

超声波除垢与强化传热实验研究

傅俊萍¹, 李录平¹, 刘泽利², 李秋仪²

(1. 长沙理工大学能源与动力工程学院, 湖南长沙 410076; 2. 华银株洲火力发电有限公司, 湖南株洲 412000)

摘要: 通过实验研究了流体在管内雷诺数达 5.11×10^4 时, 超声波功率对抑垢、除垢的匹配关系及声空化强度对传热系数的影响。研究表明, 超声波功率在 200 W 以下时具有抑垢效应; 当功率超过 200 W 以上时具有除垢效果, 并且除垢效果与波声功率成正比。超声波功率还对强化传热有明显影响。当超声波功率为 300 W 时, 传热系数达 $765 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 达到最佳传热效果。本文还初步研究了超声波传播方向改变时对除垢效果的影响。

关键词: 超声波除垢; 空化强度; 传热

中图分类号: TK124 文献标识码: A

1 前言

在电力、化工、纺织等行业中存在大量以水为载体的热交换器。这些换热器在运行中都存在结垢问题, 不仅使传热效果下降, 而且影响设备安全。目前国内常采用化学除垢、人工除垢、离子交换、电场防垢等方法除垢, 但这些除垢方法都需要投入大量资金, 防垢、除垢效果不够理想, 难以满足生产工艺需求。近几年超声波技术在锅炉水处理、换热器除垢、防垢、设备清洗等方面得到广泛应用, 国内外学者对此进行了多方面的研究, 但对超声波参数匹配以及各参数对抑垢、除垢、传热效果的影响研究还不多。本文旨在研究动态状况下, 超声波各参数和抑垢、除垢及强化传热之间的关系。

2 实验装置

以往对超声波除垢和防垢实验多数为静态实验, 动态实验时流体流速仅为 0.05 m/s 。为使实验更接近工程实际, 组建的超声波除垢与强化传热实验台, 如图 1 所示。实验段 1 和实验段 2 均为可拆换的实验管段, 两管处在同一平面。高位水箱 1 中设有电加热器, 温度可实现 $30 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间控制。系统中流体流量可调。水箱及管道外均有保温层。热电偶精度 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$, 流量

计精度 0.001 m^3 , 天平精度 0.01 g 。超声波频率为 28 kHz, 功率在 $100 \sim 600 \text{ W}$ 之间调节。

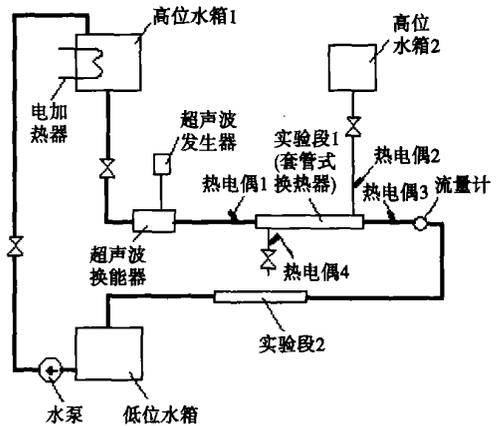


图 1 实验系统示意图

在实验前先在低位水箱中加入少量无水氯化钙 CaCl_2 , 经测定本实验流体介质中 Ca^{2+} 的含量为 990 mg/L ; Mg^{2+} 的含量为 9.53 mg/L ; 总硬度为 1.4 g/L ; pH 值为 7.19; 悬浮物 178 mg/L ; 碱度为 1.28 mmol/L 。 CaCl_2 充分溶解后调节系统水流量使其达到稳定运行, 并将高位水箱 1 的温度控制在 $50 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间。待系统运行一段时间后, 分别对超声波在不同功率下的抑垢、除垢效果和强化传热效应进行实验研究。

3 超声波抑垢、除垢机理分析

当液体在超声波作用下, 液体某个区域会形成负压, 此时液体中将产生空穴和气泡并迅速长大, 然后突然闭合。当这些空穴和气泡突然闭合时, 会产生激波。经 Rayleigh 研究, 当气泡压缩到 R 时, 距离 $1.587 R$ 处压力最大, 可达千个大气压。此种现象即为超声波空化效应。超声波空化作用一方面可使

收稿日期: 2005-11-16; 修订日期: 2006-02-08

作者简介: 傅俊萍(1961-)女, 湖北武汉人, 长沙理工大学副教授。

垢粒物质在管壁上附着能力降低而逐渐脱落;另一方面可使水裂解析出 OH⁻ 离子, OH⁻ 又与溶液中的 Ca⁺ 离子结合生成 CaOH⁻ 使水生成的积垢融解。经研究得知,若使水产生空化需克服液体分子的内聚力,液体空化的最低声强或声压幅值称为空化阈,其影响因素如下式:

$$P = P_0 - P_v + \frac{2}{3\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{2T}{R_0}\right)^3 \left[(P_0 - P_v) + \frac{2T}{R_0}\right]}$$

$$P = 0.8(\log \eta + 5)$$

式中: P —空化阈; P_0 —静水压力; P_v —蒸汽压力; R_0 —空化核开始半径; T —液体表面张力; η —液体粘性系数。根据念保平等人的研究表明,当液体在超声波的作用下^[2],液体表面张力粘度有所降低,空化阈也随之降低。

4 超声波抑垢实验

表 1 实验段 1 和实验段 2 采用铜管时超声波抑垢实验结果

超声波功率 /W	管内流速 /m ² s ⁻¹	实验前重量 M ₀ /g	实验后重量 M ₁ /g	M ₁ - M ₀	运行时间 /h	积垢率 /g·m ⁻² ·h ⁻¹	抑垢率 ψ /%
实验段 1	0	324.41	324.72	1.1	78	0.308	—
实验段 2		284.65	285.48	0.79	78	0.221	—
实验段 1	100	171.8	171.82	0.02	143	0.003	93.51
实验段 2		176.16	176.33	0.17	143	0.000 2	86.3
实验段 1	200	—	—	—	—	—	—
实验段 2		805.80	805.26	0.54	130	0.100	89.17

表 2 实验段 1 和实验段 2 采用不锈钢管时超声波抑垢实验结果

超声波功率 /W	管内流速 /m ² s ⁻¹	实验前重量 M ₀ /g	实验后重量 M ₁ /g	M ₁ - M ₀	运行时间 /h	积垢率 /g·m ⁻² ·h ⁻¹	抑垢率 ψ /%
实验段 1	0	99.12	99.42	0.3	140	0.068	—
实验段 2		97.92	98.10	0.18	140	0.040 9	—
实验段 1	100	99.14	99.19	0.05	140	0.008	86.9
实验段 2		98.85	98.98	0.07	140	0.012 5	81.6

从实验结果中得出,当实验段 1 和实验段 2 采用铜管时,无超声波作用时,实验段 1 积垢率 0.308 g/(m²·h),实验段 2 积垢率 0.221 g/(m²·h),超声波功率在 100 W 时,实验段 1 的抑垢率为 93.51%、实验段 2 的抑垢率为 86.3%;当超声波功率达 200 W 时,实验段 2 抑垢率为 89.17%,实验段 1 开始除垢。当实验段 1 和实验段 2 采用不锈钢管时,无超声波作用时,实验段 1 积垢率 0.068 g/(m²·h),实验段 2 积垢率为 0.040 9 g/(m²·h)。超声波功率在 100 W 时,实验段 1 的抑垢率为 86.9%、实验段 2 的抑垢率为 81.6%。从上述实验结果看出,不锈钢管在无超

实验段 1 和实验段 2 先采用铜管进行实验,然后再换成不锈钢管材。实验过程为:将超声波功率分别设置在 100 W、200 W 处,调节系统管内流速使其达 1.2~2.5 m/s。用天平称出实验段 1 和实验段 2 在无超声波作用和有声波作用时实验前的重量,当系统运行一段时间后,取下实验段 1 和实验段 2,待两管自然风干后称其重量,并用下式计算超声波的抑垢率。

$$\psi = (\phi_0 - \phi_n) / \phi_0$$

式中: ψ —超声波抑垢率,%; ϕ_0 —无超声波作用的积垢率, g/(m²·h); ϕ_n —有超声波作用的积垢率, g/(m²·h)。

$$\phi_{0(n)} = (M_0 - M_t) / S \cdot t$$

式中: M_0 —实验前铜管重量, g; M_t —实验后铜管重量, g; S —积垢面积, m²; t —作用时间, h。

实验结果见表 1 和表 2。

声波作用时,积垢率比铜管小,而施加超声波后,抑垢率比铜管低,这可能是由于不锈钢管管壁光滑,垢粒不易附着,由于不锈钢管积垢率低,因此,超声波对其抑垢的效果不是很明显。

5 超声波除垢实验

利用图 1 所示设备,将超声波功率分别设置在 200 W、400 W、600 W 处,调节系统管内流速使其达 1.2~2.5 m/s。实验段 1 和实验段 2 均采用有垢层的铜管,重复上述实验过程,得出超声波在不同功率下除垢效果。

表3 超声波除垢实验结果

	超声波 功率 /W	管内 流速 /m ³ ·s ⁻¹	实验前 重量 /g	实验后 重量 /g	$M_0 - M_1$	运行 时间 /h	积垢率 /g·m ⁻² ·h ⁻¹
实验段 1	200	1.96	820.43	819.20	1.23	130	0.229
实验段 2			805.80	805.26	—	130	—
实验段 1	400	1.91	822.02	820.43	1.59	130	0.296
实验段 2			807.42	805	1.46	130	0.264
实验段 1	600	1.85	844.62	841.46	3.16	130	0.570 09
实验段 2			733.96	731.2	2.76	130	0.567

从表3中得出,当超声波功率达200W时,实验段1发生除垢作用,除垢效果随超声波功率的增加而增强。由于超声波是以水为传播载体,其传播方向随水流的方向变化而变化,但其除垢效果将有所减弱。从表1和表3中得出,由于水流方向改变180°,超声波抑垢率减少7.12%,而除垢效果平均减少10.81%~0.53%。

6 强化传热实验

本实验装置实验段1同时也是一套管式换热器。将电加热器的温度上限设定在60℃,管内流量稳定在 $3 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 左右,雷诺数达 5.346×10^4 。调节高位水箱的流量,用量筒测量实验段1套管外的流量,并利用热电偶测出套管内和套管外的进出口流体温度。经多次测量后利用下式计算套管换热器各工况时传热系数,实验结果见图2。其中套管换热器的面积为 0.043 m^2 。

$$k = c_p q_{m2} (t_2'' - t_1'') / (A \cdot \Delta t_m)$$

式中: k —传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; c_p —套管外流体定压比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; q_{m2} —套管外流体质量流量, kg/s ; A —换热面积, m^2 ; Δt_m —套管式换热器对数平均温差, $^\circ\text{C}$; t_1' 、 t_2'' —套管外流体的进出口处的温度, $^\circ\text{C}$ 。

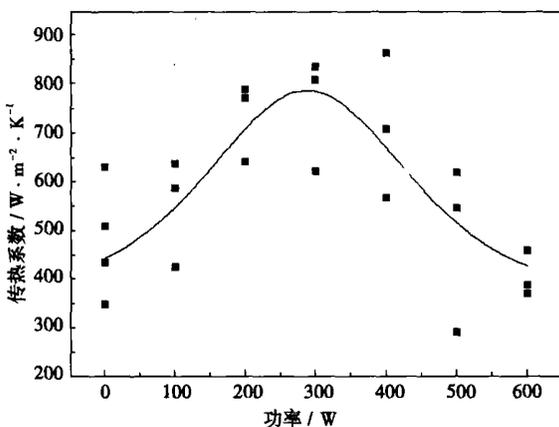


图2 平均传热系数与功率关系

(何静芳 编辑)

由图2可见,流体加载超声波后,功率在100~500W间时,传热系数均比未加超声波时有所增强。在功率为300W左右时,传热系数达最大值。若功率超过500W时,传热系数将比未加载超声波时有所下降。这主要是当加载超声波时,在流体中产生空化作用,在瞬间形成微小气泡,当气泡破裂时将形成强烈冲击波,破坏流体的层流底层,进而强化传热。超声波的热效应也会对强化传热有一定效果。另外,超声波强度又称声能强度,当声强过高则会使空化核在声波的作用下长得很大从而形成声屏蔽,导致系统可利用的声场能量减少,传热效果下降。因此,超声波功率与传热系数之间有一最佳匹配关系。

7 结论

(1) 对雷诺数达 5.11×10^4 时的管内流动流体,加载超声波具有抑垢和除垢作用。当超声波功率在100~200W时,具有抑垢作用。当超声波功率达200~600W时,具有除垢作用,其效果随超声波功率增加而增加。

(2) 超声波能量可随介质的流动传播,但其抑垢和除垢作用将随介质流动方向改变而有所减弱。若流动方向改变180°时,除垢效果平均减少10.81~0.53%。

(3) 超声波的空化作用和热效应能提高换热器的传热管系数,其空化强度与传热系数间存在一定关系,并在300W左右时换热效果最佳。

参考文献:

- [1] 应崇福. 超声学[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [2] 念保平, 陈金平. 超声波抑垢积垢的影响因素与机理研究[J]. 天津化工, 2001, 5(9): 10-12.
- [3] 梁成浩, 白忻平. 超声波阻垢性能的研究[J]. 中国给排水, 2003, 19(13): 64-65.
- [4] 周定伟, 刘登瀛, 胡学功. 声空化场下单相对流传热的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(1): 82-84.

Through the adoption of a full three-dimensional numerical simulation technology and by use of a $k-\epsilon$ dual equation turbulent model and algorithm SIMPLE, a numerical simulation was conducted of the three-dimensional turbulent flow field of the film cooled stator-blade cascade at the first stage of a new type of gas turbine. The simulation was accomplished by solving a three-dimensional viscous compressible Favre-averaged Navier-Stokes equation. Through a change in parameters of the leading-edge film pores of the gas turbine, the temperature distribution on the outer surface of stator blades and its cooling-air flow rate have been calculated respectively. The results show that the diameter, quantity and jet flow direction of leading-edge film pores can very conspicuously impact on the blade surface cooling effectiveness. In view of the above, a new version is proposed for the blade leading-edge film cooling design, providing a valuable guide for relevant engineering designs. **Key words:** gas turbine, leading-edge film cooling, numerical simulation, turbine, first stage stator blades

一种新型微热管传热性能的实验研究 = An Experimental Study of the Heat Transfer Performance of Innovative Micro HeatPipes [刊, 汉] / TANG Qiong-hui, XU Jin-liang, LI Yin-hui, et al (Guangzhou Energy Source Research Institute under the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, China, Post Code: 510640) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(4). — 350 ~ 354

An experimental study is conducted of a new type of flat-plate micro heat pipes featuring a zero-chamfer curved surface. Based on heat resistance, the thermodynamic performance of micro heat pipes is studied under such conditions as different inclination angles, working media and liquid-filling ratios. To facilitate its analysis, the total heat transfer resistance of the heat pipes is divided into four items: heating heat-transfer resistance, heat-transfer resistance of evaporation section, heat-transfer resistance of condensation section and heat-sink heat-transfer resistance. The following conclusions have been arrived at through tests: the factors that cause the main change in the total heat-transfer resistance of the micro heat pipes are the heat-transfer resistance of both the condensation section and the evaporation one. Compared with corresponding flat-plate type heat exchangers without working media, the main heat-transfer resistance of a test piece becomes the heat sink one. The heat-transfer resistance in both the evaporation section and the condensation section accounts for a relatively small proportion. According to different liquid filling ratios and inclination angles, the heat transfer limit of a micro heat pipe will be caused respectively by local dry burning and a transition from nuclear boiling to film boiling. The experiments show that this new type of micro heat pipe has bright application prospects, but an in-depth study of its operating mechanism is still needed. **Key words:** flat-plate type micro heat pipe, working medium, inclination angle, liquid filling ratio, electronic cooling

超声波除垢与强化传热实验研究 = An Experimental Study of Incrustation Removal and Intensified Heat Transfer by Ultrasonic Techniques [刊, 汉] / FU Jun-ping, LI Lu-ping (Energy Source and Power Engineering College under Changsha University of Science and Technology, Changsha, China, Post Code: 410076), LIU Ze-li, LI Qiu-yi (Huayin Zhuzhou Thermal Power Generation Co. Ltd., Zhuzhou, China, Post Code: 412000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(4). — 355 ~ 357

An experimental study is conducted of the matching relations between ultrasonic wave power on the one hand and incrustation inhibition and removal on the other as well as of the effect of sonic cavitation-intensity on heat transfer coefficient when the Reynolds number of fluid in a tube amounts to 5.11×10^4 . The research results show that the ultrasonic waves attain an incrustation inhibition effectiveness when the ultrasonic wave power is below 200 W and become effective in removing incrustation when the ultrasonic wave power is over 200 W. The incrustation removal effect is in direct proportion to the magnitude of the ultrasonic wave power. Furthermore, the ultrasonic wave power has an obvious effect on heat transfer intensification. When the ultrasonic wave power is 300 W, the heat transfer coefficient will be $765 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, achieving an optimum heat transfer effect. In addition, a preliminary study is performed of the possible impact on incrustation removal effect when a change in ultrasonic-wave propagation direction takes place. **Key words:** ultrasonic incrustation removal, cavitation intensity, heat transfer

螺纹槽管错排管束的传热特性及流动阻力特性研究 = A Study of Heat Transfer Performance and Flow-resistance Characteristics of Staggered Tube Bundles Composed of Spirally Fluted Tubes [刊, 汉] / AN Yue-li, ZHAO Li, HUANG Xin-yuan (Energy Source and Power Engineering College under the Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(4). — 358 ~ 361

As a kind of effective intensified heat transfer elements, spirally fluted tubes are widely used. On the basis of experim-