

DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201611028

声空化污水换热器的防除垢与强化换热实验

钱剑峰¹,任启峰¹,徐 莹¹,张承虎²,张吉礼³

(1.哈尔滨商业大学 能源与建筑工程学院,哈尔滨 150028;2.哈尔滨工业大学 市政环境工程学院,哈尔滨 150090;
3.大连理工大学 土木水利学院,辽宁 大连 116024)

摘 要:为解决污水源热泵系统中污水换热器结垢导致的热阻增大、传热效果恶化问题,将声空化技术引入污水换热器中.搭建声空化污水换热器的防除垢与强化换热动态实验台,研究防除垢与强化换热的数学模型,对不同影响参数下污水换热器换热管的污垢增长特性和防除垢规律以及强化换热效果开展实验研究.结果表明:换热管结垢量、结垢率、积垢速率及污垢厚度均随污水流速的降低而增大,最大结垢量为 106 g,结垢厚度 0.54 mm,积垢速率为 12.6 kg/(m²·h);除垢率随流速及声空化作用时间的增大而增大,但非一直增大,最大除垢率达 85.7%;污水黏度对各项指标影响巨大且流速越小影响越大;换热管的传热系数及其提高百分比均随声空化作用时间、污水温度以及污垢含水率的增加而增大,最大提高百分比达 53.4%.故声空化污水换热器防除垢与强化换热具有一定的可行性和高效性,对节能减排具有重要意义.

关键词:污水源热泵;声空化;污水换热器;防除垢;强化换热

中图分类号: TB657.5;TB559 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2018)02-0166-07

Experiment on the antiscaling and descaling and heat transfer enhancement of acoustic cavitation sewage heat exchanger

QIAN Jianfeng¹, REN Qifeng¹, XU Ying¹, ZHANG Chenghu², ZHANG Jili³

(1.School of Energy and Civil Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China; 2.School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3.School of Civil & Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: The scaling of sewage heat exchanger in sewage source heat pump system leads to increase of thermal resistance and decrease of heat transfer effect. In order to solve these problems, the acoustic cavitation technology was introduced into sewage heat exchanger. The dynamic experiment table of antiscaling & descaling and heat transfer enhancement by acoustic cavitation sewage heat exchanger was established. Mathematical models of acoustic cavitation antiscaling & descaling and heat transfer enhancement were analyzed. The fouling growth characteristics, and the law of antiscaling & descaling and heat transfer enhancement effect of sewage heat exchanger tubes under different influence parameters were researched. The results are as follows. The amount of scale, scaling rate, fouling rate and fouling thickness of heat exchanger tubes are increased with the decrease of sewage flow velocity. The largest amount of scaling is 106 g, fouling thickness is 0.54 mm, and fouling rate is 12.6 kg/(m²·h). Descaling rate increased with the increase of flow velocity and acoustic cavitation action time, and the largest descaling rate is 85.7%. Sewage viscosity has a huge impact on the various indexes and has greater influence with the smaller velocity. Heat transfer coefficient and its enhanced percentage are increased with the increase of acoustic cavitation action time, temperature of sewage and fouling moisture rate, and in addition, the percentage of heat transfer coefficient runs up to 53.4%. So the antiscaling & descaling and heat transfer enhancement of acoustic cavitation sewage heat exchanger have a certain feasibility and high efficiency, and great significance to energy conservation and emissions reduction.

Keywords: sewage source heat pump; acoustic cavitation; sewage heat exchanger; antiscaling and descaling; heat transfer enhancement

污水换热器是污水源热泵系统的关键设备,其

经济性和高效性决定着污水源热泵的发展前景.尽管污水换热器的防除垢与强化换热研究已得到普遍重视,但还未完全解决^[1-6].故研究和开发新技术、新方法是解决污水换热器结垢问题的当务之急.声空化是指在超声波作用下液体介质中的微气泡被随机激活,处在波峰稀薄阶段,其微气泡内压强小于原本静压强,气泡受拉迅速涨大;处在波峰密集阶段,又

收稿日期: 2016-11-04

基金项目: 中国博士后科学基金(20100471447);国家自然科学基金(51208160);黑龙江省高校青年人才培养计划(UNPYSCT-2015072)

作者简介: 钱剑峰(1979—),男,教授,博士后;
张吉礼(1969—),男,教授,博士生导师

通信作者: 钱剑峰, qianjianfeng2002@163.com

突然被绝热压缩、破碎直至湮灭等一系列动力学过程,可清除物体表面污垢,达到清洗净化的目的.声空化技术因具有很好的防除垢能力而在石化、能源等领域中的通用换热设备得到广泛的应用^[7-14].赵阳等^[10]对超声波处理后的阻垢性能进行了实验研究,发现不同温度、硬度条件下阻垢效果明显,在高温、低硬度下阻垢效果更显著,且超声波频率为40 kHz不如28 kHz时的阻垢效果好.Li等^[11]利用超声空化作用进行了防除垢实验研究,指出声空化强度、距离以及液体温度和浓度对防除垢有着不同的影响.发现声强越小防垢效果越好,除垢效果却相反;而较大的浓度和近距离的超声波则有利于防垢和除垢.丘泰球等^[12]理论研究了碳酸钙晶体的形状和大小对超声波防除垢的影响,发现超声处理不仅防止结垢,而且降低成形的规模,平均效率控制在76.4%,从而提高了蒸发强度和传热系数.傅俊萍等^[13]对超声波除垢与强化传热进行了实验研究,指出功率对其效果影响显著.Zhou等^[14]对水平圆管进行了实验研究,发现声空化对单相对流换热和沸腾换热均具有显著的强化效果.

研究表明声空化技术具有防除垢与强化换热能力,但鲜有在污水源热泵系统中的研究和应用,故其研究价值和发展前景广阔.笔者课题组进行多年的声空化和污水源热泵技术研究,并取得多项成果^[15-19],其中结合声空化技术,在利用污水低位热能方面提出了一种创新装置——声空化污水换热器^[20].基于前期的研究成果及实验台,对声空化作用时间为0~60 min,污水流速为0.45~1.74 m/s,污水温度为10℃/20℃,污垢含水率为35%~95%以及不同污水黏度等影响参数开展实验研究,分析声空化防除垢与强化换热数学模型,对比影响参数对声空化污水换热器换热管的污垢增长特性和防除垢规律以及强化换热效果的影响.

1 实验

1.1 实验装置与原理

声空化污水换热器的防除垢与强化换热动态实验台如图1所示.实验工质为管道内流动的城市污水,按实验要求进行调配并储存在污水水箱中.为保证管道泵的正常工 作,在水箱的出入水口均设有3 mm过滤筛网,以防止大颗粒杂质污垢进入实验管道.具体实验器材明细见表1.

1.2 实验步骤与方法

声空化污水换热器的防除垢与强化换热实验共分为两组,第一组实验直接采用城市污水,第二组实验在城市污水中增加一定量生活用油,以提高污水

黏度,从而改变实验污水水质,其他实验条件及步骤和第一组相同.

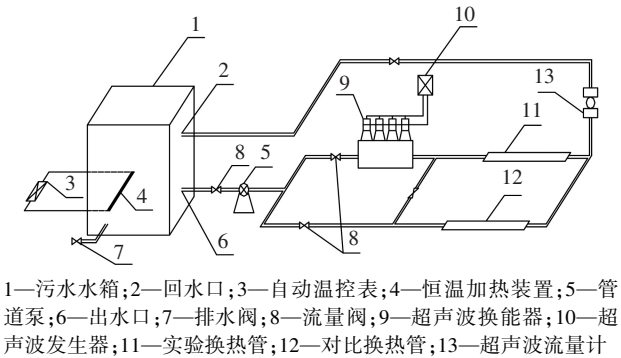


图1 实验装置

Fig.1 Schematic diagram of the experimental principle
表1 实验器材明细

Tab.1 Experimental equipment list	
设备	参数规格
污水水箱	组合式玻璃水箱,保温隔热,尺寸:1 m×1 m×1 m
超声波发生器	型号:AS500-28;电源输入:AC220V;频率 <i>f</i> :28 kHz;最大功率 <i>P</i> :500 W
超声波换能器	类型:压电式;数量:10个
管道泵	型号:40SG6.3-20;流量 <i>Q</i> =6.3 m ³ /h;扬程 <i>H</i> =20 m;转数 <i>n</i> =2 800 r/min; <i>P</i> =1.5 kW
换热管	实验换热管管长1.41 m,对比换热管管长1.40 m;均为碳钢换热管,外径20 mm,内径15 mm
电子称	量程5 100 g,分度值0.1 g
其他	生活用油、加热装置、自动温控表、过滤筛网、搅拌棒、电子表、螺丝刀、扳手等

每组实验主要分为两个部分,包括前期末施加声空化的换热管结垢实验和施加声空化的除垢实验,其具体实验步骤如下:1)实验前量测污水温度、密度、黏度以及水位等资料;清洁干燥和称量两根碳钢换热管,记录相关数据并安装换热管到实验台.2)打开流量阀,开启管道泵,记录实验开始时间和污水流速.3)系统至少运行96 h后,卸下及干燥称重实验换热管,并记录实验停止时间和换热管质量.4)将结垢稳定的实验换热管安装到实验台,连接超声波系统;设定超声波功率并运行超声波发生器,开启管道泵,记录设备运行时间.5)每隔5 min(或10 min)的声空化作用时间,停止超声波发生器和管道泵,卸下换热管干燥称重并记录,直至换热管质量不变.6)每隔一段时间搅拌实验污水,使污水浓度均匀分布,不沉积在水箱底部;当污水因蒸发等原因减少时,及时补水.7)实验结束后,按要求整理实验台并分析整理所得实验数据.

在相同实验条件下,改变每组实验的影响参数,以便进行对比实验.其影响参数主要包括污水流速、污水温度、污水黏度、污垢含水率和声空化作用时间.通过改变流量阀开度,选择合适的流量,进而控

制污水流速 v 在 $0.45 \sim 1.74 \text{ m/s}$, 污垢含水率 C 计算选取为 $35\% \sim 95\%$ 以及声空化作用时间 t_2 设定为 $0 \sim 60 \text{ min}$, 污水温度为 $10 \text{ }^\circ\text{C}/20 \text{ }^\circ\text{C}$.

2 数学模型

2.1 防除垢数学模型

评价对实验换热管声空化防除垢效果的好坏, 可通过以下数学模型进行分析:

$$\alpha = \frac{W_1 - W_0}{W_1} \times 100\% = \frac{\Delta m}{W_1} \times 100\%. \quad (1)$$

式中: α 为换热管内表面的结垢率, %; W_1 为积垢后换热管质量, g; W_0 为积垢前换热管质量, g; Δm 为换热管结垢量, g.

$$\beta = \frac{W_1 - W_0}{S \cdot t_1}. \quad (2)$$

式中: β 为换热管积垢速率, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; S 为换热管内表面面积, m^2 ; t_1 为换热管积垢时间, h.

$$\delta = \frac{W_1 - M_0}{\rho \pi d \cdot L}. \quad (3)$$

式中: δ 为换热管内污垢厚度, mm; M_0 为洁净时换热管的质量, g; L 为换热管管长, m; ρ 为污垢密度, kg/m^3 ; d 为换热管内径, m.

$$\Phi = \frac{m_1}{\Delta m} \times 100\%. \quad (4)$$

式中: Φ 为换热管内表面的除垢率, %; m_1 为施加声空化作用后换热管累积除垢量, g.

2.2 强化换热数学模型

评价对实验换热管内声空化强化换热效果, 可通过以下数学模型进行分析:

$$\frac{1}{K_f} = \frac{1}{h_w} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{h_j}. \quad (5)$$

式中: K_f 为换热管结垢后的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; h_j 为换热管污水侧表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; h_w 为换热管外侧表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; λ_1 、 λ_2 分别为为换热管内污垢和换热管的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; δ_1 、 δ_2 分别为换热管内污垢和管壁的厚度, m.

$$\frac{1}{K_j} = \frac{1}{h_w} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{h_j}. \quad (6)$$

式中 K_j 为洁净换热管的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

$$\varepsilon = \frac{K_w - K_f}{K_f} \times 100\%. \quad (7)$$

式中: ε 为传热系数提高百分比, %; K_w 为结垢稳定后的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

$$h_j = \frac{\lambda \cdot Nu}{d}. \quad (8)$$

式中: λ 为换热管内污水导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; Nu

为 Nusselt 数, 根据前期研究采用下式计算:

$$Nu = 0.025 Re^{3/4} Pr^{1/3}. \quad (9)$$

式中: Pr 为 Prandtl 数, Re 为 Reynolds 数.

3 结果与分析

3.1 污垢增长特性实验研究

本节实验主要通过式(1)~(3)的计算, 分析在不同污水黏度下, 污水流速对换热管内表面的结垢量、积垢速率、污垢厚度和结垢率等指标的影响. 在不同污水黏度下, 换热管内表面结垢量、积垢速率及污垢厚度随污水流速的变化如图 2、3 所示. 可以看出, 换热管内表面结垢量、积垢速率及污垢厚度均随着污水流速的增大而逐渐降低, 并呈减弱趋势; 且在相同流速时, 污水黏度越小则各指标相应减小, 流速越小差别越大. 在本实验条件下, 最大结垢厚度达 0.54 mm , 结垢量 106 g , 积垢速率相应达到 $12.6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; 可看出污水黏度对换热管内表面结垢影响巨大. 由式(1)可知, 结垢率的变化正比于结垢量的变化.

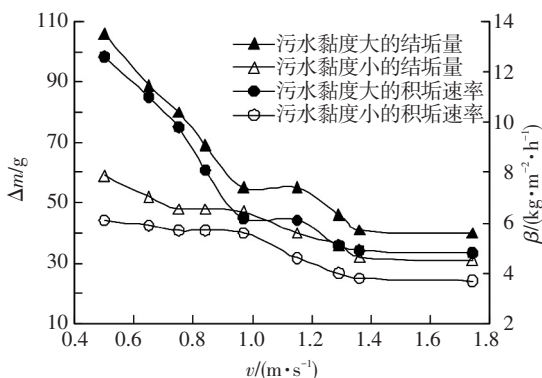


图 2 流速对结垢量和积垢速率的影响

Fig.2 Influence of velocity on amount of scaling or fouling rate

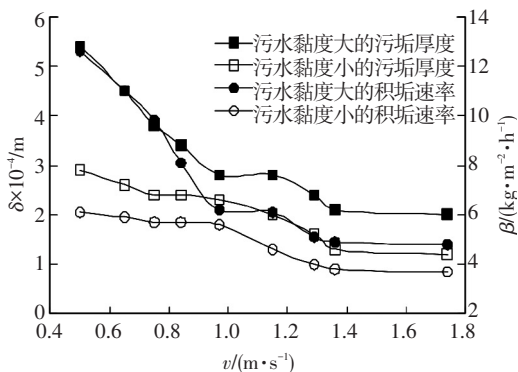


图 3 流速对污垢厚度和积垢速率的影响

Fig.3 Influence of flow velocity on fouling thickness or rate

造成上述现象的原因是在不同流速下, 污水对换热管内表面的切应力是不同的, 污水流速的增加, 后续增长的污垢薄膜变形、受力脱落, 从而污垢剥蚀率增大, 致使搅拌力及对管壁的摩擦冲击力相应加大, 故积垢速率及结垢厚度均降低. 而当污水黏度增大时, 污垢

成核速率增加,且管壁结垢的附着力增大,同时污水黏滞系数也增大,进而结垢情况愈发严重。

3.2 防除垢实验研究

本节实验待结垢稳定后,对换热管内施加声空化作用,并选用式(4)计算的除垢率作为衡量声空化防除垢效果的指标.对比不同流速下,换热管内表面除垢率随声空化作用时间的变化,结果如图 4 所示.可以看出,本实验条件下,在声空化作用时间一定时,污水流速越大,除垢率越大,当流速为 1.29 m/s 时,最大除垢率达 85.7%,但除垢率并不是一直随流速的增大而增加.在流速不变的情况下,随声空化作用时间的增加,除垢率也逐渐增大,在 50 min 左右时趋于稳定,甚至存在下降趋势;当污水流速为 0.65 m/s 时,增加的生活用油量低于其他流速下的含油量,其污水黏度比其他流速时有所降低.而一般情况下,污水流速越大,除垢率越大.但由图 4 可看出,当污水流速为 0.65 m/s 时,相应的除垢率明显高于流速为 0.84 和 0.91 m/s 时的除垢率.故污水流速对除垢率的影响,不能体现此时实验的规律变化,而体现规律变化的影响参数应为污水黏度,说明污水黏度对除垢率也有一定的影响。

造成上述现象的原因是声空化作用时产生空穴和气泡,使污水中的成垢物质破碎,降低其附着力并

将已有垢层粉碎、破坏.一方面由于污水流速的增加,加大了污水对换热管内表面的冲击作用,有利于污垢的脱落.另一方面由多普勒效应可知,流速越大,相当于声速提高,则单位时间内传播距离增大,相应的单位体积内的能量减小,故污水流速超过一定值后,除垢效果反而下降.当污水黏度增加时,污水粘滞系数增大,含气量则减少,当施加声空化作用时,声空化效应就越难发生,同时声吸收能力也加强,进而影响其除垢效果。

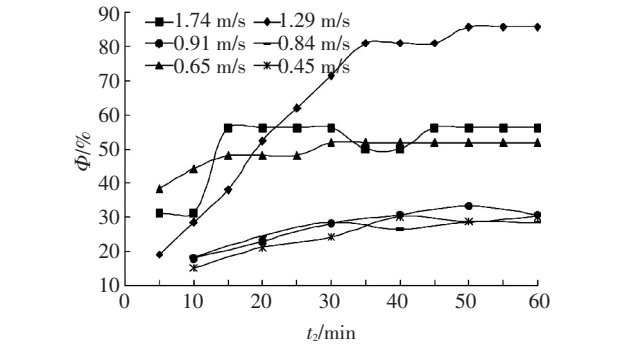


图 4 声空化作用时间对除垢率的影响
Fig.4 Influence of acoustic cavitation time on descaling rate

3.3 强化换热实验研究

本节实验选用传热系数及传热系数提高百分比作为衡量声空化强化换热效果的指标,可由式(5)~(7)计算得到,选取的相关实验参数如表 2 所示。

表 2 模型计算的实验参数					
Tab.2 Experimental parameters of model calculation					
$h_w/$ ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	$\lambda_1/$ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	$\lambda_2/$ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	$\lambda/$ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	Pr	$\nu/$ ($m^2 \cdot s^{-1}$)
3 000	1.3	49.8	0.599	9.52($t=10\text{ }^{\circ}C$); 7.02($t=20\text{ }^{\circ}C$)	$1.306 \times 10^{-6}(t=10\text{ }^{\circ}C)$; $1.006 \times 10^{-6}(t=20\text{ }^{\circ}C)$

当污水流速为 1.29 m/s、污垢含水率为 95% 时,不同温度下,声空化作用后的传热系数及其提高百分比随作用时间的变化如 5 所示.可以看出,换热管的传热系数及其提高百分比均随声空化作用时间的增加而增大,直至 50 min 左右时趋于稳定,传热系数效率提高百分比最大达 53.4%.污水温度 20 ℃ 时的传热系数及其提高百分比均高于 10 ℃ 时的数值,且在其他流速下,强化换热效果相类似。

当污水流速为 1.29 m/s 时,不同污垢含水率下,传热系数及其提高百分比随声空化作用的变化如图 6、7 所示.可以看出,随施加声空化作用时间的增加,传热系数有所增加,但增加幅度相差较大;污垢含水率越高,传热系数及其提高百分比增加幅度越大.造成上述现象的原因是随污垢含水率增加,污垢呈现软垢的特性,因软垢含大量厌氧微生物,长时间无营养后换热管壁的微生物逐渐死亡,该层微生物死亡后无挂壁能力,整层生物粘泥自然脱落,促进了声空化除垢效果。

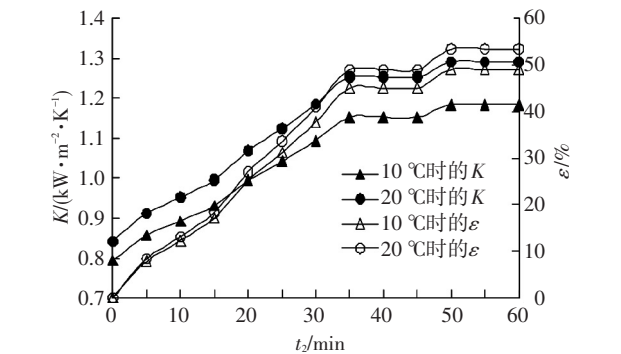
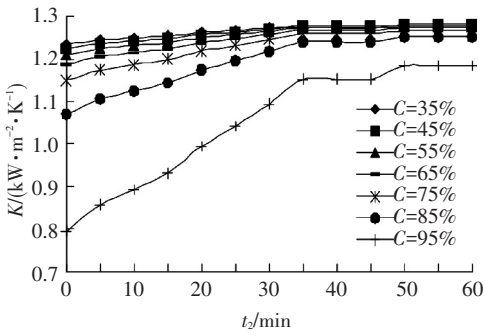
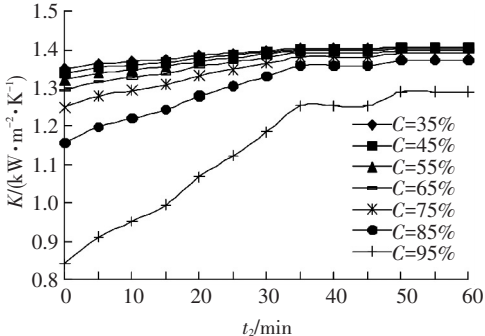


图 5 温度对强化传热效果的影响
Fig.5 Influence of temperature on heat transfer enhancement

当污垢含水率为 95% 时,施加不同的声空化作用时间下,传热系数随污水流速的变化如图 8 所示;传热系数提高百分比随污水流速的变化如图 9 所示.由图 8 可看出,施加声空化作用后,随污水流速的增大,换热管传热系数增大,当流速为 1.29 m/s 左右时,传热系数提高幅度减弱。



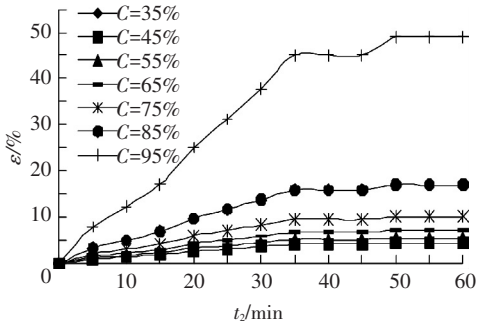
(a) $t=10\text{ }^{\circ}\text{C}$



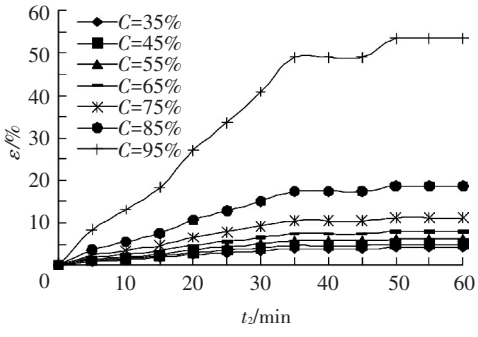
(b) $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$

图 6 声空化作用时间对传热系数的影响

Fig.6 Influence of acoustic cavitation on heat transfer coefficient



(a) $t=10\text{ }^{\circ}\text{C}$



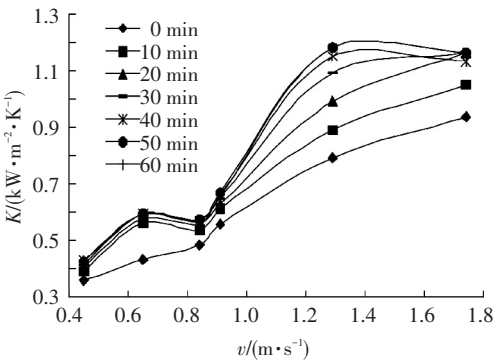
(b) $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$

图 7 声空化作用时间对传热系数提高百分比的影响

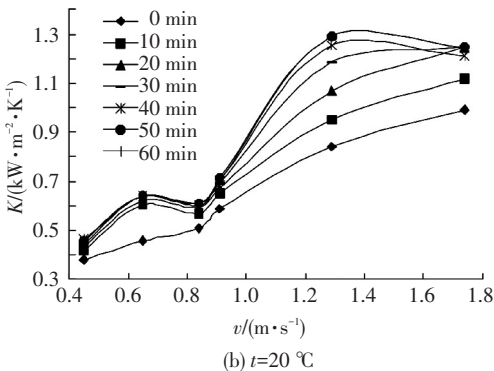
Fig.7 Influence of acoustic cavitation action time on increased percentage of heat transfer coefficient

由图 9 可明显看出,曲线中有两个波峰出现,在次波峰附近,传热系数变化不大,而在主波峰附近,传热系数变化较大,尤其提高百分比相差较大;说明次波峰对应的污水流速受施加声空化作用影响微弱,主波峰对应的污水流速受施加声空化作用影响巨大.但由于声空化作用达到 50 min 左右时,传热系数提高

幅度趋于稳定,故 50 和 60 min 的变化曲线相同.



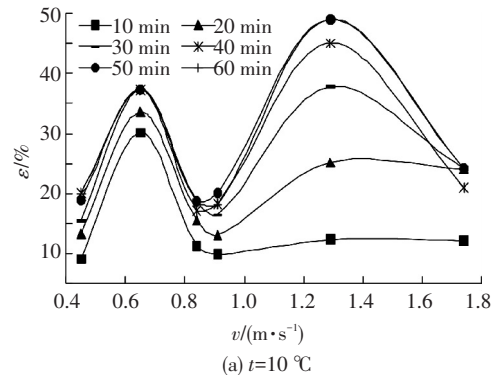
(a) $t=10\text{ }^{\circ}\text{C}$



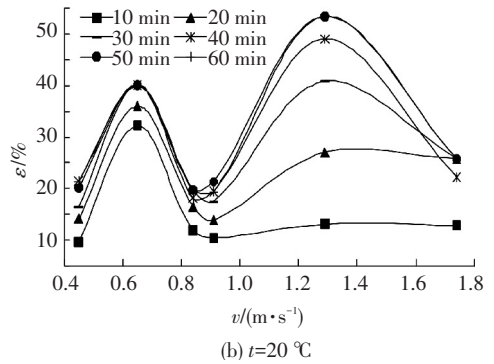
(b) $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$

图 8 流速对传热系数的影响

Fig.8 Influence of flow velocity on heat transfer coefficient



(a) $t=10\text{ }^{\circ}\text{C}$



(b) $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$

图 9 流速对传热系数提高百分比的影响

Fig.9 Influence of flow velocity on increased percentage of heat transfer coefficient

造成上述现象的原因是污水流速较大时,声空化作用时产生的空穴和气泡剧烈运动,使污水中的成垢物质破碎,降低其附着力并将已有垢层粉碎、破坏,同时污水流动的湍流程度增大,致使搅拌力及对

管壁的摩擦冲击力增强,导致污垢厚度变薄,热阻减小,传热系数增大。

4 结 论

1)声空化污水换热器的污垢增长特性表现在不同污水流速下,换热管内表面结垢量、积垢速率及污垢厚度均随流速的增大而降低,并呈减弱趋势;在相同流速时,污水黏度越小则相应减小,且流速越小差别越大;最大结垢厚度 0.54 mm,结垢量 106 g,积垢速率 12.6 kg/(m²·h)。

2)声空化污水换热器的防除垢规律表现在不同污水流速下对换热管内施加声空化,除垢率随流速的增大而增大,当流速为 1.29 m/s 时,最大除垢率达 85.7%;而声空化作用时间一定时,除垢率并非一直增大;在流速一定时,除垢率也随声空化作用时间的增加而增大,但在 50 min 时趋于稳定,甚至下降。

3)声空化污水换热器的强化换热效果表现在流速一定时,换热管的传热系数及其提高百分比均随声空化作用时间以及污垢含水率的增加而增大;传热系数提高百分比最大达 53.4%,且污水温度 20 ℃ 时的传热系数及其提高百分比均高于 10 ℃ 时的数值。在含水率一定时,施加声空化作用后,换热管传热系数随污水流速的增大而增大,当流速为 1.29 m/s 左右时,传热系数提高幅度减弱。

4)声空化所需的能耗相对于系统的能耗可以忽略不计。例如,本实验每组声空化作用时间 t_2 最多为 60 min,功率为 500 W,则声空化所需的最大能耗为 1 800 kJ,即耗电量为 0.5 kW·h。系统每组至少运行 96 h 后才施加声空化,则实际每组每小时的耗电量为 0.005 kW·h。而本实验系统的管道泵功率为 1.5 kW,其每组每小时耗电量为 1.5 kW·h。两者比较可知,声空化所需的能耗甚微。而且声空化污水换热器效率提高后其能耗是节省的,节省的能耗已远大于增加的声空化能耗。何况实际工程中上百千瓦热泵机组每小时的耗电量,故其经济效益显著。

故研究声空化污水换热器防除垢与强化换热的可行性和高效性,对于污水源热泵系统以及暖通空调领域具有重要的节能减排意义,为解决污水换热器结垢问题的研究和开发提供了方法和依据。

参考文献

[1] 徐莹,倪悦滨,孙德兴.城市污水的流动特性理论研究[J].哈尔滨工业大学学报,2010,42(8):1292-1296.
XU Ying, WU Yuebin, SUN Dexing. Theoretical research on flow characteristic of urban sewage[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(8): 1292-1296.
[2] CULHA O, GUNERHAN H, BIYIK E, et al. Heat exchanger

applications in wastewater source heat pumps for buildings: A key review[J]. Energy & Buildings, 2015, 104: 215-232.
[3] 王勇,杨启容,吴荣华,等.污水换热器流态化在线防除垢实验[J].化工进展,2015,34(12):4398-4402.
WANG Yong, YANG Qirong, WU Ronghua, et al. An experimental study on on-line fouling fluidized-removing of sewage heat exchanger[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(12): 4398-4402.
[4] 肖红侠,张海青,孙德兴.城市污水自冲洗除污换热器试验研究[J].可再生能源,2014,32(1):104-109.
XIAO Hongxia, ZHANG Haiqing, SUN Dexing. Experimental research on hydraulic removing fouling heat exchanger (HRF)[J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(1): 104-109.
[5] 吴荣华,孙德兴,张成虎,等.城市污水源热泵的应用与研究现状[J].哈尔滨工业大学学报,2006,38(8):1326-1329.
WU Ronghua, SUN Dexing, ZHANG Chenghu. Application and progress of urban wastewater as a cool and heat source[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(8): 1326-1329.
[6] 吴学慧,钟益.污水冷热源系统污垢类型及其增长特性[J].暖通空调,2012,42(1):73-76.
WU Xuehui, ZHONG Yi. Type and growing characteristics of fouling in sewage cold and heat source systems[J]. HV&AC, 2012, 42(1): 73-76.
[7] 谭延坤.污水源热泵系统污水侧声空化除污与强化换热特性实验研究[D].哈尔滨:哈尔滨商业大学,2013.
TAN Yankun. Experimental research on descale and strengthening heat transfer in the sewage side of the sewage-source heat pump system with acoustic cavitation[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2013.
[8] QIAN Jianfeng, LIU Yayuan. Characteristics study of sewage source heat pump system based on heat transfer enhancement and acoustic cavitation decontamination[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 665: 607-610.
[9] 孙双月,陈永昌,赵阳,等.超声波水处理性能的实验研究[J].工程热物理学报,2015,36(8):1790-1793.
SUN Shuangyue, CHEN Yongchang, ZHAO Yang, et al. Experimental study of water treatment performance of ultrasonic[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(8): 1790-1793.
[10] 赵阳,陈永昌,孟陶,等.超声波阻垢性能的实验研究[J].工程热物理学报,2013,34(11):2144-2146.
ZHAO Yang, CHEN Yongchang, MENG Tao, et al. Experimental study of ultrasonic antifouling performance[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(11): 2144-2146.
[11] LI Hongxia, HUAI Xiulan, CAI Jun, et al. Experimental research on antiscaling and scale removal by ultrasonic cavitation[J]. Journal of Thermal Science, 2009, 18(1): 65-73.
[12] 丘泰球,向英,陆海勤,等.换热设备的超声防垢机理[J].华南理工大学学报(自然科学版),2006,34(3):23-28.
QIU Taiqiu, XIANG Ying, LU Haiqin, et al. Mechanism of scale controlling of heat transfer equipment by ultrasonic[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2006, 34(3): 23-28.
[13] 傅俊萍,李录平,刘泽利,等.超声波除垢与强化传热实验研究[J].热能动力工程,2006,21(4):355-357.
FU Junping, LI Luping, LIU Zeli, et al. Experimental study on heat

- transfer enhancement and descaling by ultrasonic [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2006, 21(4): 355–357.
- [14] ZHOU Dingwei, LIU Dengying. Heat transfer characteristics of nanofluids in an acoustic cavitation field [J]. Heat Transfer Engineering, 2004, 25(6): 54–61.
- [15] 钱剑峰, 张吉礼, 马良栋, 等. 开式原生污水源热泵系统取水运行特性分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(2): 62–67.
- QIAN Jianfeng, ZHANG Jili, MA Liangdong, et al. Operational analysis of open untreated sewage source heat pump system [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2014, 36(2): 62–67.
- [16] 钱剑峰, 任启峰, 王海燕, 等. 污水源热泵系统的新型安全取水技术研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2016, 32(3): 271–274.
- QIAN Jianfeng, REN Qifeng, WANG Haiyan, et al. Research on the newly safety intake water technology of sewage source heat pump system [J]. Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition), 2016, 32(3): 271–274.
- [17] QIAN Jianfeng, LIU Yayuan, XU Ying, et al. Study on characteristics of ultrasonic descaling and heat transfer enhancement in sewage source heat pump system [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 525: 603–606.
- [18] QIAN Jianfeng. Study on operation and parameters of urban sewage source heat pump system with freezing latent heat collection [J]. Advanced Materials Research, 2011, 403–408(22): 3235–3238.
- [19] QIAN Jianfeng, ZHANG Jili. Feasibility analysis of urban sewage source heat pump system with freezing latent heat collection [J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2010, 26(2): 324–326.
- [20] 钱剑峰, 谭延坤. 超声波防垢、除垢的强化换热壳管式换热器: 201220480982.5 [P]. 2013–03–13.
- QIAN Jianfeng, TAN Yankun. Strengthening heat transfer on tube-shell heat exchanger of the ultrasonic anti descaling: 201220480982.5 [P]. 2013–03–13.

(编辑 刘 彤)

(上接第 93 页)

- [7] MENICONI S, BRUNONE B, FERRANTE M, et al. Energy dissipation and pressure decay during transients in viscoelastic pipes with an in-line valve [J]. Journal of Fluids and Structures, 2014, 45: 235–249. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2013.12.013.
- [8] ZHAO Ming, GHIDAoui M S. Efficient quasi-two-dimensional model for water hammer problems [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 129(12): 1007–1013. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:12(1007).
- [9] MARTINS N M C, SOARES A K, RAMOS H M, et al. CFD modeling of transient flow in pressurized pipes [J]. Computers & Fluids, 2016, 126: 129–140. DOI: 10.1016/j.compfluid.2015.12.002.
- [10] 郭烈锦. 两相与多相流动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 575–583.
- GUO Liejin. Dynamics of two-phase and multiphase [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press Co., Ltd., 2002: 575–583.
- [11] 福克斯 J A. 管网中不稳定流动的水力分析[M]. 北京: 石油工业出版社, 1983: 99–101.
- FOX J A. Hydraulic analysis of unsteady flow in pipelines [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1983: 99–101.
- [12] BERGANT A, TIJSSELING A S, VTKOVSK J P, et al. Parameters affecting water-hammer wave attenuation, shape and timing-Part 1: Mathematical tools [J]. Journal of Hydraulic Research, 2008, 46(3): 373–381. DOI: 10.1080/00221686.2004.9641221.
- [13] WYLIE E B. Simulation of vaporous and gaseous cavitation [J]. Journal of Fluids Engineering, 1984, 106(3): 307–311. DOI: 10.1115/1.3243120.
- [14] COVAS D, STOIANOV I N, MANO J F, et al. The dynamic effect of pipe-wall viscoelasticity in hydraulic transients. Part II-Model development, calibration and verification [J]. Journal of Hydraulic Research, 2005, 43(1): 56–70. DOI: 10.1080/00221680509500111.
- [15] SOARES A K, COVAS D I C, RAMOS H M, et al. Unsteady flow with cavitation in viscoelastic pipes [J]. International Journal of Fluid Machinery and Systems, 2009, 2(4): 269–277. DOI: 10.5293/IJFMS.2009.2.4.269.

(编辑 刘 彤)