

研究论文

中心圆柱电极 EHD 强化垂直管内 沸腾换热的实验研究

刘永启 李瑞阳 郁鸿凌 王发刚
(上海理工大学动力工程学院, 上海 200093)

摘 要 以 R123 为工质采用中心圆柱电极对垂直管内沸腾换热的 EHD 强化进行了实验, 得出了沸腾传热系数与电场强度、热流密度等相关参数的关系. 测试了外加电场的电流以及击穿电场强度. 从外加电场影响气泡的成长、跃离和运动规律的角度对 EHD 强化垂直管内沸腾换热的机理进行了分析.

关键词 电水动力学 强化换热 沸腾换热 电极形状

中图分类号 TK 124

文献标识码 A

文章编号 0438-1157 (2004) 04-0545-05

EXPERIMENTAL STUDY ON EHD ENHANCEMENT OF BOILING HEAT TRANSFER IN VERTICAL TUBE BY USING COAXIAL CYLINDRICAL ELECTRODE

LIU Yongqi, LI Ruiyang, YU Hongling and WANG Fagang

(College of Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract EHD enhancement of boiling heat transfer of R123 inside a vertical tube concentric with a cylindrical electrode was tested. These experiments demonstrated that the strength of applied electric field had an optimum value, under which the highest enhancements of boiling heat transfer took place at a lower heat flux and that the factors of heat transfer enhancement for a lower heat flux was larger than those for higher one. It was found that electric current increased as applied electric field strength increased and decreased as heat flux increased and that breakdown strengths of electric field fell as heat flux increased. The mechanisms of EHD enhancement of boiling heat transfer inside a vertical tube were analyzed and discussed on the view of the effect of electric field on growth rate, departure and movement behavior of bubbles.

Keywords electrohydrodynamic, heat transfer enhancement, boiling heat transfer, electrode geometry

引 言

EHD (Electrohydrodynamic) 强化传热是将电场及其理论引入传热学领域, 利用电场力与流场

和温度场的相互作用而达到传热强化的一种有效方法. 近年来, 由于余热利用、高效暖通空调系统、海洋能和地热能开发中对小温差传热的要求, 加上 EHD 强化传热所具有的效果显著、功耗低、易于

2002-12-31 收到初稿, 2003-03-27 收到修改稿.

联系人: 李瑞阳. **第一作者:** 刘永启, 男, 37 岁, 博士, 副教授.

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (No. G2000026302) 和上海市基础研究重点项目 (No. 02DJ14049) 共同资助.

Received date: 2002-12-31.

Corresponding author: Prof. LI Ruiyang. **E-mail:** lizhendk@online.sh.cn

Foundation item: supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No. G2000026302) and the Major Basic Research Program of Shanghai (No. 02DJ14049).

控制表面热流等一系列优点, 对其研究逐渐受到重视^[1]. 由于 EHD 强化换热机理的复杂性, 目前还处于以实验积累数据为主的研究阶段, 尚未有成熟的理论. 研究成果主要集中在 EHD 强化管外池沸腾换热方面, 文献 [2~4] 对这些成果进行了综述.

由于 EHD 强化管内沸腾换热的实验条件苛刻, 可视性较差, 所以对其研究较少. 通过文献检索, 还未发现有 EHD 强化垂直管内沸腾换热的报道. 本文以 R123 为工质, 对在垂直管内同轴布置的中心圆柱电极施加正高压电形成直流电场条件下的沸腾换热进行了实验研究, 并从外加电场影响气泡的成长、跃离和运动规律的角度对实验结果进行了初步的分析, 以进一步揭示 EHD 强化沸腾传热的机理.

1 实验方法

本实验在自制的装置(如图 1 所示)上进行. 实验装置主要由实验测试换热管、工质冷凝回路、制冷系统、水加热系统、高压电系统、控制系统和数据采集系统等几个部分组成. 工作过程为: 工质在实验换热管内被加热, 产生的汽相沿管内上升, 经连接管进入冷凝器, 在冷凝器内被冷凝成液体又回至换热管内. 系统内工质的温度(饱和压力)是通过调节制冷系统的冷凝液温度和加热水的温度来控制. 换热量是通过调节换热管加热水入口与出口之间的水温差和水量来控制. 实验换热管的具体结构如图 2 所示, 采用垂直安装的套管式换热器, 外层为加热水路, 内层为工质回路. 内外层之间的换热壁由两个不锈钢光滑管套在一起组成, 在两个管子之间布置 4 个热电偶, 用于测量壁温. 换热管的内径为 25 mm, 有效换热长度为 800 mm. 在换热管的中心布置一根直径为 10 mm 的黄铜圆柱形电极, 电极与换热管内表面之间的距离为 7.5 mm. 实验测试换热管接地形成 0 电位, 同时与电极构成高压回路. 高压电发生设备可向电极系统提供 0~50 kV 的直流电.

在本实验中, 用热电堆、流量传感器分别测量加热水通过实验测试管时的温差和流量, 用镍铬-康铜铠装热电偶(E 型)分别测量换热管壁温、工质的饱和温度, 用精密压力表测量工质的饱和压力. 热电堆、热电偶和流量传感器测得的电势信号由 PS-2119 光电隔离卡转换成数字信号送入计算机. 运行数据采集软件, 每 8 s 对各个通道循环采

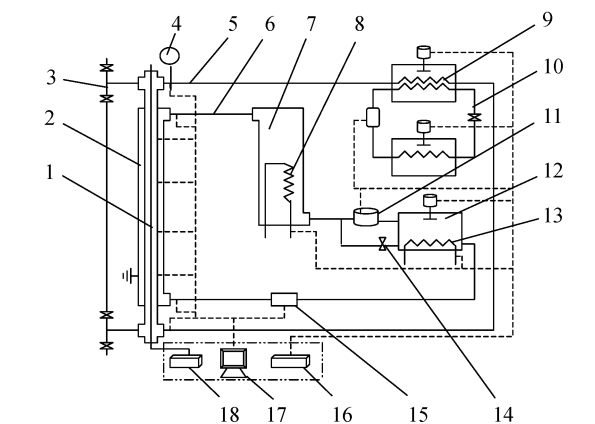


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus
1—electrode; 2—test section; 3—liquid level indicator;
4—pressure gauge; 5—refrigerant pipe; 6—water pipe;
7, 12—water tanks; 8, 13—electric heaters; 9—condenser;
10—refrigeration unit; 11—pump; 14—valve; 15—flow meter;
16—controller; 17—computer; 18—high voltage supplier

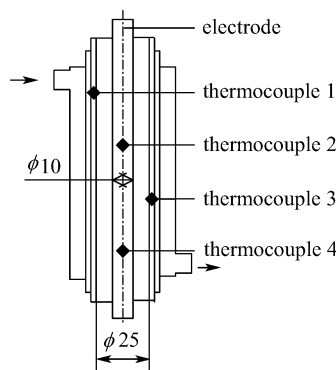


Fig. 2 Construction of test section
and layout of thermocouples

样一次, 并将电势信号分别转换为温度和流量显示在计算机屏幕上. 待系统达到稳定状态时计算机连续记录下实验数据, 并通过数据处理软件计算出过热度、热通量和传热系数等参数.

2 结果与讨论

2.1 电场强化效果

为表示 EHD 强化沸腾换热的效果, 定义 EHD 强化系数 α 为

$$\alpha = \frac{Nu_{EHD}}{Nu_0} = \frac{h_{EHD}}{h_0} \quad (1)$$

图 3 和图 4 分别给出了传热系数和强化系数在不同的热通量下与电场强度的关系. 由实验曲线可知, 在低热通量 ($1.5 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $3 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$) 情

况下, 当电场强度低于 $800 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ 时传热系数和强化系数随电场强度的增加而明显增大; 当电场强度高于 $800 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ 后, 传热系数增加变得平缓; 当电场强度为 $1333 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ 时传热系数和强化系数达到最大值, $1.5 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $3 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 热通量的最大强化系数分别为 2.1 和 1.7; 再增加电场强度, 传热系数则会逐渐降低。该实验结果表明, 对于 EHD 强化垂直管内沸腾换热, 高的电场强度不一定达到好的强化传热效果; 在给定的热通量条件下, 对于沸腾换热的强化, 存在着最佳的电场强度。

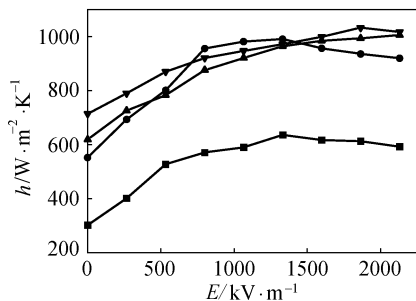


Fig. 3 Heat transfer coefficient versus electric field strength
 $q/\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$: ■ 1.5; ● 3; ▲ 5; ▼ 10

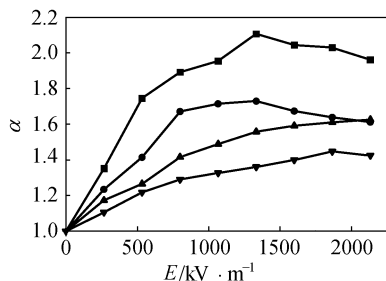


Fig. 4 Enhancement factor versus electric field strength
 $q/\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$: ■ 1.5; ● 3; ▲ 5; ▼ 10

在沸腾传热中, EHD 对传热的强化作用主要取决于电场力对气泡和汽液界面的作用, 单个气泡所受的电场力为^[5]

$$\mathbf{F}_b = 2\pi R^3 \epsilon_1 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} \nabla E^2 \quad (2)$$

由于气泡的介电常数 ϵ_2 小于液体的介电常数 ϵ_1 , 则 $\mathbf{F}_b$ 的方向指向电场强度降低的方向, 即气泡向电场强度降低的方向运动。

在本实验条件下, 电场强度为

$$\mathbf{E} = \frac{\phi}{r \ln(r_2/r_1)} \mathbf{r} \quad (3)$$

式中 $\mathbf{r}$ 是单位径向向量, 式 (2) 可以写为

$$\mathbf{F}_b = -4\pi \frac{R^3}{r^3} \frac{\epsilon_1(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} \left[\frac{\phi}{\ln(r_2/r_1)} \right]^2 \mathbf{r} \quad (4)$$

其方向为沿着半径指向换热表面。

气泡在换热表面上形成和成长过程中, 被电场力挤压在换热表面上, 并且产生变形 (如图 5 所示)。气泡变形导致: (1) 增加了气泡底部液体蒸发微层的面积; (2) 减小了蒸发微层的厚度, 降低了蒸发微层的热阻, 有利于微层内的传热; (3) 增加了气泡在热边界层中的比例和单位体积气泡的表面积。这 3 方面的原因使过热壁面向气泡传递热量的能力提高, 气泡成长的速率加快。同时, 作用于汽-液界面上的电场力降低了表面张力的作用^[6], 不但使所需的过热度降低, 而且使气泡的跃离直径减小, 气泡跃离频率加快。因此, 在施加外电场以后, 气泡数量增加, 使换热得到强化。

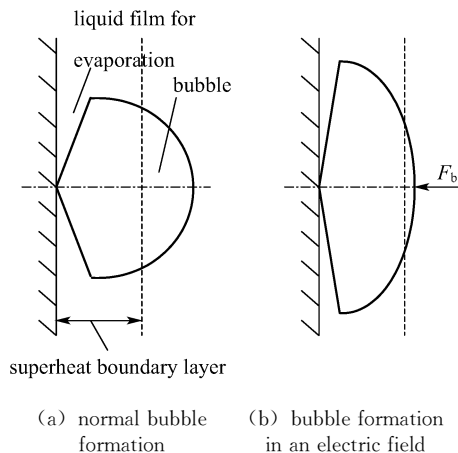


Fig. 5 Schematic diagram of bubble formation in electric field

在没有外加电场时, 气泡从换热表面上跃离后, 在浮升力和黏性阻力的作用下向管子中心的主流区运动。当存在电场时, 气泡被电场力压在换热表面上, 并在浮升力的作用下沿着换热表面上滑移。气泡在换热表面上滑移导致: (1) 破坏了液体热边界层, 降低了边界层的热阻; (2) 前方的过热液体不断地补充到气泡底部的蒸发微层内, 继续向气泡传递热量, 使气泡继续长大; (3) 大气泡将在换热壁面上分裂成小气泡, 使气泡的数量进一步增加。上述 3 方面的原因都使沸腾换热得到进一步强化。

沸腾产生的气泡对电场强度起到削弱作用^[7], 降低了换热表面附近的电场强度。在低热通量时, 产生的气泡数量少, 气泡对电场强度的影响较小,

电场对换热表面上及附近的气泡的作用比较明显。因此,当电场强度较低时,传热系数随着电场强度的增加而明显增加。但当电场强度过高时,电场力导致气泡变形过大或将过多的气泡压在换热表面上,液体蒸发后得不到充分补充,从而使液体与换热表面之间的接触面积减小,热阻增加,过热度增大,传热系数反而下降。图 6 为过热度在不同的热通量下与电场强度的关系。实验结果表明,对于低热通量 ($1.5 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $3 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$),当电场强度低于 $1333 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ 时过热度随着电场强度的增加而降低;当电场强度高于 $1333 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ 后,过热度随着电场强度的增加反而增大。可以看出,上述的分析与过热度随电场强度的变化规律是吻合的。

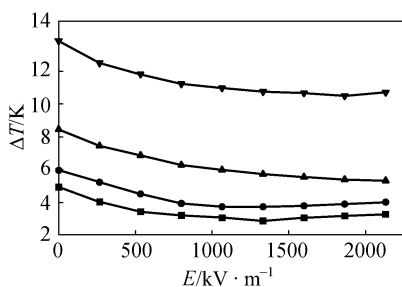


Fig. 6 Superheat degree versus electric field strength

$q/\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$: ■ 1.5; ● 3; ▲ 5; ▼ 10

比较图 3 和图 4 中的曲线可知,在给定的电场强度下,随着热通量的增加,沸腾换热强化效果下降。这主要是由于在高热通量情况下,工质的沸腾量较大,沸腾较为强烈,在没有外加电场时就有较好的传热效果,因而电场的强化效果相对较小;在高热通量时产生的气泡较多,对电场的削弱作用较大,降低了电场对换热表面处的气泡的作用,使强化换热效果下降。

2.2 电流

EHD 强化传热作为一种主动方式的强化传热方法,无疑高压电源要消耗一定的电能。在实验过程中,对每一个实验工况下外加电场的电流进行了测试。图 7 为电流在不同的热通量下与电场强度的关系。实验结果表明,当电场强度比较低时,电流随电场强度的增加而明显增加;当电场强度达到一定值后,电流随电场强度的增加而缓慢增加。比较图 7 中的曲线可知,在给定的电场强度下,电流随着热通量的增加而下降。这主要是由于随着热通量

的增加,沸腾产生的气泡数量增多,降低了整个工质的导电能力,电流减小。

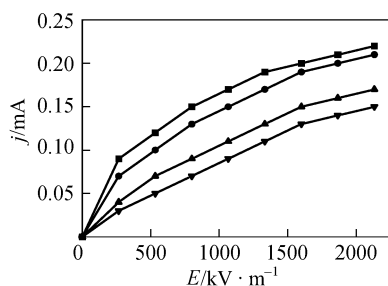


Fig. 7 Electric current density versus electric field strength

$q/\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$: ■ 1.5; ● 3; ▲ 5; ▼ 10

2.3 击穿电场强度与热通量的关系

当电场强度过高时,会将电极之间的工质击穿,造成实验工况不稳定以及设备寿命下降。图 8 为在本实验条件下外加电场的击穿强度与热通量的关系。实验结果表明,击穿电场强度随着热通量的增加而降低。这主要是由于随着热通量的增加,产生的气泡数量增多,削弱了工质的介电能力,导致击穿电场强度降低。

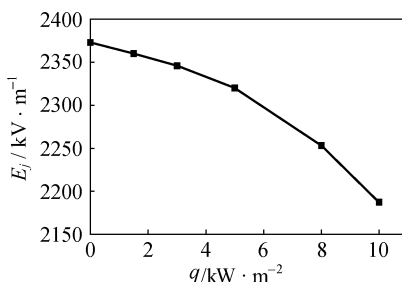


Fig. 8 Breakdown strength of electric field electric versus heat flux

3 结 论

(1) 外加电场对垂直管内沸腾传热具有强化作用,在本实验条件下,传热系数可增加到原来的 2.1 倍。

(2) 对于 EHD 强化垂直管内沸腾传热,高的电场强度不一定具有好的强化传热效果,存在着最佳电场强度。在低热通量情况下,当电场强度比较低时传热系数随电场强度的增加而增大;当电场强度达到一定值时,传热系数具有最大值,再增加电场强度,传热系数则反而降低。

(3) 低热通量的 EHD 强化效果高于高热通量的 EHD 强化效果。

(4) 通过对 EHD 强化垂直管内沸腾传热的机理分析, 作者认为: 气泡在换热表面上形成和成长过程中, 由于受电场力的挤压作用而变形, 提高了过热壁面向气泡传热的能力, 加快了气泡的成长速率, 并且使气泡跃离直径减小, 使传热得到强化; 气泡从换热表面上跃离后被电场力压在换热表面上, 并在浮升力的作用下沿着换热表面向上滑移, 使传热得到进一步的强化。

(5) 外加电场的电流随着电场强度的增加而增加, 随着热通量的增加而降低。击穿电场强度随着热通量的增加而降低。

符 号 说 明

- E ——电场强度, $V \cdot m^{-1}$
 H ——传热系数, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
 Nu ——Nusselt 数
 q ——热通量, $W \cdot m^{-2}$
 R ——气泡半径, m
 r_1 ——电极半径, m
 r_2 ——换热管内壁半径, m
 ϵ ——介电常数, $F \cdot m^{-1}$
 ϕ ——电势, V

下角标

EHD——存在外电场

0——没有外电场

1——液体

2——气泡

References

- 1 Li Ruiyang (李瑞阳), Shi Baihong (施伯红), Yu Hongling (郁鸿凌), Chen Zhihang (陈之航). Experimental Research for EHD Enhancement of Boiling Heat Transfer on a Horizontal Tube. *Journal of Engineering Thermophysics (China)* (工程热物理学报), 2000, **21** (1): 97—100
- 2 Yabe A, Mori Y, Hijikata K. Active Heat Transfer Enhancement by Utilizing Electric Fields. *Annual Review of Heat Transfer*, 1997, **7**: 193—244
- 3 Jones T B. Electrohydrodynamically Enhanced Heat Transfer in Liquids—a Review. *Advanced in Heat Transfer*, 1978, **14**: 107—148
- 4 Allen P H G, Karayiannis T G. Electrohydrodynamic Enhancement of Heat Transfer and Fluid Flow. *Heat Recovery Systems & CHP*, 1995, **15**: 389—423
- 5 Pohl H A. The Motion and Precipitation of Suspensoids in Divergent Electric Fields. *J Applied Physics*. 1951, **22** (7): 869—871
- 6 Allen P H G, Cooper P. The Potential of Electrically Enhanced Evaporators. In: Proc. 3rd Int. Symp. on the Large Scale Application of Heat Pumps. Oxford, UK, 1987. 221—229
- 7 Ogata J, Yabe A. Augmentation of Boiling Heat Transfer by Utilizing the EHD Effect-EHD Behavior of Boiling Bubbles and Heat Transfer Characteristics. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1993, **36** (3): 783—791

信息与交流

拜耳与莱昂德尔环氧丙烷/苯乙烯

合资项目投产

莱昂德尔化学公司和拜耳材料科学公司日前宣布, 两家公司合资在荷兰鹿特丹附近建设的世界级环氧丙烷/苯乙烯 (PO/SM) 装置已正式投产。

据报道, 这套装置采用莱昂德尔化学公司 PO/SM 专利技术, 是目前世界上最经济的工艺方法之一。该装置可年产环氧丙烷 28.5 万吨, 苯乙烯 63.5 万吨。

对于拜耳材料科学公司来说, 新装置的投产将可以确保其原料长期的稳定供应。

据统计, 2003 年世界环氧丙烷需求量约为 510 万吨。其中约 90% 用于多元醇、丙二醇及丙二醇醚生产, 其余部分则用于生产专用化学品, 如 1,4-丁二醇及其衍生物。

(摘自“中国化工信息网”)