 0° 处气泡受到向上的最大垂直力作用,在 180° 处气泡受到向下的最大垂直力作用;在 90° 处气泡受到向右的最大水平力作用,在 -90° 处气泡受到向左的最大水平力作用. 所以,在电场的作用下,气泡变细变长,这与图4的实验结果是相符合的.

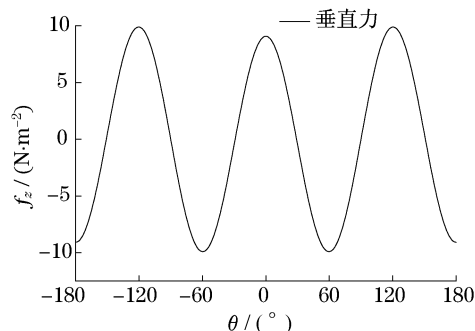


图6 R123 气泡所受的电场力垂直分力
Fig.6 Perpendicularity force of electric field of R123 bubble

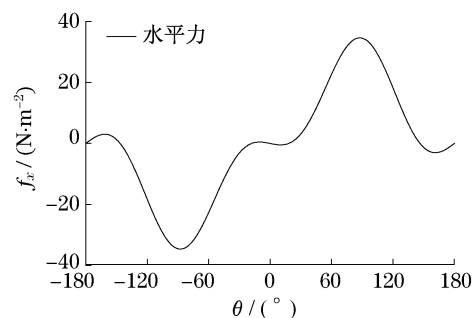


图7 气泡所受的电场力水平分力
Fig.7 Level force of electric field of bubble

4 结 论

a. 观察到了气泡在不同场强作用下生长与脱离时的情况. 实验结果表明, 在电场作用下气泡沿场强方向伸长, 随着电场强度的增大, 气泡的脱离长径比增大, 变形量增大.

b. 对气泡界面所受的电场力进行了计算, 计算结果显示, 气泡变形是由于气泡受到电应力作用, 电应力在赤道方向压缩气泡, 在极轴方向拉伸气泡, 使得气泡沿场强方向变细变长.

参考文献:

- [1] 刘振华, 王经, 陈玉明. EHD 效应强化管内油的强制对流换热实验[J]. 工程热物理学报, 2000, 21(6): 738-741.
- [2] 王发刚, 李瑞阳, 郁鸿凌, 等. 电场强化乙醚自然对流和池沸腾换热[J]. 化工学报, 2005, 56(11): 2 082-2 085.
- [3] ZAGHDOUDI M C, LALLEMAND M. Analysis of the polarity influence on nucleate pool boiling under a DC electric field[J]. Transactions of the ASME, 1999, 121(9): 856-864.
- [4] LAI F C, MATHEW J. Heat transfer enhancement by EHD-induced oscillatory flows[J]. Journal of Heat Transfer, 2006, 128(9): 861-869.
- [5] CHO H J, KANG I S, KWEON Y C, et al. Study of the behavior of a bubble attached to a wall in a uniform electric field[J]. Int J Multiphase Flow, 1996, 22(5): 909-922.
- [6] IACONA E, HERMAN C, CHANG S, et al. Electric field effect on bubble detachment in reduced gravity environment[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2006, 30(2): 121-126.
- [7] PANOFSKY W, PHILLIPS M. Classical electricity and magnetism[M]. New York: Addison-Wesley, 1962.
- [8] ZAGHDOUDI M C, LALLEMAND M. Study of the behaviour of a bubble in an electric field: steady shape and local fluid motion[J]. Int J Therm Sci, 2000, 39(1): 39-52.