

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.09.004

# 高频电磁脉冲循环冷却水污垢处理与热阻监测系统

杨子康<sup>1</sup>, 熊 兰<sup>1</sup>, 付克勤<sup>2</sup>, 苗雪飞<sup>3</sup>

(1. 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;

2. 国网重庆市电力公司璧山供电分公司, 重庆 402760;

3. 国网浙江省桐乡市供电公司, 浙江 桐乡 314500)

**摘要:** 换热设备中循环冷却水系统在高温下容易产生污垢, 不但会降低换热设备的换热效率, 还会影响设备安全。通过模拟实际工业循环冷却水结构, 搭建了微型循环冷却水实验平台, 采用高频电磁脉冲对人工配置的碳酸钙循环冷却水溶液进行阻垢处理, 观察空白实验组和不同频率的高频电磁脉冲处理组中水垢形成情况, 并利用自行设计的热阻监测系统对管道热阻进行监测。实验结果表明: 高频电磁脉冲对循环冷却水起到了很好的阻垢作用, 主要表现为循环冷却水的电导率下降趋势和 pH 值上升趋势均变缓。根据模拟换热器的热阻监测结果显示, 高频电磁脉冲处理组的热阻要小于空白实验组的热阻, 并进一步证实了高频电磁脉冲的阻垢作用。

**关键词:** 高频电磁脉冲; 循环冷却水; 热阻; 电导率; 污垢

中图分类号: TQ 085

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2014)09-026-08

## Dirt treatment by high-frequency electromagnetic pulse for circulating cooling water and thermal resistance monitoring system

YANG Zikang<sup>1</sup>, XIONG Lan<sup>1</sup>, FU Keqin<sup>2</sup>, MIAO Xuefei<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Bishan Power Supply Branch of Chongqing Electric Power Corporation of State Grid Corporation, Chongqing 402760, China; 3. Tongxiang Power Supply Branch of Zhejiang Electric Power Corporation of State Grid Corporation, Tongxiang, Zhejiang 314500, China)

**Abstract:** The circulating cooling water systems of heat transfer equipment generates dirt easily in high temperatures. Dirt will not only reduce thermal efficiency of heat exchange equipment, but also affect the equipment safety. This paper sets up a platform of miniature water cycle based on the real structure of industrial circulating water, uses high-frequency pulse treatment method to act on calcium carbonate in circulating cooling water of manual configuration, observes the impaction of blank group and different frequencies of high frequency electromagnetic pulse groups on fouling in cooling water, and monitors the thermal resistance of cooling water by a designed thermal resistance monitoring system. The results show that the high-frequency electromagnetic pulse treatment plays a very good anti-scaling effect on circulating cooling water, because both the conductivity decline trend and pH rising trend of water becomes slow. According to the thermal resistance data of analog exchanger, thermal resistances of high frequency processing groups are less than that of blank group. Moreover, it further

收稿日期: 2014-08-15

基金项目: 中央高校基本科研业务费资助项目(CDJZR12110027)

作者简介: 杨子康(1985-), 工程师, 主要从事脉冲功率技术等研究, (E-mail)cquyzk@cqu.edu.cn.

confirms the important role of anti-scaling for high-frequency electromagnetic pulse.

**Key words:** high-frequency electromagnetic pulse; circulating cooling water; heat resistance; electric conductivity; dirt

换热设备是工业生产中最常见的热工设备之一,它既是保证工艺流程和条件所必需的设备,也是实现热回收和开发利用工业二次能源的主要设备。换热设备中的循环冷却水系统在高温下容易产生污垢,Steinhagen 等人<sup>[1]</sup>的调查表明,90%以上的换热设备都存在不同程度的污垢问题。

污垢引起的经济损失也是不容忽视的,Thackery 等人<sup>[2]</sup>对英国工业生产中因污垢造成的损耗进行了估算,每年为3至5亿英镑。2002年,徐志明等人<sup>[3]</sup>参照国际通用算法对中国火电企业的锅炉和凝汽机的污垢损耗进行估算,总污垢损耗的年费用达150亿元。因此,污垢造成的经济损失是巨大的,加强对污垢的监测与治理具有较高的经济价值和实用价值。目前,水中污垢处理法已经得到了广泛的研究和发展,主要包括投加阻垢剂或酸类药品的化学法<sup>[4-6]</sup>和向水体施加声、光、电、磁等的物理法<sup>[7-8]</sup>。其中,高频电磁脉冲水处理法作为一种具有操作简单方便、维护费用低廉、绿色环保等优点的物理水处理法,已得到了国内外专家的广泛关注和研究<sup>[9-11]</sup>。相对于水处理技术的发展,污垢监测技术的发展相对落后,造成用户无法高效阻垢,甚至制约着整个水处理行业的进一步发展。因此,有必要研制一种高效、直观、精确的污垢监测系统。

笔者按照 John Wiley<sup>[12]</sup>所构建的热阻模型设计了污垢热阻监测系统,对循环冷却水的污垢进行实时监测,并采用本课题组设计的脉冲频率和脉冲幅值可调的高频电磁脉冲发生装置开展水处理实验<sup>[13-15]</sup>。通过对循环冷却水的电导率和 pH 值进行测试和分析,并结合模拟换热器中热阻监测的结果,评价电磁脉冲阻垢技术的工业应用前景。

## 1 微型循环水实验平台

为了更好地观察高频电磁脉冲的阻垢实验效果,使阻垢实验更加具有现实性和针对性,本课题组设计了模拟实际工业循环冷却水的微型实验平台,如图1所示。该系统包含了制冷设备、制热设备、换热设备和动力设备。循环系统下半部分模拟工业热水的产生,包括容量为30 L的恒温热水箱、不锈钢水管、高温流量计、热水泵、阀门和法兰等元件。循环系统上半部分是模拟工业循环冷却水,包括容量为10 L的冷却水箱、PVC水管、流量计、不锈钢水泵、阀门和法兰等元件。冷水和热水通过套管式换热器进行热交换,恒温热水箱对经换热器冷却后的热水进行加热至一定的温度,冷却水箱则对经换热器加热后的冷水进行冷却至一定温度。为了保证流量的持续可调,设计了从水泵出来直接回水箱的旁路,可以通过调节旁路的阀门实现对流过换热器的水流量调节。

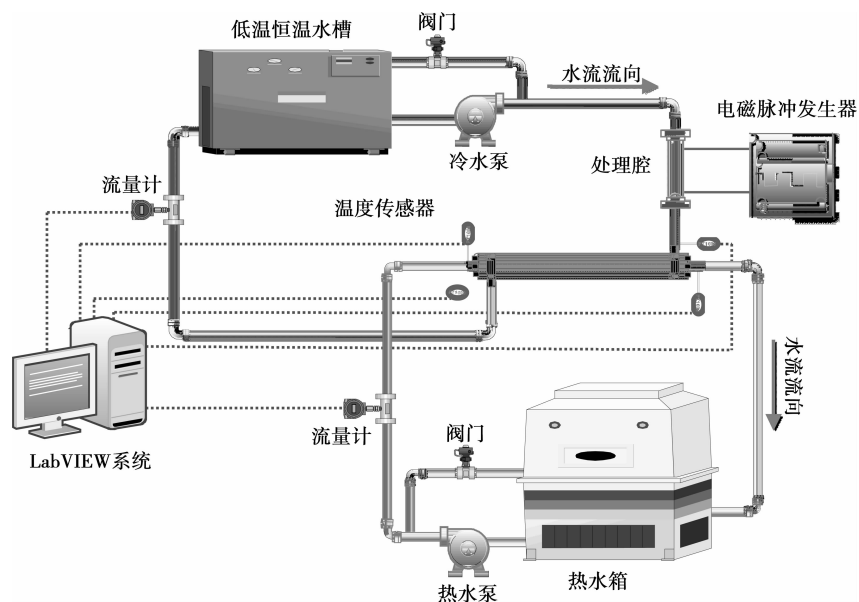


图1 微型循环冷却水实验平台

## 2 污垢热阻监测系统

### 2.1 热阻数学模型

热阻的计算公式根据 John Wiley 的定义为

$$R_f = \frac{1}{U_f} - \frac{1}{U_i}, \quad (1)$$

式中:  $U$  为换热系数, 下标  $f$  和  $i$  分别表示结垢状态和初始状态。

循环系统中的冷水和热水是逆向流入换热器的, 冷热水的对流情况如图 2 所示。

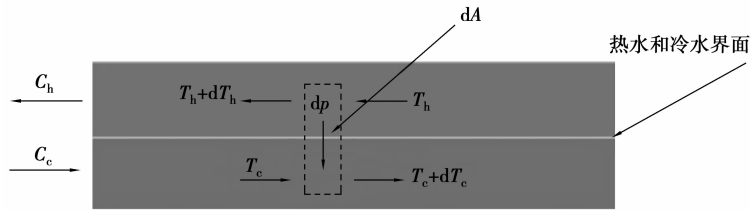


图 2 冷水和热水逆向流过换热器管道示意图

冷热水逆向对流的热量分布如图 3 所示。

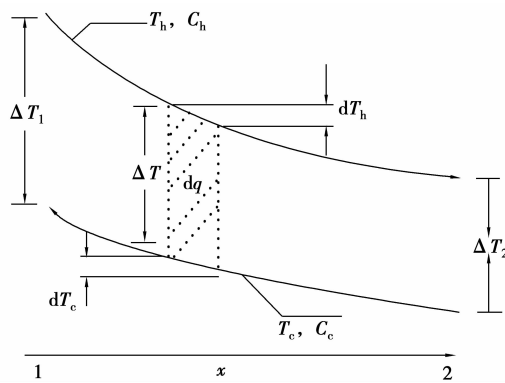


图 3 冷水和热水逆向对流热量分布图

由图 3 可知存在如下热平衡等式:

$$dq = -m_h C_{p,h} dT_h = -C_h dT_h, \quad (2)$$

$$dq = -m_c C_{p,c} dT_c = -C_c dT_c, \quad (3)$$

式中:  $q$  为换热流量;  $C_c$  和  $C_h$  分别为冷水和热水的质量比热容;  $m$  为液体流量的质量。

换热管表面的热流量有如下等式:

$$dq = U \Delta T dA, \quad (4)$$

式中:  $\Delta T = T_h - T_c$  为换热管表面冷热水温差。

通过对  $\Delta T$  两端取微分来求取完整的温差:

$$d(\Delta T) = dT_h - dT_c. \quad (5)$$

将式(2)和式(3)代入式(5)得:

$$d(\Delta T) = -dq \left( \frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c} \right). \quad (6)$$

将式(4)代入到式(6)并两端进行积分得:

$$\int_1^2 \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -U \left( \frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c} \right) \int_1^2 dA. \quad (7)$$

并进一步求得:

$$\ln \left( \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right) = -UA \left( \frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c} \right). \quad (8)$$

对式(2)和式(3)进行积分, 并代入初始值可得:

$$q = \dot{m}_h C_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}), \quad (9)$$

$$q = \dot{m}_c C_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i}), \quad (10)$$

式中:  $T_{c,i}$ ,  $T_{c,o}$  分别为冷水管入口和出口温度值;  $T_{h,i}$ ,  $T_{h,o}$  分别为热水管入口和出口温度值。

将式(9)和式(10)中求得的冷热水的比热容代入式(8),可得:

$$\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right) = -UA \left( \frac{T_{h,i} - T_{h,o}}{q} - \frac{T_{c,i} - T_{c,o}}{q} \right) = \frac{-UA}{q} [(T_{h,i} - T_{h,o}) - (T_{c,i} - T_{c,o})]. \quad (11)$$

根据换热器流入流出的温度关系可以得出:

$$\begin{cases} \Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,o} \\ \Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,i} \end{cases}. \quad (12)$$

代入式(11)得:

$$q = UA \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)}. \quad (13)$$

由式(13)分别求得初始状态下的换热系数  $U_i$  和结垢状态下的换热系数  $U_f$ , 即可根据式(1)求得管道的热阻值。

## 2.2 套管式换热器结构

由式(1)可知,热阻测量需要计算出换热系数,而由式(13)可知,换热系数主要由换热管两端温差、水流速度以及换热器的管径及表面积决定。笔者自制了套管式换热器,内管为紫铜管,其外径为 18 mm,内径为 14 mm,总长为 600 mm(套管式换热器的有效长度)。换热器外管采用透明石英管,其外径为 30 mm,内径为 25 mm,如图 4 所示。实验过程中,热水在内管中流动,冷水在外管中流动。根据模拟换热器的参数即可求出换热器的管径和表面积,因此,只需在换热器的冷热水进出口各安装一个温度传感器,并测出水流速度即可得到热阻。

## 2.3 基于 Pt1000 的热阻监测系统

本系统将 4 个高精度的 Pt1000 温度传感器分别安装在模拟换热器冷热水进出口的四端,实时监测冷热水进出口温度,然后将测得的水温和流量计测得的水流速度等数据上传到 LabVIEW 上位机,根据前文推导得到的热阻数学模型进行热阻计算。

温度值将直接影响热阻在线监测的精度,选用高精度、高可靠性的温度传感器是热阻计算的重点。热电偶和铂热电阻是常用的测温元件,它们将温度信号转换成电信号进行分析和处理。笔者设计的监测系统硬件组成如图 5 所示。



图 4 套管式换热器结构示意图

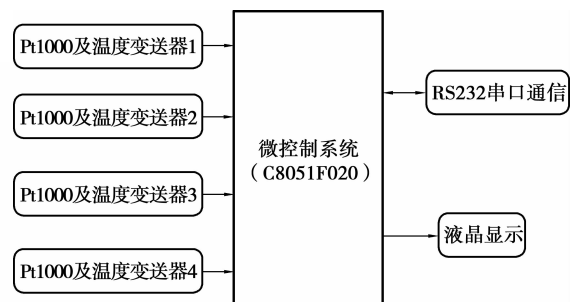


图 5 热阻监测系统结构示意图

本系统选择铂热电阻作为测温元件,它具有测量准确度高、范围大、复现性和稳定性好等优点。由于铂热电阻只能将温度值转换成电阻值,故采用温度变换器将铂热电阻输出的电阻值转换成单片机能够识别的电压信号。然后,通过单片机内部 AD 模块将模拟信号转换成数字信号,并计算得到冷热水进出口的 4 个温度值,将这 4 个温度值通过串口送到由 LabVIEW 组成的上位机系统中进行进一步处理,得到管道实时热阻值和热阻曲线。

## 3 高频电磁脉冲阻垢实验

### 3.1 实验方法

高频电磁脉冲阻垢系统由高频方波脉冲发生器和高频处理腔构成。高频脉冲发生装置产生的高频方波信号施加在处理腔内的电极上,从而在水中产生高频电磁场。笔者研制的高频脉冲发生装置输出的可调双极性方波的电压小于 200 V,频率为 0~1 MHz,功率为 0~200 W。高频处理腔为不锈钢同轴式结构,处理腔作为冷却水管道的一部分接入循环水系统中,具体的结构参数如图 6 所示。

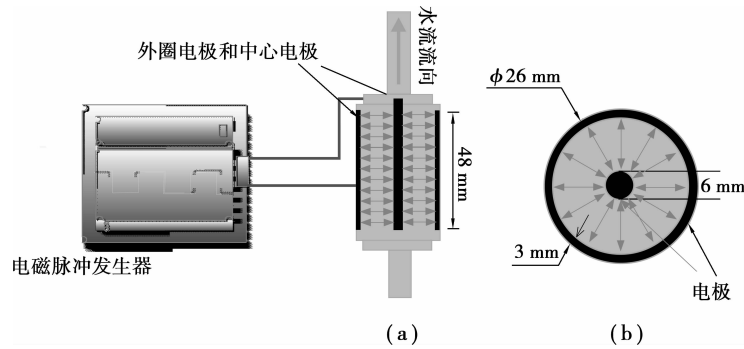


图 6 高频电磁脉冲阻垢处理腔结构图

在高频电磁脉冲阻垢实验中,阻垢效果可以直接用管道热阻的变化趋势来进行评价,但为了更好地理解电磁脉冲阻垢机理,笔者同时引入了对电导率和 pH 值两种水质参量的检测。由于工业循环冷却水中水垢的主要成分为碳酸钙,因此,本实验只针对碳酸钙这一种析晶垢进行研究。实验中采用人工配置的额定浓度的纯碳酸钙溶液作为循环冷却水阻垢实验的作用对象。为了获取大量水垢沉淀和缩短碳酸钙的结垢时间,笔者采用的  $\text{Ca}^{2+}$  初始浓度为  $5\text{mmol/L}$ ,其远高于工业用水的硬度。本系统中热水采用超纯水,其流过模拟换热器内壁不会产生水垢,对管道热阻没有影响。

实验步骤:按照 1:2 物质的量之比称取一定量的氯化钙和碳酸氢钠,在冷却水箱中用去离子水配置  $\text{Ca}^{2+}$  浓度为  $5\text{mmol/L}$  的混合溶液。高频电磁脉冲信号的幅值设置为  $50\text{V}$ ,波形为双极性方波,根据不同频率分为  $100$ 、 $200$ 、 $300$ 、 $400\text{kHz}$  的 4 个处理组,再加上一个空白组,共有 5 组实验,每组实验持续  $12\text{h}$ 。实验过程中热阻监测系统实时监测并记录模拟换热器管道热阻变化,并每隔  $30\text{min}$  测定循环冷却水的电导率和 pH 值进行分析。

### 3.2 实验结果与分析

#### 3.2.1 实测电导率和 pH 值

实验得到的各实验组电导率随时间变化趋势如图 7 所示,从总体上看 4 个高频脉冲处理组的电导率下降趋势都比较接近,且频率为  $100\text{kHz}$  和  $200\text{kHz}$  处理组的电导率下降最慢,但空白组的电导率下降最快。

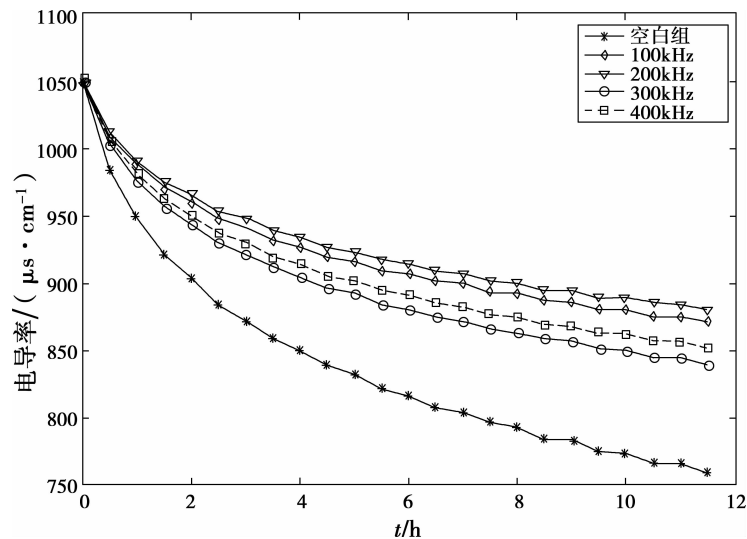


图 7 电导率变化曲线

溶液中离子浓度决定了溶液的电导率,即溶液传导电流的能力。为了避免其他杂质离子的影响,实验中采用去离子水配制碳酸氢钠和氯化钙混合溶液,该溶液中氯离子和钠离子浓度保持不变,则溶液电导率的大小可直接反映溶液中钙离子的浓度。图 7 表明,各个处理组与空白组的电导率都随时间在缓慢下降,但各个处理组的电导率均高于空白组。这说明经过高频电磁脉冲处理后,溶液中钙浓度下降趋势明显减缓,溶液中离子含量较之空白组增多,表现为处理组电导率高于空白组电导率,导致溶液中析出的  $\text{CaCO}_3$  晶体减少,起到阻垢的效果。

实验得到的各实验组 pH 值随时间变化趋势如图 8 所示,高频脉冲处理组与空白组的 pH 值都有所上升,空白组的 pH 值上升趋势最明显,而频率为 100 kHz 和 200 kHz 处理组的 pH 值上升趋势最慢。

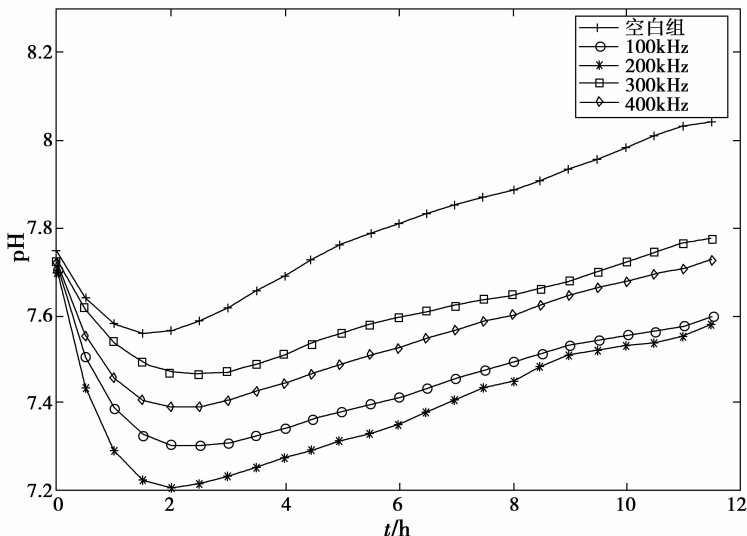


图 8 pH 值变化曲线

图 8 表明,各实验组的 pH 值在前 2 h 之内都显著下降,其原因可能是碳酸氢钠和氯化钙的化学反应生成了  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_2$  部分溶解于水中导致 pH 值下降;2 h 后,溶液的 pH 值又逐渐升高,其原因可能是水体的不断循环流动和加热,使得  $\text{CO}_2$  通过开口的水箱慢慢地挥发出去。从图中还可以看出,空白组的 pH 值在任何时刻都略高于高频脉冲处理组的 pH 值,分析认为其原因是高频电磁脉冲对水体起到了活化作用,增大了  $\text{CO}_2$  等气体的溶解量,使得处理组的 pH 值略小于空白组。该实验结果进一步说明了高频电磁脉冲在水中产生了大量的活性物质,这些活性物质增大了  $\text{CO}_2$  的溶解,使得  $\text{CO}_2$  与溶液中碳酸根离子结合生成碳酸氢根离子,降低了钙离子与碳酸根离子的结合几率,从而起到阻垢的效果。

### 3.2.2 实测热阻曲线

实验得到的各实验组热阻值随时间变化趋势如图 9 所示,实验过程中需要一定的时间来启动冷却水箱进行制冷和热水箱进行制热,使流入换热器的溶液温度保持稳定。因此,大约 2 h 后才能对管道热阻进行正常的监测。图 9 中管道热阻随时间变化曲线的起始时刻选择从 2 h 后开始绘制,9 h 后实验数据基本趋于稳定。

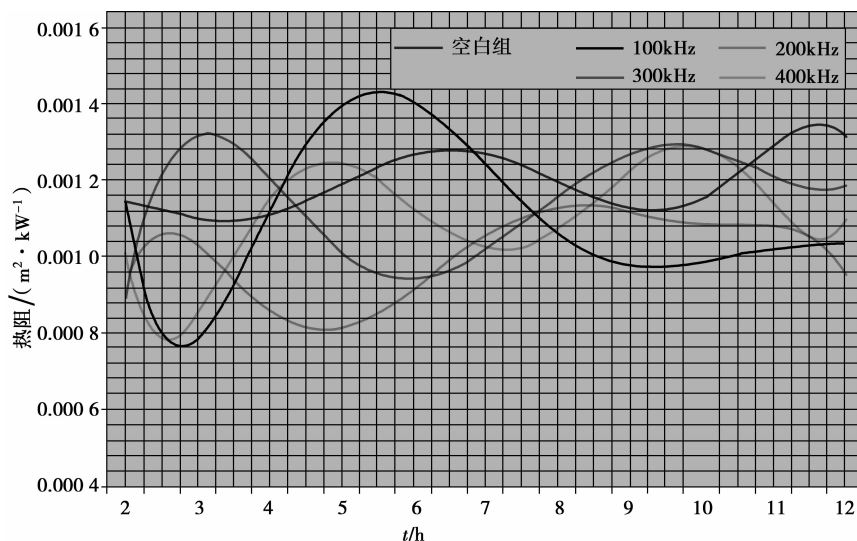


图 9 热阻变化曲线

图 9 表明,在整个实验过程中,频率为 200 kHz 处理组的热阻值要显著低于其他实验组。各实验组的热阻值开始都呈现出震荡状态,然后逐渐趋于稳定,计算热阻开始稳定的 2~12 h 的平均热阻值如表 1 所示。

表 1 平均热阻  $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 

实验组	空白组	100 kHz	200 kHz	300 kHz	400 kHz
热阻	0.001 284	0.001 004	0.000 992	0.001 104	0.001 085

### 3.2.3 实验结果及机理分析

综上所述可知,溶液电导率变化曲线能够直接反映碳酸钙的结垢速度,溶液 pH 值变化曲线能够反映水体在电磁场作用下的活化程度<sup>[16]</sup>。本实验中,高频脉冲处理组的电导率下降速度均慢于空白组,说明高频脉冲对碳酸钙沉淀的形成起到了一定的抑制作用;同时,空白组的 pH 值在任何时刻都略高于高频脉冲处理组的 pH 值,说明高频脉冲对水体起到了一定的活化作用,产生的活性物质进一步抑制了碳酸钙的形成;最后,通过热阻监测结果直观地表明了高频脉冲处理更能有效阻止碳酸钙在管道表面的结晶和附着。

实验结果还表明:频率为 100 kHz 和 200 kHz 处理组相比于其他处理组,其溶液的电导率下降趋势最缓慢、pH 值上升趋势最慢、平均热阻也最小。因此,频率为 100kHz 和 200kHz 的高频电磁脉冲的阻垢效果略优于其他两个处理组。

高频电磁脉冲阻垢机理研究还不够成熟,除了笔者前面所测参数外,高频电磁脉冲对水中水垢颗粒粒径也有一定的影响。国内外电磁脉冲水处理专家的研究发现<sup>[17-21]</sup>,电磁脉冲能够促使碳酸钙晶体结构产生较大的改变。Chunfu Fan<sup>[22]</sup>等人的研究表明电磁场会促使晶体的尺寸缩小;武理中<sup>[23]</sup>通过 X 衍射和扫描电镜对经电磁场处理和未经电磁场处理形成的晶体进行了分析测试,发现两者形成的碳酸钙晶体结构相差迥异;笔者通过对高频脉冲处理组和空白组产生的碳酸钙晶体进行粒度分析发现,频率为 100 kHz 和 300 kHz 处理组形成的碳酸钙晶体的粒径是最小的,频率为 200 kHz 和 400 kHz 处理组形成的碳酸钙晶体的粒径略大,但与前两个处理组在同一个数量级上。然而,空白组形成的碳酸钙晶体的粒径则远大于高频电磁脉冲处理组,相差达一个数量级。

因此,综合上述实验结果可见:高频电磁脉冲对水垢的形成具有一定的抑制作用,并对碳酸钙晶体产生一定的破坏,减少了沉淀和已生成沉淀在换热表面的附着。由实验结果可知,电磁脉冲频率在 100~200 kHz 之间可以起到较好的阻垢效果。

## 4 结 语

笔者通过模拟实际工业循环冷却水系统,搭建了微型循环冷却水实验平台,并研制了污垢热阻监测系统。最后,采用 4 个不同频率的处理组和一个空白对照组进行电磁脉冲阻垢实验,对实验过程中溶液的电导率、pH 值和热阻进行监测,并对各实验组形成的沉淀颗粒粒径进行了检测。

实验结果表明:频率为 100 kHz 和 200 kHz 处理组的阻垢效果最理想,通过管道热阻监测的数据分析也证实了该频率参数的有效性。通过热阻实时监测与数据分析,可以评价高频电磁脉冲阻垢的效果。因此,可以将热阻作为评价阻垢与除垢效果的重要技术指标。

### 参考文献:

- [1] Steinhagen R, Müller-Steinhagen H, Maani K. Problems and costs due to heat exchanger fouling in New Zealand industries [J]. Heat Transfer Engineering, 1993, 14(1): 19-30.
- [2] Thackeray P. The cost of fouling in heat exchanger plant [J]. Effluent and Water Treatment, 1980, 20:112.
- [3] 徐志明,杨善让,郭淑青,等. 电站锅炉污垢费用估算 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 196-200.  
XU Zhiming, YANG Shanrang, GUO Shuqing, et al. Approach to costing the utility boiler fouling in china [J]. Proceedings of the Csee, 2004, 24(2): 196-200.
- [4] Al-Jaroudi S S, Ul-Hamid A, Al-Matar J A. Prevention of failure in a distillation unit exhibiting extensive scale formation [J]. Desalination, 2010, 260(1/3): 119-128.
- [5] Lisitsin D, Yang Q, Hasson D, et al. Inhibition of CaCO<sub>3</sub> scaling on RO membranes by trace amounts of zinc ions [J]. Desalination, 2005, 183(1/3): 289-300.
- [6] Macadam J, Parsons S A. Calcium carbonate scale control, effect of material and inhibitors [J]. Water Science &

- Technology, 2004, 49(2): 153-159.
- [7] 熊兰, 蒋颀, 杨子康, 等. 循环冷却水的复合式电磁灭菌阻垢系统 [J]. 重庆大学学报, 2009, 32(10): 1144-1149.  
XIONG Lan, JIANG Yang, YANG Zikang, et al. Composite structure of sterilization and descaling system for circulating cooling water [J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(10): 1144-1149.
- [8] 李海花, 刘振法, 高玉华, 等. 静电场对  $\text{CaCO}_3$  结晶过程的影响及与绿色阻垢剂的协同阻垢性能 [J]. 化工学报, 2013, 64(5): 1736-1742.  
LI Haihua, LIU Zhenfa, GAO Yuhua, et al. Influence of the electrostatic water treatment on the crystallization behavior of  $\text{CaCO}_3$  and the synergistic scale inhibition performance with the green scale inhibitor [J]. Ciesc Journal, 2013, 64(5): 1736-1742.
- [9] Botello-Zubiate M E, Alvarez A, Martínez-Villafañe A, et al. 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.
- [10] Chang M, Tai C Y. Effect of the magnetic field on the growth rate of aragonite and the precipitation of  $\text{CaCO}_3$  [J]. Chemical Engineering Journal. 2010, 164(1): 1-9.
- [11] Cho Y I, Lane J, Kim W. Pulsed-power treatment for physical water treatment [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2005, 32(7): 861-871.
- [12] Incropera F P, Lavine A S, Dewitt D P. Fundamentals of heat and mass transfer [M]. New York: John Wiley & Sons, 2011.
- [13] 熊兰, 席朝辉, 叶晓杰, 等. 大功率高频电磁阻垢系统的设计及实验研究 [J]. 工业水处理, 2011, 31(6): 46-48.  
XIONG Lan, XI Zhaohui, YE Xiaojie, et al. Design and experimental research of high-power and high-frequency electromagnetic scale inhibition system [J]. Industrial Water Treatment, 2011, 31(6): 46-48.
- [14] 熊兰, 伍懿美, 席朝辉, 等. 高频电磁水处理器处理腔的仿真与设计 [J]. 重庆大学学报, 2012, 35(9): 94-98.  
XIONG Lan, WU Yimei, XI Zhaohui, et al. Simulation and Design of the Processing Chamber of High-frequency Electromagnetic Processor [J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(9): 94-98.
- [15] 苗雪飞. 循环冷却水的热阻监测与高频阻垢实验研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [16] 张若兵, 徐莹, 张驰, 等. 双脉冲放电等离子体水处理  $\text{H}_2\text{O}_2$  的生成规律 [J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2297-2302.  
ZHANG Ruobing, XU Ying, ZHANG Chi, et al. Formation of hydrogen peroxide by bipolar pulsed discharge plasma in Water [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9): 2297-2302.
- [17] Rizzuti A, Leonelli C. Crystallization of aragonite particles from solution under microwave irradiation [J]. Powder Technology, 2008, 186(3): 255-262.
- [18] Lipus L C, Dobersek D. Influence of magnetic field on the aragonite precipitation [J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(7): 2089-2095.
- [19] Alimi F, Tlili M, Ben Amor M, et al. Influence of magnetic field on calcium carbonate precipitation [J]. Desalination, 2007, 206(1/3): 163-168.
- [20] Knez S, Pohar C. The magnetic field influence on the polymorph composition of  $\text{CaCO}_3$  precipitation from carbonized aqueous solutions [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2005, 281(2): 377-388.
- [21] Long F, Zhu A, Wang X, et al. Membrane flux and  $\text{CaCO}_3$  crystallization in the unstirred dead-end nanofiltration of magnetic solution [J]. Desalination, 2005, 186(1): 243-254.
- [22] Fan C. A study of electronic descaling technology to control precipitation fouling [D]. USA: Drexel University, 1997.
- [23] 武理中. 磁处理循环冷却水防垢机理的显微观察及探讨 [J]. 化肥工业, 2000, 27(3): 33-36.  
WU Lizhong. Microscopic examination of and exploration into scale-inhibition mechanism of magnetic treatment of cooling water in circulation [J]. Journal of the Chemical Fertilizer Industry, 2000, 27(3): 33-36.