

以水为工质的 EHD 强化管内对流换热实验研究

杨 侠 张 捷 吴艳阳 张 涛

(武汉工程大学 机电工程学院 湖北 武汉 430073)

摘 要: 以水作为工质,实验研究了 EHD(Electrohydrodynamics) 对水套管式换热器内对流换热过程的强化作用机理。实验中,在水套管换热器换热管中心设置一直流式高压电极,电极电压 DC 设置范围为 0~40 kV,分别进行了 5 组不同流量下不同电压值的组合强化实验。实验结果表明:不同管内流量条件下电场对管内传热过程均有不同程度的强化作用,当流量为 0.1 m³/h 时,其电场强化系数 θ 最大,为 1.224;流量为 1.0 m³/h 时,电场强化系数 θ 最小。实验证实了电场对于以水为工质的对流换热过程具有强化作用,但电场强化效果具有对流量变化敏感性的特点,同流量下存在最佳强化电压值而非电压值越高强化效果越大。

关 键 词: EHD; 对流换热; 强化传热; 电场

中图分类号: TK123 文献标识码: A

引 言

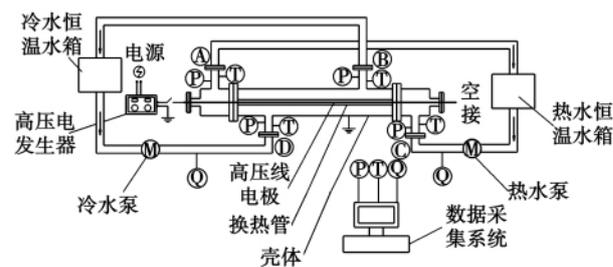
EHD(Electrohydrodynamics) 强化换热是通过在换热表面的流体中施加电场,利用电场、流场和温度场的耦合作用以达到强化换热的一种有源强化方法,其具有强化效果显著、应用面广、能耗低等优点,在化工、石油、能源、航天、制冷等领域极具应用前景。早在 1916 年 Chubb 就提出电磁场对换热具有强化作用^[1],但由于其机理的复杂性,之后的研究多处于实验探索阶段^[2~3]。1995 年,Allen 等人首次指出 EHD 强化传热的实质是电场力对流体的作用和电场对对流换热亦具有强化效果^[4]。在此基础上,文献[5]对油类在电场作用下的强制对流换热进行了实验研究,结果表明,当外加电压为 4 kV 时换热强化率最大可达 8 倍,强化换热效果良好;文献[6~8]分别对乙酸乙酯、苯和乙醚进行了自然对流和沸腾换热的实验研究,证明外加电场对以上有机液体的自然对流和沸腾换热均有一定的强化效果。此外,Karayiannis 通过数值研究认为改进电极的数量、排布、尺寸等结构因素,能够有效提高

EHD 的强化换热效果^[9]。

综合现有的文献来看,目前对于 EHD 强化对流换热的研究主要集中在有机介质,且尚未见以应用为目的的模型提出,鉴于此,文献[10]提出了电场强化传热换热器新结构模型,该模型给出了电场强化技术应用于管壳式换热器的系统解决方案,在此发明专利基础上^[10],本研究首次采用水为工质,在单管换热器换热管中间放置高压电极(DC 0~40 kV)进行强化对流换热实验研究,以探索工质对电场强化传热的影响及其规律。

1 实验装置与条件

实验装置如图 1 所示,实验装置主要由实验换热管段、高压发生器、水加热系统、工质回路、数据测量元件等组成。工质由热水泵驱动从热水恒温水箱进入换热器管程,经回路循环至恒温水箱,恒温水箱内布置加热电阻丝对工质进行加热保温,根据流量计读数调节管路阀门以改变工质流量;冷水泵使冷却水进入换热器壳程,经回路循环至冷水水箱。在换热器管程和壳程出、入口分别布置热电偶、压力变送器和流量计。



A—管程出口; B—壳程出口; C—管程入口图; D—壳程入口
P—压力变送器; T—热电偶; Q—流量计

图 1 实验装置

Fig. 1 Schematic drawing of the test device

收稿日期:2010-07-28; 修订日期:2010-11-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50906065, 51006067); 湖北省教育厅优秀中青年基金资助项目(Q20081508)

作者简介:杨 侠(1978-),男,湖北安陆人,武汉工程大学副教授、博士。

换热管管内电极布置如图 2 所示,线电极置于换热管中心,电极与高压电发生器连通,成为高压电极;换热管壁面则与壳体壁面连为一体接地,成为地极。线电极与同心换热管间形成径向高压电场,并施加在管内流体上,强化换热过程。高压电线端子通过与高压电源相连作为高压电极。高压直流电发生器为 DW-P503 型可调直流电源,其操作电压为 $0 \pm 50 \text{ kV}$,操作电流为 $0 \sim 5 \text{ mA}$ 。换热管为普通圆管,管长 2 m ,公称直径为 25 mm ,壁厚 1 mm 。

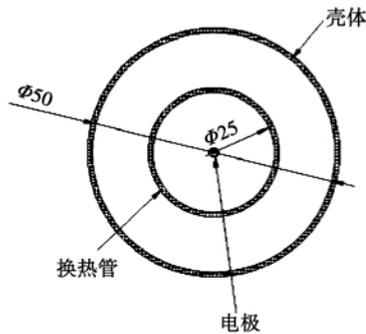


图 2 换热管管内电极布置

Fig. 2 Electrode arrangement inside a heat exchange tube

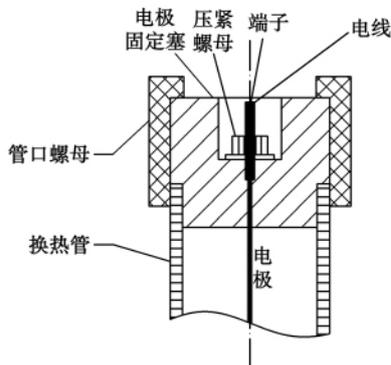


图 3 电极绝缘结构

Fig. 3 Schematic drawing of electrode insulation

图 3 为电极绝缘密封装置结构,换热管两端管口外周加工有螺纹,配合 2 个管口螺母使用;端子为金属圆棒,端子外圆周上加工有螺纹与压紧螺母配合,端子与电极相连;电极通过电极固定塞固定,电极固定塞为绝缘材质;将电极引出端子穿入电极固定塞孔中,压紧螺母可将电极固定于换热管中;最后通过管口螺母可将换热管管口密封。

管程入口流量为 $0.1 \sim 1.0 \text{ m}^3/\text{h}$,壳程入口流量设定为固定值 $3.0 \text{ m}^3/\text{h}$,每组实验设定相应入口

流量,在不同外加高电压下 ($0 \sim 40 \text{ kV}$) 进行实验,然后改变入口参数进行实验。具体实验条件如表 1 所示。

表 1 换热器管程和壳程入口实验条件

Tab. 1 Test conditions for the tube and shell side of a heat exchanger

管程		壳程	
流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	温度/ $^{\circ}\text{C}$
0.1	65	3.0	24
0.3	65	3.0	24
0.5	65	3.0	24
0.7	65	3.0	24
1.0	65	3.0	24

2 实验结果与分析

图 4 分别给出的是管程入口流量 q 分别为 $0.1, 0.3, 0.5, 0.7$ 和 $1.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,管内对流传热系数 α 与外加电极电压 U 的关系散点图。

从图 4 的 $U-\alpha$ 关系图可以看出,外加电场能强化水管换热器内传热,传热系数在电场的作用下均有不同程度的提高,而对于不同流量,管内传热系数随电压升高呈现不同的变化幅度。流量为 $0.1 \text{ m}^3/\text{h}$ 时传热系数随电压增大,并且增幅平缓呈现线性增长,这表明施加电场能强化对流传热过程,外电场电压 U 越大,流体中粒子离子化程度越高,因此流场中的自由电荷增大,通过自由电荷产生的库仑力也随之增大,管内流体在流动过程中受到库仑力的径向扰动亦增强,故传热系数增加。当流量为 0.3 和 $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 传热系数在 $0 \sim 20 \text{ kV}$ 范围内明显提高,随后电压的升高对传热系数影响并不明显,甚至有所下降;当流量为 0.7 和 $1.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,传热系数随电压的升高均有小幅波动,即在电压为 15 kV 左右出现一个波峰,在电压为 $15 \sim 40 \text{ kV}$ 范围内,传热系数随电压升高小幅减小和明显减小。这主要由于在外加电场电压为 15 kV 左右,流体离子化已达到饱和状态,即使继续增加外电场电压,其离子化程度也不会增大。实验条件下,当电压超过 45 kV 时,电极间出现工质被击穿的放电现象。

为了更好地比较在同一实验工况下,有/无电场作用下传热系数的大小,定义无量纲电场强化系数 θ :

$$\theta = \frac{\alpha_E}{\alpha_0} = \frac{Nu_E}{Nu_0}$$

式中: α_E 、 Nu_E 、 α_0 、 Nu_0 —施加电场和无电场时管内传热系数和努赛尔数。

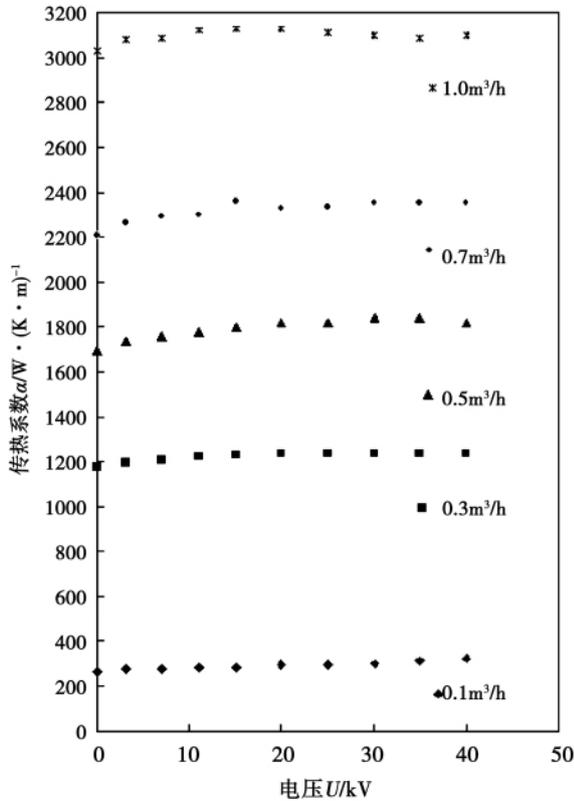


图 4 $U-\alpha$ 关系图

Fig. 4 Drawing showing the $U-\alpha$ relationship

图 5 给出的是不同管程入口流量下, 电场强化系数 θ 与电场电压 U 的关系。

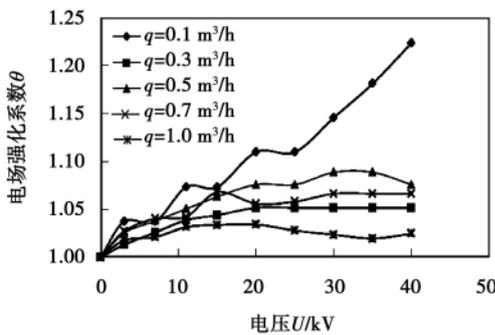


图 5 电场强化系数 θ - 电压 U 关系图

Fig. 5 Drawing showing the electric field intensification coefficient θ - voltage U (kV)

从图中可看到, 电场对不同管程入口流量均有一定的强化作用, 电场强化系数在电压为 0 ~ 10 kV 范围内变化不明显, 在外加电压大于 12 kV 后增幅

明显。在本实验条件下, 当管程入口流量为 0.1 m^3/h 时电场强化系数 θ 最大(最大可达 1.224) 即强化效果最好; 同时, 当管程入口流量为 1.0 m^3/h 时电场强化系数 θ 最小即强化效果最差。

为了比较相同管程入口流量下电场电压 U 对电场强化系数 θ 的影响, 图 6 给出的不同电压下, 强化系数 θ 与管程入口流量 q 的关系。

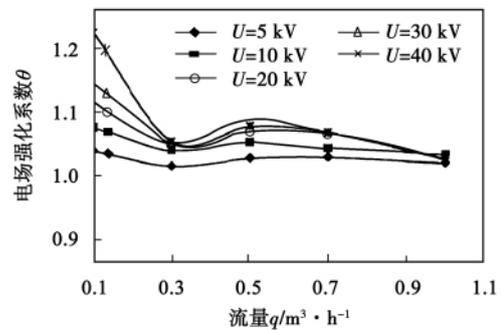


图 6 电场强化系数 θ - 流量 q 关系图

Fig. 6 Drawing showing the electric field intensification coefficient θ - q (m^3/h)

由上图可知, 总体上相同电压作用的电场强化系数 θ 随管程入口流量增大而减小, 其中 θ 在流量 q 为 0.3 m^3/h 时有小幅波动, 并在此处形成波谷, 当流量增大至 0.5 m^3/h 时形成波峰, 随着流量继续增大 θ 则缓慢减小; 当流量大于 0.3 m^3/h 时, 外加电场电压 U 对电场强化系数影响不大, 且强化效果亦不明显。该现象说明了电场强化效果具有对流量变化的敏感性, 同时, 大流量下的流动湍流化也是其中的一个重要影响因素。此结论与文献 [9] 数值计算的结果相符, 证实实验的可靠性。

3 结 论

利用文献 [9] 的换热管结构模型, 进行了不同流量不同电压值条件下的组合实验, 分析实验结果后, 得到了如下结论:

(1) 对于不同流量, 传热系数 α 随电压 U 值升高呈现出不同变化趋势, 该结果说明了一定流量条件下存在最佳强化电压值, 并不是电压值越高强化效果越明显

(2) 当管程入口流量为 0.1 m^3/h 时电场强化系数 θ 最大, 强化效果最好; 当管程入口流量为 1.0 m^3/h 时电场强化系数 θ 最小, 强化效果最不理想; 这说明电场强化效果具有对流量变化的敏感性。同

时第一次证实了电场对于以水为工质的对流换热过程具有强化作用。在管程流量不变条件下,相比于无电场($U = 0 \text{ V}$)情况外加电场均能使传热系数 α 有不同程度提高。

(3) 当流量为 0.7 和 $1.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,传热系数 α 随电压值 U 升高的变化趋势均存在小幅波动,该现象说明电场强化效果具有对流量变化敏感性的特点。同时我们认为,大流量下的流动湍流化也是其重要的影响因素。

(4) 相同电压作用下,电场强化系数整体随管程入口流量增大而减小,其中 θ 在流量为 $0.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 时有小幅波动,并在此处形成波谷,当流量增大至 $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 时形成一个波峰,随着流量继续增大则再缓慢减小;当流量大于 $0.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,外加电场电压 U 对电场强化系数影响不大,且强化效果亦不明显。

参考文献:

[1] CHUBB L W. 有关液体加热器的方法和装置的改进[P]. 英国专利号 100796, 1916.
Chubb L W. Methods for liquid heaters and improvement of their devices[P]. UK Patent Number 100796, 1916.

[2] KARAYIANNIS T G, XU Y. 沸腾传热中的电场效应. A 部分: 电场和电场力的模拟[J]. 强化传热期刊, 1998, 5(4): 217-229.
Karayiannis T G, Xu Y. Electric field effect in boiling heat transfer, Part A: Simulation of an Electric Field and Electric Field Force [J]. Journal of Intensified Heat Transfer, 1998, 5(4): 217-229

[3] KARAYIANNIS T G, XU Y. 沸腾传热中的电场效应. B 部分: 电极几何形状[J]. 强化传热期刊, 1998, 5(4): 231-247.
Karayiannis T G, Xu Y. Electric field effect in boiling heat transfer, Part B: Electrode Geometry [J]. Journal of Intensified Heat Transfer, 1998, 5(4): 231-247.

[4] ALLEN P H G, KARAYIANNIS T G. 电流体动力学强化传热和流体流动 - 文献回顾[J]. 余热回收系统及 CHP, 1995, 15(5): 289-423.
Allen P H G, Karayiannis T G. Electrohydrodynamic intensified heat transfer and fluid flow-literature review [J]. Waste Heat Recovery Systems and Cooling-heating-power, 1995, 15(5): 289-423

[5] 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.
LIU Zhen-hua, WANG Jing, CHEN Yu-ming. A forced convection heat exchange experiment of oil inside an EHD-intensified tube [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2000, 21(6): 738-741.

[6] 王发刚, 李瑞阳, 郁鸿凌, 等. 电场强化乙酸乙酯自然对流和沸腾换热的实验研究[J]. 化工学报, 2003, 54(9): 1220-1223.
WANG Fa-gang, LI Rui-yang, YU Hong-ling, et al. Experimental study of an electric-field-intensified ethyl acetate natural convection and boiling Heat exchange [J]. Journal of chemical Industry, 2003, 54(9): 1220-1223.

[7] 王发刚, 李瑞阳, 郁鸿凌, 等. 外加电场强化苯自然对流和沸腾换热的试验研究[J]. 太阳能学报, 2005, 26(2): 277-280.
WANG Fa-gang, LI Rui-yang, YU Hong-ling, et al. Experimental study of an external-electric-field-intensified benzene natural convection and boiling heat exchange [J]. Journal of Solar Energy, 2005, 26(2): 277-280.

[8] 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): 2082-2085.
WANG Fa-gang, LI Rui-yang, YU Hong-ling, et al. Electric-field-intensified ether natural convection and pool boiling heat exchange [J]. Journal of Chemical Industry, 2005, 56(11): 2082-2085.

[9] KARAYIANNIS T G. 电极强化传热的数值模拟[J]. 应用热工程, 2006, 26(3): 1471-1480.
Karayiannis. Numerical simulation of electrode-intensified heat transfer [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(3): 1471-1480.

[10] 杨 侠, 喻九阳, 徐建民, 等. 电场强化传热换热器[P]. 中国: ZL200810196900.2, 2009.
YANG Xia, YU Jiu-yang, XU Jian-min, et al. Electric-field-intensified heat exchangers [P]. China, ZL200810196900.2, 2009.

(陈 滨 编辑)

• 书 讯 •

工程热力学(第2版)

本书是根据我国高等工业学校“工程热力学课程教学基本要求”并参照清华大学热能工程、动力工程、空调、内燃机及反应堆热工等专业的教学大纲,在清华大学试用教材及多年教学实践的基础上修订而成的,并注意吸收了国内外同类教科书的经验与优点。本书充实并强化了基本概念与基本定律的论述,力求严谨深入、由浅入深,并且还突出工程观点,使理论密切联系实际,注重培养学生灵活分析问题的能力。在编排方面注意与“物理”、“化学”等课程的衔接,起点较高,避免不必要的重复,并且将气体动力循环、蒸气动力循环、制冷循环以及湿空气过程紧接在基本定律之后,依理想气体、蒸汽与湿空气三个层次循序渐进,引导学生加深对热力学基本规律的理解、掌握与运用。全书取材广泛,内容有所拓宽,着意反映一些最新科技进展,加强了的概念、计算及应用的叙述;介绍了保护臭氧层对制冷剂提出的新要求,首次引入了作为 CFC12 最有希望的替代物 HFC134a 的 ln-p-h 图等。

本书可用作高等工业学校热能工程、动力工程、空调制冷、供暖通风、内燃机、反应堆热工以及工程热物理等专业的教科书或参考书,也可供有关科技人员参考。

2011年7月1日出版

By using the commercial software ANSYS CFS , numerically calculated were the heat exchange characteristics of the cooling air inside a straight ribbed rectangular channel and compared were the calculation results with the test data obtained by Han. Furthermore ,the influence of Reynolds and the angle of ribs on Nusselt number was also analyzed. It has been found that the average Nusselt number obtained from the numerical calculation assumes an identical variation tendency to the test values. The calculation results ,however ,were bigger than the test values. Due to the flow disturbance role played by the ribs ,two vortexes will be produced in the zone between any two ribs ,enhancing the heat exchange between the cooling air and the solid wall surfaces. With an increase of Reynolds and Nusselt number , the average friction resistance coefficient will also increase. When the angle of ribs falls in a range from 45 to 60 degrees , the intensified convection heat exchange effectiveness in the cooling channel is assessed as the best.

Key words: blade cooling , rectangular channel , flow and heat exchange

以水为工质的 EHD 强化管内对流换热实验研究 = **Experimental Study of the Electrohydrodynamically (EHD) -intensified Convection Heat Exchange Inside a Tube With Water Serving as the Working Medium**

[刊 汉] YANG Xia , ZHANG Jie , WU Yan-yang , ZHANG Tao (College of Electromechanical Engineering , Wuhan Engineering University , Wuhan , China , Post Code: 430073) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011 , 26(5) . - 547 ~ 550

With water serving as the working medium , experimentally studied was the EHD (electrohydrodynamics) intensification mechanism controlling the convection heat exchange inside water jacket heat exchanger tubes. During the test , a direct current type high voltage electrode was mounted at the center of the water jacket heat exchanger tubes and the voltage of the electrode was within a range from DC 0 ~ 40 kV. A total of five groups of combined intensification test were performed at different flow rates and voltages respectively. The test results show that under the condition of different flow rates inside the tubes , the electric field all played intensification role to various extents on the heat conduction process inside the tubes. When the flow rate is $0.1 \text{ m}^3/\text{h}$, the intensification coefficient of the electric field θ attains its maximal value , being up to 1.224. When the flow rate is $1.0 \text{ m}^3/\text{h}$, the above-mentioned coefficient θ attains its minimal value , verifying that the electric field plays an intensification role on the convection heat conduction process with water serving as the working medium. It has also been found , however , that the intensification effectiveness achieved by the electric field enjoys a specific feature , which is susceptible to any change of the flow rate and at an identical flow rate , there exists an optimum intensification voltage value. It is not true that the higher the voltage value the better the intensification effectiveness. **Key words:** electrohydrodynamics (EHD) , convection heat exchange , intensified heat transfer , electric field

航空煤油在微通道中传热性能的实验研究 = **Experimental Study of the Heat Transfer Performance of Aviation Kerosene in Microchannels**

[刊 汉] CHEN Hai-gang , HUANG Yong , MIAO Hui (Key Laboratory on Aero-engine Aerodynamics and Thermodynamics , College of Energy Source and Power Engineering , Beijing University of Aeronautics and Astronautics , Beijing , China , Post Code: 100191) // Journal of Engineering for Thermal Energy