

文章编号:1000-582X(2012)01-045-07

工业循环水高频电磁场阻垢机理和试验分析

何 为,王 博

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044)

摘 要:在工业循环冷却水系统中,污垢的存在给换热设备的设计和运行造成了巨大的经济损失,并且传统的阻垢方法存在二次环境污染、成本高等缺点。而电磁场阻垢技术具有使用方便、无污染、成本低等其他方法不可比拟的优点。通过分析总结,为了适用于不同的水质,利用 DDS 技术和功率放大技术,设计了一套高频电磁阻垢装置,输出为 0~1 MHz 范围内连续可调的单一频率和扫频的方波信号。并在实验室搭建了动态循环水管道系统以便模拟工业循环水系统。研究表明:外加高频电磁场作用后,CaCO₃ 的结晶速度变小。通过扫描电镜观察,处理后的 CaCO₃ 晶体结构一部分由原来的方解石变成了文石。此外,阻垢效果还与输出频率和 Ca²⁺ 浓度有关,输出频率并不是越高越好,而 Ca²⁺ 浓度不宜超过 5 mmol/L。

关键词:电磁场;阻垢;碳酸钙;电磁阻垢;DDS

中图分类号:TM621.7

文献标志码:A

Mechanism and experimental analysis on high-frequency electromagnetic anti-fouling for industrial circulating water

HE Wei, WANG Bo

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: In industrial cycling cooling water system, the dirt of heat exchanger causes enormous economic losses, and the traditional anti-scaling method has disadvantages, such as secondary pollution, poor results and high cost, etc. While the anti-scaling of electromagnetic field is convenient, pollution-free and low cost. These are advantages that other methods don't have. A high-frequency electromagnetic device with DDS and amplifier technology for different water is designed, and its output is single frequency and sweep of the square wave signal within the scope of 0~1 MHz. A dynamic circulating water system is set up in laboratory to simulate industrial water cycling system. The research results show that external high-frequency electromagnetic field slows down the crystallization rate. Part of original calcite comes into aragonite. In addition, the effect of anti-scaling is effected by the concentration and output frequency, while the higher output frequency doesn't always obtain better result, and the concentration of calcium should not be more than 5 mmol/L.

Key words: electromagnetic fields; anti-fouling; calcium carbonate; electromagnetic scale; DDS

收稿日期:2011-07-10

基金项目:重庆市科技攻关计划资助项目(2008AC7085)

作者简介:何为(1957-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事电磁场理论在生物医学中的应用研究等,
(E-mail)hewei@cqu.edu.cn。

工业冷却水系统^[1]在运行过程中常常会遇到一些问题,例如:结垢、腐蚀、微生物等。其中冷却水系统中的结垢问题主要是水中的碳酸氢钙 $[\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2]$ 受热或曝气后转变成碳酸钙 (CaCO_3) 沉淀而引起的;碳钢在冷却水中的腐蚀则是冷却水中的溶解氧与碳钢上的铁原子之间的电化学相互作用而引起的;冷却水中的微生物则主要是冷却水中的条件特别有利于藻类、真菌和细菌生长繁殖的结果。结垢、腐蚀和微生物生长会造成冷却水系统中金属设备的破坏,冷却效率的降低,水质的污染等相关问题^[2-3]。

到目前为止,国内外为了减少甚至消除污垢对正常生产生活的影 响,许多研究学者不断探索阻垢的新方法。在应对这些污垢的不断实践中,已开发了多种抑垢方法,例如:以投放杀生剂、缓蚀剂、阻垢剂为主的经典化学法,采用声、光、电、磁技术为主的环境友好的物理法,以及采用射线、酶、噬菌体等手段的新方法^[4]。利用化学方法对水垢和微生物进行处理,起到了显著的效果,然而该方法存在对环境污染、成本高、腐蚀管道和设备等缺点和不足。因此,随着环境保护意识的深入,人们开始关注比较绿色环保、经济实用的物理方法。其中,高频电磁场阻垢技术以其低能耗、安全性高、效率高、成本低等优点受到众多学者的青睐^[5-6]。

笔者解决了以前高频电磁场单一频率的缺陷,输出的频率可以在一定范围内连续地可调,可以产生单一频率和扫频方波信号,以满足不同水质的要求。研究表明,该技术有效阻止水垢的生成以及除去已生成的硬垢。

1 电磁模型和阻垢装置的设计

1.1 高频电磁水处理装置的电磁模型

高频电磁水处理是通过向水中施加高频电磁场来改变水溶液各种理化参数的方法。一般来说,处理腔结构和形状的不同将会导致处理腔内部电磁场分布的不同,从而会有不同的处理效果。因此首先对处理腔内部电磁场的分布以及大小做简单的理论分析。由电磁场理论可知,处理腔内部电磁场的场量应满足麦克斯韦方程组:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu \mathbf{H}, \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + j\omega\epsilon \mathbf{E}. \quad (2)$$

假设水处理装置的处理腔结构是由两根同轴的圆形导体^[7]组成,这是一个双导体导波系统,如图 1 所示(其中:内导体外半径为 a ,外导体内半径为 b)。若内外导体是理想导体,其间填充介质为 μ 和 ϵ 的无耗介质,在这种处理装置中,电场、磁场所形成的

电磁波将沿 z 方向传播,采用柱坐标系分析,并忽略边界效应。

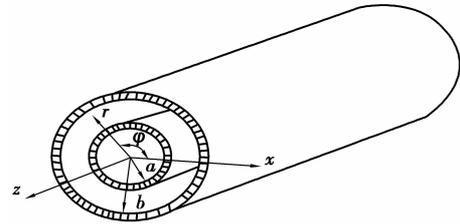


图 1 同轴圆筒状结构示意图

如果在上图所示同轴导体的处理装置中,可以传播一种无色散 TEM 波,并考虑到 $E_z = 0, H_z = 0$, 电场和磁场都是在横截面内,又因为磁力线是闭合曲线,所以电场只能有 E_r 分量,磁场只能有 H_ϕ 分量。考虑到 $\gamma = j\beta = j\omega\sqrt{\mu\epsilon}$, 于是式(1)到式(2)变为:

$$\beta E_r = \omega\mu H_\phi, \quad (3)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial E_r}{\partial \phi} = 0, \quad (4)$$

$$\beta H_\phi = \omega\epsilon E_r, \quad (5)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial (rH_\phi)}{\partial r} = 0. \quad (6)$$

将上述方程组联立求解,并考虑到沿 z 方向传输因子为 $e^{j(\omega t - \beta z)}$, 同时代入边界条件 $(U_a - U_b)_{\max} = U$, 最后可得同轴导体的电磁场分布:

$$E_r = \frac{U_0}{r \ln \frac{b}{a}} e^{j(\omega t - \beta z)}, \quad (7)$$

$$H_\phi = \frac{U_0}{r \ln \frac{b}{a}} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} e^{j(\omega t - \beta z)}. \quad (8)$$

可见,在横截面内, E_r, H_ϕ 只与 r 有关,与 ϕ 无关,即电磁场对 r 成反比,对 ϕ 无变化(均匀分布)。由式(7)和式(8)所述场分量,不难做出同轴导体中 TEM 波的场结构图,用横截面和纵剖面表示于图 2 中。

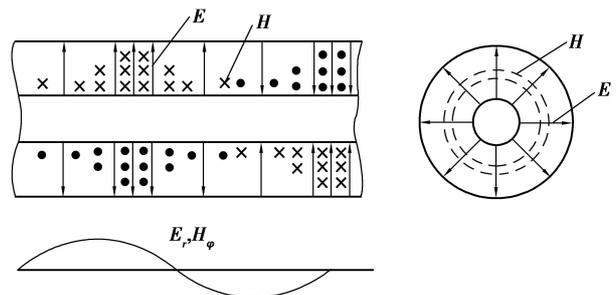


图 2 同轴导体中电磁场分布图

从图中可以看出,同轴线中 TEM 波的电场呈辐射状圆对称分布,磁场为围绕内导体的同心圆簇,电场、磁场沿 z 方向余弦变化。当时间 t 改变时,整个图形沿 z 移动。

1.2 频谱分析

由于电磁场的大小与频率有关,下面将对方波信号进行频谱分析^[8]。如图 3 所示的梯形脉冲,每个脉冲幅度 A ,脉冲上升时间为 τ_r ,脉冲下降时间为 τ_f ,以及脉冲宽度 τ (波形幅度值将为一半时的两个点之间的宽度)来描述^[9]。

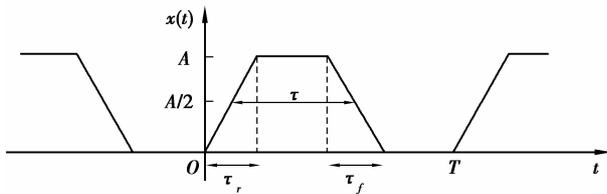


图 3 代表数据信号断点梯形周期脉冲串

其实对于波形的高频频谱分量有影响的关键参数是脉冲的上升和下降时间。该波形用复指数形式的傅里叶级数集表示为:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{jn\omega_0 t} \quad (9)$$

如果上升和下降时间是相等的, $\tau_r = \tau_f$, 这样展开式系数的表达式可以用两项 $\frac{\sin x}{x}$ 的乘积来表达,通过代入 $f = \frac{n}{T}$, 将离散谱用连续的包络来代替,得:

$$\text{包络} = 2A \frac{\tau}{T} \left| \frac{\sin(\pi\tau f)}{\pi\tau f} \right| \left| \frac{\sin(\pi\tau_r f)}{\pi\tau_r f} \right| \quad (10)$$

为了得到这个频谱的边界,对上式对数运算得:

$$20\lg(\text{包络}) = 20\lg\left(2A \frac{\tau}{T}\right) + 20\lg\left(\frac{\sin(\pi\tau f)}{\pi\tau f}\right) + 20\lg\left(\frac{\sin(\pi\tau_r f)}{\pi\tau_r f}\right) \quad (11)$$

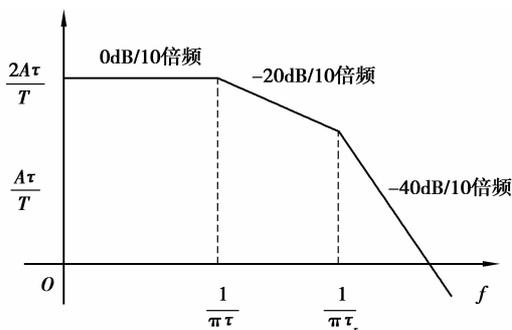
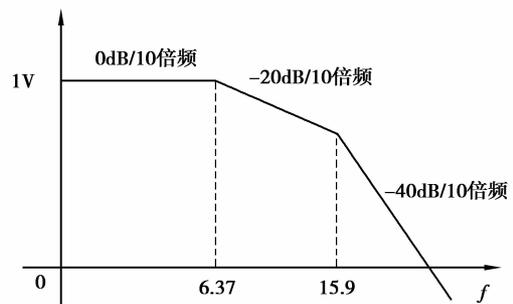


图 4 梯形脉冲串单边幅度频谱的边界

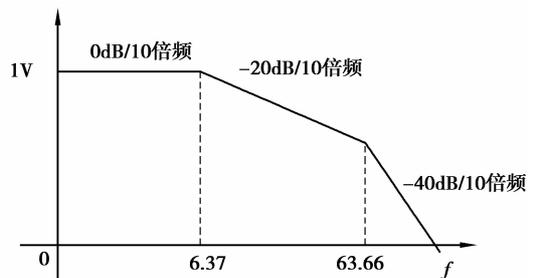
从这些频谱范围可以清晰地看到梯形脉冲串的

高频谱分量主要取决于脉冲的上升/下降时间。上升/下降时间较短的脉冲比上升/下降时间较长的脉冲具有更宽的高频谱分量。因此,为了增大电磁场对水的作用,需要减小上升/下降时间来增大高频分量的范围。

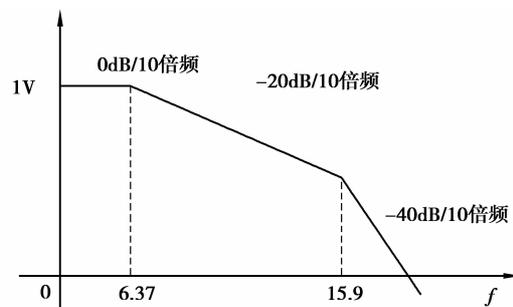
为了举例说明脉冲上升/下降时间和波形谱分量之间的重要关系,在这里将考虑以下的具体例子,该信号是 10 MHz 的数字信号,幅度为 1 V,占空比为 50%,具有两种上升/下降时间。图 5(a)给出了上升/下降时间为 20 ns 的脉冲谱边界,图 5(b)给出了同样信号的谱边界,但上升/下降时间为 5 ns。注意: -40 dB/10 倍频斜率的边界从 15.9 MHz 移到 63.66 MHz。因此,对于 20 ns 的脉冲,15.9 MHz 以上的高频谱分量将不再以 -40 dB/10 倍频的斜率下降,而是仅仅以 -20 dB/10 倍频的斜率下降直到 63.66 MHz,这将导致 15.9 MHz 以上的谱分量电平明显增加。



(a) 10 MHz, $\tau_r = 20$ ns



(b) 10 MHz, $\tau_r = 5$ ns



(c) 10 MHz, $\tau_r = 20$ ns

图 5 上升/下降时间和重复率对 1 V, 50% 占空比梯形脉冲串频谱的影响

脉冲串重复率的变化可以改变离散谐波之间的间距。谱边界的直流或起始电平是 $20\lg\left(2A\frac{\tau}{T}\right) = 20\lg(2AD)$, 其中 $D = \frac{\tau}{T}$ 为占空比。

通常当波的频率降低(周期增大)时,脉冲宽度相应地增加以保持同样的占空比 50%,因此降低脉冲串的频率(增加周期 T)通常并不影响起始电平。然而,如果波的频率降低而占空比保持不变,那么脉冲宽度将增加。结果是谱边界的第一断点 $\frac{1}{\pi\tau}$ 向低频处移动,以至于在 0 dB/10 倍频区域的谱分量现在变成了以 -20 dB/10 倍频下降的曲线。图 5(c)给出了脉冲串的重复率从 10 MHz 减少到 1 MHz(上升/下降时间为 20 ns 且占空比为 50%)所带来的影响。

图 6 举例说明了脉冲串占空比 D 对谱边界的影响。谱边界上的第一个断点 $\frac{1}{\pi\tau}$, 可以用占空比 $D = \frac{\tau}{T}$ 和波形基频 $f_0 = \frac{1}{T}$ 来表示: $\frac{1}{\pi\tau} = \frac{f_0}{\pi D}$, 由于 0dB/10 倍频线段的起始电平是 $2AD$, 因此,如果减少脉冲宽度(减少占空比),将降低起始电平并且将第一个断点向高频移动,如图 6 所示,其中 $D_1 > D_2$ 。很容易发现小的占空比 D_2 , 第一个断点将位于 -20 dB/10 倍频的线段上,从而降低了波形的低频谱分量,但不影响其高频分量。

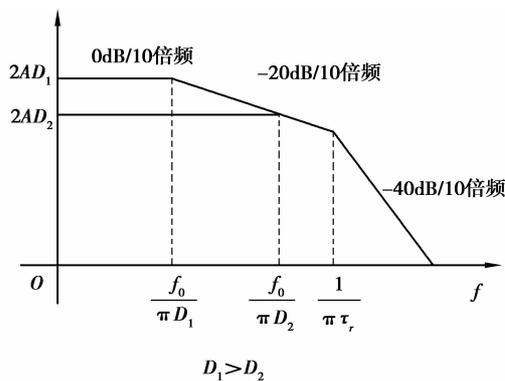


图 6 占空比对梯形脉冲串频谱边界的影响

综上所述,为了提高电磁场的各分量,需要增加输入频率,根据傅里叶变换的频谱图可知,必须增加输入信号的高次谐波以及增大频带,因此,对输入方波的信号就提出了要求:重复频率大、上升/下降时间要小,以及占空比要大。

1.3 高频电磁场阻隔装置

高频信号发生电路是高频电磁处理器的核心部

分,决定系统最终输出的频率和信号波形^[10]。根据设计需要,该高频信号发生器应该满足 0~1MHz 范围内连续可调,产生正弦、方波、三角波等波形,而且系统对波形失真度的要求也不高。

此高频信号发生电路是由 16 位的单片机 DSPIC30f6010A、低通滤波器(LPF)、DDS 芯片 AD9850、4×4 键盘、液晶显示屏 LCD 和有源晶振、宽带放大器等模块组成^[11]。其中,稳压电源为单片机提供稳定的 +5 V 直流电压;低通滤波器是信号源中的关键器件,负责滤除输出信号中的高频、杂散信号和谐波信号;外部参考时钟源选用 40 MHz 有源晶振,单片机与 AD9850 采用并行通信方式连接。图 7 为产生高频方波的系统框图。

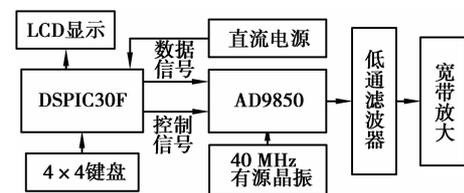


图 7 系统框图

在本系统中,通过键盘的数字键和功能键实现高频发生器的扫频、移频和选频 3 种形式的信号。通过 AD9850 自带的比较器,就可以得到方波信号。下图为 DDS 输出的正弦信号经过比较器、低通滤波器和带宽放大器后的方波波形。

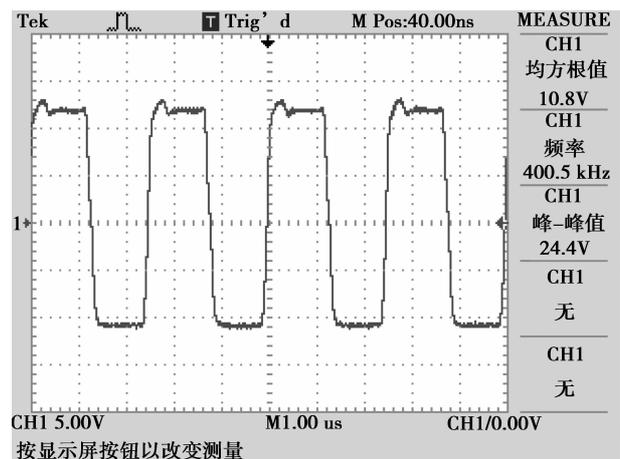


图 8 输出波形图

经过 FFT 变换之后得到输出为 400 kHz, 1 V 的频谱图,如图 9 所示,很显然,此频谱包括很大的高频谐波分量,可以达到 10MHz 的高频分量,从而大大提高了电磁场的强度。

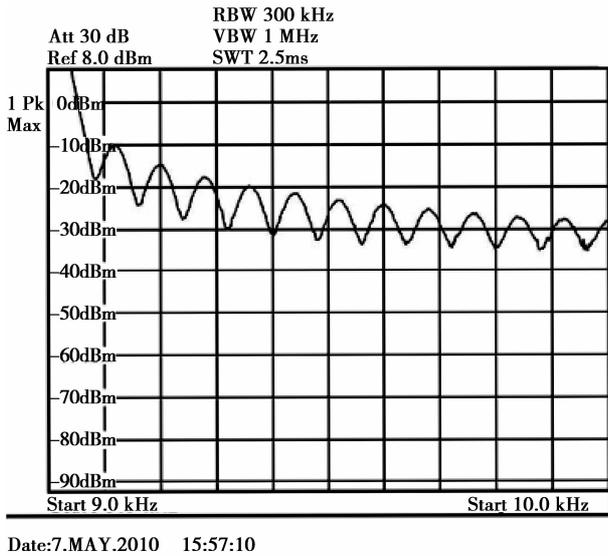


图 9 频率 400 kHz、占空比为 50%的方波信号

2 实验设计

为了更深入地研究电磁场的阻垢机理和阻垢效果,笔者在实验室搭建了循环管道水系统,试验装置如图 10 所示。

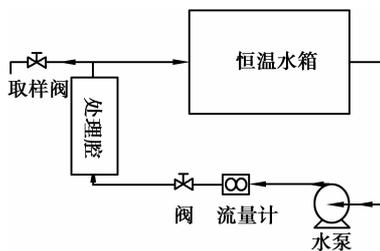


图 10 小型循环水系统

试验时,在处理腔的两个电极上,连接自制的高频信号发生器的输出端,并且水流由下向上通过处理腔,使得溶液充分受到电磁场的作用。除垢试验时,把已经结垢的金属片悬挂于恒温水箱内。在取样阀处取出一定的水样,利用 EDTA 法滴定,测得溶液的 Ca^{2+} 浓度。

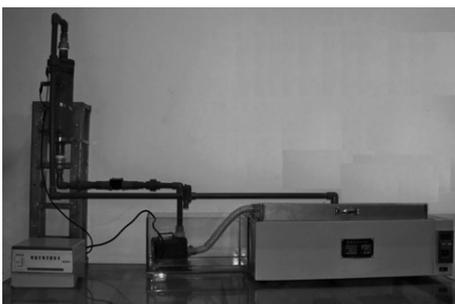


图 11 高频低压脉冲阻垢除垢子系统

在设计高频处理腔时,参考了目前常用的高压静电水处理装置的处理腔结构。在本设计中,处理腔的腔体长 39 cm,半径为 6 cm,其阳极为置于水管正中间的一根金属棒(直径 8 mm,长度约 25 cm),外壳作为阴极,这样可以在阴阳两极之间形成电流的回路,流经处理腔的液体作为动态负载,由于有微弱的电流流过,在一定程度上可以阻碍细菌和藻类的生长。当冷却水流经过带有高频电磁场的处理腔时吸收感应电磁能量,从而提高冷却水的活化性,改变碳酸钙晶体的结构,起到阻垢除垢的作用。

2.1 电导率变化情况

配制 Ca^{2+} 浓度为 3 mmol/L,物质的量浓度比为 1:2 的 CaCl_2 和 NaHCO_3 溶液,将混合溶液均匀搅拌,待混合均匀后置于电磁场阻垢装置内,并直接静止于恒温水浴中,水浴温度都设定为 25 $^{\circ}\text{C}$,稍停几分钟,等待阻垢装置内的温度与水浴温度相同,加上一定频率的方波信号作用;另外不加信号作用,重复上述步骤再做一次空白试验,每隔 30 min 测一次溶液的电导率值、pH 值以及溶解性固体 TDS 值。为了保证测量更加准确,在每次测量时,待电导率值等参数值稳定后,连续取 3 次并以其平均值作为每次测量的最终数据。

在 Ca^{2+} 浓度为 3 mmol/L 和温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ 的条件下,设置不同的输入频率,每隔 0.5 h 所测的电导率变化曲线如图 12 所示。

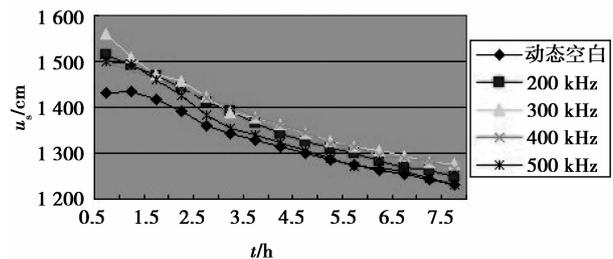


图 12 电导率变化

由图 12 可以看出,随着时间的延长,处理前后溶液的电导率都是呈现下降趋势,但是处理后的溶液,在前一段时间,其电导率下降的速率要比未处理的大,而在后期,其电导率的下降速率则变得很小。由于电导率的变化情况描述了溶液中离子浓度在成核或结晶过程中的变化,揭示了电磁场对水溶液中离子反应速率及结晶影响的一些规律。若电磁场处理后混合溶液的电导率低于未处理混合溶液的电导率,则说明处理后离子的浓度降低,溶液的成核或结

晶速率增大;若电磁场处理后溶液的成核速度高于溶液的结晶速度,则说明溶液中将有大量微晶生成,其稳定性增强,在壁上的结垢量也将大大降低^[12-14]。在本试验中,300 kHz、500 kHz 作用下起初电导率减小得非常迅速,然后逐渐有平稳的趋势,说明电磁场处理的水溶液具有先促进碳酸钙晶核生成,而后却抑制晶核长大及生成的作用,由此可知,高频电磁场能够有效阻止 CaCO_3 的生成。

2.2 pH 值变化情况

试验条件不变,测试了频率分别为 200、300、400、500 kHz 的情况下,来研究溶液的 pH 值随着时间的变化规律。图表 13 为每隔 0.5 h 所测的结果。

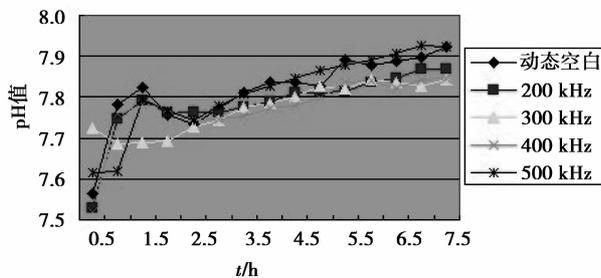


图 13 pH 值变化曲线

由 pH 的变化曲线可知,在不同频率的电磁场作用下,水溶液的 pH 值呈现增加的趋势,根据氢键断裂理论,由于高频电磁水处理向水溶液中施加了电磁能,从而破坏水原来的结构,使较大的缔合水分子集团变成较小的缔合水分子集团,甚至是单个的水分子,虽然增加了水的活性,对 CO_2 有一些吸收作用,但是在循环过程中,大大加快了 CO_2 的挥发程度,使得 pH 值没有静态中那么明显。不过,通过 pH 值变化曲线可以看出,高频电磁场处理过的 pH 值都要比未处理的要低一些,这一点更能说明上面所做的解释。另外,通过观察发现,并不是电磁场所加的频率越高就越好,本试验中,频率为 500 kHz 的电磁处理和未处理的空白试验相差不大,而 300 kHz 和 400 kHz 频率下, pH 值就明显要小得多了,其处理效果反而会更好。

2.3 扫描电镜分析

前面都是从宏观的角度来分析电磁抗垢的机理,为了从微观上观察高频电磁场处理前后 CaCO_3 晶体结构的变化^[15-16],借助于扫描电镜 SEM 得到在不同频率作用下 CaCO_3 晶体的结构图像。

常温 25 °C, Ca^{2+} 浓度为 3 mmol/L 的 CaCO_3 溶液,在不同频率的电磁场处理后的硬垢,利用扫描电镜得到的成像图片,放大倍数都是 500 倍。

图 14 为未处理的空白试验,图 15-17 分别为 400 kHz、200 kHz 和长时间处理后管道上水垢的电镜图片。很显然,未处理的 CaCO_3 晶体结构,排列紧密,为规则多面体形状的方解石,经过处理后的 CaCO_3 晶体结构疏松,出现不规则的、絮状的文石结构,同时,处理后的晶体结构变小。由图 17 经过长时间处理后管道上的水垢的电镜图知, CaCO_3 晶体的结构还与电磁场处理时间的长短有关,时间越久,其晶体结构就变化越明显,晶体显得愈小,愈不规则,成为松软的文石,很容易随水流冲走。

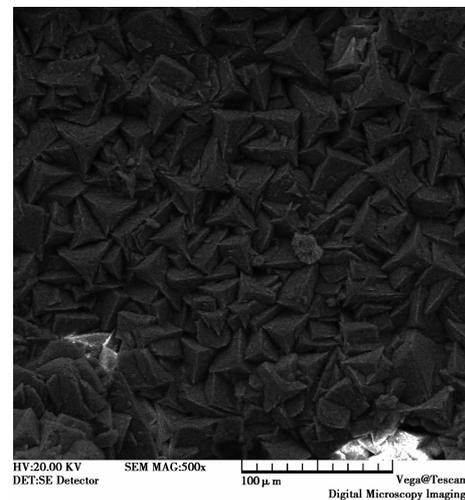


图 14 空白试验

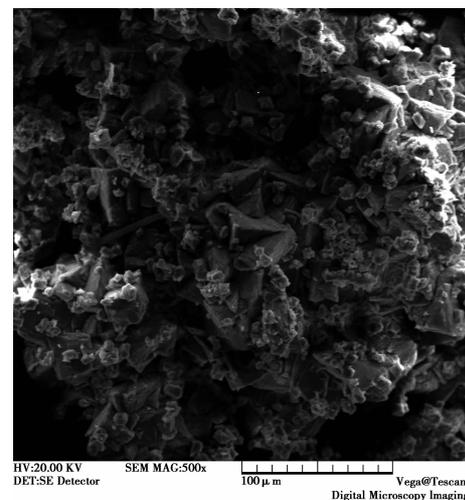


图 15 200 kHz 电磁场处理后管道 SEM

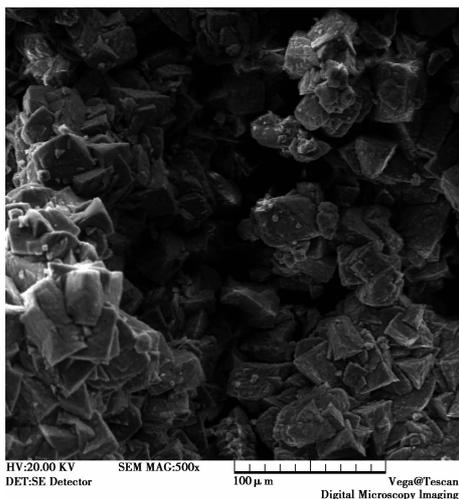


图 16 400 kHz 电磁场处理后管道 SEM

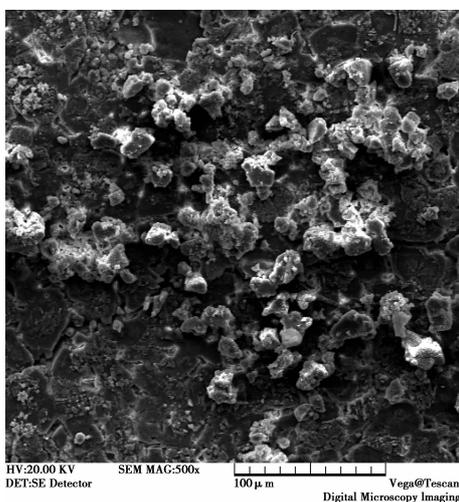


图 17 管道经过长时间处理后的电镜分析

2.4 利用人工模拟硬水进行的动态除垢试验研究

分别配置物质的量浓度比为 1:2 的 CaCl_2 和 NaHCO_3 的溶液两份。将相同质量的铜块分别放入上述混合溶液中,保持恒温水浴的温度 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 。其中一份外加 300 kHz 的高频电磁场,另一份做空白试验。试验结束后,将两溶液中铜块上的垢样取下来烘干称重,从而得出阻垢试验的效果。

图 18 及图 19 分别为未处理和处理后铜块上的垢样。很显然,未经过高频电磁场处理的垢样坚硬,烘干称其质量为 1.7 g,并且在储水容器中可以看到大量的水垢沉积在容器的底部。而经过高频处理的垢样变得非常松散,烘干称其质量为 0.5 g,与前者相比减少了许多,而且储水容器底部析出的垢量明显少于未处理的情况,经过计算可得阻垢率为 71%,显然高频电磁场起到了明显的阻垢作用。



图 18 未经处理,循环 48 h 后的垢样

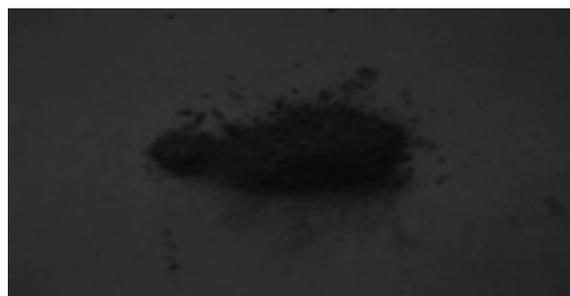


图 19 经过处理,48 h 后的垢样

3 结 语

笔者采用人工模拟硬垢、挂片试验、测试电导率、pH 值、SEM 等方法进行了动态试验研究。首先详细介绍了模拟循环水系统的试验装置,以及研究动态试验分析阻垢机理的方法。然后分别对溶液相关理化参数进行了深入的探讨。

试验表明:电磁场可使混合溶液的电导率显著降低,溶液中成核速率显著增大,而晶体生长速率则比成核速率小。因此,高频电磁场能够有效阻止 CaCO_3 晶体的析出,起到防垢阻垢的作用;为了能够深入研究高频电磁场处理前后 CaCO_3 晶体结构的变化情况,借助扫描电镜成像分析。通过对空白试验以及不同频率作用下的成像分析发现,处理前后 CaCO_3 晶体结构变化显著,晶体由规则稳定的多面体方解石,变成了絮状无规则的文石结构,并且晶体结构变得更小。另外, CaCO_3 晶体结构还与电磁场处理时间的长短有关,经过长时间的处理以后,由管道内壁上水垢的 SEM 图像可以看出, CaCO_3 晶体变得非常小,分布比较松散,很容易被水流带走。

参考文献:

- [1] 周本省. 工业冷却水处理的物理方法及工程应用[M]. 北京:化学工业出版社,2008.
- [2] SOMERSCALES E F C. Fouling of heat transfer surfaces: a historical review [J]. Heat Transfer Engineering, 1990, 11(1):19-36.

- and Machine Intelligence, 1998, 20(1):23-38.
- [10] SUNG K K, POGGIO T. Example-based learning for view-based human face detection [J]. IEEE Transactions Pattern analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(1):39-51.
- [11] SOCHMAN J, MATAS J. AdaBoost with totally corrective updates for fast face detection [C] // Proceedings of the Sixth IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition, May 17-19, 2004, Seoul, Korea. [S.l.]: IEEE Press, 2004: 445-450.
- [12] JONES M, VIOLA P. Fast multi-view face detection. Technical report Mitsubishi Electric Research Laboratories[EB/OL]. (2003-08-01). <http://faculty.ucmerced.edu/mhyang/.../face-detection-chapter.pdf>.
- [13] VIOLA P, JONES M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features [J]. Computer Vision and Pattern Recognition, 2001(1): 8-14.
- [14] SCHNEIDERMAN H. A statistical approach to 3D object detection applied to faces and cars [D]. Pittsburgh: Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 2000.
- [15] CHEN X, YANG Q, LIAO H, et. al. Real-time face pose estimation in video sequence [C] // Proceedings of the 2010 2nd International Workshop on Education Technology and Computer Science, March 6-7, 2010, Wuhan, China. [S.l.]: IEEE Press, 2010, 2: 24-27.
- [16] GONG X, WANG G, XIONG L. Single 2D image-based 3D Face reconstruction and its application in pose estimation [J]. Fundamenta Informaticae, 2009, 94(2):179-195.
- [17] STEPHEN M, MICHAEL J, SMITH B. SUSAN-a new approach to low level image processing [J]. International Journal of Computer Version, 1997, 23(1):45-78.

(编辑 王维朗)

~~~~~

(上接第 51 页)

- [3] 惠希增. 变频电磁场处理油田水防垢技术研究[D]. 北京:中国石油大学,2007.
- [4] BAKER J S, JUDD S J. Magnetic amelioration of scale formation[J]. Water Research, 1996,3(2):247-260.
- [5] 曲久辉,刘会娟. 水处理电化学原理与技术[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [6] 冯慈璋,马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京:高等教育出版社,1999.
- [7] 保罗. 电磁兼容导论[M]. 温映红,译. 北京:机械工业出版社,2006.
- [8] OPPENHEIM A V, SCHAFER R W. 数字信号处理[M]. 董士嘉,译. 北京:科学出版社,1981.
- [9] 王博,何为. 高频电子阻垢仪的研制与实验研究[J]. 化工自动化及仪表,2009,36(6):49-52.  
WANG BO, HE WEI. High frequency electronic scale apparatus and experimental study [J]. Chemical Engineering, 2009, 36 (6):49-52.
- [10] 杨萍,兀旦晖,杨良煜. DDS 技术在正弦信号发生器中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (11): 1738-1740.  
YANG PING, WU DAN-HUI, YANG LIANG-YU. DDS sine wave generator in the application [J]. Computer Measurement and Control, 2008, 16 (11): 1738-1740.
- [11] KOBE S, MCGUINNESS P J. The influence of the magnetic field on the crystallisation form of calcium carbonate and the testing of a magnetic water-treatment device [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2001, 236(1-2):71-76.
- [12] KOBE S, DRAZIC G, CEFALAS A C, et al. Nucleation and crystallization of CaCO<sub>3</sub> in applied magnetic fields[J]. Crystal Engineering, 2002, 5 (3-4): 243-253.
- [13] COEY J M D, CASS S. Magnetic water treatment[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2000, 209:71-74.
- [14] ALIMI F. Influence of magnetic field on calcium carbonate precipitation in the presence of foreign ions[J]. Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2009, 45(1): 56-62.
- [15] XING. X K, Research on the electromagnetic anti-fouling technology for heat transfer enhancement[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28 (8-9): 889-894.

(编辑 王维朗)