

# Scale Inhibition Effects of High Voltage Electrostatic Fields in Circulating Cooling Water System

Yun Jia, Zhihao Zhang, Judong Zhao\*, Yuquan Wang, Lei Gao

Department of Physics, College of Science, Inner Mongolia University Technology, Hohhot Inner Mongolia  
Email: [jdzhaod@imut.edu.cn](mailto:jdzhaod@imut.edu.cn)

Received: Feb. 13<sup>th</sup>, 2019; accepted: Feb. 25<sup>th</sup>, 2019; published: Mar. 4<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

The scale inhibition effect of self-made water was studied by using dynamic simulation bench of industrial circulating cooling water and high voltage electrostatic water processor. The results showed that the scale inhibition rate calculated by the gravimetric method was 50.0% after 10 hours of operation at a working voltage of 4.0 kV. The smaller the concentration of  $Ga^{2+}$  in the circulating water, the larger the amount of fouling, and the experiment showed that the amount of fouling was the highest two hours before the action.

## Keywords

High Voltage Electrostatic Field, Circulating Cooling Water, Scale Inhibition Rate

---

# 高压静电场对循环冷却水阻垢研究

贾 芸, 张志浩, 赵巨东\*, 王禹权, 高 磊

内蒙古工业大学理学院物理学系, 内蒙古 呼和浩特  
Email: [jdzhaod@imut.edu.cn](mailto:jdzhaod@imut.edu.cn)

收稿日期: 2019年2月13日; 录用日期: 2019年2月25日; 发布日期: 2019年3月4日

---

## 摘 要

利用工业循环冷却水动态模拟实验台和高压静电水处理器, 对自制水进行阻垢效果研究。结果表明, 在 4.0 kV 工作电压下作用 10 小时, 重量法计算的阻垢率为 50.0%。其中循环水中的  $Ga^{2+}$  浓度越小, 结垢量越大, 实验显示在作用前两小时结垢量最大。

---

\*通讯作者。

文章引用: 贾芸, 张志浩, 赵巨东, 王禹权, 高磊. 高压静电场对循环冷却水阻垢研究[J]. 应用物理, 2019, 9(3): 121-126. DOI: [10.12677/app.2019.93014](https://doi.org/10.12677/app.2019.93014)

## 关键词

高压静电场, 循环冷却水, 阻垢率

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

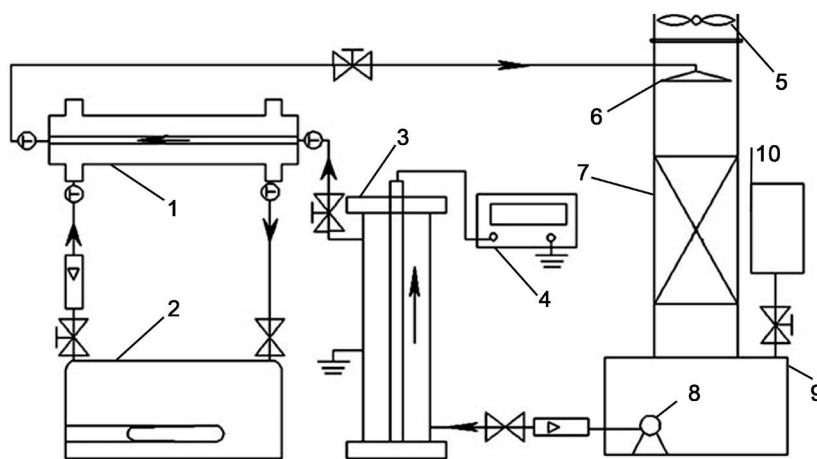
## 1. 引言

内蒙古地区工业用水主要是地下水和地表水, 水中含有大量  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  等结垢离子[1] [2] [3], 呼和浩特当地火电厂循环冷却水系统主要采用天然水循环冷却, 运行过程中  $\text{CaCO}_3$  水垢沉淀严重[4], 目前多采用的化学药剂阻垢主要弊端是运行成本高及排放污染环境等[5] [6], 高压静电场、脉冲磁场、超声波等物理技术作为新型环保、减排的处理手段被广泛关注[7] [8] [9] [10]。课题组之前以当地火电厂用水为实验用水进行阻垢研究, 由于各次实验水质均不同造成了实验结果不稳定。本实验以高纯水添加适量药剂为研究对象, 模拟火电厂循环冷却水系统, 通过分析在施加高压静电场和未加静电场两种情况下, 循环水中各离子浓度和相应物理性质的变化, 试图寻找在高压静电场作用下水成垢的机理。

## 2. 实验部分

### 2.1. 实验装置及方法

根据中华人民共和国化工行业《冷却水动态模拟试验方法(HG/T 2160-2008)》[11], 搭建了“工业循环冷却水分析测试台”和“高压静电水处理器”。测试台主要由换热器、加热水系统、自动补水系统、冷却塔、高压静电水处理器、高压发生器组成(实验流程如图1所示)。进行了阻垢实验和空白对照实验, 有研究指出施加 4 kv 高压静电场时阻垢效果最佳[12], 故本实验阻垢处理实验组施加 4 kv 工作电压持续作用 10 小时, 未处理实验组未施加电压持续 10 小时。实验中保持循环冷却水温度( $30 \pm 10.5^\circ\text{C}$ ), 加热水温度( $90 \pm 1.0^\circ\text{C}$ ), 循环处理水量 250 L。



1-换热器; 2-恒温水浴锅; 3-高压静电水处理器; 4-高压电源; 5-轴流风机; 6-喷头; 7-冷却塔; 8-循环水泵; 9-集水池; 10-补水系统。

Figure 1. Flow chart of experiment of scale inhibition [12]

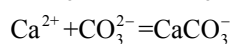
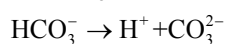
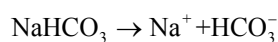
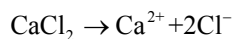
图 1. 实验流程图[12]

## 2.2. 实验水质

实验采用自制循环冷却水, 在高纯水中只加入了  $\text{GaCl}_2$  和  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  浓度 12 mmol/L,  $\text{HCO}_3^-$  浓度 12 mmol/L, 溶液 PH 值为 7.82。为了保持实验过程中水质的硬度和碱度不变, 实验中持续补充硬度和碱度。

## 2.3. $\text{CaCO}_3$ 的结晶过程

实验水质在模拟过程中将发生如下反应:



$\text{CaCO}_3$  溶解度很小, 属难溶性盐, 当液相成垢离子的浓度达到饱和状态后在换热器表面上形成  $\text{CaCO}_3$  水垢。

## 3. 实验结果与分析

实验过程中不同时刻实验水质分析如表 1 所示。

**Table 1.** Analysis of water quality in experiment

**表 1.** 不同时刻实验水质分析

未处理组	$\text{Ca}^{2+}$	碱度	PH 值	电导率
起始	9.72	0.65	7.82	3190
2 小时	8.25	0.55	8.31	3270
4 小时	8.80	0.38	8.46	3580
6 小时	9.41	0.35	8.59	3940
8 小时	9.56	0.32	8.65	4310
10 小时	10.05	0.30	8.67	4660
处理组	$\text{Ca}^{2+}$	碱度	PH 值	电导率
起始	10.00	0.68	7.81	3070
2 小时	8.42	0.42	8.31	3360
4 小时	10.15	0.32	8.41	3890
6 小时	10.80	0.28	8.42	4370
8 小时	13.45	0.28	8.49	4810
10 小时	13.80	0.22	8.43	5320

将沉积在换热面上的  $\text{CaCO}_3$  晶体称为附着垢, 将被水流冲击而剥离至拦截网中的  $\text{CaCO}_3$  晶体称为脱除垢, 脱除垢与附着垢之和称为总垢量。实验结束后, 取出换热器铜管烘干, 称量处理组和未处理组换热铜管的质量通过(1)式计算阻垢率  $\eta$ , (2)式计算总垢量变化率  $k$ :

$$\eta = 1 - \frac{m_1'}{m_2'} \quad (1)$$

$$k = \frac{m_2 - m_1}{m_2} \quad (2)$$

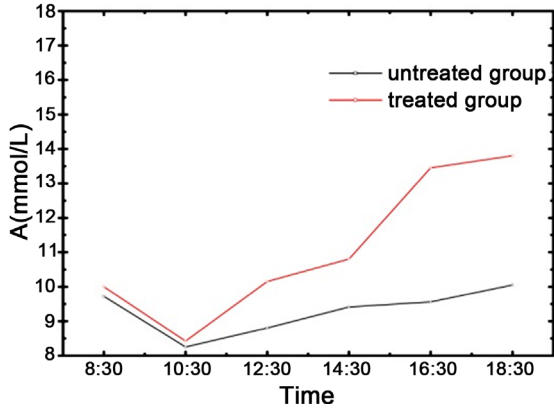
式中:  $m_1'$ ——处理组的附着垢量, g;  
 $m_2'$ ——未处理组的附着垢量, g;  
 $m_1$ ——处理组的总垢量, g;  
 $m_2$ ——未处理组的总垢量, g。

公式(2)中当  $k$  为正值时表示未加静电场的总垢量大于加静电场的总垢量, 反之为负值。本次实验的附着垢、脱除垢与总垢量的变化见表 2 所示。

**Table 2.** The change of scale quantity of  $\text{CaCO}_3$   
**表 2.** 处理组和未处理组  $\text{CaCO}_3$  垢量变化

	附着垢	脱除垢	总垢量	$\eta\%$	$k$
处理组	0.658	10.362	11.020	45.977	0.528
未处理组	1.218	22.129	23.347		

图 2 显示处理组和未处理组在实验两小时处滴定消耗量最小表明此时水质溶液中  $\text{Ca}^{2+}$  浓度最小, 大量的  $\text{Ca}^{2+}$  用于结垢, 由此说明在实验初始两小时是结垢的高峰期, 实验过程中不停地补充  $\text{Ca}^{2+}$  但由于结垢速度趋于缓慢导致溶液中  $\text{Ca}^{2+}$  浓度逐渐回升, 处理组的钙离子浓度高于未处理组浓度表明了静电场能够抑制水垢的生长, 从表 2 的结果也证明了高压静电场对循环冷却水起到了阻垢作用。图 3 表明由于  $\text{HCO}_3^-$  不断水解参与结垢, 实验水质的碱度呈下降趋势, 由于处理组结垢变缓需要的  $\text{CO}_3^{2-}$  少于未处理组, 所以处理组的碱度下降要显著高于未处理组。图 4 表明两组实验水质随着结垢的发生均呈碱性变化趋势, 由于为处理组消耗较多的  $\text{CO}_3^{2-}$  用于结垢导致溶液碱性更强。图 5 显示了由于静电场能够阻垢导致了溶液中有较多的游离离子故处理组电导率显著高于未处理组。



**Figure 2.** Calcium hardness  $[\text{Ca}^{2+}]$  history curve of treated and untreated group  
**图 2.** 处理组和未处理组钙硬度随时间变化曲线

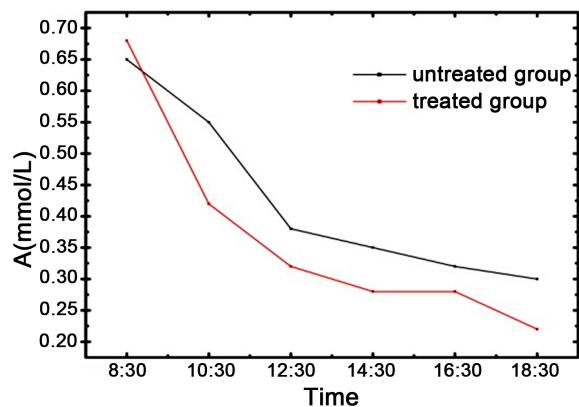


Figure 3. Alkalinity [ $\text{HCO}_3^-$ ] history curve of treated untreated group

图 3. 处理组和未处理组碱度随时间变化曲线

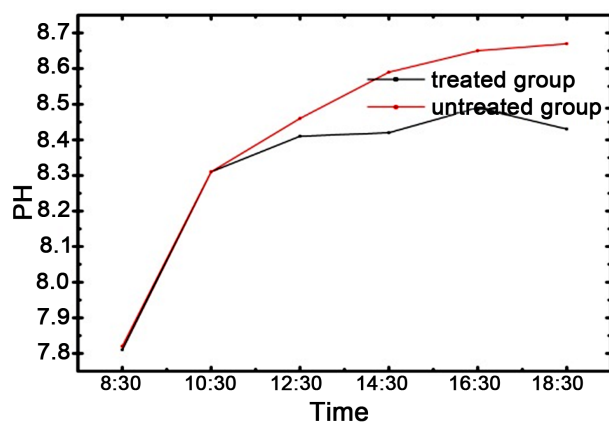


Figure 4. PH value history curve of treated and untreated group

图 4. 处理组和未处理组 PH 值随时间变化曲线

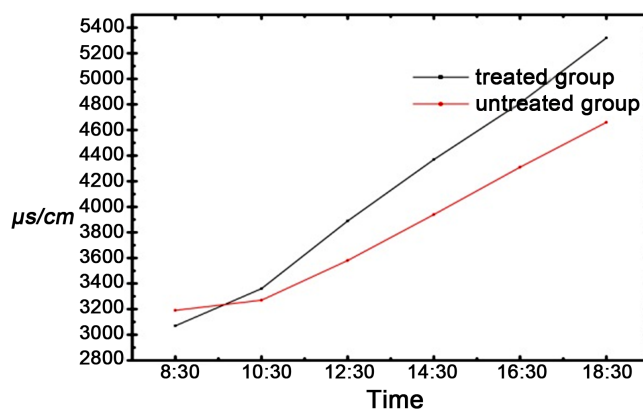


Figure 5. Conductivity history curve of treated and untreated group

图 5. 处理组和未处理组电导率随时间变化曲线

#### 4. 结论

实验表明, 4 kV 高压静电场作用 10 小时下的阻垢率为 45.977%, 总垢量变化率为 0.528, 静电场对水垢的形成有抑制作用, 并且在实验最初两个小时是形成水垢最多的时段。

## 基金项目

国家自然科学基金资助项目(61761036), 内蒙古工业大学重点研究项目(ZD201614)。

## 参考文献

- [1] 能源部西安热工研究所. 热工技术手册(电厂化学) [M]. 北京: 水利电力出版社, 1993: 16-18.
- [2] 杨星, 刘智安, 龙山, 等. 电磁场协同处理电厂循环冷却水阻垢实验[J]. 工业水处理, 2016, 36(5): 44-66.
- [3] 牛慧杰, 刘智安, 赵巨东, 等. 脉冲磁场阻垢处理器腔内磁感应强度的分布与计算[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版), 2015, 6(44): 782-784.
- [4] 刘智安. 电厂水处理技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 6-15.
- [5] 王兴国. 火电厂水处理与化学监督[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 26-32.
- [6] 惠希增. 变频电磁场处理油田水防垢技术研究[D]. [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学, 2007.
- [7] 王建国, 何芳, 邸昊, 等. 电磁场对结垢过程中电导率及 PH 值的影响[J]. 化学工程, 2013, 41(1): 32-36.
- [8] 相亚军, 纪利春. 磁电协同用于电厂循环冷却水阻垢实验[J]. 化学工程, 2014, 42(10): 11-14.
- [9] 姜德宁, Sintayehu, Z.D., 曹继华. 交变磁场对换热器阻垢效果的研究[J]. 中国给水排水, 2008, 24(7): 57-59.
- [10] 张旭, 刘智安, 赵巨东, 等. 磁电复合式循环冷却水阻垢处理装置及阻垢实验研究[J]. 工业水处理, 2013, 33(10): 34-36.
- [11] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 冷却水动态模拟实验方法(HG/T2160-2008) [S]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 2-4.
- [12] 安慧凤, 刘智安, 赵巨东, 等. 高压静电场对火电厂循环冷却水阻垢效果及机理[J]. 环境工程学报, 2013, 7(11): 4295-4299.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7567, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>  
期刊邮箱: [app@hanspub.org](mailto:app@hanspub.org)