

超声空化对污垢沉积特性影响的数值研究

张艾萍, 冯卓, 丁权, 徐志明

(东北电力大学能源与动力工程学院, 吉林省 吉林市 132012)

摘要: 在超声波防垢过程中, 超声波的传播以及空化效果会受到流体及超声波参数的影响, 析晶污垢的沉积特性也会随之发生变化。对此, 采用 FLUENT 数值模拟与实验参数相比对的方法研究了不同流体速度、超声波频率下超声空化对 CaSO_4 析晶污垢剥蚀的影响。结果表明: 同频率条件下, 增大流速超声空化对污垢的剥蚀效果减弱; 同流速条件下, 增大超声波频率超声空化对污垢的剥蚀效果减弱。将空化效应引起的剥蚀率代入污垢的沉积过程, 得到超声波频率对污垢沉积特性的影响, 随着超声波频率的增加, 污垢净沉积率增加、污垢热阻变大。

关键词: 超声空化; 析晶污垢; 沉积特性; 数值模拟

中图分类号: TK 124

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2017) S1—0184—07

Simulation study on influential of ultrasonic cavitation on fouling deposition characteristic

ZHANG Aiping, FENG Zhuo, DING Quan, XU Zhiming

(College of Energy and Power Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, Jilin, China)

Abstract: In the process of ultrasonic antiscaling, the spread of ultrasonic and cavitation effect will be affected by the fluid and ultrasonic parameters, deposition character of crystallization fouling will also be changed. Thus, using the method of the FLUENT software numerical simulation compared with the experimental parameters, the effect of ultrasonic cavitation on CaSO_4 crystallization fouling removal is studied in the different fluid velocity and the ultrasonic frequencies. Results show that under the conditions of the same frequency, increasing velocity of fluid, the removal effect of ultrasonic cavitation on fouling is weakened. The removal rate caused by cavitation effect was brought into the fouling deposition process, and the effect of ultrasonic frequencies on the fouling character was obtained. With the increase of ultrasonic frequencies, fouling net deposition rate and fouling resistance increased.

Key words: ultrasonic cavitation; crystallization fouling; deposition character; numerical simulation

引言

在经济发展新常态下, 能源问题也面临一系列

挑战。为了保障经济的可持续发展, 只有在认识新常态和适应新常态的基础上提高能源利用效率, 才能使经济发展拥有持久的驱动力。换热设备中出现

2017-05-15 收到初稿, 2017-06-05 收到修改稿。

联系人及第一作者: 张艾萍 (1968—), 男, 博士。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51476025)。

Received date: 2017-05-15.

Corresponding author: Prof. ZHANG Aiping, dongdian510@163.com

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (51476025).

结垢的现象较常见,一旦换热设备结垢就会造成传热传质效率降低,更有甚者会引起管道的腐蚀,一个普通的海水淡化工厂,大约需要补偿 40% 的传热面积来维持生产的顺利进行,这就增加了产业成本以及浪费能源^[1]。目前,超声波应用在换热设备中已表现出显著的防垢性能,大量研究表明超声波引起的空化效果是防垢主要因素。Benjamin 等^[2]发现,当壁面附近的气泡两侧所受力不平衡时,会引起一束微射流穿透气泡并以极大的速度撞击到壁面上。Pečnik 等^[3]对超声空化除垢进行研究发现不同表面粗糙程度下超声空化对污垢的清除效果不同,表面越粗糙越能促进超声波对水垢的清除;若表面完全光滑则需要通过增加超声空化发生器振幅的方式提高空化效果,加强对水垢的清除。Wallhauber 等^[4]完成了超声波设备对附着污垢的板式壁面清除效果的研究,根据结果希望该项技术能够得到推广。Paakkonen 等^[5]采用计算流体力学的方法得到热交换表面析晶污垢在形成过程中,受壁温的影响要比受剪切应力的影响强 30 倍,这也更加证实了析晶污垢的反常特性。Mazue 等^[6]将超声波换能器装备到船舶中发现,降低超声波频率,有利于增强积垢表面污垢的清除效果。有学者研究发现,将超声波技术应用在磷废水当中可有效消除其中的磷酸镁氨,并且随着超声波功率的增大,磷酸镁氨的诱导时间缩短结晶速率加快^[7]。而把超声空化效应应用到花生油的提取当中,发现当超声波频率为 40 kHz 时空化效果最好,并且从物理和化学的角度可提高萃取效率和改变氧化性能^[8]。Krasulya 等^[9]从超声波改变物体固有性质的方面,基于对乳液液滴稳定方面的影响,为研究超声波诱导乳状液体性质的变化提出空化声场模型。Doosti 等^[10]就超声波单纯与不纯净水之间的相互影响进行研究,发现水中的细菌数量变少,并且水里面悬浮的微粒现象减轻。其他因素也会对空化泡的发展形成不同程度的影响。Yusof 等^[11]发现低频条件下所形成的气泡能够产生较大的剪切力,并且空化泡能够作用于强氧化剂,有效地降解污染物。高功率超声波所引起的空化效果呈现明显的不稳定,其空化活动随温度升高达到一个峰值以后再下降,并且气体含量也对空化活动产生影响^[12]。Bogdan^[13]查明空化程度要受到工质温度的影响,通常表现为最大值的变化,这主要与工质的二次脱气现象有关,根据这种影响可以考虑研究温度对超声波作用

的影响。张艾萍等^[14]发现超声波声强及管型上的差异同样会引起换热设备中空化结果的不同,并完成了对空化现象中各阶段空化泡特征的具体分析。目前,国内外采用数值模拟的方法进行超声波防垢的研究还比较缺乏。

由于超声波的防除垢原理相对复杂^[15],超声波作用下空化效应、活化效应、抑制效应以及剪切效应都影响超声波防除垢效果。超声空化是影响防除垢效果的主要因素,由空化效应而引起的气泡由形成直到在壁面处的破裂过程更为复杂。由于超声波传播过程中的衰减以及空化效应对强化传热的影响,所以很难通过实验来动态研究超声波对污垢沉积特性的影响,本文主要采用声压函来模拟管内超声场的变化,设置超声波入口的声压方程为

$$P(t)=P_1+P_2\sin(2\pi ft) \quad (1)$$

式中, $P_1=0$ 为入口静压; $P_2=156000$ Pa 为压力脉动平均值; $f=20$ kHz 是超声波频率。

管内声压的变化情况在模拟过程中通过导入 UDF 来实现,首先由数值模拟得到超声场内污垢的沉积特性,并通过与实验得到超声波的抑垢参数进行比对,研究超声空化对污垢剥蚀的影响,得到不同速度、频率下超声空化对污垢剥蚀的影响规律,为研究超声波对污垢沉积特性的影响提供参考依据。

1 研究对象的物理模型及网格划分

1.1 物理模型

本文对圆管三维物理模型进行数值模拟。圆管是直径为 22 mm、长为 1.5 m 的不锈钢管,超声场的数值模拟在距管道的入口 50 mm 处加入超声波入口如图 1 所示。

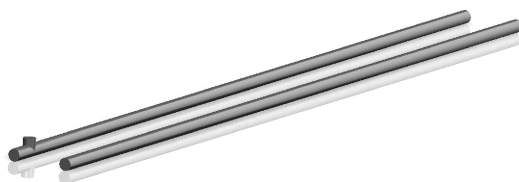


图 1 物理模型

Fig. 1 Physical model

1.2 网格划分

计算网格是利用 ICEM 划分的六面体非结构化网格,由于研究的是壁面处的沉积过程,所以对于壁面处的网格进行加密处理以提高运算的精度,网格划分的局部放大如图 2 所示。

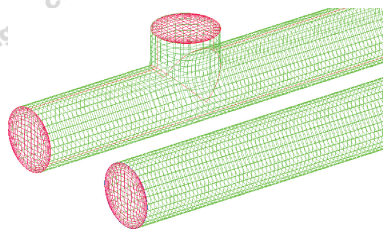


图 2 物理模型网格

Fig. 2 Mesh generation of physical model

2 数学模型及边界条件

2.1 数学模型

描述管内流体流动与传热问题的动量方程、能量方程、连续性方程以及控制方程、 κ - ϵ 方程可以写成以下通用形式^[16]

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{u}\phi) = \text{div}(\Gamma_{\phi}\text{grad}\phi) + S_{\phi} \quad (2)$$

式中, ρ 为工质密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; t 为时间, s ; ϕ 为广义变量; $\mathbf{u}$ 为速度矢量, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; Γ_{ϕ} 为广义扩散系数; S_{ϕ} 为广义源项。

2.2 污垢沉积模型

本文计算所采用的污垢沉积模型, 采用徐志明等^[17]建立起来的污垢沉积模型, 污垢的沉积率模型为

$$\dot{m}_d = \frac{1}{2} \frac{k_t}{k_R} + \Delta c - \left[\frac{1}{4} \left(\frac{k_t}{k_R} \right)^2 + \frac{k_t}{k_R} \Delta c \right]^{1/2} \quad (3)$$

式中, k_t 为对流传质系数; k_R 为表面反应速率常数; Δc 为总浓度差。

污垢的剥蚀率模型^[18]表示如下

$$\dot{m}_r = \frac{K}{P} \rho_f (1 + \delta \Delta T) d_P (\rho^2 \eta g)^{1/3} x_f u^2 \quad (4)$$

式中, 依照 Krause^[19] 的测量方法, $\frac{P}{K} =$

$83.2u^{0.54}$; $\rho_f = \frac{m}{x_f}$, 为污垢层的平均密度; x_f 为污垢层厚度; m 为单位面积上的污垢沉积量; $1 + \delta \Delta T$ 为污垢层的热应力; δ 为线性扩散系数; ΔT 为污垢层内的温度差; d_P 为 CaSO_4 析晶晶体的平均半径, 约为 $37 \mu\text{m}$; u 为流体的平均流速。

污垢的净沉积率可表示沉积率与剥蚀率之差

$$\frac{dm}{dt} = \frac{dm_d}{dt} - \frac{dm_r}{dt} \Rightarrow \dot{m} = \dot{m}_d - \dot{m}_r \quad (5)$$

由物质热阻定义^[20]可得污垢热阻

$$R_f = m_f / (\rho_f \lambda_f) \quad (6)$$

式中, λ_f 为污垢层的热导率。

2.3 边界条件

本文中未加超声波的基本边界条件为: 入口边界条件为速度入口, 流速为 $0.37 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 流体温度为 340 K 、入口浓度为 $666.67 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 CaSO_4 溶液, 管道壁面为速度无滑移常壁温条件, 壁温为 300 K 。对超声场的模拟根据声压函数编写 C 语言程序, 并在边界条件设置的超声波入口选择压力入口边界条件、导入自定义函数, 其他边界条件的设置均与未加超声波条件相同。

参照文献 [21] 中的实验以及抑垢率参数, 本文不考虑析晶污垢种类对超声波防除垢效果影响, 研究的影响因素为两类工况对计算结果的影响, 所以文中所用到的相关参数如表 1 所示。

表 1 模拟工况

Table 1 Simulation conditions

Group number	Inlet velocity / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Ultrasonic frequency /kHz	Experiment fouling inhibition rate/%
1	0.37	0	0
2	0.37	20	96.1
3	0.37	40	92.7
4	0.74	0	0
5	0.74	20	90.4
6	0.74	40	83.4

3 数值方法与验证

为了验证网格数对计算结果的影响, 依次增加网格数为 104895、132867、188811、244755、356643、412587 个, 得到未加超声场内在 150 h 的污垢热阻曲线如图 3 所示。由网格无关性曲线可以看出, 随着网格的加密热阻逐渐减小, 当网格数量达到 244755 个后继续加密网格, 对计算精度的提高无意义, 所以为了保证计算的精度和提高运算速度, 本文网格数采用网格数为 244755 个, 壁面

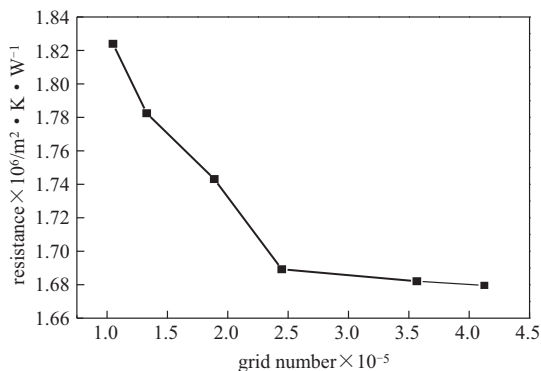


图 3 关于热阻的网格无关性验证

Fig. 3 Verifying grid independence about fouling resistance

处采用加密的方式来划分网格。

本文运用 FLUENT 软件对不同工况进行数值模拟计算。FLUENT 解算器为三维双精度分式求解器,研究管道的流动状态时,选择了标准的 $k-\epsilon$ 湍流模型,压力与速度的耦合方式选取 SIMPLER 算法,计算过程中的数学方程均选择二阶迎风格式离散的方式,残差级别设置为 10^{-6} ,时间步长为 3600 s,迭代步数为 200 步。

为了验证数值方法的准确性,采用文献 [13] 的实验参数与方法对数值方法的正确性进行分析。即流体入口温度设置为 300 K,根据已知几何模型参数依次调整入口速度为 0.25、0.35、0.5、0.6、0.75 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,浓度为 3.0 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的 CaSO_4 溶液,壁面温度恒定在 330 K。对比结果如图 4 所示。对模拟结果与实验结果的对比可知,模拟结果与实验结果除了在低 Reynolds 数误差较大外,其余几组模拟工况均与实验结果的变化趋势相同。

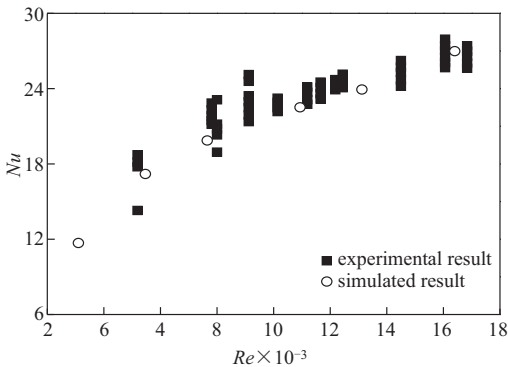


图 4 实验结果与模拟结果对比

Fig. 4 Comparison between experiment and simulation result

各工况的计算误差率如表 2 所示,表 2 为各 Reynolds 数下的误差,由表可以看出整体误差也保持在允许范围内,所以本文的数值方法是合理的。

表 2 各工况下的计算误差率

Re	Error rate/%
5536	2.80
7731	7.22
11028	4.11
13227	2.55
16526	1.73

4 计算结果与分析

4.1 不同入口速度下超声空化对污垢剥蚀的影响

由于超声空化是影响防除垢的主要因素,而其

他效应的影响相对较小,所以在本文中将气泡在边界处破碎前的阻垢以及其他效应对污垢沉积的影响均归纳于超声空化对剥蚀率的影响。通过组 1、2 的数值结果并根据污垢的沉积模型进行计算,得到组 1 与组 2 净沉积率曲线如图 5 所示。

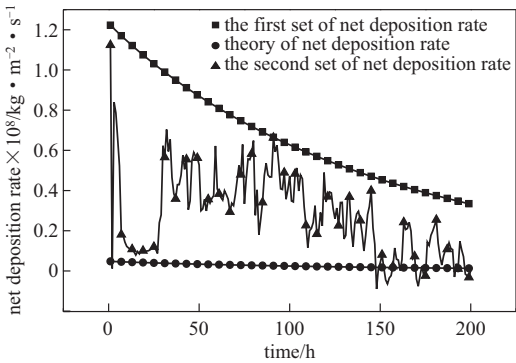


图 5 净沉积率理论与数值结果及其修正

Fig. 5 Net deposition rate and its correction for theoretical and numerical results

由图 5 两条曲线可以看出超声场对污垢具有抑制的效果,根据实验的抑垢率参数由组 1 的净沉积率曲线可得到理论净沉积率曲线。通过组 2 的净沉积率曲线与理论净沉积率之差可得到用于修正的净沉积率曲线即超声空化的剥蚀率曲线。采用以上方法分别得到组 2、组 5 的超声空化剥蚀率曲线,将其结果进行对比如图 6 所示。

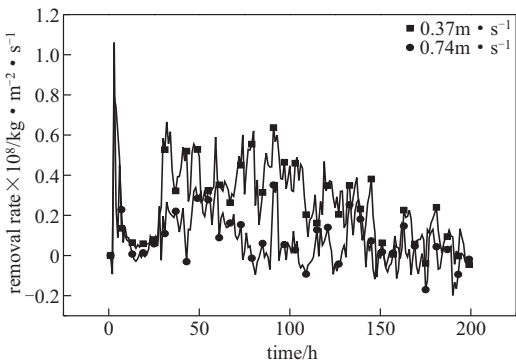


图 6 不同入口速度下超声空化对剥蚀率的影响

Fig. 6 Effect of ultrasonic cavitation on removal rate at different inlet velocity

由图 6 可以看出增大流速超声空化对污垢的剥蚀效果减弱,出现以上结果主要是随着流体流速的升高引起超声波的衰减增强,也就是说随着流体速度的增加声强减小、管内工质的 Reynolds 数增大、湍流效果增强,管内气含率升高,在此种条件下虽然空化阈值有所降低,但空化的强度也随之降低。

流速增加,管内动压增强,管内液体压力变大引起空化阈值增高,所以在超声波频率一定的条件下,增大流速超声空化效果减弱,超声空化对应的剥蚀效果也降低。在图中个别点的数值小于 0,也就是说在该点处的剥蚀效果为负,出现该种情况主要是由于在本文中所选的实验值参数为平均抑垢率,而空化所引起的剥蚀率变化也是由理论平均值推导而来。

4.2 不同频率下超声空化对污垢剥蚀的影响

为研究不同频率下超声空化效果以及对污垢剥蚀的影响,本文分别对组 1、2、3 以及组 4、5、6 进行数值计算,计算结果经处理得到的剥蚀率整体趋势随超声波频率变化一致,组 4、5、6 的变化趋势如图 7 所示。从图中可以看出 20 kHz 超声波的整体剥蚀率效果较好,出现这种情况主要是由于随着超声波频率的增加,缩短了超声波周期,气泡由生长到破裂过程所需相的稀疏与压缩时间减少。这会削弱稀疏相内空化核的增长,导致管内环境难以达到气泡发生空化效应的要求,以至于管内的气含率也随之降低;同时,由于管内相自稀疏到压缩过程的周期缩短导致部分气泡来不及破碎,空化效应减弱。所以,在流速一定的条件下随着超声波频率增大,超声空化效果减弱,管内气泡的快速变化以及汽含率的降低,管内超声波阻垢能力也减小,超声空化对污垢的剥蚀效果也减弱。

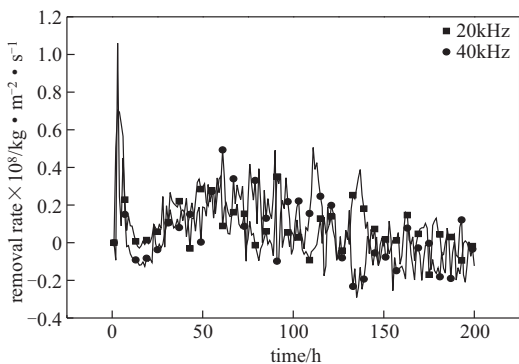


图 7 不同频率下超声空化对污垢剥蚀率的影响
Fig. 7 Effect of ultrasonic cavitation on removal rate at different ultrasonic frequencies

4.3 超声波频率对污垢沉积特性的影响

通过对组 1、2、3 的数值计算可得到超声场内的污垢沉积结果,在此基础上分别加入用于修正各组的超声空化剥蚀率数据,可得到不同超声波频率下的污垢沉积特性曲线,如图 8 所示。

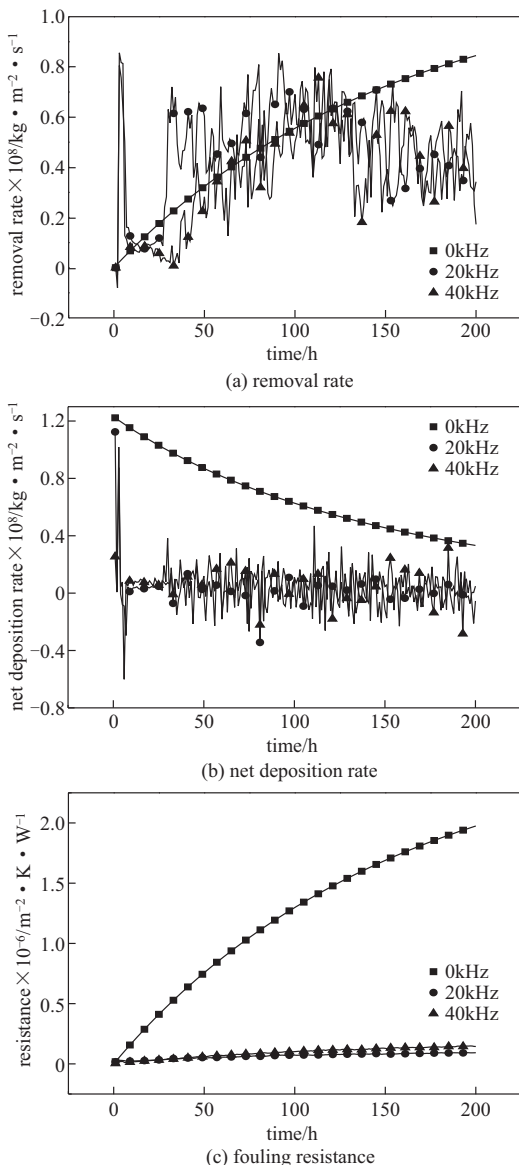


图 8 不同超声波频率下的污垢沉积特性
Fig. 8 Fouling deposition characteristic at different ultrasonic frequencies

从图 8 (a) 中可以看出在 0~120 h 内随着超声波频率的增加污垢剥蚀率先增大后减小,在 120~200 h 内未加超声波的剥蚀率继续增加,而加入超声波的剥蚀率在未加超声波的剥蚀率下方波动变化。出现这种现象是因为剥蚀是指污垢在壁面或垢层被带走的过程,由于加入超声波后,空化过程中气泡的生长过程使阻垢能力提高,气泡的破裂过程使污垢的剥蚀率增大,导致如图 8 (b) 所示加入超声波后污垢的净沉积减小,所以随着时间变化在壁面处所积累的污垢减少,而未加超声波污垢会随着时间变化在壁面处的积累增加,直到剥蚀与污垢

的沉积速度等效。所以,图 8 (a) 中在 120~200 h 内 20、40 kHz 的剥蚀率在 0 的下方波动。

从图 8 (c) 中可以看出加入超声波后污垢热阻明显降低,20 kHz 超声波作用下的污垢热阻小于 40 kHz 的污垢热阻,这说明低频超声波的防除垢效果好。

4.4 误差分析

通过对数值结果的计算可得到污垢总的沉积量,将组 1、2 按照实验称重的方法进行抑垢率计算并与实验结果进行对照可得到如图 9 所示的误差变化曲线。从图中可以看出开始一段时间内误差较大,出现此现象主要是由于模拟过程主要是两种物质在壁面的反应,模型没有考虑污垢诱导期,随着时间的增加误差逐渐减小,并且小于 20%。

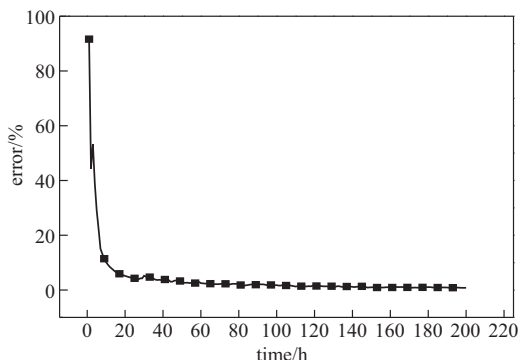


图 9 数值计算结果与实验结果间的相对误差

Fig. 9 Relative error between numerical values and experimental values

5 结 论

(1) 防除垢超声波在一定频率下,增加换热管内流体速度,超声空化效果减弱,超声空化对污垢的剥蚀效果减小,本文流速为 $0.37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的剥蚀率大于 $0.74 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的剥蚀率,所以在以上两种流速可供选择的情况下,可以选择 $0.37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的流速来提高超声空化的防除垢效果。

(2) 超声波具有明显的防除垢效果,超声空化会增大污垢的剥蚀,减小沉积,降低壁面的热阻。在流速一定条件下,增大超声波频率,超声空化对污垢的剥蚀降低,本文中频率为 20 kHz 的超声波空化效果好,对污垢的剥蚀效果较 40 kHz 的超声波显著,热阻及净沉积率也小于频率为 40 kHz 的超声波作用。

References

- [1] ALAHMAD M. Factors affecting scale formation in sea water environments an experimental approach[J]. Chemical Engineering & Technology, 2008, **31** (1): 149-156.
- [2] BENJAMIN T B, ELLIS A T. The collapse of cavitation bubbles and the pressures thereby produced against solid boundaries [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1966, **260**: 221-240.
- [3] PEČNIK B, HOČEVAR M, ŠIROK B, *et al.* Scale deposit removal by means of ultrasonic cavitation[J]. Wear, 2016, **356**: 45-52.
- [4] WALLHAUBER E, SAYED A, NOBEL S, *et al.* Determination of cleaning end of dairy protein fouling using an online system combining ultrasonic and classification methods[J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, **7** (2): 506-515.
- [5] PAAKKONEN T M, OJANIEMI U, PATTIKANGAS T, *et al.* CFD modelling of CaCO_3 crystallization fouling on heat transfer surfaces[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, **97**: 618-630.
- [6] MAZUE G, VIENNET R, HIHN J Y, *et al.* Large-scale ultrasonic cleaning system: design of multi-transducer device for boat cleaning (20 kHz) [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2011, **18** (4): 895-900.
- [7] QIU L, SHI L, LIU Z, *et al.* Effect of power ultrasound on crystallization characteristics of magnesium ammonium phosphate[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, **36**: 123.
- [8] ZHANG L, ZHOU C, WANG B, *et al.* Study of ultrasonic cavitation during extraction of the peanut oil at varying frequencies[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, **37**: 106-113.
- [9] KRASULYA O, BOGUSH V, TRISHINA V, *et al.* Impact of acoustic cavitation on food emulsions[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2016, **30**: 98-102.
- [10] DOOSTI M R, KARGAR R. Watertreatment using ultrasonic assistance: a review [C] // Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences. 2012: 96-110.
- [11] YUSOF N S, BABGI B, ALGHAMDI Y, *et al.* Physical and chemical effects of acoustic cavitation in selected ultrasonic cleaning applications. [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, **29**: 568.
- [12] XU H, TU J, NIU F, *et al.* Cavitation dose in an ultrasonic cleaner and its dependence on experimental parameters[J]. Applied Acoustics, 2016, (101): 179-184.
- [13] BOGDAN N. Cavitation intensity of water under practical ultrasonic cleaning conditions [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2014, (21): 354-359.
- [14] 张艾萍, 杨钊, 夏荣涛, 等. 强化换热管内超声空化影响因素的数值研究[J]. 化工机械, 2016, (2): 208-213.
- ZHANG A P, YANG Z, XIA R T, *et al.* Numerical simulation of ultrasonic cavitation influence factors in enhanced heat transfer tube [J]. Chemical Engineering Machinery, 2016, (2): 208-213.

- [15] 张艾萍, 杨洋. 超声波防垢和除垢技术的应用及其空化效应机理[J]. 黑龙江电力, 2010, **32** (5): 321-324.
ZHANG A P, YANG Y. Application of ultrasonic antiscaling and descaling and its cavitation effect mechanism [J]. Heilongjiang Electric Power, 2010, **32** (5): 321-324.
- [16] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 19-25.
TAO W Q. Numerical Heat Transfer[M]. Xi' an: Xi' an Jiaotong University Press, 2001: 19-25.
- [17] 徐志明, 张一龙, 徐欣. 温度及浓度对析晶污垢沉积特性影响的模拟研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, **34** (35): 6263-6270.
XU Z M, ZHANG Y L, XU X. Simulation study on influential of temperature and concentration on crystallization fouling deposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, **34** (35): 6263-6270.
- [18] BRAHIM F, AUGUSTIN W, BOHNET M. Numerical simulation of the fouling process[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2003, **42** (3): 323-334.
- [19] KRAUSE S. Fouling of heat-transfer surfaces by crystallization and sedimentation [J]. International Chemical Engineering (A Quarterly Journal of Translations from Russia, Eastern Europe and Asia) (United States), 1993, **33** (3): 355-401.
- [20] 杨善让, 徐志明, 孙灵芳. 换热设备污垢与对策[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1-20.
YANG S R, XU Z M, SUN L F. Fouling and Countermeasures for Heat Transfer Equipment[M]. Beijing: Scientific Press, 2004: 1-20.
- [21] 孙晓清, 符卫春, 张明铎. 直管中流体流速对超声波防垢效果的影响[J]. 声学技术, 2010, (6): 600-602.
SUN X Q, FU W C, ZHANG M D. Experimental study of flow rate effect on ultrasonic anti-scaling control [J]. Technical Acoustic, 2010, (6): 600-602.