

研究论文

外加电场对弱导电工质管外沸腾传热强化的实验研究

李瑞阳 黄 烜 郁鸿凌

(上海理工大学热能与环境工程研究所, 上海 200093)

摘 要 针对化工过程和能源工程中常遇到的弱导电工质, 通过施加一高压直流电场进行管外沸腾传热的强化实验, 得出了外加电场电压、热流密度与沸腾换热系数及强化系数之间的规律。比较分析了工质不同组分对电流体动力学(EHD)强化效果的影响, 并对外加电场的功耗进行了分析, 为探索 EHD 强化沸腾换热的机理以及将其推广到工程应用中提供了一定依据。

关键词 强化传热 沸腾传热 弱导电工质 电场

中图分类号 TK 124

文献标识码 A

文章编号 0438-1157(2003)06-0743-06

ENHANCEMENT OF INSERTED ELECTRIC FIELD ON BOILING HEAT TRANSFER OUTSIDE TUBE WITH WEAK ELECTRIC CONDUCTION FLUID

LI Ruiyang, HUANG Xuan and YU Hongling

(Institute of Thermal and Environmental Engineering, University
of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract An experimental study on the enhanced boiling heat transfer outside a tube with weak electric conduction fluid was conducted by inserting a electric field in the fluid. Relationships among high electric field voltage, heat flux, heat transfer coefficient and enhancement factor were obtained. The efficiency of EHD (electrohydrodynamics) enhancement for R11 and the different proportion mixture of R11 with R134a was analyzed. Analysis of consumption of the supplied electric field was carried out. The results have laid a foundation for exploring mechanism of EHD enhancement of boiling heat transfer and its practical application in engineering.

Keywords heat transfer enhancement, boiling heat transfer, weak electric conduction fluid, electric field

引 言

在化学工程和能源利用工程中, 如何提高各种工质的换热效率, 是广大工程技术人员面临的非常实际的问题。以往传统的传热强化方法如扩展表面方法、流体扰动法等被动传热强化方法虽然取得了一定的效果, 但一方面其强化效果较为有限, 另一

方面会较大地增加设备的投资和运行费用, 因此有必要探索新的传热强化方法。

EHD (electrohydrodynamics, 电流体动力学) 强化传热技术是一种主动强化传热方法。它利用电场、流场和温度场的相互作用达到强化传热的目的。实际上, 流体中施加的电场对传热的强化效果早在1916年就被发现, 并由英国学者Chubb申

2001-10-15 收到初稿, 2002-01-10 收到修改稿。

联系人及第一作者: 李瑞阳, 男, 46岁, 博士, 教授。

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(No. G2000026302)及上海理工大学青年科研基金项目。

Received date: 2001-10-15.

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).

请了专利^[1]。但该现象一直未引起人们的注意,直到 1960 年 Bochirrol 等人^[2]首次发表了 EHD 强化沸腾换热的定量结果。由于太阳能、地热能、制冷系统、余热利用工程及化学工程等领域对小温差传热强化的要求,高压电技术的安全使用以及人们对 EHD 强化传热技术优越性的逐步了解,EHD 强化传热技术渐渐引起人们的重视,一些发达国家先后开展了 EHD 强化沸腾传热的研究,特别是近 10 年来有了较大发展,取得了不少成果。1995 年 Allen 等人^[3]对 EHD 强化传热做了综述,首次概括了 EHD 强化传热的机理,指出 EHD 对传热的强化作用的实质来源于电场力对流体的作用,并对流体所受的电场力进行分析。在两相传热中,由于存在汽液界面,EHD 现象更为复杂,电场力对汽液界面的扰动是引起传热强化的重要因素。多年来,国内外学者为探索 EHD 强化传热的机理做出了不懈的努力,也取得了不少进展^[4~7],对其定性的强化效果基本达到共识。但是到目前为止,一方面 EHD 强化传热的机理未能完全揭示,虽然不同的学者提出了各自的分析结果,但这些结果无法用统一的理论来解释和描述,也无法解释所有现象,而且有些理论还存在矛盾之处^[8,9];另一方面,从实验研究上,实验的范围并没有覆盖工程应用的不同条件,尚未有一个公认的、描述 EHD 强化传热的可供实际应用的关系式,从而未能真正应用于工程实际^[10~14]。

EHD 强化传热技术最适用的工质是弱导电工质,在化学工程以及制冷、空调和热泵等能源利用领域中大量遇到的恰恰也是弱导电工质,因此该种传热强化方法在以上领域有着广泛的应用前景。针对工程实际应用,本文采用管外沸腾传热过程进行基础实验研究,工质采用低沸点弱导电的 R11 以及 R11 与较低含量的有较高沸点的 R134a 组成的非共沸混合物,外加电场的电压范围为 0~27 kV。

1 实验装置

实验装置如图 1 所示,主要由沸腾室、冷凝室、测试部件、高压电系统、水回路和制冷系统组成。工质在沸腾室受热沸腾,产生的汽相工质经箱体间的连接管上升至冷凝室,汽相在冷凝管束外冷凝为液体回到沸腾室,这样沸腾室、冷凝室和连接管组成了一个自然循环回路。沸腾室和冷凝室的大

小均为 250 mm×250 mm×400 mm,沸腾室内安有测试部件。

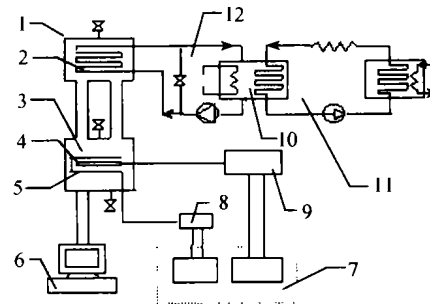


Fig.1 Schematic of experimental system of EHD enhancement of boiling heat transfer

- 1—cooling chamber; 2—condensing tubes; 3—boiling chamber;
4—test tube; 5—electrodes; 6—computer; 7—control system;
8—high voltage supply; 9—variable transformer;
10—heat exchanger; 11—cooling system; 12—water loop

测试部件由换热管和电极组成,换热管为外径 25 mm 的光滑铜管,管外均匀分布 6 根 2 mm 粗的铜丝作为高压电极,电极距管壁的距离为 5 mm,其布置如图 2 所示。电极接高压电源的正极,换热管接地形成 0 电位。采用的高压电源为直流电,最大输出电压为 5 kV,电流为 2 mA。

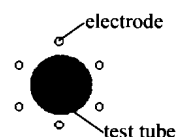


Fig.2 Configuration of test tube and electrodes

换热管管长 400 mm,每根管内安有电加热器以提供热量。为了使电加热器与换热管均匀接触以方便安装热电偶,在换热管和电加热器之间安装一个铜制内管,内管沿管长在外表面上开了 3 根槽,槽沿外表面间隔 90°布置,用来安装热电偶。内管与外管之间用焊锡封死,以防接触热阻过大。测试管结构及温度测点的布置如图 3 所示。

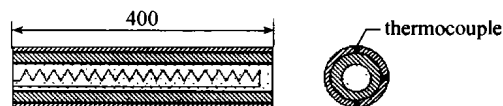


Fig.3 Configuration of test tube and locations of thermocouples

2 实验结果

本实验采用 R11 及 R11 与 R134a 不同比例的

混合物为工质, 以外加电场电压和热流密度的变化为基础进行了一系列实验. R134a 在常温下的压力较 R11 高得多, 两者在 25 °C 下对应的压力分别为 105.62 kPa 和 665.27 kPa. 一方面考虑系统的安全性, 同时也仅仅揭示制冷剂中掺微量的其他组分工质对 EHD 强化沸腾传热的影响, 在混合工质实验中使用 R134a 的含量很低, 占总质量的比例分别为 0.54%、1.00%、1.49% 和 2.05%, 为方便起见, 以混合比表示 R134a 与 R11 的质量比, 具体工质成分见表 1. 实验中采用的热流密度范围为 2~10 kW·m⁻², EHD 施加的最高电压低于工质的击穿电压, 其范围为 0~27 kV.

Table 1 Ingredients of working fluid in experiment

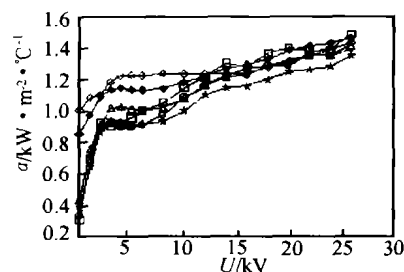
R11/kg	R134a/kg	R134a·R11 ¹ /%
31.454	0	0
31.454	0.172	0.5
31.454	0.317	1.0
31.454	0.477	1.5
31.454	0.659	2.1

2.1 电场强化的效果

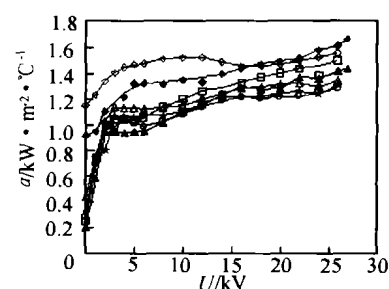
为了比较在某一实验工况下有、无电场作用的换热系数的大小, 定义 EHD 强化系数 f , 即

$$f = \frac{Nu_{EHD}}{Nu_0} = \frac{\alpha_{EHD}}{\alpha_0}$$

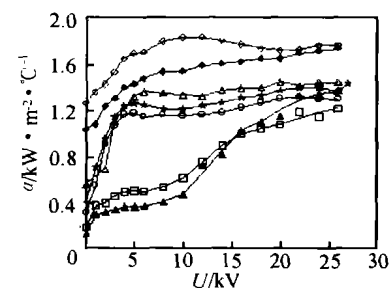
式中 Nu 为 Nusselt 数, α 为换热系数, 下角标 0 表示无电场. f 能直接而真实地反映外加电场对换热系数强化的效果. 图 4、图 5 分别给出了不同组分的工质在不同热流密度下电场电压 U 与 α 及 f 的关系. 由图中的实验曲线可看出, 总体上换热系数随 EHD 电压提高而提高, 但是对不同工质(单工质和不同比例的混合工质)、不同热流密度, 换热系数随电压提高的幅度变化的趋势有很大的不同. 对于 R11 以及混合比为 0.5% 的混合工质, 低热流密度时加上较低的电压(1~3 kV)就可使换热系数有明显的提高, 随后换热系数没有明显变化(略微有所下降), 在 8 kV 左右换热系数又随电压迅速提高. 对于另外 3 种比例的混合工质, 在低热流密度时的曲线与 R11 有明显不同, 电压大于 10 kV 换热才有明显提高. 无论对单工质还是不同比例的混合工质, 在高热流密度下曲线变化趋势相近, 换热系数变化不大.



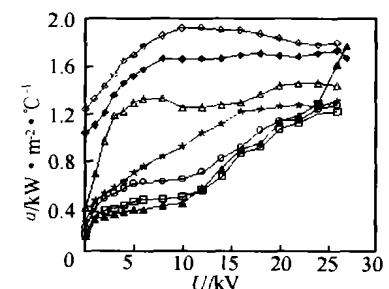
(a) working fluid: R11



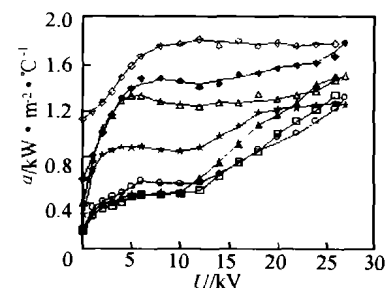
(b) working fluid: R11 99.46%; R134a 0.54%



(c) working fluid: R11 99.00%; R134a 1.00%

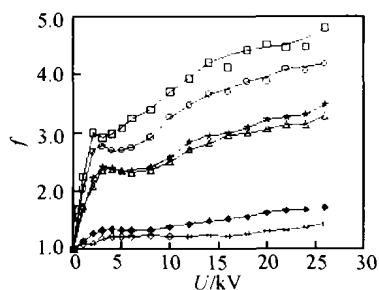


(d) working fluid: R11 98.51%; R134a 1.49%

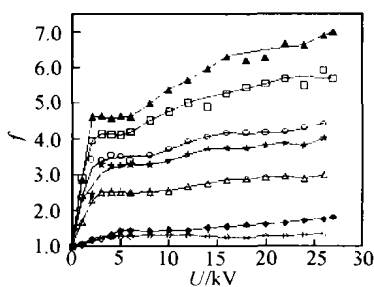


(e) working fluid: R11 97.95%; R134a 2.05%

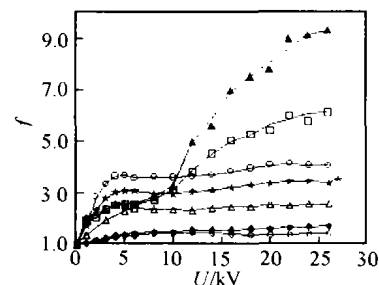
Fig.4 Relationship between α and U at different heat fluxes
heat flux/kW·m⁻²: ▲ 2; □ 3; ○ 4; * 5; △ 6; ◆ 8; ◇ 10



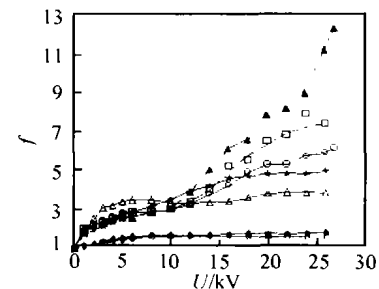
(a) working fluid: R11



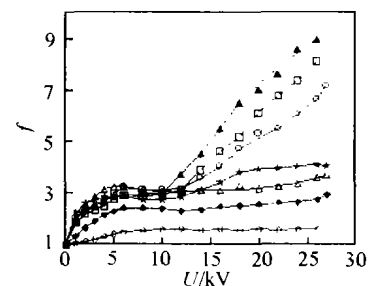
(b) working fluid: R11 99.00%; R134a 0.54%



(c) working fluid: R11 99.00%; R134a 1.00%



(d) working fluid: R11 98.51%; R134a 1.49%



(e) working fluid: R11 97.95%; R134a 2.05%

Fig.5 Relationship between f and U at different heat fluxes
heat flux/ $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$: $\blacktriangle$ 2; $\square$ 3; $\circ$ 4; $*$ 5; $\triangle$ 6; $\blacklozenge$ 8; $\diamond$ 10

找到电压对各种工质沸腾传热强化的影响规律,就可以在工程实际应用中的工况范围内确定强化效果最佳的电压。

2.2 热流密度对 EHD 强化的影响

图 4、图 5 均表明 EHD 对低热流密度单管外沸腾传热有着较好的强化效果,在电场的作用下低热流密度时换热系数的增加明显高于高热流密度下换热系数的增加。对于某些工质,加上较低的电压就可使低热流密度的换热系数有明显提高。如 R11 在热流密度 $4 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, 2 kV 的电压使换热系数由无电场的 $0.33 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ 升至 $0.89 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$, 强化系数为 2.67; 而热流密度为 $8 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, 2 kV 的电压使换热系数由无电场的 $0.86 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ 升至 $1.09 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$, 强化系数仅为 1.27。对于不同的热流密度, 无电场时换热系数的差别较大, 而在高电压下换热系数的差距减小。对于混合比为 0.5% 的混合工质, 曲线的变化规律与工质 R11 相似。但是对于其他 3 种比例的混合工质, 如图 4 及图 5 中 (c)、(d)、(e) 所示, 在低热流密度时, 在低范围的电压下 (小于 10 kV) 换热系数随电压的升高增加缓慢, 在某一电压 (10 kV 左右) 下换热系数随电压的提高迅速提升。

为了直观地表示热流密度对 EHD 强化效果的影响, 将每种工质在不同热流密度下的最大强化系数 $f_{\max}$ 作成图 6。可以看出, 低热流密度时, 各种组分工质的强化效果均较好; 热流密度为 $2 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, 混合比为 1.5% 的混合工质的强化系数高达 12.20; 热流密度分别为 3、4 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, 混合比为 2.1% 的混合工质的强化效果最好, 强化系数分别为 8.11、7.13; 在 $5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 的热流密度下, 各种工质强化系数的差别开始减小; 高热流密度下, 各种工质的强化系数比较接近。高热流密度时, 管壁外沸腾传热强烈, 生成的气泡较多, 气泡的运动会对壁面流体产生扰动, 一方面破坏了管壁表面的热边界层, 另一方面可使周围较冷的液体补充到管壁表面, 从而使本身传热效果较好, 在无电场作用时换热系数较高, 这样电场对传热的强化效果相对减弱。从上述实验结果可以看出, 外加电场对原本传热效果较差的场合有明显的传热强化效果, 而对原本传热效果较好的情况强化的程度较弱。EHD 可以提高较差传热条件的传热效果, 这在工程实际应用中具有重要意义。

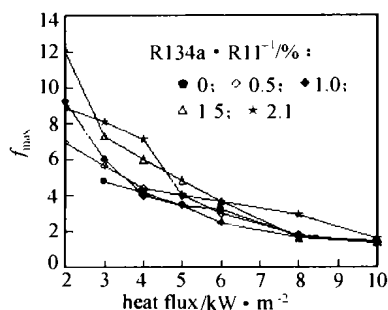


Fig.6 Maximum enhancement factor at various heat fluxes

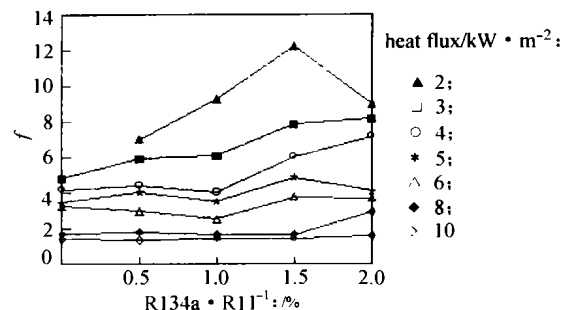


Fig.7 Maximum enhancement factor at various working fluids

2.3 混合工质的混合比对 EHD 强化的影响

工质的性质对 EHD 强化效果的影响非常明显. 由于在工程中广泛应用混合工质, 有必要对混合工质进行 EHD 强化传热的研究. 本实验中采用 R11 与 R134a 的非共沸混合工质.

非共沸混合工质的换热系数比纯工质低得多, 某种工质在非共沸工质中的比例越大, 非共沸工质的换热系数就越接近该种工质的换热系数. 在本实验采用的非共沸混合工质中工质 R11 的比例非常大, 所以混合工质的沸腾换热系数比以 R11 为单工质的沸腾换热系数稍低, 但非常接近. 如在热流密度为 $3 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 且无电场时, 工质 R11 在单管外沸腾换热系数为 $0.31 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, 混合比分别为 0.5%、1.0%、1.5% 和 2.1% 的混合工质的单管外沸腾换热系数分别为 0.25、0.20、0.16、0.16 $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, 可见随着 R134a 成分的升高换热系数下降. 而在电场的作用下混合工质的换热系数明显提高, 当电压为 26 kV 时, 工质 R11 的沸腾换热系数为 $1.48 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, 强化系数为 4.79; 混合比分别为 0.5%、1.0%、1.5% 和 2.1% 的混合工质的沸腾换热系数分别为 1.44、1.20、1.20、1.32 $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, 强化系数分别为 5.9、6.0、7.3、8.1. 虽然在电场的作用下非共沸混合工质的沸腾换热系数没有超过单工质 R11 的沸腾换热系数, 但是混合工质沸腾换热系数提高的幅度大于单工质, 即强化系数比单工质对应的高. 图 7 表示工质不同组分对 EHD 强化效果的影响. 总的来说, 混合工质的强化效果优于单工质 R11, 混合比高于 1.5% 的混合工质的强化系数比单工质 R11 的强化系数有明显提高.

2.4 单管实验外加电场耗电量的比较

EHD 强化沸腾传热是一种主动的强化传热方法, 需要消耗一定的能量, 有必要进行 EHD 耗能

的比较. 由 EHD 电耗量公式 $Q_{\text{EHD}} = UI$ 可看出, EHD 电耗量是电压和电流的函数. 在单管外沸腾换热 EHD 强化实验中, 高压电的范围为 0~27 kV, 所对应高压电电流的范围为 0.07~0.2 mA, 而且高压电电流随热流密度、EHD 电压以及 R134a 含量的提高略微有所提高. 在 20 kV 电压下, 随热流密度的提高, 以 R11 为工质的实验中高压电电流由 0.07 mA 升至 0.1 mA, 混合比为 0.5%、1.0%、1.5%、2.1% 的混合工质在实验中高压电电流分别由 0.08 mA 升至 0.12 mA、0.1 mA 升至 0.18 mA、0.11 mA 升至 0.2 mA、0.11 mA 升至 0.2 mA. 外加电场消耗的电能比起管子的传热量微不足道, 最大为 5.2 W, 仅占传热量的 1.7%, 所以高压电场的能源消耗可忽略不计.

图 8 给出混合比为 1.0% 的混合工质在热流密度分别为 2、5、10 $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 时高压电源电耗量与外加电场电压、热流密度的关系. 由图可见, 外加电场耗电量主要与电压有关, 随着电压的上升而上升, 电压为 10 kV 后电耗量增加较快. 热流密度提高所消耗的 EHD 能耗也略微有所提高.

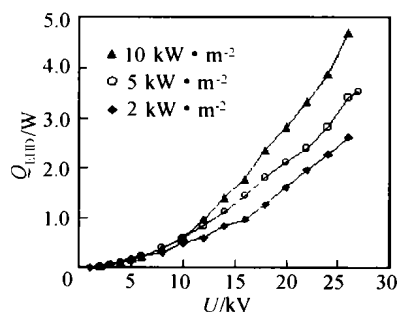


Fig.8 EHD power consumption at various applied high voltages and heat fluxes

(working fluid: R11 99.00%; R134a 1.00%)

3 结 论

(1) 外加高压电场对水平单管外沸腾传热有非常显著的强化效果, 从本实验的结果上看, 最大强化系数为 12.20, EHD 技术能成倍地提高沸腾换热系数, 在强化沸腾传热领域有很好的应用前景。

(2) 低热流密度下的 EHD 强化效果明显高于高热流密度下的强化效果, 热流密度高于一定值后几乎没有强化效果。在实际应用中要确定 EHD 适用的热流密度。EHD 对低热流密度下的传热有很好的效果, 这对强化小温差传热, 使之在较小的过热度下实现强烈沸腾, 克服小温差传热的不利因素有着重要的意义。

(3) 总的来说, 随着电压的升高换热系数提高。但是对于不同的工质、不同的热流密度, 换热系数与电压关系曲线呈现不同的趋势。

(4) 工质的性质对电场的强化效果有很大的影响。从本实验来看, 电场对单工质 R11 的强化效果相对较差, R11 的最大强化系数为 4.79。在 R11 中加入少量 R134a 后, 改变了电参数, 大大提高了沸腾传热的强化系数, 使沸腾换热强化系数最高达 12.20。

(5) EHD 强化沸腾换热中高压电源的电能消耗很低, 相对换热量可忽略不计。

References

- 1 Chubb L W. UK 100796. 1916
- 2 Bochirol L, Bonjour E, Weil L. Exchanges Thermiques-Etude de l'action de Champs Electriques Sur Les Transferts de Chaleur Dans Les Liquides Bouillants. C. R. Heb. des Seances de l'Acad. Sciences (Weekly Seances of the Academy of Sciences) (Paris) 1960, 250: 76—78
- 3 Allen P H G, Karayiannis T G. Electrohydrodynamic Enhancement of Heat Transfer and Fluid (Review Paper). *Heat Recovery System & CHP*, 1995, 15(5): 389—423
- 4 Pohl H A. Dielectrophoresis-the Behavior of Neutral Matter in Nonuniform Electric Field. Cambridge: Cambridge University Press, 1978
- 5 Marco P D, Grassi W. Saturated Pool Boiling Enhancement by Means of an Electric Field. *Enhanced Heat Transfer*, 1993, 1: 99—114
- 6 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
- 7 Karayiannis T G, Xu Y. Electric Field Effect in Boiling Heat Transfer. Part A: Simulation of the Electric Field and Electric Forces. *Enhanced Heat Transfer*, 1998, 5: 217—229
- 8 Cooper P. EHD Enhancement of Nucleate Boiling. *Trans. ASME J. Heat Transfer*, 1990, 112: 458—464
- 9 Damiannidis C, Karayiannis T G, Al-Dadah R K, James R W, Collins M W, Allen P H G. EHD Boiling Enhancement in Shell and Tube Evaporators and Its Application in Refrigeration Plants. *ASHRAE Trans.*, 1992, 98(2): 462—472
- 10 Ogata J, Iwafuji Y, Shimada Y, Yamazaki T. Boiling Heat Transfer Enhancement in Tube-bundle Evaporators Utilizing Electric Field Effects. *ASHRAE Trans.*, 1992, 98(2): 435—444
- 11 Ohadi M M, Papar R A, Ng T L, Faani M A, Rademacher R. EHD Enhancement of Shell-side Boiling Heat Transfer Coefficients of R-123/Oil Mixture. *ASHRAE Trans.*, 1992, 98(2): 427—434
- 12 Yabe A, Taketani T, Maki H, Takahashi K, Nakadai Y. Experimental Study of Electrohydrodynamically (EHD) Enhanced Evaporator for Nonazeotropic Mixtures. *ASHRAE Trans.*, 1992, 98(2): 455—461
- 13 Cheung K, Ohadi M M, Dessiatoun S, Singh A. EHD-enhanced Boiling Coefficients and Visualization of R-134a over Enhanced Tubes. *Trans. ASME J. Heat Transfer*, 1997, 119: 332—338
- 14 Karayiannis T G. EHD Boiling Heat Transfer Enhancement of R123 and R11 on a Tube Bundle. *Applied Thermal Engineering*, 1998, 18: 809—817

信息与交流

第八届国际环保展延期举办

近日从中国环境保护产业协会获悉, 根据国务院和有关部门有效控制 SARS、防止疫情蔓延的要求, 经国家环境保护总局批准, 原定于 2003 年 6 月 5~8 日在北京举办的“第八届中国国际环保展览暨会议”顺延至 2003 年 12 月 15~18 日, 举办地点及其他展览事宜不变。

(摘自“中国化工信息网”)