

研究论文

电场分布对 R123 沸腾换热的影响

黄 焯, 李瑞阳, 郁鸿凌, 刘春艳
(上海理工大学动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 采用 6 种不同电极布置方式, 进行了不同电势和热流密度下的 R123 池沸腾换热的试验研究。通过数值分析, 计算了不同电极布置下换热面上的电场强度及分布。不同的电极布置, 会导致换热面上电场强度和电场均匀性两方面的变化。结合试验和电场分布的计算结果, 分析了电场均匀性、电场强度、热流密度与沸腾换热效果之间的关系。结果表明, 在低热流密度下, 电场分布对沸腾换热影响较大; 而在高热流密度下, 影响较小。电水动力学 (EHD) 强化换热效果是电场强度和电场均匀性综合作用的结果。

关键词: 电场分布; 电水动力学; 强化换热; 沸腾换热

中图分类号: TK 124

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2007) 08-1926-05

Effects of electric field distribution on R123 boiling heat transfer enhancement

HUANG Xuan, LI Ruiyang, YU Hongling, LIU Chunyan

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

Abstract: The effect of six different electrode arrangements on R123 pool boiling heat transfer was investigated. The resultant electric field intensities and distributions on the heat transfer surface were numerically calculated. Both electric field intensity and homogeneity on the heat transfer surface were different for different electrode arrangements. It was found that heat transfer enhancement was related to electric field homogeneity, electric field intensity and heat flux. At a lower heat flux, heat transfer was enhanced more significantly than at a higher heat flux. Meanwhile the higher the electric potential, the more significant the heat transfer enhancement. Electro-hydrodynamics (EHD) boiling heat transfer enhancement was the result of both electric field intensity and homogeneity.

Key words: electric field distribution; EHD; heat transfer enhancement; boiling heat transfer

引 言

EHD (electro-hydrodynamics) 强化换热技术是一种新型的强化换热技术, 它利用电场、流场和温度场的相互作用来强化换热。EHD 技术在一般情况下, 可使沸腾换热系数提高 2~10 倍。EHD 强化沸腾换热的机理比较复杂, 影响因素很多, 其

中电场分布是影响沸腾换热的一个重要因素。目前大量的研究集中在改变电极的形状和布置上^[1-9], 用于提高换热效果。不同的学者采用的都是非均匀电场, 认为非均匀电场的强化效果较好。然而, 到目前为止, 电场分布对 EHD 强化沸腾换热的影响规律的研究尚停留在定性分析上, 尚无人对此进行深入的研究, 因此无法确定什么是最优的电场分

2006-09-12 收到初稿, 2006-11-14 收到修改稿。

联系人及第一作者: 黄焯 (1973—), 女, 博士, 副教授。

基金项目: 上海理工大学博士启动基金项目。

Received date: 2006-09-12.

Corresponding author: HUANG Xuan, associate professor.

E-mail: huangxuan_2001@citiz.net

布，从而无法确定最佳的电极结构和布置方式。只有充分了解电场分布对 EHD 强化沸腾换热的影响规律，才可能真正揭示 EHD 强化沸腾换热的机理，从而发展较为完整的理论。

优化电极的实质就是改变电场的分布。因此，研究电场分布对 EHD 强化沸腾换热的影响无疑具有理论和实际意义，而且电场的分布应从一般性规律研究出发，进行均匀电场和非均匀电场的对比及趋势研究，探讨电场分布对强化效果的影响，这就是本文工作的目的所在。

由于环保的要求，使用 CFC 替代物成为国际社会共同关注的问题。目前，除混合工质外，HCFC-123 (R123) 是 CFC-11 最有希望的替代工质。R123 的电荷松弛时间为 8.9×10^{-4} s，远远小于气泡跃离时间（一般为 0.017 s^[10]），在一般情况下，电荷松弛时间小的电介质的电场强化效果要高于电荷松弛时间大的电介质的电场强化效果^[11]。此外，R123 在常温下压力不高，成为本试验首选的试验工质。

1 试验装置

1.1 试验系统

试验系统主要由 5 部分组成：本体部分、冷却系统、高压电发生系统、测量系统和控制系统。如图 1 所示。

本体部分包括沸腾室（下箱体）、冷凝室（上箱体）和两根连接管。工质在沸腾室加热沸腾，产生的气相工质经连接管上升至冷凝室，在冷凝管束外冷凝为液体后经连接管回到沸腾室，这样沸腾室、冷凝室和连接管组成了一个自然循环回路。

测试部件结构如图 2 所示，铜板为换热面，在铜板内部装有电加热器以提供加热的热量。铜板安放在绝缘、绝热的环氧树脂底座中，在环氧树脂板与铜板间铺有云母片，铜板与环氧树脂板间以环氧树脂胶密封，使铜板只能单向向上表面传热。高压电极平行于换热面，可以调节支撑杆的长度来改变高压电极与换热面的距离。

电极布置采用了网状电极和线状电极，如图 3 所示。忽略边界条件的影响，认为本试验中的网格-平板电极结构产生的电场为均匀电场。非均匀电场采用了 5 种不同的线状电极布置方式，在多根线状电极的布置中，铜丝之间相互平行，其间距可调。具体电极结构参数见表 1。

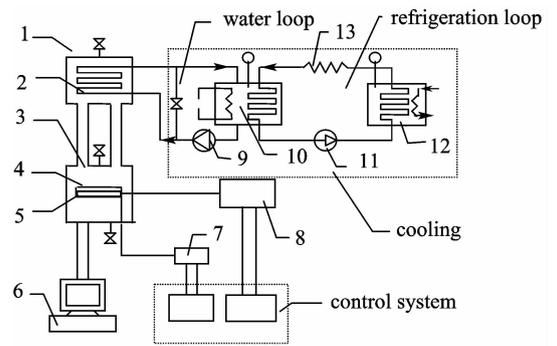


图 1 试验系统图

Fig. 1 Schematic of experimental system

- 1—cooling chamber; 2—condensing tubes;
- 3—boiling chamber; 4—mesh electrode; 5—brass plate;
- 6—computer; 7—high-voltage supplier;
- 8—variable transformer; 9—water pump;
- 10—heat exchanger; 11—compressor;
- 12—condenser; 13—capillary

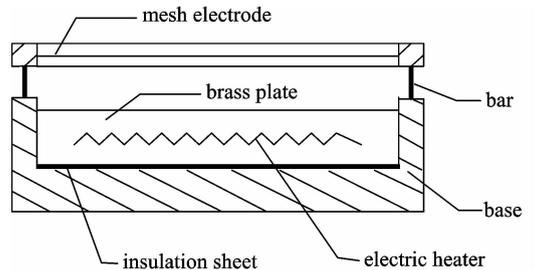
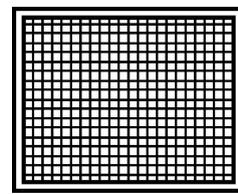
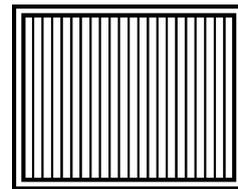


图 2 测试部件结构

Fig. 2 Schematic of test section



(a) electrode of uniform electric field



(b) electrode of non-uniform electric field

图 3 电极结构

Fig. 3 Layout of electrodes

1.2 试验工质和工况

工质 R123，其标准大气压下对应的饱和温度

表 1 电极结构的参数

Table 1 Layout of different electrodes

Electric field	Material	Number	d_w /mm	d_e /mm
uniform	brass mesh	—	—	28
non-uniform 1	brass wire	23	10	28
non-uniform 2	brass wire	11	20	28
non-uniform 3	brass wire	7	30	28
non-uniform 4	brass wire	5	50	28
non-uniform 5	brass wire	1	—	28

为 27.8℃。试验在表压为 101 kPa 的系统压力下进行，试验过程中控制工质的饱和压力相对稳定，由于实际试验时压力略微有所波动，液体的饱和温度基本控制在 27.80~28.10℃ 之间。试验中采用的高压电压分别为 0、5、10、15 和 20 kV，热流密度的范围为 2~25 kW·m⁻²。

2 数据处理

平板表面的沸腾换热系数 h 由加热量 Q 、平板表面积 A 、平板表面平均壁温 T_w 和液体主体温度 T_l 来计算

$$h = \frac{Q}{A(T_w - T_l)} \quad (1)$$

式中 平板表面积 A 近似等于 0.0438 m²，平板加热量可由自耦变压器输出的电压 U 和电流 I 求得。

为了比较在某一试验工况下有电场作用的换热系数与无电场作用的换热系数的大小，定义了一个 EHD 强化系数 f ，即

$$f = \frac{Nu_{EHD}}{Nu_0} \quad (2)$$

它能直接而真实地反映外加电场对换热系数强化的效果。

3 不同电场分布强化沸腾换热效果的综合比较

试验结果表明，相同工况下，施加的电压越高，其强化的换热系数越大，不同的电极结构中，最大的强化系数均在 20 kV 的电压下获得。

图 4 给出了不同电场布置在 20 kV 电压的作用下的 EHD 强化系数和热流密度的关系。在低热流密度下，电场分布对沸腾换热影响较大；而在高热流密度下，影响较小。从整体上看，热流密度 $q \leq 12$ kW·m⁻² 时，强化效果最好的是非均匀电场 1，然后是均匀电场和非均匀电场 3，其次是非均匀电场 2 和 4，强化效果最差的是非均匀电场 5。在均

匀电场和非均匀电场 1~5 六种不同电场分布中所获得的最大强化系数分别为 4.51、5.85、5.55、4.78、4.69 和 1.79。

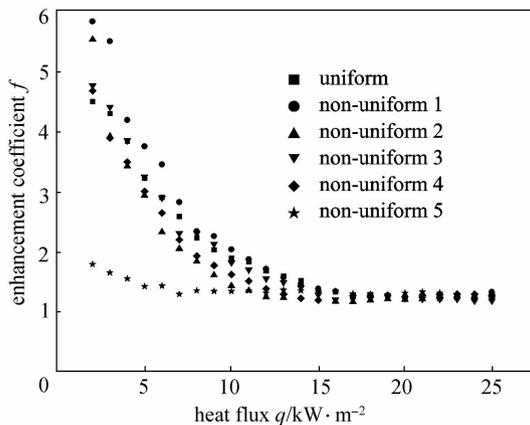


图 4 20 kV 电压下强化系数与热流密度的关系

Fig. 4 Relation of enhancement coefficient with heat flow under 20 kV

4 电场分布对 EHD 强化沸腾换热的影响分析

从上述的试验结果看，施加相同的电压，不同的电极结构会产生不同的换热面平均场强，带来不同的换热效果，说明电场分布是影响沸腾换热效果的重要因素。作者曾提出不同的电极结构会影响换热表面附近的电场强度和电场均匀性，从而影响换热效果^[12]，下面结合电场分析和试验结果来证明此结论。

4.1 电场分布对电场强度的影响

图 5 为 5 kV 的电压下，换热面上的最大、平均、最小电场强度，为方便起见，横坐标的 1、2、3、4、5、6 分别代表均匀电场、非均匀电场 1、2、3、4、5 的电极结构。从图中可以看出，在这 6 种电极结构中，均匀电场的场强最大，非均匀电场 1 的平均场强略低于均匀电场，随着非均匀电场中线状电极的减少，电场强度迅速下降，在非均匀电场 5 中的平均场强仅为 22786 V·m⁻¹。

各种研究表明，电场强度的大小会影响作用在单相流体和气泡上的电场力^[13-15]，从而影响换热效果。对于同一电极结构，在一定的电场强度范围内，提高电压即增加电场强度会带来较好的强化换热效果。由于均匀电场中换热面上的电场强度最大，应得出均匀电场的强化作用最强的结论，而事实并非如此，从试验上看非均匀电场 1 的总体强化

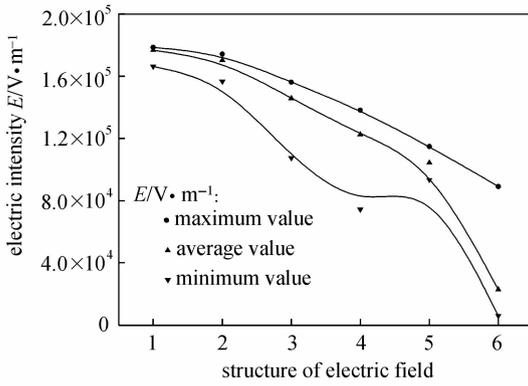


图 5 5 kV 电压下换热面上的电场强度
Fig. 5 Electric field intensity under 5 kV

效果最好，因此电场均匀性的作用要一并考虑。

4.2 电场均匀性和电场强度的综合影响

在本试验的电极结构中，电场强度越大，非均匀性越小，因此电场的强化效果是两者的综合结果。

从图 6 上看，非均匀电场 1 的电场强度与均匀电场接近，只是非均匀度较大，非均匀性的影响使得非均匀电场 1 的强化效果较好。由于均匀电场的电场强度较大，所以也取得了较好的强化效果。非均匀电场 2~4 的电场强度明显下降，使其强化效果小于非均匀电场 1 和均匀电场，但是在非均匀电场 2~4 中，其强化换热的效果差别不大，说明电场的非均匀性弥补了由电场强度下降带来的作用。而非均匀电场 5，由于其场强明显低于其他电场，其换热效果也最差。

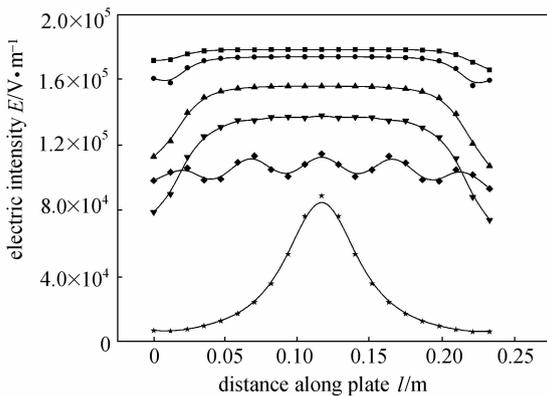


图 6 各个电极结构中 5 kV 电压下
换热面上的电场分布

Fig. 6 Electric distributions of different
electrodes along plate under 5 kV

■ uniform; ● non-uniform 1; ▲ non-uniform 2;
▼ non-uniform 3; ◆ non-uniform 4; ★ non-uniform 5

5 结 论

结合机理分析和本文试验工况下得到的试验结果，得到以下结论。

(1) 施加高压电场可以显著提高 R123 的池沸腾换热系数。在低热流密度范围内，强化效果较好。当电压为 20 kV、热流密度 $q \leq 12 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 时，6 种不同的电场分布分别获得了 4.51、5.85、5.55、4.78、4.69 和 1.79 的最大强化换热系数。

(2) 电场强度的大小，直接影响强化换热的效果。场强越大，强化效果越好。施加电压的大小决定了电场强度的大小。本文实验中分别施加了 5、10、15 和 20 kV 的高压电，6 种电场分布均在 20 kV 时，得到了最大的强化效果。

(3) 电场分布从换热面上的电场强度大小和均匀性两方面影响换热的效果。虽然在相同电压作用下，均匀电场的场强最大，但在本文试验中，最大的强化效果是在间距 10 mm 的线状电极布置情况下获得的，其场强略小于均匀电场的场强。而其他电极布置的非均匀电场，由于场强较小，强化效果没有均匀电场的好。

符 号 说 明

- A——表面积， m^2
- d_e ——高压电极与零电极之间的距离，mm
- d_w ——线电极之间距离，mm
- E——电场强度， $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$
- f——强化系数
- h——换热系数， $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}$
- I——电流，A
- Nu——Nusselt 数
- Q——传热量，W
- q——热流密度， $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$
- U——电压，V

下角标

- EHD——有电场
- l——液体
- w——壁面
- 0——无电场

References

[1] Singh A, Ohadi M M, Dessiatoun S. EHD-enhanced boiling of R-123 over commercially available enhanced tube. *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, 1995, **117**: 1070-1073

[2] Doek S, Kwak H Y. A study of bubble behavior and boiling

- heat transfer enhancement under the electric field. *Heat Transfer Engineering*, 2000, **21**: 33-45
- [3] Li Ruiyang (李瑞阳), Shi Bohong (施伯红), Yu Hongling (郁鸿凌). Experimental research for EHD enhancement of boiling heat transfer on a horizontal tube. *Journal of Engineering Thermophysics* (工程热物理学报), 2000, **21** (1): 97-100
- [4] Karayiannis T G, Xu Y. Electric field effect in boiling heat transfer. Part A: Simulation of the electric field and electric forces. *J. Enhanced Heat Transfer*, 1998, **5** (4): 217-229
- [5] Karayiannis T G, Xu Y. Electric field effect in boiling heat transfer. Part B: Electrode geometry. *J. Enhanced Heat Transfer*, 1998, **5** (4): 231-247
- [6] Cheung K H, Ohadi M M, Dessiatoun S, *et al.* EHD-enhanced boiling coefficients and visualization of R134a over enhanced tubes. *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, 1997, **119**: 332-338
- [7] Doek S, Kwak H Y. A study of bubble behavior and boiling heat transfer enhancement under the electric field. *Heat Transfer Engineering*, 2000, **21**: 33-45
- [8] Ogata J, Yabe A. Basic study on the enhancement of nucleate boiling heat transfer by applying electric fields. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1993, **36** (3): 775-782
- [9] Paschkewitz J S, Pratt D M. Electrichydrodynamic (EHD) heat transfer enhancement in an aviation working fluid: effect of electrode material and polarity. *J. Enhanced Heat Transfer*, 2000, **7**: 371-383
- [10] Karayiannis T G. EHD boiling heat transfer enhancement of R-123 and R11 on a tube bundle. *Applied Thermal Engineering*, 1998, **18**: 809-817
- [11] Li Ruiyang (李瑞阳), Chen Laibao (陈赅宝), Chen Zhihang (陈之航), *et al.* Mechanism analysis on EHD enhancement of heat transfer. *J. East China University of Technology* (华东工业大学学报), 1996, **18** (4): 5-12
- [12] Huang Xuan (黄烜). The effects of electric field distribution on boiling heat transfer enhancement [D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2005
- [13] Pohl H A. Dielectrophoresis—the Behavior of Neutral Matter in Nonuniform Electric Field. Cambridge: Cambridge University Press, 1978
- [14] Karayiannis T G, Collins M W, Allen P H G. Electrichydrodynamic enhancement of nucleate boiling heat transfer in heat exchangers. *J. Chem. Commun.*, 1989, **81**: 15-24
- [15] Winer M. An experimental study of the influence of nonuniform electric field on heat transfer in a dielectric fluid; TRW Systems Report [R]. No EM17-14, 1967