

污水源热泵系统污水侧声空化防除垢与 强化换热特性研究

钱剑峰¹, 任启峰¹, 徐莹¹, 张吉礼², 孙德兴³

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

摘 要: 基于污水源热泵系统, 建立超声波声空化防除垢与强化换热动态实验台, 对污水流速为 0.45、0.65、0.84、0.91、1.29 和 1.74 m/s, 换热管内径为 15 mm/20 mm, 超声波功率为 250 W/500 W, 声空化作用时间为 0~60 min, 污垢含水率为 35%~95% 以及不同的污水黏度和温度等特性参数下开展实验研究, 分析计算污水侧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实验数据, 对比研究特性参数对污水侧换热管运行特性的影响。研究表明: 在较大的换热管径或污水流速下, 污水侧换热管积垢速率和结垢率均偏低, 除垢率和传热系数均偏高; 在较大的超声波功率下, 除垢率效果更好, 传热系数效率显著提高; 在较高的污垢含水率下, 传热系数降低及其效率提高明显; 随声空化作用时间的增加, 除垢率和传热系数均显著提高, 但在约 50 min 时趋于稳定, 当流速为 1.29 m/s 时, 传热系数效率提高百分比达到 53.4%; 另外, 污水黏度和污水温度对污水侧换热管运行特性也有一定影响。总之, 声空化应用在污水源热泵系统污水侧防除垢与强化换热方面是可行的。

关键词: 污水; 热泵系统; 声空化; 防垢; 除垢; 强化换热

中图分类号: TB559; TU831.6 **文献标识码:** A

0 引 言

污水源热泵技术在暖通空调领域具有显著的节能环保效益, 其技术关键在于防阻除垢和高效换热, 尤其污水侧的结垢问题严重, 尽管其防除垢与强化换热研究已得到重视, 但尚未完全解决^[1-3]。污水侧污垢的存在极大降低了系统及换热设备的运行效率, 导致初投资和运行费用明显增加, 其中软垢对污水侧换热设备的影响更加复杂, 给系统带来的弊端有待进一步分析研究^[4-6]。故要实现污水侧换热设备对污水这一低位热能的高效利用, 必须解决其换热管上软垢会引起传热系数恶化的一系列问题^[7,8]。

声空化是一种新型的防除垢与强化换热技术, 在能源、动力等领域的换热设备中已拥有广泛应用^[8-10]。国内外学者对声空化防除垢与强化换热进行了机理及影响因素等方面的研究探索^[11-15]。傅俊萍等^[16,17]指出超声波具有除垢作用, 超声频率

和换能器位置对除垢效果影响显著; 并对超声波除垢与强化传热进行了实验研究, 提出超声波功率在 200 W 以下具有抑垢效应, 且功率对强化传热影响显著, 当达到 300 W 时传热效果最佳。张艾萍等^[18]分别采用圆管、波纹管、螺纹管和横纹管对超声波除垢效果进行了实验研究, 认为管道的几何结构对超声波传播特性和空化效果有明显影响。陈永昌等^[19,20]对超声波阻垢性能进行实验研究, 发现在高水温、低硬度下阻垢效果更显著, 且超声波频率 28 kHz 较 40 kHz 阻垢效果好。文献[21]利用超声空化作用对换热设备进行防除垢的实验研究, 指出超声波强度越小, 防垢效果越好, 但除垢效果越差; 且较大的溶液浓度及近距离的超声波换能器则有利于防垢和除垢。

已有研究表明声空化具有一定的防除垢与强化换热效果, 但应用在污水源热泵系统上的研究不多。笔者课题组进行长期的声空化以及污水源热泵技术的理论和实验研究, 取得多项成果, 其中结

收稿日期: 2016-07-12

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)

通信作者: 钱剑峰(1979—), 男, 博士、教授, 主要从事制冷与热泵节能技术方面的研究。qianjianfeng2002@163.com

合声空化防除垢与强化换热技术,在利用原生污水这一低位热能方面提出一种创新装置^[22]。本文对污水流速、换热管径、超声波功率、声空化作用时间、污垢含水率以及污水黏度和温度等特性参数下开展实验研究,分析计算污水侧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实验数据。主要选用除垢率和传热系数及其效率提高百分比等为衡量指标,对比研究特性参数对污水侧换热管运行特性的影响。实验结果表明声空化在污水源热泵系统污水侧防除垢与强化换热方面发展前景广阔,具有一定的可行性,对节能减排具有重要意义。

1 实验系统

为使实验达到实际工程的应用效果,搭建超声波声空化防除垢与强化换热动态实验台,如图1所示。超声波声空化系统是本实验的核心装置,由超声波发生器与超声波换能器组成。其超声波发生器型号为AS500-28,电源输入AC220V,频率28 kHz以及设置10组压电式超声波换能器,最大功率为500 W。

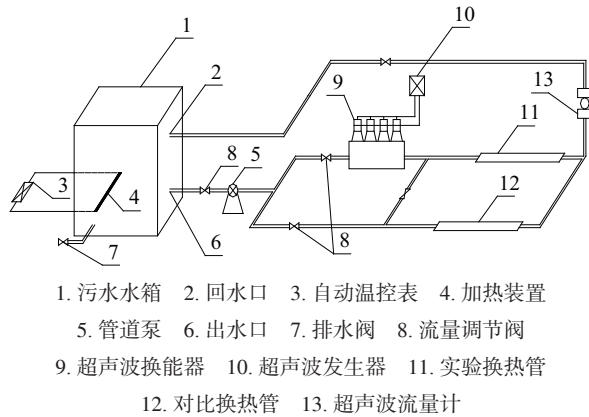


图1 实验系统图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

实验用城市污水储存在尺寸为1 m×1 m×1 m的水箱中,其污水相关物性参数为:容量为0.5 m³,密度 $\rho=1006.2 \text{ kg/m}^3$,普朗特数 $Pr=7.02$,运动黏度 $\nu=1.306 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 等。实验时,为防止大颗粒杂质污垢进入实验管道,保证管道泵的正常工作的污水水箱的出水口设有3 mm过滤筛网。首先,将城市污水注入实验用水箱,测量污水温度及计算其密

度;清洁干燥换热管,并称重记录后安装到实验台;启动水泵,通过控制流量阀调节至合适流量,并记录实验初始时间;待系统运行96 h后,卸下换热管干燥称重并记录;将超声波发生器与换能器连接,设置功率并启动发生器;超声波声空化作用时间设定为60 min,每隔5分钟(或10分钟)卸下换热管干燥称重并记录;最后整理并分析所得实验数据。

2 特性参数

通过对污水侧换热管内施加超声波声空化作用,可实现换热管的防除垢与强化换热效果。其评价数学模型见式(1)~式(8)。

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

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

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

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

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

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

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

$$C_f = \frac{K_f}{K_j} \quad (8)$$

式中, α ——换热管内表面的结垢率,%; W_0 、 W_t ——积垢前、后换热管质量,g; Δm ——换热管结垢量,g; β ——换热管积垢速率,g/(m²·h); S ——换热管内表面积,m²; t_1 ——换热管积垢时间,h; δ ——换热管内污垢厚度,mm; M_0 ——洁净时换热管的质量,g; ρ ——污水密度,kg/m³; d ——换热管内径,m; L ——换热管管长,m; Φ ——换热管内表面的除垢率,%; m_t ——施加声空化作用后换热管累积除垢量,g; K_f ——换热管结垢后的传热系数,W/(m²·K); h_w ——换热管外侧表面传热系数,W/(m²·K); λ_1 ——换热管内污垢导热系数,W/(m·K); δ_1 、 δ_2 ——换热管内污垢厚度和管壁厚度,m; λ_2 ——换热管导热系数,W/(m·K); h_j ——换热管污水侧表面传热系数,W/(m²·K); K_j ——洁净换热

管的传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; ε —— 传热系数效率提高百分比, %; K_w —— 结垢稳定后的传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; C_f —— 洁净系数, 其数值越小, 污染程度越深。

根据前期研究, 污水侧换热管表面传热系数 h_j 和努赛尔数 Nu 的定义式见式(9)和式(10):

$$h_j = \frac{\lambda \cdot Nu}{d} \quad (9)$$

$$Nu = 0.025 Re^{3/4} Pr^{1/3} \quad (10)$$

式中, λ —— 管内污水导热系数, $W/(m \cdot K)$; Re —— 雷诺数, $Re = \frac{vd}{\nu}$ (其中 v 为污水流速, m/s ; ν 为运动黏度, m^2/s)。

对污水侧换热管运行特性而言, 污水流速、换热管径、超声波功率、超声波声空化作用时间和污垢含水率为主要特性参数。实验中采用的污水流速 v 为 0.45、0.65、0.84、0.91、1.29、1.74 m/s ; 换热管径分别为外径 $D_1=20$ mm, 内径 $d_1=15$ mm 和外径 $D_2=25$ mm, 内径 $d_2=20$ mm; 功率 P 为 250 W/500 W; 声空化作用时间 t_2 为 0~60 min; 污垢含水率 C 为 35%~95%。

实验中的其他参数: 换热管外侧表面传热系数 $h_w=3000$ $W/(m^2 \cdot K)$, 换热管内污水导热系数 $\lambda=0.599$ $W/(m \cdot K)$, 换热管内污垢导热系数 $\lambda_1=1.3$ $W/(m \cdot K)$, 换热管导热系数 $\lambda_2=49.8$ $W/(m \cdot K)$ 。此外, 还考虑污水黏度 ν 和污水温度 T 对污水侧换热管运行特性的影响, 其黏度按是否添加生活用油来区分, 污水温度为 10~20 $^{\circ}C$ 。

3 实验结果与分析

3.1 污水流速对污水侧换热管运行特性的影响

其他影响参数不变, 由式(1)和式(2)可得, 在不同污水流速下, 污水侧换热管内表面结垢率及积垢速率的变化规律如图 2 所示。由图 2 可知, 污水侧换热管内表面结垢率及积垢速率均随着污水流速的增大而逐渐降低, 并呈减弱趋势; 当污水流速为 0.45 m/s 时, 最大结垢率达到 0.45 %; 也可看出当污水流速为 0.84 m/s 时, 因其污水黏度增大, 导致结垢率及积垢速率出现波动, 说明污水黏度对结垢有一定影响。

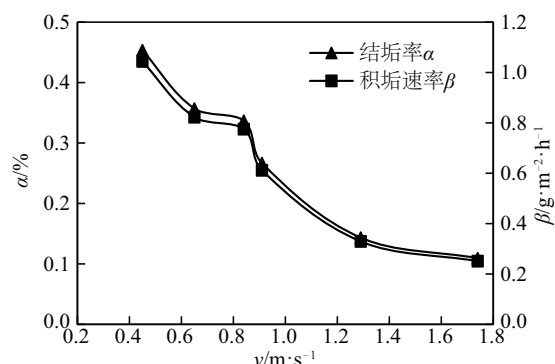


图2 流速对结垢率及积垢速率的影响

Fig. 2 Influence of flow velocity on scaling rate and fouling rate

造成上述现象的原因是在不同流速下, 污水对污水侧换热管内表面的切应力不同, 随流速的增加, 使得后续增长的污垢薄膜变形、受力脱落, 从而边界层厚度减薄, 结垢率及积垢速率均降低。

图 3 为污水侧换热管内表面污垢结垢厚度与结垢率的变化规律, 由式(1)与式(3)比较得到。由图 3 可知: 污水侧换热管内表面污垢厚度随结垢率增大而增大; 结垢率最大时, 结垢厚度将达到 0.1 mm, 此时结垢量 6.6 g, 最大积垢速率 1.04 $g/(m^2 \cdot h)$; 另外, 比较图 2 和图 3 可看出污垢厚度随流速减小而增大, 污垢厚度增大必然导致流通截面减小及污垢热阻增加, 使其传热系数恶化, 进而影响系统能效比, 引起一系列的不利后果。

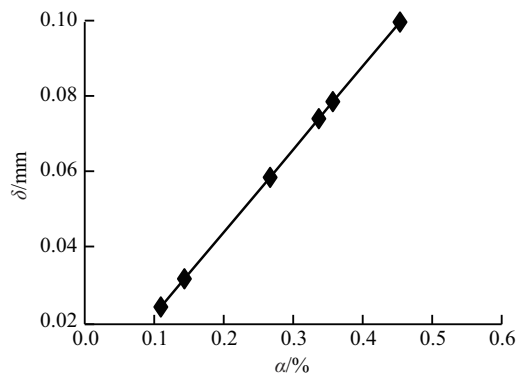


图3 结垢率与污垢厚度的关系

Fig. 3 Relationship between fouling thickness and scaling rate

造成上述现象的原因是污水流速较小时, 污水中杂质污垢易沉积, 同时污水湍流程度降低, 使搅拌力及摩擦冲击力相对减弱, 导致污垢厚度加大。

由式(5)和式(6)可得, 污水侧换热管内表面结垢前后传热系数与污水流速的变化规律如图 4 所示。

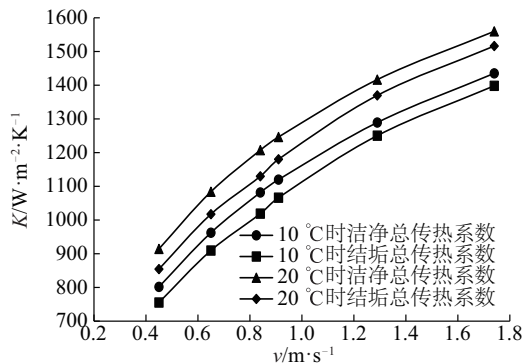


图4 流速对传热系数的影响

Fig. 4 Influence of flow velocity on heat transfer coefficient

由图4可知,结垢前后换热管传热系数相差较大,换热管洁净时的传热系数总是大于结垢后的传热系数,说明污垢存在对换热管传热的影响是非常严重的;流速愈大,传热系数相应增大,且结垢前后换热管的传热系数差值减小,说明增大流速可以提高传热系数;而污水温度20 °C时的传热系数均高于10 °C的传热系数,说明温度对污垢有一定影响。

造成上述现象的原因是污垢使污水侧换热管内粗糙度增加,导致摩擦系数和局部阻力增大,引起污垢热阻增加,进而降低换热管的传热系数,这与图3得到的结论一致。此外污水温度高,传热系数大的原因是高温条件下污水侧换热管内表面上污垢生长更为迅速,从而导致污垢质地比较疏松,后续污垢沉积更为困难,达到防垢的作用;依靠污水流动的剪切作用,高温使污垢易脱落,热阻逐渐降低,传热系数得以提高。

洁净系数数值越小,污水侧换热管的污染程度就越深。由式(8)可得,污水侧换热管的洁净系数与污水流速的变化规律如图5所示。

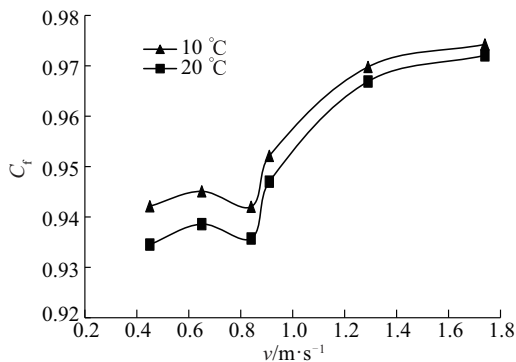


图5 流速对洁净系数的影响

Fig. 5 Influence of flow velocity on clean coefficient

由图5可知,在不同温度下的洁净系数随流速的增加呈上升趋势,当流速为0.45 m/s时洁净系数最小,当流速为1.74 m/s时最大洁净系数可达0.97;且在低流速下,洁净系数差值较大;从图5趋势看,随流速的逐渐增大,洁净系数增大趋势已减弱,说明污水侧换热管的污染程度随着流速的减小而加重,其流速大小对污垢的生成和脱落影响较大。由图5也可看出温度为10 °C时的洁净系数略高于20 °C时的洁净系数。此外,当流速为0.84 m/s时,因污水黏度增大,引起洁净系数变化趋势呈现明显波动。

造成上述现象的原因是当污水中含有一定含油成分时,使得污垢成核速率加大,管壁结垢附着力增大。故黏度增加,黏滞系数变大,含气量则减少,对其施加声空化作用,空化域值增大,同时声吸收增强,从而空化效应不易发生,防除垢效果降低。

选取污垢含水率为95%,污水温度为20 °C,对比施加不同声空化作用时间下,传热系数随流速的变化规律如图6所示,传热系数效率提高百分比随流速的变化规律如图7所示。

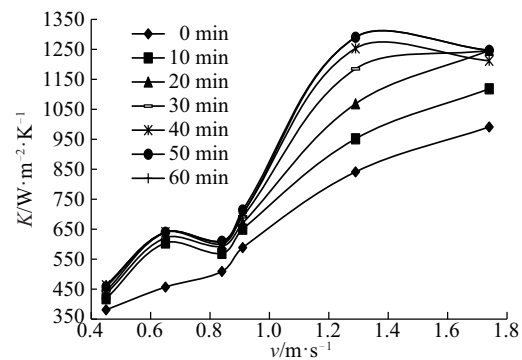


图6 流速对传热系数的影响

Fig. 6 Influence of flow velocity on heat transfer coefficient

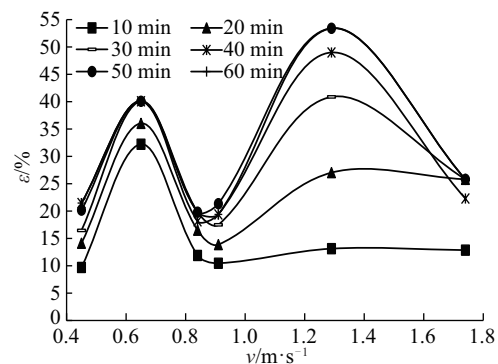


图7 流速对传热系数效率提高百分比的影响

Fig. 7 Influence of flow velocity on efficiency increased percentage of heat transfer coefficient

从图 6 可看出,施加声空化作用后,随污水流速的增大,污水侧换热管传热系数增大;当污水流速为 1.29 m/s 时,传热系数提高幅度减弱。从图 7 可明显看出曲线中出现 2 个波峰,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,尤其效率提高百分比相差较大。说明次波峰对应的污水流速受声空化作用影响微弱,主波峰对应的流速受声空化作用影响巨大。但声空化作用时间达到 50 min 时,传热系数提高幅度趋于稳定,故 50 min 和 60 min 的曲线基本相同。

造成上述现象的原因是污水流速较大时,声空化产生的空穴和气泡运动剧烈,使污水中的成垢物质破碎,降低其附着力并将已有垢层破坏、粉碎,同时污水流动的湍流程度增大,致使搅拌力及摩擦冲击力增强,导致污垢厚度变薄,传热系数增大。

3.2 换热管径对污水侧换热管运行特性的影响

其他影响参数不变,对比研究了不同换热管径对污水侧换热管运行特性的影响。表 1 为不同管径与流速下防除垢的计算结果由式(1)~式(4)计算所得。

表 1 不同管径与流速下防除垢的计算结果

Table 1 Calculation results of anti descaling under different tube diameter and flow velocity

$d/$ mm	$v/$ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\Delta m/$ g	$\delta/$ mm	$\beta/$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$	$\alpha/$ %	$\Phi/$ %
20	0.45	4.0	0.0458	0.00048	0.23	59
15	0.45	6.6	0.0996	0.00104	0.45	30
20	0.65	3.8	0.0428	0.00045	0.22	58
15	0.65	5.2	0.0785	0.00082	0.36	52
20	0.84	5.2	0.0586	0.00062	0.29	90
15	0.84	4.9	0.0740	0.00078	0.34	27

由表 1 可知,管径相对较大的防除垢效果显著,结垢量、污垢厚度、积垢速率和结垢率均偏低,除垢率也明显偏高。

造成上述现象的原因是黏滞作用使小管径换热管的声吸收能力较强,导致声场衰减较大,故声空化作用效果恶化较快。

3.3 超声波功率对污水侧换热管运行特性的影响

其他影响参数不变,对比研究不同超声波功率

对污水侧换热管运行特性的影响。由式(7)得,当流速为 0.91 m/s 时,不同超声波功率对声空化作用后的传热系数效率提高百分比的影响规律如图 8 所示。

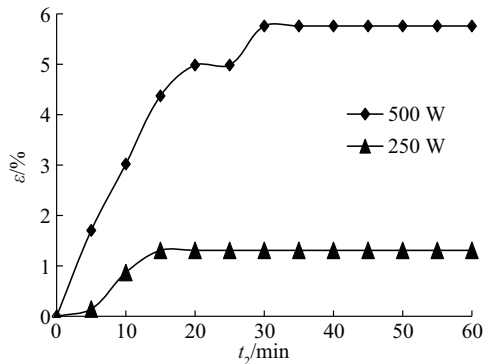


图 8 超声波功率对传热系数效率提高百分比的影响

Fig. 8 Influence of ultrasonic power on efficiency increased percentage of heat transfer coefficient

由图 8 可知,当超声波功率为 500 W 时传热系数效率提高百分比大于功率为 200 W 时的百分比,且随声空化作用时间的增加,两者差距越大,在 50 min 时趋于稳定。

表 2 为不同超声波功率下防除垢与强化换热的计算结果,由式(1)~式(4)可得。由表 2 可知,功率为 500 W 时的除垢率效果明显优于 250 W 时的效果,当污水流速为 0.84 m/s 时,其最大除垢率达到 90 %。

表 2 不同超声波功率下防除垢与强化换热的计算结果

Table 2 Calculation results of anti descaling and heat transfer enhancement under different ultrasonic power

$d/$ mm	$v/$ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$P/$ W	$\Delta m/$ g	$\delta/$ mm	$\beta/$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$	$\alpha/$ %	$\Phi/$ %
15	0.91	500	5.8	0.0871	0.00092	0.40	67
15	0.91	250	3.9	0.0586	0.00062	0.27	23
15	1.74	500	1.6	0.0239	0.00025	0.11	56
15	1.74	250	1.7	0.0254	0.00027	0.12	41
20	0.45	500	4.0	0.0458	0.00048	0.23	59
20	0.45	250	3.0	0.0335	0.00035	0.17	60
20	0.84	500	5.2	0.0586	0.00062	0.29	90
20	0.84	250	3.9	0.0439	0.00046	0.21	54

造成上述现象的原因是较大的超声波功率使声场中机械作用和空化作用加强,同时提高的声强

使液体中空化作用剧烈,加强除垢效果。但超声波功率过大,会加快粘贴换能器的钢板表面空化腐蚀,不仅缩短使用寿命,还增加声传播损失,缩短声空化作用距离,故其最佳功率尚需进一步研究。

3.4 声空化作用时间对污水侧换热管运行特性的影响

污水侧换热管结垢稳定后,对其施加超声波声空化作用,对比不同流速下除垢率随声空化作用时间的变化规律如图 9 所示。

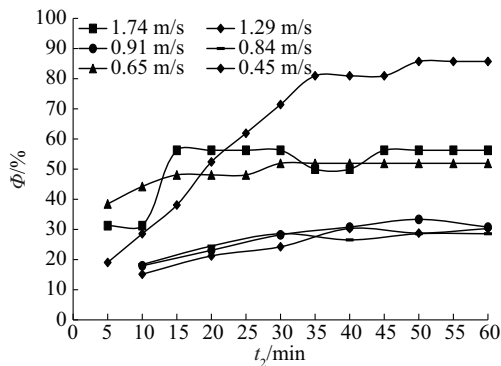


图9 声空化作用时间对除垢率的影响

Fig. 9 Influence of ultrasonic acoustic cavitation action time on descaling rate

由图 9 可知,污水流速越大,除垢率越大;流速一定,随声空化作用时间的增加,除垢率逐渐增大,但在 50 min 时趋于稳定,甚至存在下降趋势;而声空化作用时间一定,除垢率并不是一直随流速的增大而增加。当污水流速为 0.65 m/s 时,因污水黏度比其他流速低,其除垢率较高,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一方面由于污水流速的增加,加大了污水对污水侧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,即声强变小,故污水流速过大后,除垢效果反而下降。污水黏度增加使得污垢成核速率增加,管壁结垢的附着力也增大,进而含气量减少,声空化效应就越难发生,影响其除垢效果。

当污垢含水率为 95%、污水温度为 20 ℃时,对比不同流速下,声空化作用后的传热系数随声空化作用时间的变化规律如图 10 所示;声空化作用后

的传热系数效率提高百分比随声空化作用时间的变化规律如图 11 所示。

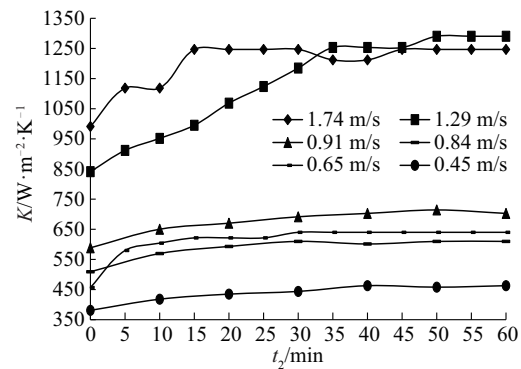


图10 传热系数对比示意图

Fig. 10 Schematic diagram of heat transfer coefficient comparison

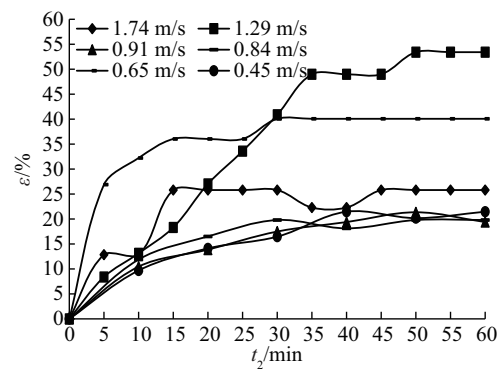


图11 传热系数效率提高百分比对比示意图

Fig. 11 Schematic diagram of efficiency increased percentage of heat transfer coefficient comparison

由图 10、图 11 可看出随声空化作用时间的增加,传热系数均有所提高;当声空化作用时间达到 50 min 时,传热系数效率提高幅度减弱,趋于稳定;当污水流速为 1.29 m/s 时,传热系数最大效率提高百分比提升幅度最大,最大达到 53.4 %。说明污水流速对传热系数影响巨大,并呈现增大趋势;而对传热系数效率提高百分比的影响未呈现规律变化。

3.5 污垢含水率对污水侧换热管运行特性的影响

当污水流速为 0.91 m/s、温度为 20 ℃及污垢含水率为 95 %时,对比施加不同声空化作用时间下,传热系数随污垢含水率的变化规律如图 12 所示,传热系数效率提高百分比随污垢含水率的变化规律如图 13 所示。

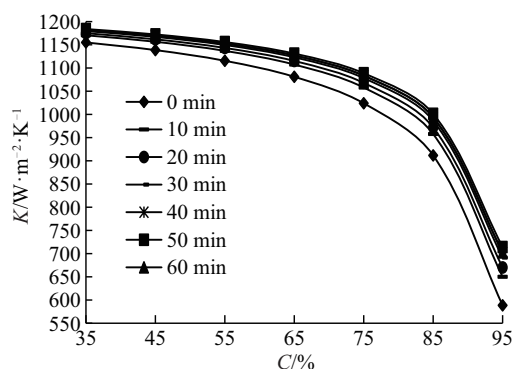


图 12 污垢含水率对传热系数的影响

Fig. 12 Influence of fouling moisture rate on heat transfer coefficient

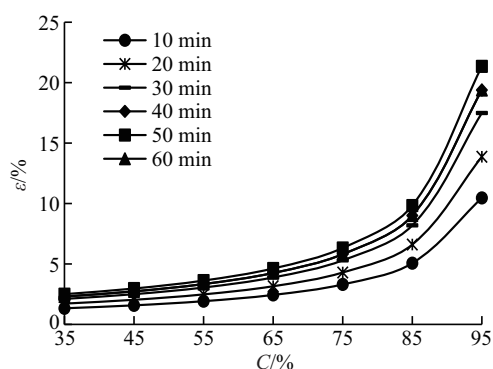


图 13 含水率对传热系数效率提高百分比的影响

Fig. 13 Influence of moisture rate on efficiency increased percentage of heat transfer coefficient

由图 12、图 13 可知,施加声空化作用后,污垢含水率越高,传热系数越小,传热系数效率提高百分比越大。说明污垢含水率越高,声空化除垢效果越明显。在污垢含水率不变的情况下,随声空化作用时间的增加,传热系数及其效率提高百分比逐渐增大,在 50 min 时达到最大,这与 3.4 节得到的结论一致。

造成上述现象的原因是随污垢含水率增加,污垢呈现软垢特性。由于软垢含大量厌氧微生物,长时间处于无营养状态,污水侧管壁的微生物逐渐死亡,失去挂壁能力,生物黏泥自然脱落,故促进了声空化除垢的效果。

4 结 论

1)在较大的换热管径或污水流速下,污水侧换热管积垢速率和结垢率均偏低,除垢率和传热系数均偏高;同一流速下,声空化作用 50 min 时传热系

数提高幅度趋于稳定。

2)在较大的超声波功率下,除垢率效果更好;当流速为 0.84 m/s 时,除垢率高达 90%;同一流速下,大功率的传热系数效率提高百分比相对较高。

3)随声空化作用时间的增加,除垢率和传热系数均显著提高,但在 50 min 时趋于稳定,当流速为 1.29 m/s 时,传热系数效率提高百分比达到 53.4%;在声空化一定时,除垢率并非一直随流速的增大而增加。

4)在较高的污垢含水率下,施加声空化作用后,传热系数降低及其效率提高较明显,说明污垢含水率越高,软垢特性越明显,声空化除垢效果越强。

5)污水黏度和污水温度对污水侧换热管运行特性也有一定的影响。

6)声空化应用在污水源热泵系统污水侧防除垢与强化换热方面是可行的,且效果明显。

[参考文献]

- [1] 赵玺灵,付林,张世钢,等.城市原生污水源热泵系统的应用[J].太阳能学报,2010,31(11):1458—1463.
- [1] Zhao Xiling, Fu Lin, Zhang Shigang, et al. Performance study and engineering practice of urban original sewage source heat pump system[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2010, 31(11): 1458—1463.
- [2] 钱剑峰,孙德兴,张承虎.采集凝固热泵技术凝固及换热性能的理论分析[J].太阳能学报,2007,28(11):1200—1205.
- [2] Qian Jianfeng, Sun Dexing, Zhang Chenghu. Theoretical analysis on characteristic of freezing and performance of heat transfer in heat pump system with freezing latent heat collection[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2007, 28(11): 1200—1205.
- [3] 孙春锦,吴荣华,孙源渊,等.污水源热泵技术研究现状及分析[J].暖通空调,2015,45(9):49—53.
- [3] Sun Chunjin, Wu Ronghua, Sun Yuanyuan, et al. Research status and analysis of sewage-source heat pump technology[J]. Journal of HV&AC, 2015, 45(9): 49—53.
- [4] 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):4395—4402.
- [4] 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): 4395—4402.
- [5] 沈朝,姜益强,姚杨.自除污型干式污水源热泵系统的实验研究[J].太阳能学报,2013,34(1): 154—159.
- [5] Shen Chao, Jiang Yiqiang, Yao Yang. Experimental system built and research of a dry-type wastewater source heat pump[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2013, 34(1): 154—159.
- [6] 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.
- [7] 吴荣华,张承虎,孙德兴,等.城市原生污水冷热源换热管软垢特性研究[J].流体机械,2006,34(1): 59—62.
- [7] Wu Ronghua, Zhang Chenghu, Sun Dexing, et al. Research on the soft-dirt characteristic of heat-exchanging pipe in using urban original wastewater as cool and heat source[J]. Fluid Machinery, 2006, 34(1): 59—62.
- [8] 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.
- [8] 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.
- [9] 孙宝芝,姜任秋,淮秀兰,等.声空化及其强化传热技术研究进展[J].哈尔滨工程大学学报,2004,25(1): 19—24.
- [9] Sun Baozhi, Jiang Renqiu, Huai Xiulan, et al. Development of the research on acoustic cavitation enhancement of heat transfer[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2004, 25(1): 19—24.
- [10] Zhou Dingwei, Liu Dengying. Heat transfer characteristics of nanofluids in an acoustic cavitation field[J]. Heat Transfer Engineering, 2004, 25(6): 54—61.
- [11] 钱剑峰,谭延坤,张吉礼,等.污水源热泵系统声空化除污与强化换热技术[J].建筑热能通风空调,2011,30(6): 24—29.
- [11] Qian Jianfeng, Tan Yankun, Zhang Jili, et al. Research on acoustic cavitation defouling and heat transfer enhancement in the sewage heat exchanger of sewage source heat pump system[J]. Building Energy & Environment, 2011, 30(6): 24—29.
- [12] 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.
- [13] 谭延坤,钱剑峰,郑大宇.声空化作用下城市污水在碳钢管内结垢的研究[J].哈尔滨商业大学学报:自然科学版,2012,28(5): 583—586.
- [13] Tan Yankun, Qian Jianfeng, Zheng Dayu. Study on urban sewage scalings in carbon steel tube under acoustic cavitation[J]. Journal of Harbin University of Commerce: Natural Sciences Edition, 2012, 28(5): 583—586.
- [14] Lima J F, Vilar E O. The use of ultrasound to reduce cathodic incrustation[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2014, 21: 963—969.
- [15] Niemczewski B. Cavitation intensity of water under practical ultrasonic cleaning conditions[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2014, 21: 354—359.
- [16] 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.
- [16] 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.
- [17] 傅俊萍,石沛,何叶从,等.超声波频率对除垢范围及除垢效率的影响[J].化工进展,2015,34(10): 3809—3813.
- [17] Fu Junping, Shi Pei, He Yecong, et al. Effects of ultrasonic frequency on descaling scope and descaling efficiency[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(10): 3809—3813.
- [18] 张艾萍,张毅,谢媚娜,等.强化换热管型对超声波传播特性及空化效果的影响[J].化工进展,2015,34(1): 44—48.
- [18] Zhang Aiping, Zhang Yi, Xie Meina, et al. Effect of enhanced heat exchange tube type on ultrasonic propagation and cavitation[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(1): 44—48.
- [19] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [20] Zhao Yang, Chen Yongchang, Meng Tao, et al. Experimental study of ultrasonic antifouling performance [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34 (11): 2144—2146.
- [21] 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.
- [22] 钱剑峰, 谭延坤. 超声波防垢、除垢的强化换热壳管式换热器[P]. 中国: 201220480982.5, 2013-03-13.
- [22] Qian Jianfeng, Tan Yankun. Strengthening heat transfer on tube-shell heat exchanger of the ultrasonic anti descaling[P]. China: 201220480982.5, 2013-03-13.

CHARACTERISTIC RESEARCH ON ANTI-DESCALING AND HEAT TRANSFER ENHANCEMENT IN SEWAGE SIDE OF SEWAGE-SOURCE HEAT PUMP SYSTEM WITH ACOUSTIC CAVITATION

Qian Jianfeng¹, Ren Qifeng¹, Xu Ying¹, Zhang Jili², Sun Dexing³

(1. School of Energy and Civil Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China;

2. School of Civil & Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

3. School of Municipal & Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: The dynamic experiment table of acoustic cavitation ultrasonic anti-descaling and enhanced heat exchange was established based on sewage-source heat pump system, the experiment study was carried out under the different characteristic parameters such as 0.45, 0.65, 0.84, 0.91, 1.29 and 1.74 m/s sewage flow speeds, 15 mm/20 mm inner diameter of heat exchange tubes, 250 W and 500 W ultrasonic power, 0-60 min acoustic cavitation action time, 35%-95% fouling moisture content, and the different viscosity and temperature of the sewage etc. The fouling growth characteristics and anti-descaling laws of the sewage side heat exchange tubes and the experimental data of strengthening the heat exchange effect were analyzed and calculated, and the effect of the characteristic parameters on the operating characteristics of the sewage side heat exchange tubes was compared. The results indicate that under the larger experimental tubes diameter or flow speed of sewage, both fouling rate and scaling rate of sewage side heat exchange tube are low, but the descaling rate and heat transfer coefficient are relatively high. Under the larger ultrasonic power, descaling rate effect is better, the heat transfer efficiency is significantly improved. Under the higher fouling moisture rate, the heat transfer coefficient is decreased and the heat transfer efficiency is increased obviously. With the increase of the acoustic cavitation action time, descaling rate and heat transfer coefficient increase obviously and tend to be stable at about 50 min. When the flow speed is 1.29 m/s, the increased percentage of the heat transfer coefficient reaches 53.4%. In addition, the viscosity and temperature of sewage have some influence on the operation characteristics of sewage side heat exchange tubes. In general, the application of acoustic cavitation is feasible in anti-descaling and heat exchange enhancement of the sewage side of sewage-source heat pump system.

Keywords: sewage; heat pump system; acoustic cavitation; anti-fouling; descaling; heat transfer enhancement