

研究论文

缠绕式变频电磁水处理器电磁频率对抑垢效果的影响

王建国, 李雨通, 邓丽娟

(东北电力大学自动化工程学院, 吉林省 吉林市 132012)

摘要: 针对缠绕式变频电磁水处理系统, 利用 ANSYS 仿真软件对处理腔内水溶液的磁感应强度和感生电流进行分析, 探究水体内磁感应强度以及感生电流做功与激励信号频率的内在关系, 并利用电磁抑垢效果在线评价实验台, 通过改变缠绕式处理腔中电磁场的频率大小分析其对特定硬水循环换热实验管道抑垢效果的影响规律, 进而寻求理想的抑垢频率。实验结果表明, 电磁频率在分界频率附近时水处理系统能到达较长的污垢诱导期以及较好的抑垢率, 抑垢效果最佳。

关键词: 缠绕式处理腔; 频率; 磁感应强度; 感生电流; 抑垢效果; 对流; 传热; 数值分析

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20141385

中图分类号: TQ 085

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2015) 03—0972—07

Influence of electromagnetic frequency on scale inhibition for spiral winding variable frequency electromagnetic water processor

WANG Jianguo, LI Yutong, DENG Lijuan

(School of Automation Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, Jilin, China)

Abstract: For the spiral winding variable frequency electromagnetic water processor, magnetic induction intensity of water in processing cavity and induced current were analyzed with ANSYS simulation software. The inner relationship of magnetic induction intensity and induced current work with excitation signal frequency was studied. Using an online evaluation test bench for electromagnetic scale inhibition, the influence of spiral winding processing cavity frequency on scale inhibition of hard water circulation heat transfer experiment pipe was observed, and the ideal scale inhibition frequency was determined. Under this experimental condition, the frequency near the line frequency had longer scale induction period and stronger scale inhibition effect, and anti-scaling efficiency was the best.

Key words: spiral winding processing cavity; frequency; magnetic induction intensity; induced current; anti-scaling effect; convection; heat transfer; numerical analysis

引 言

电力、钢铁、冶金等工业领域大型设备的正常运行都离不开循环水冷却系统。碳酸钙垢是水冷应

用中最常见的一种垢型, 由于污垢的热阻相对较大, 换热面结垢通常会降低其换热效率, 同时流通面积的减小会增加泵耗。结垢也会增加补水、排污水以及清理换热面的费用, 严重时会造成爆管等事故^[1]。

2014-09-16 收到初稿, 2014-11-28 收到修改稿。

联系人: 李雨通。第一作者: 王建国 (1963—), 男, 教授。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51176028); 吉林省重点科技攻关项目(20140204006SF)。

Received date: 2014-09-16.

Corresponding author: LI Yutong, 302533570@qq.com

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (51176028) and the Key Scientific and Technological Project of Jilin Province of China (20140204006SF).

相对于传统的化学除垢抑垢方法, 电磁抑垢法以其操作简单、绿色环保、价格低廉等优点广泛应用于工业和生活水冷系统^[2-6]。但是考虑到实验条件的限制以及水体的多样性, 国内外所报道的研究成果存在差异性^[7-12]。针对缠绕式变频水处理系统的研究往往是在特定水质参数和实验工况下进行, 所以得到的结论也不尽相同。姜德宁等^[13]对不同硬度的溶液样本经过处理后, 认为所加激磁电压幅值越高阻垢效果越好, 当磁感应强度达到 0.9 mT 时结垢量最小; 金贞花等^[14]对硬度在 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的硬水溶液施加交变电信号进行处理, 认为激磁线圈内的电流越大阻垢效果越显著; 陈璨等^[15]认为频率为 1.2 kHz 左右时抑垢效果最好。而邢晓凯等^[16]在自行设计的实验条件下, 认为激磁频率为 700 Hz 时抗垢效果最佳; 费继友等^[17]还有些学者通过自制的扫频装置, 认为扫频可以对不同水质达到一定的抑垢效果。

本研究针对电磁能量分布比较均匀^[18]的缠绕式处理腔, 从腔体水溶液内感生电流做功值和磁感应强度两个方面开展研究, 根据实验台实际条件绕制合理的线圈匝数, 在自主研制的电磁抑垢效果在线评价系统的基础上得出不同频率下特定硬水循环流经换热实验管道时的抑垢效果及其变化规律, 进而对缠绕式变频电磁水处理器技术的发展起到指导性作用。

1 缠绕式变频电磁水处理器电磁场分析

由于污垢的形成受到很多未知因素的影响, 目前变频电磁水处理的原理尚不明确, 磁抑垢机理一直存在争议^[19], 公认度比较高的有“洛伦兹力理论”^[20]、“氢键断裂理论”^[20]、“磁滞效应理论”^[21]、“极化作用理论”^[22]等。综合这些理论, 可以将缠绕式变频电磁水处理器工作的主要原理概括为: 电磁信号发生装置对紧密缠绕在输水管上的线圈施加一定频率和幅值的方波电压, 从而使线圈内部产生与水流方向大致平行的交变磁场, 交变磁场会在水体内部感生出与线圈缠绕方向平行的感生电场, 输水管道内的水体在交变磁场和电场的作用下内部离子和分子的物理化学性质发生某些改变, 进而影响晶核的形成以及沉淀颗粒的生长, 从而达到抑垢的效果。但是, 在抑垢除垢的过程中感生电场和感生磁场的哪一个起到关键作用并无定论。韩勇等^[23]认为感生电场对水体做功越多抑垢效果越好; 而金贞花等^[14]

认为激磁线圈内的电流越大, 磁感应强度越大, 阻垢效果越显著。本研究利用 ANSYS 有限元软件探究感生电流做功值和磁感应强度大小与激励线圈结构和信号频率的内在关系, 实现最优抑垢效果的分析。

ANSYS 有限元软件包是一个多用途的有限元法计算机设计程序, 可以用来求解结构、流体、电力、电磁及碰撞等问题^[24]。本研究基于缠绕式变频电磁水处理器物理模型, 利用 ANSYS 软件的 PLANE53、CIRCU124、POST1 和 POST26 等单元对处理腔进行 2D 瞬态电磁仿真分析。选取 $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 碳酸钙过饱和溶液进行模型仿真, 溶液 pH 为 9.0, 电导率为 $2.400 \times 10^3 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, 温度为 27℃。激磁线圈为单层密绕的螺线管, 线圈材料为漆包铜线, 铜线的电阻率在外界温度 25℃时为 $1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, 铜线直径为 2 mm, 匝数为 50。输水管道采用 PVC 材料, 壁厚 2.5 mm, 内径为 10 mm, 管长 0.25m。缠绕式变频电磁水处理器 2D 模型如图 1 所示, 2D 仿真模型如图 2 所示。

1.1 电磁频率对水处理系统内感生电流的影响

由于缠绕式变频电磁水处理器水体内部的感生电流方向与激励线圈内电流方向平行, 也呈环状分布, 水体感生电流密度分布如图 3 所示, 蓝色部位为感生电流分布, 粉色部位为激励线圈。

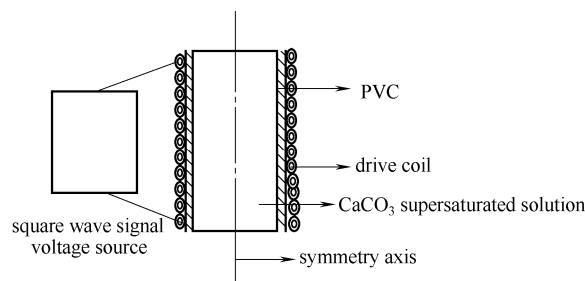


图1 缠绕式变频电磁水处理器 2D 模型

Fig.1 Spiral winding variable frequency electromagnetic water processor 2D model

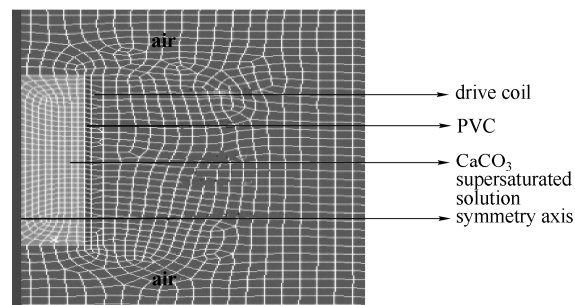


图2 缠绕式变频电磁水处理器 2D 仿真模型

Fig.2 Spiral winding variable frequency electromagnetic water processor 2D simulation model

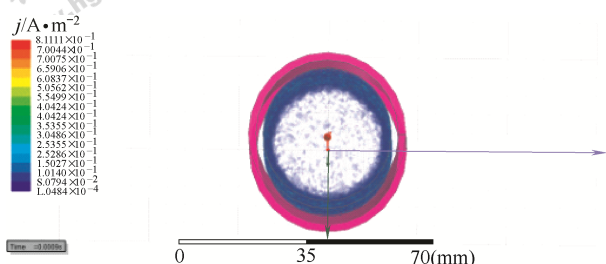


图 3 水体感生电流密度分布

Fig.3 Induced current density distribution of water

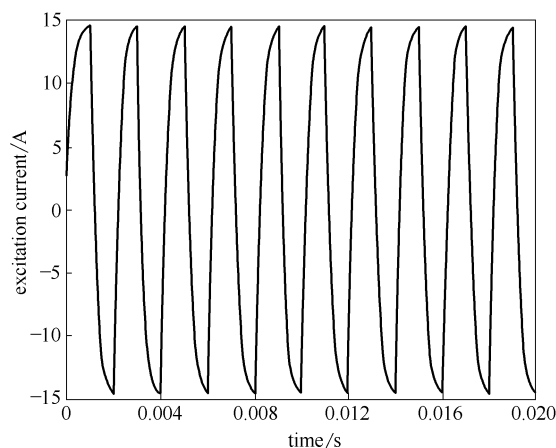


图 4 线圈电流信号波形

Fig.4 Coil current signal waveform

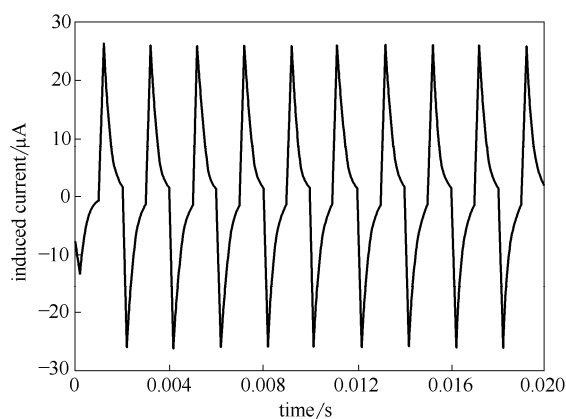


图 5 感生电流信号波形

Fig.5 Induced current signal waveform

可以将处理腔内溶液等效为与激励线圈同轴的单匝线圈进行处理, 并达到很好的精度^[23]。经 ANSYS 对所建模型的仿真, 如图 4 线圈电流信号波形和图 5 感生电流信号波形, 可知两种信号都呈周期性指数变化。

可根据线圈互感的电路方程推导出水体感生电流的数学表达式[式(1)、式(2)]以及感生电流做功的计算公式[式(3)]。

$$i_{1(t)} = k \frac{U e^{-\frac{t}{\tau}} \left[2 - e^{-\frac{T}{2\tau}} (2 - e^{-\frac{T}{2\tau}}) \right]}{\tau R_1}$$

$$\left(\tau = \frac{L_1}{R_1}, \quad 0 \leq t \leq \frac{T}{2}, \quad k = \frac{0.95 \sqrt{L_2}}{R_2 L_2} \right) \quad (1)$$

$$i_{2(t)} = -i_{1\left(t - \frac{T}{2}\right)} \quad \left(\frac{T}{2} \leq t \leq T \right) \quad (2)$$

$$W = K U^2 \frac{\left[2 - e^{-\frac{T}{2\tau}} (2 - e^{-\frac{T}{2\tau}}) \right]^2}{T R_1} \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau}} \right)$$

$$\left(\tau = \frac{L_1}{R_1}, \quad 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \right) \quad (3)$$

$$K = \lambda \frac{L_2 T_0}{R_2} \quad (4)$$

式中, L_1 、 L_2 分别为激励线圈电感、水体电感, H; R_1 、 R_2 分别为激励线圈电阻、水体电阻, Ω ; λ 为处理腔内水容积与循环水总体积的比值; T_0 为实验周期, s; U 为激励线圈的电压幅值, V。

根据做功公式[式(3)]可知, 当参数 K 以及激励线圈结构一定时, 感生电流做功量只与激励电压以及激励信号频率有关, 当信号频率确定时做功量随激励信号电压幅值增大而增大。

当激励线圈电压幅值为 1 V 时, 取参量 K 为 1×10^{-12} , 线圈参量 L_1 、 R_1 的比值 τ 为 0.667 ms, 代入式(3), 观察电磁频率 f 对感生电流做功量 W 的影响曲线, 如图 6 所示。可以看出, 当激励电压幅值和溶液参数 K 以及激励线圈结构一定时, 感生电流做功量只取决于激励信号频率的大小, 当频率 f 在 0~525 Hz 附近时做功值随频率增加迅速增大, 而当频率大于 525 Hz 后做功值增长很不明显。

通过以上的讨论可知, 一味地增大激励信号频率 f 并不能很明显地增加做功量 W , 虽然通过式(3)

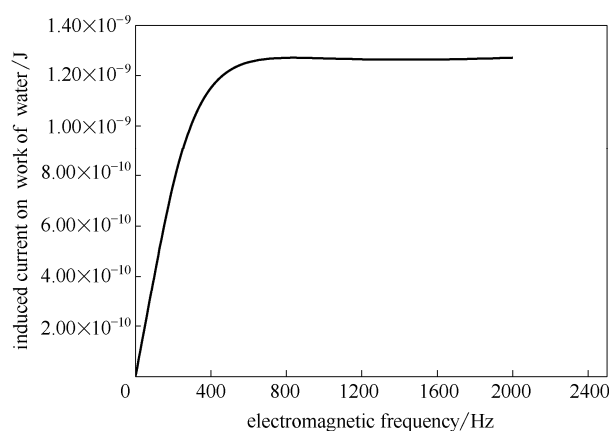


图 6 电磁频率对感生电流做功的影响

Fig.6 Influence of electromagnetic frequency on induced current power

的函数表达式可以证明 W 是关于 f 的单调递增函数, 但是当 f 高于某一个分界频率值时, 随着频率的继续增大, W 的变化却很缓慢, 并且当 f 趋近无穷大时 W 收敛于某一个值。

由于式(3)很复杂, 直接通过数学推导很难找到分界频率与线圈时间常数 τ 的函数关系, 所以选取几组不同的 τ 值, 找到其对应的分界频率点进行拟合, 找到对应的函数关系, 拟合曲线如图 7 所示。通过图 7 可以知道临界频率 f_0 是关于 τ 的反比例函数, 比例系数为 0.35, 所以 f_0 仅由 τ 决定, 即激励线圈是由电阻和电感决定。由于缠绕式变频电磁水处理器结构参数的限制, $0.35/\tau$ 分界频率值往往处于低频段内, 所以缠绕式变频电磁水处理更适合在低频段工作。因为过高的频率不仅不会使 W 有显著的提升, 而且还会使缠绕式变频电磁水处理系统设计复杂化, 特别是造成线圈严重发热以及电磁辐射等弊端, 提高系统的造价, 影响系统电路的精确度。

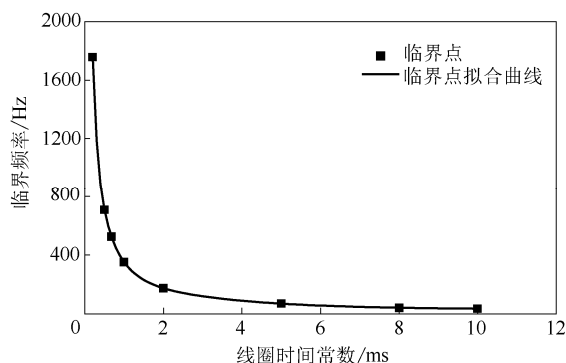


图 7 线圈时间常数与临界频率的关系

Fig.7 Relationship between time constant of coil and critical frequency

之所以会出现分界频率, 是由于溶液中的离子分布可以看作是由若干个离子氛组成的, 当离子氛的电平衡遭到破坏, 中心离子要从先前的离子氛中移出时, 就会对离子溶液造成大的扰动作用。而缠绕式变频电磁水处理装置工作时, 其产生的交变电场作用于碳酸钙水溶液, 当电磁频率较低时离子氛的中心离子可以从离子氛中移出, 致使大范围的带电离子重新排列, 随着频率的增加离子氛的中心离子能够更快速地从离子氛中移出, 而当频率高至迫使中心离子恰好移出其离子氛时对溶液的扰动可以达到最理想的效果, 但是随着频率的继续增加, 将会导致有些离子氛的中心离子只能在其离子氛内做往返运动, 扰动作用不会明显提升。所以确实会存在一个分界频率对溶液的做功值影响最明显, 扰动

作用也最强。

1.2 电磁频率对水处理系统内磁感应强度的影响

不同线圈匝数条件下, 改变激励信号频率, 观察水体中心磁感应强度的大小, 可以得到表 1。由表可知, 在激励信号电压幅值和线圈匝数不变的前提下, 水体中心磁感应强度随激励信号频率的增大也呈现递减趋势。

表 1 水体中心磁感应强度与线圈匝数以及信号频率的关系

Table 1 Relationship of magnetic induction intensity of water center, coil number of turns and signal frequency

Turn	Magnetic induction intensity of water, B/Gs						
	0.1 kHz	0.5 kHz	1 kHz	2 kHz	5 kHz	10 kHz	20 kHz
10	324.1	316.2	266.1	183.1	92.7	53.3	32.9
20	162.1	162.5	133.1	60.9	46.3	26.7	16.9
30	108.0	108.3	88.7	39.5	30.9	17.8	11.3
50	64.8	65.0	53.2	33.4	28.2	17.9	6.8
60	54.0	52.7	44.4	30.5	15.4	8.9	5.5
80	41.5	40.6	33.3	15.2	11.6	6.7	4.8

磁感应强度计算公式为

$$B = \frac{\mu NI}{L_e} \quad (5)$$

$$I = \frac{U}{\sqrt{(2\pi fL)^2 + R^2}} \quad (6)$$

式中, B 为磁感应强度, Gs; H 为磁场强度, $A \cdot m^{-1}$; N 为线圈匝数; I 为电流, A; L_e 为有效磁路长度, m; μ 为磁导率, $H \cdot m^{-1}$ 。

由式(5)和式(6)可知, 在线圈的激励电压幅值一定时磁感应强度的大小与线圈内有效电流直接相关, 然而有效电流由线圈阻抗决定, 当线圈匝数一定时, 信号频率增大, 阻抗会大幅度增大, 所以会使磁感应强度减小。

2 实验

2.1 实验系统

电磁抑垢效果在线评价实验平台结构如图 8 所示。

实验系统采用双路对比的实验方法, 研究相同水质、相同工况、加电磁处理和不加电磁处理的污垢热阻及水质参数变换特性。主要由工质循环系统、冷却循环系统、信号采集系统和变频电磁水处理装置 4 部分组成。工质循环系统由恒温水浴箱、工质循环管道组成。恒温水浴箱底部安装有加热器, 用来保持箱内水温恒定至设定温度。通过变频器控

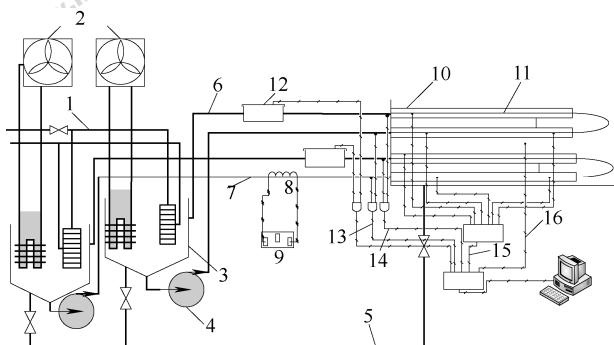


图 8 电磁抑垢效果在线评价实验台

Fig.8 Electromagnetic scale inhibition effect of only evaluation experiment

- 1—water cooling system; 2—air cooling system; 3—water tank;
4—circulating water pump; 5—drainage system; 6—pipeline of A side;
7—pipeline of B side; 8—spiral winding processing chamber;
9—electromagnetic signal generator; 10—thermostatic water bath;
11—U-shaped tubes; 12—water quality parameters on-line instrumentation;
13—inlet temperature of two pipes; 14—outlet temperature of two pipes;
15—wall temperature of two pipes; 16—bath temperature

制循环水泵, 获得实验需要的流速, 同时方便进行不同流速的实验。冷却循环系统由空冷系统和水冷系统组成。在水冷系统工作的基础上, 空冷系统通过 PID 智能温度控制器和变频器控制风冷冷却器的风机转速来调节风量大小, 从而控制循环工质的入口温度, 使入口温度保持恒定。信号采集系统由工控机、智能控制模拟量前端、水质参数在线仪表及 DS18B20 测温元件组成。变频电磁水处理装置由变频电磁信号发生器和缠绕式电磁处理腔组成。变频信号发生器产生可变频率的大功率方波信号, 通过缠绕电极式处理腔作用于流过的工质, 从而达到抑垢效果。

2.2 污垢热阻监测及抑垢率计算

基于污垢热阻在线监测技术评价电磁场的抑垢效果。

污垢热阻^[25]的定义如下

$$R_f = \frac{(T_{wf1} + T_{wf2} + T_{wf3})/3 - T_s}{q} \quad (7)$$

式中, R_f 为污垢热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$; T_{wf1} 、 T_{wf2} 、 T_{wf3} 为 3 个测点的壁温, 即管壁与污垢间的界面实测温度, $^{\circ}\text{C}$; T_s 为污垢与流体的界面温度, $^{\circ}\text{C}$; q 为热通量, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

T_s 可通过式(8)求得

$$T_s = \frac{T_{f0} - e^{-\frac{4l}{d} St} T_{fi}}{1 - e^{-\frac{4l}{d} St}} \quad (8)$$

式中, T_{f0} 、 T_{fi} 分别为实验管段出、入口处温度,

$^{\circ}\text{C}$; l 为实验管道长度, m ; d 为实验管道内径, m ; St 为 Stanton 数。

热通量 q 计算式为

$$q = \frac{Gc_p\rho(T_{f0} - T_{fi})}{\pi(d - 2\delta_f)l} \quad (9)$$

式中, c_p 为介质比热容, $\text{J} \cdot \text{kg} \cdot \text{K}^{-1}$; ρ 为介质密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

综合以上分析可知, 只要测出工艺流体在研究管段的出入口温度、流速和管壁温度, 利用上述关系就可以得到污垢热阻。相应地, 电磁场的抑垢率据化工行业标准得到^[26]。

抑垢率公式如下

$$\eta = \frac{R_{f0} - R_{fi}}{R_{f0}} \times 100\% \quad (10)$$

式中, η 为抑垢率; R_{f0} 为未经过电磁处理的污垢热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$; R_{fi} 为经过电磁处理的污垢热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

2.3 实验条件

根据实验台现有条件, 参考有关文献对磁记忆时间的描述, 初步设定处理腔长度为 25 cm。结合线圈匝数和信号频率对水体感生电流做功以及磁感应强度的影响, 本应选择大线径多匝的缠绕方式, 但是考虑到线圈过流发热, 在保证磁感应强度和感生电流尽量大的前提下, 本实验采用细线径多匝的方案进行实验研究。实验介质为去离子水与无水 Na_2CO_3 、 CaCl_2 按摩尔比 1:1 配制的溶液, 钙硬度为 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

实验中, 下水箱的循环介质温度控制在 27°C , 循环介质的流速设置为 $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 恒温水浴温度控制在 50°C 。将铜质漆包线缠绕在加磁管道 B 管入口管段, 呈螺旋管状, 线圈两端接上自制变频电磁装置, 实验中装置输出波形为方波信号, 输出电流和频率大小根据具体实验进行调整。实验周期为 7~10 d, 在线监测平台每分钟自动采集 1 次实验参数, 在线自动计算污垢热阻并将数据存盘。

3 频率对抑垢效果影响的实验结果与分析

基于电磁场频率对水处理系统的感生电流做功以及磁感应强度的影响, 通过对线圈的电阻和电感的测量, 计算感生电流做功的分界频率 $0.36/\tau$ 为 1.108 kHz。所以, 基于电磁抑垢效果在线评价技术, 在保证线圈所加交变方波电压峰值不变的条件下, 调节信号发生装置的信号频率在 0~10 kHz 范围内

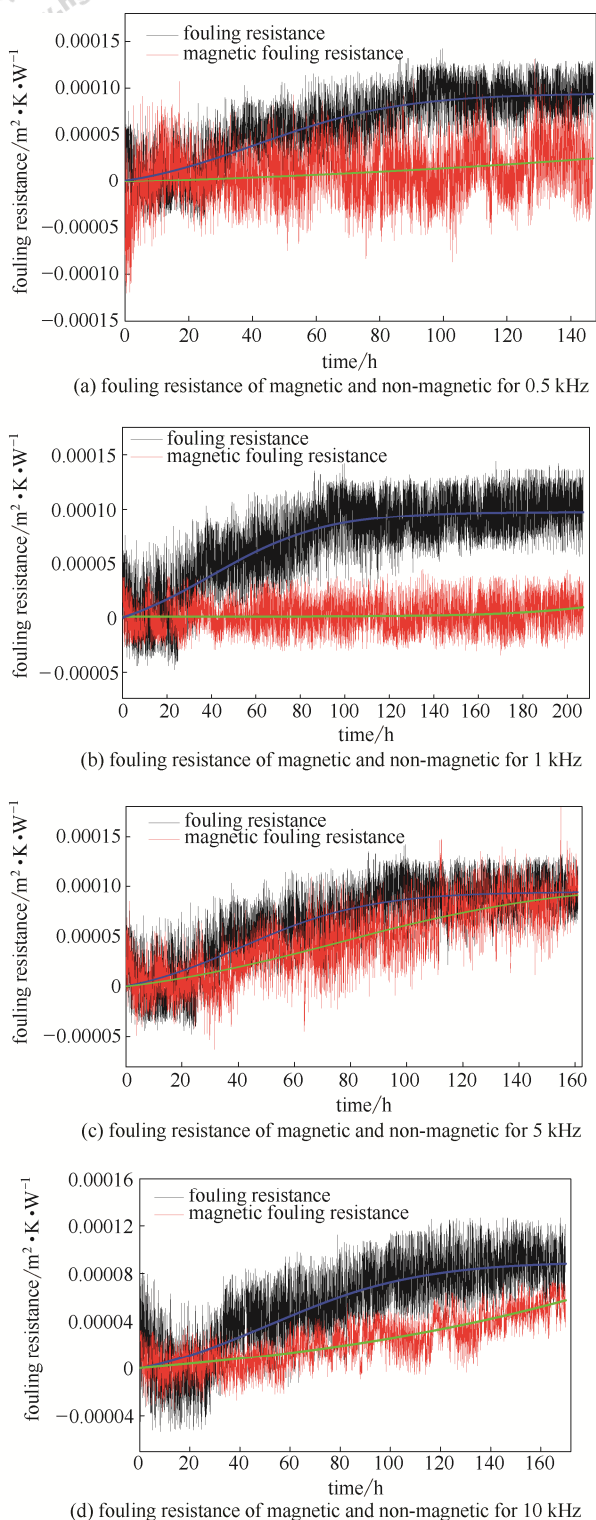


图9 不同频率电磁场对污垢热阻的影响

Fig.9 Effect of electromagnetic field of different frequency on fouling resistance

以 0.5 kHz 的步长递增, 使水处理系统在不同频率下工作, 进而得到不同频率电磁场条件下的污垢热阻变化曲线, 如图 9 所示。一方面, 通过曲线的变化可以观察不同频率电磁场条件下污垢诱导期 (污

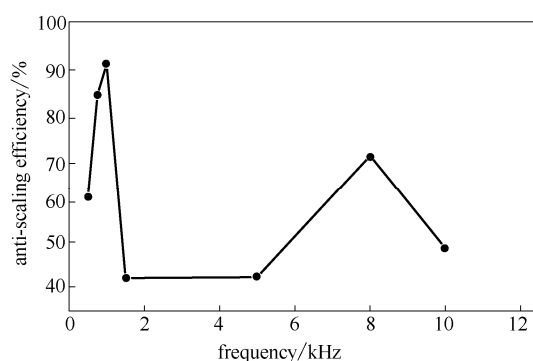


图 10 不同频率电磁场作用下的抑垢率

Fig.10 Effect of electromagnetic field of different frequency on anti-scaling efficiency

垢诱导期指的是从溶液与表面接触的时刻起到检测到析晶沉积物的这段时间), 来间接反映电磁频率对污垢形成的抑制作用; 另一方面也可以通过实验数据计算不同频率电磁场条件下抑垢率的变化, 如图 10 所示, 直观地反映了电磁频率对污垢形成的影响。

污垢诱导期越长, 说明模拟换热器表面生成的垢越少, 加磁处理具有一定的抑垢效果。从图 9 不同频率电磁场条件下的污垢热阻变化曲线可以观察到频率为 1 kHz 以及 0.5 kHz 下加磁处理后换热器表面污垢的诱导期到实验结束时还未结束, 频率为 5 kHz 和 10 kHz 下加磁处理后换热器表面污垢诱导期分别为 40 h 和 60 h 左右。从以上污垢诱导期的长短可以看出, 加磁处理下的污垢诱导期比未加磁处理长, 在频率为 1 kHz、0.5 kHz 加磁处理下的污垢诱导期较其他频率下长。大量的实验研究证明, 在 1.108 kHz 分界频率附近的频率点所得的模拟换热器表面的污垢诱导期都在 100 h 以上, 抑垢效果最明显, 证明了当电磁频率在分界频率附近时抑垢效果最明显的理论。

从图 10 不同频率电磁场作用下的抑垢率曲线可以直观地观察到, 1 kHz 处的抑垢率最大, 可达到 90% 左右, 抑垢效果最好, 也说明了当电磁频率在分界频率附近时抑垢效果最明显。

4 结 论

(1) 利用 ANSYS 仿真软件对缠绕式变频电磁水处理建立 2D 模型, 并利用电路模型等效, 计算出感生电流做功的表达式。当激励信号电压幅值一定时, 处理腔内感应电流做功的大小与激励信号频率有关, 并存在一个分界频率, 当激励频率在分界频率以下时感应电流做功随频率的增大做功值大幅增加, 在分界频率以上感应电流做功变化甚微, 此

分界频率大小在 $0.35/\tau$ 左右。

(2) 由 ANSYS 仿真结果可知, 缠绕式变频电磁水处理器的线圈匝数一定时, 处理腔中心磁感应强度随激励信号的频率增加, 磁感应强度呈现递减趋势, 所以频率在低频段更适合, 保持在 20 kHz 之内为优。

(3) 本实验工况下, 分界频率为 1.108 kHz, 当保证激励信号电压幅值一定时, 改变激励信号频率在 0~10 kHz 内变化, 动态实验结果表明, 在分界电磁频率附近频率点 1 kHz 时, 模拟换热面的污垢诱导期长达 100 h, 抑垢率也在 90% 左右, 电磁抑垢效果理想, 说明缠绕式变频电磁水处理器在分界频率附近工作时能达到较好的抑垢效果。

References

- [1] Lipusa L C, Ačko B, Hamlerb A. Electromagnets for high-flow water processing [J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2011, **50** (9): 952-958
- [2] Wang Jianguo (王建国), He Fang (何芳), Di Hao (邸昊). Correlation analysis of magnetic field and conductivity, pH value in electromagnetic restraint of scale formation [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2012, **63** (5): 1468-1473
- [3] Shelper W L, Kamp L M, Church J L. Measurement of triclosan in water using a magnetic particle enzyme immunoassay [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, **55** (10): 3758-3763
- [4] Xiao Zengli (肖曾利), Pu Chunsheng (蒲春生). Review of technology and application on magnetized water treatment for anti-scaling [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field* (断块油气田), 2010, **17** (1): 121-125
- [5] Chen Bowu (陈博武). Status and trends of the fouling monitoring technology of cooling water [J]. *Industrial Water Treatment* (工业水处理), 2006, **26** (5): 4-8
- [6] He Jun (何俊), Zhao Zongze (赵宗泽), Li Yuehua (李跃华). Research status and progress in scale inhibition and removal by physical technology [J]. *Industrial Water Treatment* (工业水处理), 2010, **30** (9): 5-9
- [7] Cheolho Bai. Effect of electronic anti-fouling treatment on fouling mitigation with circulating cooling-tower water [J]. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 2001, **28** (5): 671-680
- [8] Chang M C, Tai C Y. Effect of the magnetic field on the growth rate of aragonite and the precipitation of CaCO_3 [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, **164** (1): 1-9
- [9] Zhang Xuefeng (张雪峰), Niu Yonghong (牛永红). Research progress on application of magnetic treatment industrial water technology [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress* (化工进展), 2011, **30**: 831-833
- [10] Alimi Fathi, Tlili Mohamed, Gabrielli Claude. Effect of a magnetic water treatment on homogeneous and heterogeneous precipitation of calcium carbonate [J]. *Water Research*, 2006, **40**: 1941-1950
- [11] Botello-Zubiate M E, Alvarez A, Martinez-Villafane A. Influence of magnetic water treatment on the calcium carbonate phase formation and the electrochemical corrosion behavior of carbon steel [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2004, **369** (1/2): 256-259
- [12] Song Liu. A study of fouling in a heat exchanger with an application of an electronic anti-fouling technology[D]. Michigan USA: Drexel University, 1999
- [13] Jiang Dening (姜德宁), Zhou Kun (周昆). Experimental study on anti-scale of pipes based on alternating magnetic field [J]. *Journal of Tianjin University of Technology and Education* (天津工程师范学院学报), 2008, **18** (1): 21-25
- [14] Jin Zhenhua (金贞花), Chen Yongchang (陈永昌), Xing Xiaokai (邢晓凯). Investigation on the high voltage electrostatic anti-fouling technology for heat transfer enhancement [J]. *Journal of Engineering Thermophysics* (工程热物理学报), 2006, **27** (6): 1035-1037
- [15] Chen Can (陈璨), Liu Runhua (刘润华). The impact of electromagnetic frequency on CaCO_3 solubility quantitative research [J]. *Science Technology and Engineering* (科学技术与工程), 2009, **9** (15): 4567-4570
- [16] Xing Xiaokai (邢晓凯), Ma Chongfang (马重芳), Chen Yongchang (陈永昌). Experimental study of electromagnetic anti-fouling technology to enhanced heat transfer [J]. *Journal of University of Petroleum* (石油大学学报), 2005, **29** (1): 79-83
- [17] Fei Jiyou (费继友), Li Yuquan (李玉泉), Bai Xin (白鑫). The electromagnetic frequency conversion water anti-scale technology and experimental research [J]. *Chemical Automation and Instrument* (化工自动化及仪表), 2010, **38** (2): 157-161
- [18] Chen Xiaozhuan (陈小砖), Liu Jianhua (柳建华), Ma Chongfang (马重芳). Experimental research on mechanism of electromagnetic anti-fouling technology on cooling water flowing through absorber [J]. *Fluid Machinery* (流体机械), 2011, **11** (39): 67-70
- [19] Sung H Lee. A study of physical water treatment technology to mitigate the mineral fouling in a heat exchanger[D]. USA: Thesis of Drexel University, 2002
- [20] Ding Jie (丁洁), Dong Lingyun (董凌云). Magnetic treatment water anti-scale and the influence in the anti-scaling induction period/9th National Chemical Engineering Science and Technology[C]. Qingdao, China, 1998: 216-220
- [21] Xie Qifen (谢绮芬). The anti-scale mechanism and design of magnetic water device [J]. *Water Treatment Technology* (水处理技术), 1985, **11** (2): 49-52
- [22] Donsldson J D, Grimes S. Lifting the scales from our pipes [J]. *New Scientist*, 1988, **117** (18): 43-46
- [23] Han Yong (韩勇), Zhao Yongping (赵永平), Chai Xin (柴鑫). Analytical modeling of induced current for DC pulse water processor system and optimizing of excitation coil [J]. *Electric Machines and Control* (电机与控制学报), 2011, **9** (15): 31-38
- [24] Yan Zhaowen (阎照文). ANSYS10.0 Electromagnetic Analysis Technology and Engineering Example Explanation (ANSYS10.0 电磁分析及实例详解) [M]. Beijing: China Water Power Press, 2006
- [25] Yang Shanrang (杨善让), Xu Zhiming (徐志明), Sun Lingfang (孙灵芳). Heat Exchanger Fouling and Countermeasures (换热设备污垢与对策) [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2004: 1-5
- [26] HG/T 2160—1991: Cooling water dynamic simulation test method[S]. Beijing: Chemical Industry Press, 1996