

膜式全热换热器 EHD 电场强化换热的实验研究

孙淑红, 鹿院卫, 刘广林, 马重芳

(北京工业大学 传热强化与过程节能 教育部重点实验室, 北京 100124)

摘 要: 为提高膜式全热换热器的换热效率, 对换热器中流场施加高压电场, 在相同的实验条件下, 通过测量换热器的显热和潜热效率来分析外加高压电场对换热效果的影响, 并且在此基础上, 测试了不同电极电压、风速情况下换热器的换热效果。实验结果表明, 在换热器流场中施加高压电场, 能够有效地提高换热器的显热效率, 对潜热效率的提高则不明显; 在低风速的条件下, 强化换热效果更加明显。

关 键 词: 全热换热器; 强化换热; EHD

中图分类号: TU831 文献标识码: A

引 言

近年来, 对膜式换热器本身性能的研究主要集中在对换热器的强化传热方面, 前人的研究大多基于优化芯体结构和改善芯体材料的换热性能这两个方面的实验研究或数值分析。在优化芯体结构方面, 殷平等研制出了一种菱形直通型结构的全热换热器^[1], 该换热器换热效率高, 阻力小, 并通过实验验证了全热换热器是一种有效可靠的换热装置。在改善换热芯体材料换热性能方面, 张立志等人研究了基于 PVAL/PVDF 复合透湿膜的全热交换器的透热透湿性能^[2~4], 实验测定了新风与排风之间的显热交换能力和水蒸气交换能力, 并建立了基于亲水/憎水复合膜的逆流膜全热交换器传热传质计算模型。通过大量的实验研究, 全热换热器的结构和性能方面得到很大程度的优化, 但对于常温空气-空气小温差换热来说, 换热的效果仍然不是很理想, 导致换热器的尺寸过于庞大, 仍需要采取措施进一步的强化换热。

EHD(Electrohydrodynamic)强化换热是一种有源强化换热措施^[5]。它是在流场中施加高压电场, 利用电场、流场、温度场的相互耦合作用而达到的一种有源强化传热的方法。1916年, Chubb发现流体中施加电场能够强化换热^[6], 但在此后 40 多年里, 该技

术并未受到重视。直到 20 世纪 60 年代才有学者开始研究, 特别是 70 年代以后, 由于对各种节能技术的迫切要求, 加上太阳能、地热能、海洋能的利用和高效暖通空调开发中对小温差的要求, 加上 EHD 强化换热具有效果显著、功耗低、易于控制表面热流等一系列优点, 其研究逐渐受到重视。文献[7]以空气为实验工质, 对以光管、横纹管为传热管的管束换热器强制对流传热进行了高压电场强化(EHD)实验研究, 得到了努塞尔数与雷诺数、传热强化系数与外加电场电压的关系曲线, 验证了外加高压电场对管束换热器对流传热有一定的强化效果。本研究在此基础上, 在膜式全热换热器这种多通道结构中布置电场, 对通道中的流体进行电场强化换热实验, 并通过实验验证在膜式全热换热器中施加高压电场对提高换热器换热效率的影响, 为减小全热换热器尺寸的设计提供一种新的参考依据。

1 实验装置与实验方法

1.1 实验系统

图 1 为膜式全热换热器 EHD 强化空气对流传热系统, 主要由膜式全热换热器、高压静电发生器、风机和风管组成。进入换热器的新风温湿度为室外的实际气候工况, 由风机从室外引入, 而进入换热器的排风为室内实际工况由风机直接从室内排出, 其温湿度大小由建筑物的中央空调控制。在新排风进出口布置温湿度测点 1、2、3 和 4 其值用芬兰 Vaisala 温湿度传感器测得。在新风进出口管路上布置测点 5 和 6 通过 WQ1151 电容式差压变送器测得新排风通过换热器的空气阻力损失。本实验系统新排风量由通过在新排风进口处的 EF-80 热式气体质量流量计测得, 风量通过在风机上串联的调速开关来进行调节。换热器中高压电场强化是通过布

收稿日期: 2009-12-28 修订日期: 2010-03-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50476063)

作者简介: 孙淑红(1983-), 女, 山东日照人, 北京工业大学硕士研究生。

置在换热器内的线-板电极结构来实现, 电压的调节通过高压静电发生器实现。

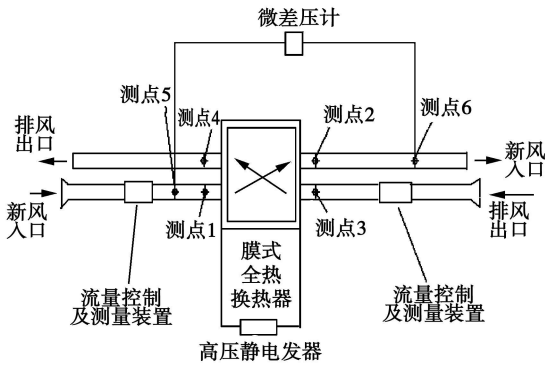


图 1 实验系统示意图

1.2 膜式全热换热器芯体结构及内部电极结构

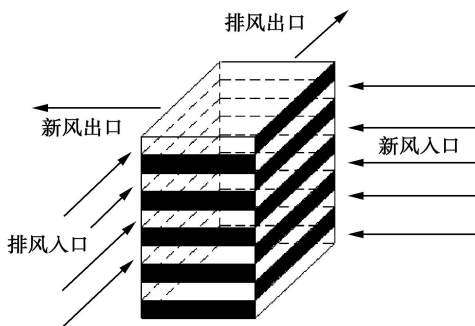


图 2 膜式全热换热器芯体结构示意图

膜式全热换热器是新风换热器的核心, 因此换热器的制作成为影响换热性能的关键。图 2 为膜式全热换热器芯体结构示意图, 在膜材料的两个对边上粘贴塑料条, 然后通过 4 根绝缘棒串联固定, 如图 3 所示, 固定时塑料条间隔放置, 形成交错矩形通道, 新风与排风交叉通过换热器。整个芯体长、宽、高为 200 mm×200 mm×260 mm, 芯体内气流通道高度为 4 mm。膜材料选择对水分子有选择透过性功能的高分子膜材料, 厚度为 0.02 mm, 膜孔径为 3 000 D(道尔顿), 约为 2 nm。

膜式全热换热器芯体内部的电极结构布置如图 3 所示。本研究选择的电极布置方式为线-板式结构, 电极电压通过高压静电发生器产生和调节。在相同的电压下^[8], 正极性放电较负极性放电更加强烈, 正极性放电等离子区域大于负离子电晕, 因此选用 φ0.2 mm 的细铜丝作为正极电晕线。为了防止两个相邻的电晕线相互影响, 每相邻电晕线间距为 20 mm, 选用高密度金属网作为放电负极, 正负电极

之间为热交换膜, 这样在两个通道内就形成了一个线-板式的电极结构。每两个线-板结构中间隔一个通道, 以便防止两层电极之间的相互影响。换热器共布置了 11 个线-板结构, 所有的线电极并联并与高压静电发生器的正极相连, 电极板并联接地。由于受膜式换热器本身结构的影响, 膜式全热换热器的线板间距离为 7 mm。

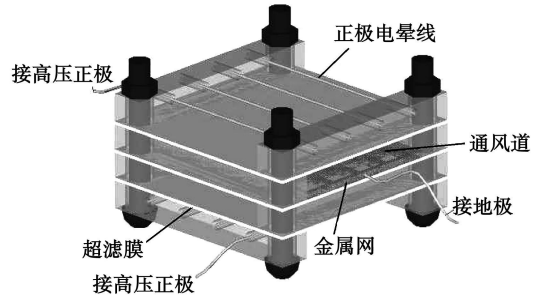


图 3 换热器内部电极结构

2 EHD 电场强化空气对流换热原理

EHD 对传热的强化作用实质上来源于电场力对流体的作用, 根据电磁学理论, 电场中流体所受到的电场力 F 可表示为^[9]:

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

式中: 第一项 ρE 电场施加于流体自由电荷的库仑力, 称为电泳力; 第二项 $\frac{1}{2} E^2 \nabla \epsilon$ 表示在电场作用下由于介电常数的空间变化而产生的施加于流体上的力, 称为介电电泳力; 第三项 $\frac{1}{2} \nabla [E^2 (\frac{\partial \epsilon}{\partial \rho})_T \rho]$ 表示由于电场强度及介电常数的空间变化而产生的施加于流体上的力, 又称为电致伸缩力。对于不同的工质和不同的传热方式, 这 3 种力的作用和大小不同。

EHD 强化空气对流传热属于单相气体对流传热。对单相气体, 其介电常数接近为 1, 自由电荷的库仑力 (电泳力) 占主要地位, 其主要表现为电晕放电。图 4 为本实验电晕线施加正电压后, 电极上产生电晕放电照片。在线电极附近, 由于电场的作用, 气体将会离子化电离, 产生带电粒子, 这些带电粒子在库仑力的作用下向电极板运动, 并且通过碰撞将动量传给中性分子引起的高速离子射流流动, 这种离子射流对周围流体流动产生强烈的扰动, 形成附加的流体运动, 即所谓的电诱导二次流, 它将导致对流传热效果的加强。实验证明, 在强的电场作用下,

流体的流动能从层流变成紊流, 强化机理属于流型转变^[10]。

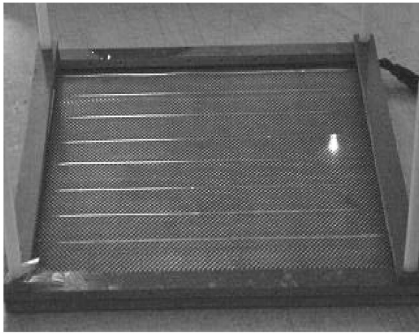


图 4 电极电晕放电现象

3 实验数据处理及误差分析

3.1 实验数据处理

能量回收效率计算为:

显热换热效率:

$$\epsilon_i = \frac{G_s(t_i - t_o)}{G_{min}(t_i - t_i)} = \frac{G_s(t_i - t_o)}{G_m(t_i - t_i)} \quad (2)$$

潜热换热效率:

$$\epsilon_i = \frac{G_s(d_i - d_o)}{G_{min}(d_i - d_i)} = \frac{G_s(d_i - d_o)}{G_m(d_i - d_i)} \quad (3)$$

式中: t_i 、 t_o —新风进、出口温度, °C; t_i 、 t_o —排风进、出口温度, °C; d_i 、 d_o —新风进、出口焓值, kg/kg(干空气); d_i 、 d_o —排风进、出口焓值, kg/kg(干空气); G_s 、 G_m —新、排风质量流量与比热容乘积, kJ/(s·°C); G_{min} —新排风质量流量与比热容乘积中较小值, kJ/(s·°C)。

上式中温度、湿度和风量可通过实验直接测量得到。

3.2 实验误差分析

本实验中温度、湿度、风量值均为直接测量得到, 从式(2)和式(3)中可以看出, 显热及潜热的换热效率分别与温度、风量及湿度、风量有关, 因此本研究采用二次方公式误差传递的方法分析实验测量值对显热效率及潜热效率的影响^[11], 经计算得出显热效率的相对误差 $\leq 5.91\%$, 潜热效率的相对误差 $\leq 5.11\%$ 。

4 实验结果及分析

4.1 电极电压对换热效率的影响

图 5 为温差 3.7 °C, 湿度差 5.5 g/kg 迎面风速

0.56 m/s, 线板距离 7 mm 时, 在换热器内部流场施加电压后, 电压值对换热效率的影响的实验结果。由图可知, 在施加电压之前, 换热器的显热换热效率为 37.8%, 潜热换热效率为 56%。在相同实验条件下, 当施加电压大于起晕电压(本研究为 4.5 kV)后, 才开始对换热起到强化作用。这是因为, 只有达到起晕电压后, 才可能激发电极产生足够能量的电子, 形成由电极向电极板运动的电晕风, 从而对空气产生扰动强化换热。在邻近击穿电压附近(本研究为 5.6 kV)强化效果最明显, 显热效率为 43.8%, 潜热换热效率为 56.9%。可见, 换热器的显热换热效率在施加电压后有明显的提高, 潜热效率变化则不明显。显热效率随着施加电压的提高而增大, 缘于随着电极电压的逐步升高, 电场强度越来越大, 空气粒子的离子化程度越来越高, 使得流场中的自由电荷越来越多, 电荷受到的库仑力也越来越大, 由库仑力造成的垂直于流动方向的径向扰动越来越强, 所以显热换热效率越来越高, 直至达到击穿电压的临界点时, 换热效率达到最高值。而对于潜热效率, 虽然电晕风也能引起传质边界层的扰动, 从而加强潜热量的交换, 但是由于在极不均匀电场中, 水分子具有弱电负性^[12], 容易吸附电子形成负离子, 造成水分子向电晕线方向运动, 从而对潜热的交换有一定抑制作用, 因此 EHD 电场强化对潜热效率影响并不明显。

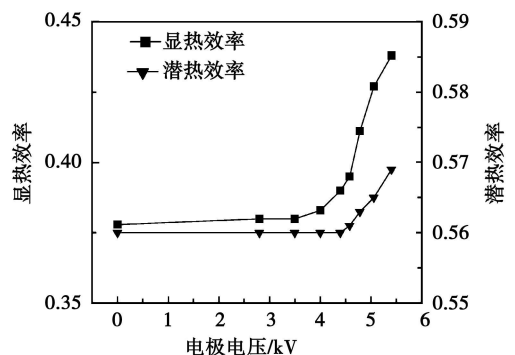


图 5 施加电压对换热效率的影响

图 6 为温差 5.3 °C, 湿度差 4.3 g/kg 迎面风速 0.56 m/s, 线板距离 7 mm 时, EHD 强化换热的实验结果。在施加电压之前, 显热效率为 40.5%, 潜热效率 47.1%, 施加电压后, 在临近击穿电压的情况下, 显热效率为 46.1%, 潜热换热效率为 47.8%, 可见在相同风速、不同的温差和湿度差条件下, 施加电场都会对显热换热有明显强化作用, 而对潜热强化则不明显。

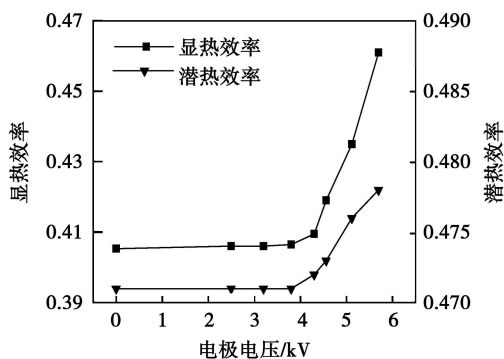


图6 施加电压对换热效率的影响

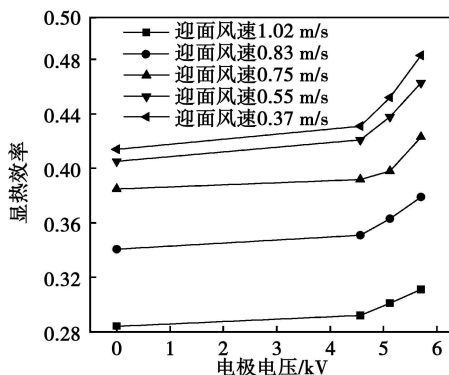


图7 不同迎面风速下电极电压对显热效率的影响

4.2 迎面风速对 EHD 强化换热的影响

迎面风速对全热换热器换热效率的影响比较大,文献[13]在此方面已经做了大量的实验研究。图7为换热器在温差为 5.3°C ,不同迎面风速下电极电压对显热效率的影响。实验表明,换热器的显热效率随着风速的增大明显减小。根据对流传热传质原理,掠过固体表面的气流速度增大,对流传热系数增加,但通道长度一定时,风速的增大将使单位体积空气在换热器内热质交换时间变短,不利于新排风进行充分的热质交换,最终导致全热换热器的换热效率是随着风速的增加而减小。从实验结果可以看出,在施加电场后,不同迎面风速下,显热换热效率都有相应的提高,但风速增大时,EHD 电场强化换热的效果相对减弱,迎面风速越小,强化效果越明显。这是由于随着流速的增大,电场力跟粘性力和惯性力相比,作用不是很明显。电晕风对于低雷诺数对流换热具有较好效果,当雷诺数较高时,由于此时的对流换热系数已经较大而且电晕风引起的二次流小于主流速度,因而强化效果不明显。因此,对于

电场强化余热回收,有必要对电场和流场的结构进行优化,以提高余热回收效率。

5 结论

(1) 膜式全热换热器在外加高压电场的条件下,显热效率提高了6%以上,而潜热效率的提高则不明显。

(2) EHD 电场强化换热在达到起晕电压后才开始起作用,并且施加电极电压越高,强化效果越明显,在临界击穿电压处,强化效率达到最高值。对电极结构进行优化,提高施加电压,可以提高换热器的效率。

(3) EHD 电场强化换热在不同迎面风速下,显热换热效率都有提高。迎面风速越小,显热换热效率越大,电场强化传热效果越明显。

参考文献:

- [1] 殷平. 新型板式全热交换器研制—产品研制及实验[J]. 暖通空调, 2005, 35(11): 56—62
- [2] ZHANG L Z, JIANG Y. Heat and mass transfer in a membrane-based energy recovery ventilator[J]. Journal of Membrane Science, 1999, 16(3): 29—38
- [3] ZHANG L Z. Heat and mass transfer in a cross-flow membrane-based enthalpy exchanger under naturally formed boundary conditions[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50: 151—162
- [4] 张炎, 张立志, 项辉, 等. 基于亲水/憎水复合膜的全热交换器换热换湿性能[J]. 化工学报, 2007, 2: 294—298
- [5] 董超, 李瑞阳. EHD 强化换热研究中的重要问题——电场特性的影响规律[J]. 能源与研究信息, 2001, 17(1): 36—44
- [6] CHUBB L W. Improvements relating to methods and apparatus for heating fluids[J]. UK: 100796, 1916
- [7] 黄岗, 罗小平, 高贵良. 换热器 EHD 强化空气对流传热及其动力学分析[J]. 石油机械, 2008, 36(7): 7—10
- [8] 鹿院卫, 王丁会, 马重芳. NIP 电极结构对光催化去除室内 HCHO 的影响研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(16): 1015—1018
- [9] LANDAU L D. LIFSHITSE M. Electrodynamics of continuous media[M]. New York: Pergamon, 1963
- [10] 王丰华, 朱子述. EHD 强化传热中的电晕放电与离子风[J]. 高压电器, 2003, 39(6): 43—46
- [11] TAYLOR J R. An introduction to error analysis (second ed)[M]. New York: University Science Books, 1997
- [12] 吴广宁. 高压电技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007
- [13] 汪会勇, 鹿院卫, 马重芳. 膜式全热换热器换热效率影响因素实验研究[J]. 建筑热能通风空调, 2008, 27(3): 14—17

(编辑 伟)

With Fluent 6.3 serving as a platform, a partial heat non-equilibrium model was adopted to numerically study the non-Darcian forced convection heat exchange in the vertical passages of a skeleton heat generation porous medium in a turbulent flow zone and its transition one. Three-dimensional N-S equation and standard $k-\epsilon$ turbulent flow model were used to depict the flow inside the porous medium. On this basis, the influence of the change in the pore effective Reynolds number Re ($400 < Re < 2000$), surface heat flux density q ($q = 5 \text{ kW/m}^2$, 30 kW/m^2 and 90 kW/m^2) and coolant inlet temperature T_i ($T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $50 \text{ }^\circ\text{C}$ and $80 \text{ }^\circ\text{C}$) on the flow resistance and heat exchange characteristics was studied in detail. The research results show that at a low heat flux density, the change of surface heat flux density has a very small influence on the flow resistance and heat exchange coefficient. However, the diameter of the small balls exercises a significant influence on the heat exchange coefficient and such an influence will increase with an increase of Reynolds number. Moreover, the heat exchange coefficient will decrease with an increase of the coolant inlet temperature. Key words: skeleton heat generation porous medium, numerical simulation

膜式全热换热器 EHD 电场强化换热的实验研究 = Experimental Study of the EHD (Electrohydrodynamics)-based Electric Field Intensified Heat Exchange of a Membrane Type Full Heat Exchanger [刊, 汉] / SUN Shuhong, LU Yuanwei, LU Guanglin et al (Education Ministry Key Laboratory on Heat Transfer Intensification and Process Energy Conservation, Beijing University of Technology, Beijing, China, Post Code 100124) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(6). — 617 ~ 620

To enhance the heat exchange efficiency of a membrane type full heat exchanger, a high voltage electric field was applied to the heat exchanger. Under the same test conditions, the influence of the electric field applied from outside on the heat exchange effectiveness was analyzed by measuring both sensible and latent heat efficiency of the exchanger. On this basis, the heat exchange effectiveness of the exchanger was tested at various voltages of electric poles and different wind speeds. The test results show that the application of a high voltage electric field to the flow field of the heat exchanger can effectively enhance its sensible heat efficiency but insignificantly increase its latent heat efficiency. At a low wind speed, the intensified heat exchange effectiveness will be even more conspicuous. Key words: full heat exchanger, intensified heat exchange, electrohydrodynamics (EHD)

流化床反应器内气固两相流动特性的研究 = Investigation of the Gas-solid Two-Phase Flow Characteristics Inside a Fluidized Bed Reactor [刊, 汉] / SUN Qiaoyun, ZHU Weibing (College of Astronautics and Architectural Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code 150001), GAO Jianmin, LU Huijin (College of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(6). — 621 ~ 626

By simulating the particle phase flow based on the particle kinetic theory and taking into account the two phase interaction by using the fluid and particle two phase flow theory established, a CFD (computational fluid dynamics) model featuring the multiple phase flow inside a fluidized bed nuclear reactor and numerically simulated and studied were the fluid kinetic behaviors in the above-mentioned reactor. The calculation results show that the distribution of particle concentrations on the cross section obtained by using Gidaspow drag force model shares a compar-

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net