

EHD/脉动流混合强化传热换热器的传热与
阻力特性实验研究杨 侠, 刘丰良, 熊 卉, 杨 清
(武汉工程大学 机电工程学院 湖北 武汉 430073)

摘 要:以水为工质,实验研究了EHD(电场)与脉动流对单管换热器内的传热与阻力特性影响。实验中,电压值设定为0-40 kV,脉动流频率 $f=1,2,3$ Hz,脉动流幅度 $A=1$,脉动流条件下的管内时均流量 $q=0.1-0.5$ m³/h。实验结果表明:管程脉动流单独作用时,同一流量条件下, f 增加时传热系数 α 无明显变化,即脉动流单独作用对圆管传热强化作用不显著;EHD单独作用能显著强化传热,电压相对较小时, α 增长缓慢,当电压 $U>30$ kV时 α 较快增长,但随着电压的继续增加渐趋平缓, α 最大提高0.12倍;脉动流和EHD具有一定的复合作用, f 对有电场强化条件下的 α 有较大影响,尤其是当 $U>30$ kV时, f 越大,相同电场强度下管程 α 越大,对应的 α 最高可提高约0.25倍;EHD/脉动流混合作用时,随着 Re 的增大,管程阻力系数 λ 逐渐降低,并且在相同的 Re 情况下,脉动强化措施下的 λ 要明显高于无脉动情况;同一 Re 条件下,同频率工况时,电压的增大与否,对 λ 的改变并无影响,即阻力损耗主要来源于脉动流的作用,而电场对此的影响较小。

关 键 词: EHD; 脉动流; 混合强化; 对流换热

中图分类号: TK124 文献标识码: A

引 言

EHD(electrohydrodynamics,简称EHD或电场)强化传热技术是一种将电场引入传热学领域,利用电场、流场和热场协同作用达到强化传热的新方法。EHD对传热的强化作用实质是电场力对流体的作用,流体中的带电粒子、极性分子、非极性分子等在电场作用下受力各不相同,一方面流体中的温度梯度使流体的导电系数发生变化,从而产生空间电荷,即温度场影响了电场,另一方面空间电荷在电场中运动,电场进而又影响了流场,电场和流场的相互作用影响了温度场及传热效果^[1-2]。相关研究表明电场强化传热具有效果显著、热流和温度可控、功耗低

等优点^[3-5]。

脉动流作为非稳态流的一种,是指流体速度或压力以正/余弦函数变化的周期性振荡流动。Ber-gles通过实验研究发现,脉动流可以改变换热特性,进而导致换热增强^[6];Richardson通过实验对比研究了管内稳态流和脉动流的速度分布^[7],研究表明,流体脉动会导致管内流体的速度环效应,即最大速度在靠近管壁处而不是在管中心。此后,相关学者针对脉动条件下的流动与传热进行了分析^[8-10],得到不同的结论。

EHD强化传热技术与脉动流强化传热技术的结合,是一种全新的强化传热技术,即混合强化传热模式。本课题组在此基础上首次提出并设计了EHD/脉动流混合强化传热换热器模型^[11-13],给出了EHD/脉动流混合强化传热换热器的工程化解决方案。该成果如若能产生复合强化传热效果,将有望开辟出强化传热研究的新领域,对于节能环保领域将会产生显著的经济与社会效益。鉴于此,本研究通过实验研究的方法对换热圆管管程内EHD与脉动流的复合作用展开实验研究,探讨其复合强化效果及阻力特性规律,以为后续研究提供参考。

1 实验系统介绍

1.1 实验装置

传热与阻力特性实验在具有自主专利技术的电场/脉动流混合强化传热换热器实验台上进行^[11]。实验系统布置如图1所示,主要由热水循环、冷水循环、高压发生器、脉动流发生器、换热器本体、采集测试等系统组成。实验以水为工质,热水工质由热水泵驱动从热水恒温水箱进入换热器管程,经循环管

收稿日期: 2013-11-03; 修订日期: 2013-12-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51006076,51276131)

作者简介: 杨 侠(1978-),男,湖北孝感人,武汉工程大学博士,副教授。

路回流至热水恒温水箱,热水恒温水箱内置加热电阻丝对其进行加热保温;冷水工质由冷水泵驱动从冷水箱流入换热器的壳程,在换热器本体换热后经回路流回至冷水箱。管壳程入口处安装有电磁流量计,显示由变频器调节的管壳程流量值。在换热器本体的管程和壳程的出入口分别布置温度变送器,管程出入口布置压力变送器,监测温度与压力值。



图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic drawing of the test device

电极布置如图 2(a) 所示,线电极置于换热管轴线位置,并贯穿换热管,管程和壳程分别接地,电极线一端与高压电发生器相连,另一端绝缘密封。线电极在换热管管口处的绝缘密封装置如图 2(b) 所示,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。高压电源为直流电,选用高压直流电场发生设备,输出电压为 0-40 kV,操作电流 1 mA,由于电流很小,电场完全屏蔽,在工程应用中安全且可行。

1.2 实验条件

在实验过程中脉动流发生器植入于换热器管程入口端,使管程内流体呈现出脉动流动形式,进而增强管内流体的扰动,实验中壳程流量保持不变,设为 $5.0 \text{ m}^3/\text{h}$,管程流量(因脉动流作用,管程流量指管内时均流量,下同)选取 5 组,分别设定为 0.1、0.2、0.3、0.4 和 $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$,以此考察不同管内流量下的换热与阻力特性。高压电极线布置于换热管中心,接通高压电后,使得换热管内的流体处于高压电场

作用下,实验中设定不同的电极电压,分别为 10、20、30 和 40 kV。在每一组管程流量条件下,均开展不同脉动频率(0、1、2 和 3 Hz)和不同电极电压的混合强化传热和阻力性能实验,频率 $f = 0$ 时为稳态流。表 1 为实验相关参数。

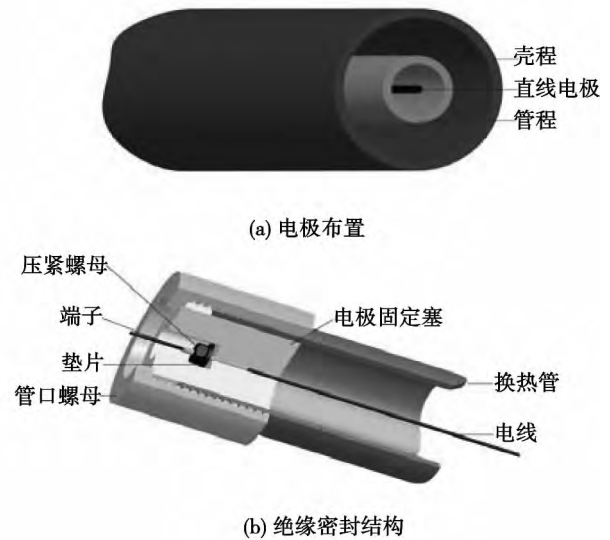


图 2 电极布置及绝缘密封结构

Fig. 2 Electrode arrangement and insulation packing structure

表 1 实验相关条件参数

Tab. 1 Relevant parameters of the test

参数名称	数值
换热器壳体直径/mm	50 × 2
壳体长度/mm	1 730
换热管直径/mm	25 × 1.5
换热管长度/mm	1 800
壳程入口温度/K	283
管程入口温度/K	331
壳程流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	5.0
管程流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	0.1 - 0.5
电场电压/kV	0 - 40
脉动频率/Hz	0 - 3

2 实验内容

2.1 传热计算

在不同脉动流参数和电压参数下进行 EHD/脉

动流的混合强化传热实验,通过计算换热器的总传热系数来衡量这种混合强化传热方式的换热效果。在实验中,换热器保温良好,近似于无热量损失,单位时间内管程放热量等于壳程吸热量,当管壳程热冷流体的换热达到平衡后,由布置于管程和壳程出入口的温度变送器测出实时的温度值,由传热学公式换算出总传热系数 α 。

管程热流体温度差:

$$\Delta t_1 = t'_1 - t''_1 \quad (1)$$

壳程冷流体温度差:

$$\Delta t_2 = t''_2 - t'_2 \quad (2)$$

换算管程放热量和壳程吸热量:

$$Q_1 = q_{v1}\rho_1 c_{p1}\Delta t_1 \quad (3)$$

$$Q_2 = q_{v2}\rho_2 c_{p2}\Delta t_2 \quad (4)$$

平均换热量:

$$Q = (Q_1 + Q_2) / 2 \quad (5)$$

对数平均温差:

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \Delta t_1 / \Delta t_2} \quad (6)$$

总传热系数:

$$\alpha = Q / A \Delta t_m \quad (7)$$

式中: t'_1 、 t''_1 —管程进出口温度, K; t'_2 、 t''_2 —壳程进出口温度, K; q_{v1} 、 q_{v2} —管壳程体积流量, m^3/s ; ρ_1 、 ρ_2 —管程热流体和壳程冷流体的密度, $\text{kg} \cdot (\text{m}^3)^{-1}$; c_{p1} 、 c_{p2} —管程热流体和壳程冷流体的定压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

2.2 阻力计算

阻力实验是考察在脉动流和 EHD 强化传热措施带来的强化效果的同时,在不同的脉动流参数和电压参数下,换热管内的阻力损失情况。由布置于换热管进出口处的压力变送器测得换热管内的压降值,进而衡量换热过程中的阻力损失。

管程压降:

$$\Delta p = p_1 - p_2 \quad (8)$$

阻力系数:

$$\lambda = \frac{2d\Delta p}{lu^2\rho_1} \quad (9)$$

管内雷诺数:

$$Re = \frac{\rho_1 u d}{\mu} \quad (10)$$

式中: p_1 、 p_2 —管程进出口的压力值, Pa; d —换热管当量直径, m; l —换热管的当量长度, m; u —管内时均流速, m/s; μ —换热管内流体的动力粘度, $\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 。

3 实验结果

当实验条件达到预设值,且换热稳定后,由温度和压力变送器测得管壳程出口温度值和管程进出口压力值,并换算出压降,限于篇幅,仅列出 $q = 0.1 \text{ m}^3/\text{h}$ 时的数据,如表 2 所示。

3.1 换热特性分析

为了说明 EHD/脉动流混合强化传热换热器的传热特性,现讨论不同电压和不同脉动流频率下的传热效果,图 3 给出的是同时在换热管中施加电场和脉动流两种强化手段,管程入口流量 q 为 $0.1 - 0.4 \text{ m}^3/\text{h}$,外加电场 $0 - 40 \text{ kV}$,换热管内脉动流体的脉动频率 f 为 $1, 2, 3 \text{ Hz}$,脉动幅度 A 为 1 ,管内传热系数 α 与电极电压 U 的关系。由图中曲线可知,在本次实验范围内,单独脉动流作用时, α 增加并不多,随着脉动流频率 f 的增加, α 增长仅约 0.05 倍,表明在管内雷诺数 $1418 < Re < 5722$ 之间时,脉动流单独作用时强化效果并不明显。

表 2 实验部分数据表

Tab.2 Partial data sheet of the test

U/kV	f=1 Hz			f=2 Hz			f=3 Hz		
	t'' ₁ /K	t' ₂ /K	Δp/Pa	t'' ₁ /K	t' ₂ /K	Δp/Pa	t'' ₁ /K	t' ₂ /K	Δp/Pa
0	317.49	283.42	124.4	317.28	283.35	487.8	317.23	283.40	1324.7
10	316.81	283.45	130.3	316.63	283.43	490.2	316.50	283.56	1345.9
20	316.65	283.54	126.7	316.51	283.45	500.3	316.24	283.61	1320.5
30	316.54	283.56	131.2	315.80	283.54	489.7	315.71	283.70	1324.5
40	316.34	283.68	127.6	315.47	283.73	490.2	315.23	283.87	1345.6

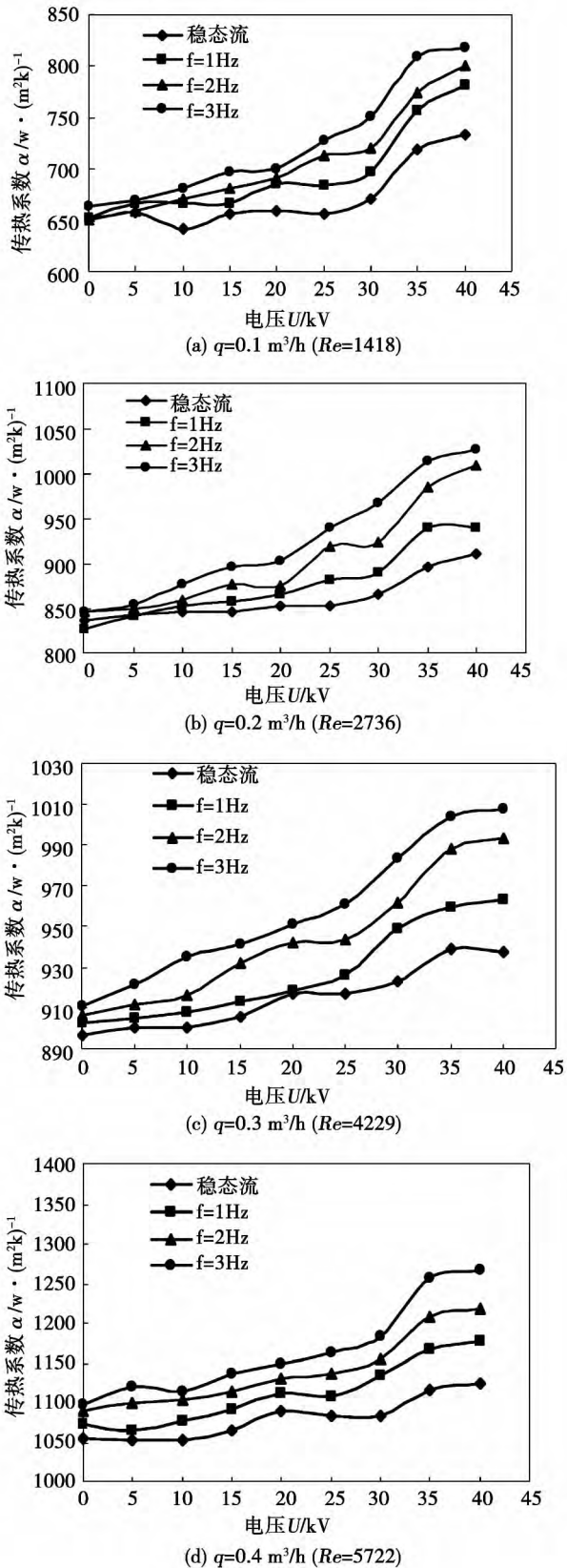


图 3 EHD/脉动流混合作用时传热系数 α - 电压 U 关系图
Fig. 3 Chart showing the relationship between the heat transfer α and voltage U under the combined action of the EHD and pulsation flow

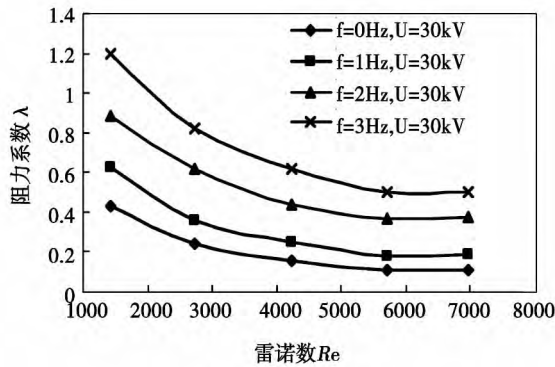
由图 3(a) - 图 3(d) 可知, 电场单独强化作用时, 随着电压的增大, 传热系数 α 有一定幅度的增长, 且 α 在低电压区域 (0 - 25 kV) 增长缓慢, 在高电压区域 (25 - 35 kV) 增长较快, α 最大提高约 0.12 倍 ($q=0.1 \text{ m}^3/\text{h}$), 这表明施加电场能够起到强化传热的作用, 这与文献 [14] 的结论相一致。分析原因, 当外加电场电压越高, 流体的离子化程度越高, 流场中自由电荷增多, 由此通过自由电荷产生的库伦力也就越大, 管内流体在流动过程中受到库伦力的径向扰动亦增强, 故传热系数 α 增大; 在不同的管内流量情况下 (0.1 - 0.4 m^3/h) α 增长呈现出相似的趋势, 流量越大 α 提高越多, 各流量状态下, 在高电压区域 (25 - 35 kV) 增长较快, 超过这个电压值以后 α 无明显增长趋势, 表明当管内雷诺数 $1418 < Re < 5722$ 时, 流体在电压 $35 < U < 40 \text{ kV}$ 时离子化程度已经达到饱和状态, 其强化传热作用已经达到极限, 即使再继续增加电压, 其离子化程度也不会增大。

由图 3(a) - 图 3(d) 还可见, EHD 和脉动流同时作用下, EHD 和脉动流具有一定的复合作用, 脉动流频率 f 对有电场条件下的对流换热有较大的影响, 当电压 $U > 30 \text{ kV}$ f 越大, 相同电场强度下管程传热系数 α 越大, α 最大为 $820.8 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$, α 最大提高约 0.25 倍 ($q=0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$), 这表明相比于单独电场强化, EHD/脉动流混合强化作用对传热效果有进一步提升的作用, 该现象说明了脉动流本身对流体传热效果影响不大, 但在加入电场以后, EHD 和脉动流混合作用有助于大幅度提高传热系数, 笔者认为, 这种强化传热的增益主要是由于在电场的基础上加入脉动流后, 电场、流场和热场达到了一种协同耦合作用, 三场的相互作用使得速度场与温度场的协同在此工况下达到了较高的程度, 进而换热效果得到增强。

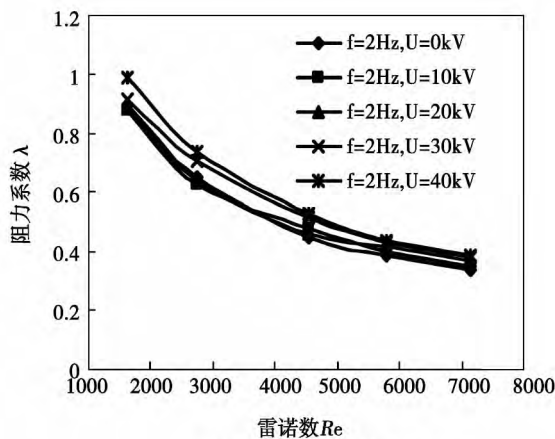
3.2 阻力特性分析

混合强化传热换热器换热管内的阻力系数随雷诺数的变化如图 4(a) - 图 4(b) 所示。由图可知, 在 EHD 与脉动流同时作用下, 随着 Re 的增大, λ 逐渐降低, 并且在相同雷诺数条件下, 脉动流强化措施情形下的阻力系数要明显高于无脉动情况; 在相同雷诺数条件下, 同频率工况时, 电压的增大与否, 对阻力系数的改变并不明显, 说明在混合强化传热过程中, 阻力损耗主要来源于脉动流的作用, 而电场对

阻力系数的影响较小;在本实验所研究的雷诺数范围内,混合强化传热下的阻力系数较无强化措施下的工况增大了 150% - 300%,这说明在混合强化传热中,在电场的基础上加入脉动流,脉动流起到辅助强化传热的作用,并以阻力损失增加为代价。



(a) 同电压工况下



(b) 同脉动流频率工况下

图 4 换热管内阻力系数 λ - 雷诺数 Re 关系图
Fig. 4 Chart showing the relationship between the drag coefficient λ and Reynolds number Re inside the heat exchange tubes

4 结 论

通过实验研究对以水为工质的单管换热器在 EHD/脉动流复合作用下的对流换热效果和阻力特性进行了研究,研究结果表明:

(1) 管程脉动流单独作用,同一流量条件下,脉动频率增加时传热系数无明显变化,即脉动流单独作用对圆管对流换热强化作用不显著。

(2) EHD 单独作用能显著强化对流换热,电压

相对较小时,传热系数 α 增长缓慢,当电压 $U > 30$ kV, α 较快增长,但随着电压的继续增加渐趋平缓,相比于无强化措施,单独电场强化条件下, α 最大提高约 0.12 倍。

(3) 脉动流和 EHD 具有一定的复合作用,脉动频率 f 对有电场强化条件下的传热系数有较大影响,尤其是当 $U > 30$ kV,脉动频率越大,相同电场强度下管程传热系数越大,对应的传热系数最大提高约 0.25 倍。

(4) EHD 和脉动流混合作用时,随着雷诺数 Re 的增大,阻力系数 λ 逐渐降低,并且在相同的 Re 情况下,脉动强化措施下的 λ 要明显高于无脉动情况;在相同雷诺数条件下,同频率工况时,电压的增大与否,对阻力系数的改变并不明显,即阻力损耗主要来源于脉动流的作用,而电场对此的影响较小。

参考文献:

[1] Turnbull R J. Electroconvective Instability with a Stabilizing Temperature Gradient [J]. Theory Phys. Fluids, 1968, 11(12): 2588 - 2596.

[2] 李瑞阳,陈贻宝,陈之航,等. EHD 强化传热机理分析[J]. 华东工业大学学报, 1996, 18(4): 5 - 12.
LI Rui-yang, CHEN Lai-bao, CHEN Zhi-hang, et al. Analysis of the mechanism governing the enhanced heat transfer by EHD [J]. Journal of East China University of Technology, 1996, 18(4): 5 - 12.

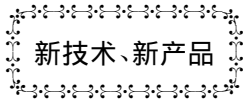
[3] 刘振华,陈玉明. 高压电场强化管内强制对流换热的实验研究[J]. High voltage engineering, 2000, 26(4): 38 - 42.
LIU Zhen-hua, CHEN Yu-ming. Experimental study of the forced convection heat exchange inside tubes intensified by a high voltage electric field [J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(4): 38 - 42.

[4] 刘振华,王 经. 均匀高压电场强化圆管和套管内油的层流强制对流换热的综合效应[J]. 中国电机学报, 2000, 7, 7(20): 71 - 74. LIU Zhen-hua, WANG Jing. Comprehensive effect of the laminar flow-forced convection heat exchange inside round tubes and sleeve tubes intensified by a uniform high voltage electric field [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering, 2000, 26(4): 38 - 42.

[5] 李瑞阳,施伯红,郝鸿凌,等. EHD 强化水平管外沸腾传热的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2000, 21(1): 97 - 100.
LI Rui-yang, SHI Bai-hong, YU Hong-ling. Experimental research of the boiling heat transfer outside horizontal tubes intensified by EHD [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2000, 21(1):

- 97 - 100.
- [6] Bergles A E. Heat transfer enhancement -The encouragement and accommodation of high heat fluxes [J]. Journal of Heat Transfer , 1997 ,119(2) : 8 - 19.
- [7] Richardson E G ,Tyler E. The Transverse Velocity Gradient near The Mouths of Pipes in Which an Alternating or Continuous Flow is Established [C]. Landon: Proceedings of the Physical Society , 1929.
- [8] Uchida S. The Pulsating Viscous Flow Superposed on the Steady Laminar Motion of Incompressible Fluid in a Circular Pipe [J]. ZAMP ,1956(7) : 403 - 422.
- [9] 俞接成 ,李志信. 圆管层流脉冲流动对流换热数值分析[J]. 工程热物理学报 2005 26(2) : 319 - 321.
YU Jie-cheng ,LI Zhi-xin. Numerical analysis of the convection heat exchange of a laminar pulsation flow inside round tubes [J]. Journal of Engineering Thermophysics 2005 26(2) : 319 - 321.
- [10] Mackley M R ,Stonestreet P. Heat Transfer and Associated Energy Dissipation for Oscillatory Flow in Baffled Tubes [J]. Chemical Engineering Science ,1995 50(14) : 2211 - 2224.
- [11] 杨 侠 ,喻九阳 ,徐建民 等. 脉动流、电场混合强化传热换热器 [P]. 中国: ZL200910060616. 7 2011 - 07 - 20.
YANG Xia ,YU Jiu-yang ,XU Jian-min ,et al. Heat transfer-based heat exchangers intensified by a combination of a pulsation flow and electric field [P]. China: ZL200910060616. 7 ,2011 - 07 - 20.
- [12] 杨 侠 ,喻九阳 ,徐建民 等. 电场强化传热换热器 [P]. 中国: ZL200810196900. 2 2010 - 02 - 24.
YANG Xia ,YU Jiu-yang ,XU Jian-min ,et al. Heat transfer-based heat exchangers intensified by an electric field [P]. China: ZL200810196900. 2 2010 - 02 - 24.
- [13] 杨 侠 ,喻九阳 ,徐建民 等. 脉动流发生器 [P]. 中国: ZL 200920083522. 7 2009 - 11 - 11.
YANG Xia ,YU Jiu-yang ,XU Jian-min ,et al. Pulsation flow generator [P]. China: 200910060616. 7 2011 - 07 - 20.
- [14] YANG Xia ,ZHANG Jie. Experimental Study on Convective Heat Transfer in Tube-Side of Water Jacket-Tube Heat Exchanger by Electrohydrodynamics Effect [J]. Journal of Natural Sciences of Wuhan University 2011 ,16(1) : 049 - 054.

(丛 敏 编辑)



基于安全系统和可靠性系数的汽轮机金属状态分析

据《Теплоэнергетика》2013 年 1 月刊报道,“全俄热工研究所”的专家根据安全系数和可靠性系数,对汽轮机的金属状态进行了分析。

论述了功率超过 200 MW 的汽轮机金属技术状态的评定方法。

列出了汽轮机部件使用寿命估算的方法。提出了汽轮机主要部件现行状态和剩余寿命监控的方法。

实现了汽轮机的部件设计,并制定了汽轮机极重要部件(涡轮转子、套装轮盘、高压缸和中压缸、隔板、停汽阀和调节阀、末级动叶和在相变压域内工作的叶片、紧固件等)的参数体系和相应于该体系技术状态的判据。

提出了设备现行技术状态评定的各个阶段。揭示了既单个评定各部件,也评定整个汽轮机技术状态的可能性。

(吉桂明 摘译)

recuperation μ exhaust steam recuperation μ combined recuperation μ thermal performance

EHD/脉动流混合强化传热换热器的传热与阻力特性实验研究 = **Experimental Study of the Heat Transfer and Resistance Characteristics of an EHD (Electrohydrodynamics) /Pulsating Flow Hybrid Enhanced Heat Transfer-based Heat Exchanger** [刊 汉] YANG Xia ,LIU Feng-liang ,XIONG Hui ,YANG Qing (College of Electromechanical Engineering ,Wuhan Engineering University ,Wuhan ,China ,Post Code: 430073) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014 29(3) . - 256 - 261

With water serving as the working medium μ experimentally studied was the influence of the electric field and pulsating flow on the heat transfer and resistance characteristics of a single tube heat exchanger. During the test μ the voltage value is set at 0 - 40 kV μ the frequency of the pulsating flow at $f = 1$ 2 and 3 Hz and its amplitude $A = ii$ μ the time - averaged flow rate inside the tube under the condition of the pulsating flow $q = 0.1 - 0.5$ m³/h. The test results show that under the single action of the pulsating flow in the tube path and an identical flow rate and with an increase of f μ the heat transfer coefficient α has no conspicuous change μ . e. the single action of the pulsating flow plays an inconspicuous role in enhancing the heat transfer inside the round tube. The single action of EHD can remarkably enhance the heat transfer. When the voltage is relatively small $\mu\alpha$ grows slowly and when the voltage $U > 30$ kV $\mu\alpha$ grows relatively quick but with a continuing increase of the voltage $\mu\alpha$ tends to become slow and smooth and can maximally increase by 0.12 times. Both the pulsating flow and EHD can play a certain combination role. f has a relatively big influence on α under the condition of the electric field being intensified μ especially μ when $U > 30$ kV μ the bigger f is μ the greater α in the tube path will be. The corresponding α can increase by about 0.25 times. Under the combination action of EHD and the pulsating flow μ with an increase of Re μ the resistance coefficient in the tube path λ will gradually decline and in case of an identical Re $\mu\lambda$ enhanced by the pulsating flow will be conspicuously higher than that without the pulsating flow. Under the condition that both Re and the frequency are identical μ whether or not the voltage increases has no influence on λ μ . e. the resistance loss mainly comes from the action of the pulsating flow while the electric field has a relatively small influence on λ . **Key words:** EHD (electrohydrodynamics) μ pulsating flow μ hybrid enhancement μ convection-based heat exchange

细微通道内低温 CO₂ 流动沸腾换热特性研究 = **Study of the Boiling Heat Exchange Characteristics of a Low Temperature CO₂ flow inside a Micro-channel** [刊 汉] ZHANG Liang ,LIU Jian-hua ,DING Yang (Refrigeration Technology Research Institute ,Shanghai University of Science and Technology ,Shanghai ,China ,Post Code: 200093) ,YE Fang-ping (Zhejiang Xinjin Air Conditioning Equipment Co. Ltd. ,Longquan ,China ,Post Code: 323700) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014 29(3) . - 262 - 266