



电磁除垢参数的实验研究

姜德宁^{1,2}, Sintayehu Zewdu¹, 傅汝廉²

(1. 天津工程师范学院电子工程系, 天津 300222; 2. 南开大学信息科学技术学院, 天津 300071)

摘要: 利用麦克斯韦方程和边界条件, 计算了交变磁场在水管中的场分布. 采用交变磁场的磁感应强度作为参量, 用实验的方法得到水管结垢量与磁感应强度之间的关系, 从而提出了结垢磁感应强度阈值的概念. 根据该阈值计算出不同管径对应的功率阈值, 为工程设计提供了参考. 此外, 对水的参数, 如温度、硬度与结垢量的关系进行了实验研究. 结果表明, 在水的硬度小于 700 mg/L 的范围内, 不同的管径对应的结垢磁感应强度阈值相近, 功率阈值不同.

关键词: 防垢; 除垢; 硬度; 阈值

中图分类号: O451 文献标识码: A 文章编号: 1672-6510 (2008) 03-0064-04

Experimental Parameter Study on Prevention from Descaling

JIANG De-ning^{1,2}, Sintayehu Zewdu¹, FU Ru-lian²

(1. Electronic Engineering Department, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China;
2. College of Information Technical Science, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: Using the Maxwell equations and border conditions, the distribution of magnetic field in the water pipe was computed. As the magnetic induction intensity and power are parameters, the relation between the scaling amount and magnetic induction intensity was gotten through the experimental method. Then the threshold of magnetic induction intensity was advanced. According to the threshold, the power threshold of various pipes were calculated, it gives the references for the engineering design. In addition, the relations of the scaling amount with temp, hardness were investigated by the experiments. Under the water hardness is less than 700 mg per liter, the results show that magnetic induction intensity threshold for various pipe are almost same, but the power thresholds are different.

Keywords: prevention from descaling; descale; hardness; threshold

在工业生产过程中, 水是最重要的热交换介质, 受热面和传热面的结垢就成为热交换工艺中困扰设备正常运行的主要问题之一. 由于化学除垢的局限性, 物理防垢、除垢成为研究的热点^[1-4]. 物理方法除垢, 常见的有电磁、永磁、强磁、高频、静电等多种形式的除垢仪. 其中, 电磁除垢采用“宽频波”技术, 使得电磁波在设定频率范围内的各个频率点持续恒定, 没有变频间隙, 因此完全没有漏处理部分, 使得流经的水受到完全处理, 宽频电磁波频率覆盖不同水质、变化条件(硬度、温度、黏度、压力、pH、流速、气压、矿物质含量等)的水分子自然频率, 保证了对

各种水质的高效除垢、防垢、缓蚀、防腐、杀菌、除藻. 近年来, 若干研究小组采用光学方法评价防垢效果, 但此方法不能在场量与防垢之间建立直接的联系. 本文在理论计算的基础上, 通过实验得到磁场防垢的具体评价.

1 电磁除垢原理

1.1 交变磁场对水的物理结构的影响

水是由一个氧原子和两个氢原子组成的, 通常水中 80% 的水分子是由氢键缔合成水分子团的形式, 这

收稿日期: 2007-12-11; 修回日期: 2008-03-23

基金项目: 教育部科学技术研究重点资助项目(2007007); 天津市高等学校科技发展基金资助项目(20050508)

作者简介: 姜德宁(1964—), 男, 天津人, 副教授, 博士.

种水分子团对碳酸钙的溶解程度较低,使水垢很容易析出.

由于不同条件下水的温度、硬度、黏度、pH不同,其内部的自然频率就不同.电子除垢仪使用“宽频波”技术,对受处理水体施加一个持续的覆盖所有水质频率的电磁场,而这组波内肯定有与水分子氢键自然振动频率相同的频率,从而引起水分子产生共振现象,共振的结果就是在不改变原有化学成分的情况下,使水的物理结构发生变化,即原水分子大缔合链状大分子的氢键断裂并形成单个水分子,水中单个水分子急剧增加,水中溶解盐的正负离子就迅速被大量单个水分子包围,运动速度降低,有效碰撞次数减少,静电引力下降,从而使水中的钙离子无法与碳酸根结合成碳酸钙.此外,由于水体吸收大量被激励的电子,使水的偶极矩增强,与盐的正负离子的亲和能力增强,从而使管壁上原有的水垢逐渐松软以至脱落.而且,大缔合水分子断裂成单个水分子后,极微小的水分子可以渗透、疏松、溶解垢体,从而达到除垢、防垢的目的^[5,6].

1.2 电子除垢仪的结构

电子除垢仪给水一个宽频的大功率电磁波信号.电子除垢仪的基本框图如图1所示,它由电源模块,控制模块,驱动器模块和电磁转换部分组成.

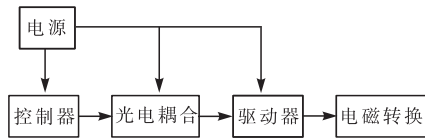


图1 电子除垢仪系统框图
Fig. 1 Schematic diagram of the electronic descaler

控制模块是整个设计的关键部分,利用它产生频率可调的方波信号.光电耦合器起隔离作用,驱动器模块部分采用了场效应管并联形式,电路的总电流是各并联支路的电流叠加,可以产生足够的电流,同时增加电路输出功率,这样可以满足磁场强度的要求,因为根据麦克斯韦方程,磁场强度与交变电流直接相关.电磁转换部分的主要作用是用导线产生交变电磁场,根据电磁感应原理,流经它的交变电流将产生交变的磁场.导线相当于电感缠绕在水管上,从而在水管中产生交变的磁场,如图2所示.

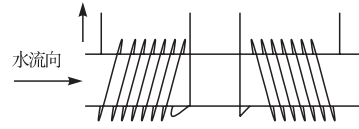


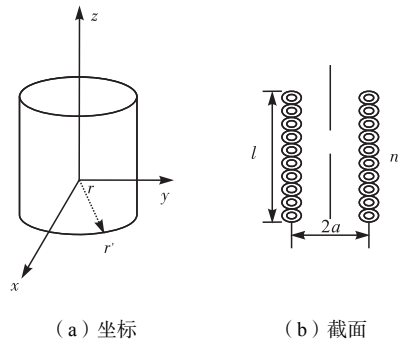
图2 电磁转换

Fig. 2 Structure of electro-magnetic conversion

1.3 水管中磁场分布

取水管纵向为z轴,横截面为xy平面,坐标原点位于水管横截面中心,缠绕的导线可以看作是线密度为 $\frac{In}{l}$ 的圆柱面电流,其中I, n, l分别为导线的电流、缠绕圈数和导线缠绕区沿水管方向的长度.可以计算得到电流为 $\frac{In}{l} dz$ 的电流环在水管缠绕区中心线处的磁感应强度 $B_1(r)$.

设 r, r' 分别代表水管区中目标点和线圈上源点的矢量坐标, θ 代表目标点与z轴的夹角, ϕ' 为源点与x轴的夹角, a 是电流环的半径,如图3所示.



(a) 坐标 (b) 截面
图3 水管上的导线分布

Fig. 3 Line distribution on pipe

根据亥姆霍兹定理有

$$B_1(r) = -\nabla U + \nabla \times A \tag{1}$$

$$U(r) = \frac{1}{4\pi} \int_{V'} \frac{\nabla \cdot B_1(r')}{|r - r'|} dV' \tag{2}$$

$$A(r) = \frac{1}{4\pi} \int_{V'} \frac{\nabla \times B_1(r')}{|r - r'|} dV' \tag{3}$$

根据麦克斯韦方程有 $\nabla \cdot B_1(r) = 0$, 所以标量电位 $U(r) = 0$, 式(1)变为

$$B_1(r) = \nabla \times A \tag{4}$$

矢量磁位 $A(r)$ 满足洛伦兹条件

$$\nabla^2 A(r) - \mu\epsilon \frac{\partial^2 A(r)}{\partial t^2} = \mu J(r') \tag{5}$$

解式(5)得到矢量磁位对于线分布电流的表达式

$$A(r, t) = \frac{\mu}{4\pi} \int_{V'} \frac{I(r', t - \frac{|r - r'|}{v})}{|r - r'|} dl' \tag{6}$$

由于结构对称,场量一定与目标点与 x 轴的夹角 ϕ 无关. 为了方便计算,令场点位于 xz 平面. 由图 3 可知

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= (r \sin \theta) \mathbf{e}_x + (r \cos \theta) \mathbf{e}_z \\ \mathbf{r}' &= (r \sin \phi') \mathbf{e}_x + (r \cos \phi') \mathbf{e}_y \end{aligned}$$

所以

$$|\mathbf{r} - \mathbf{r}'| = r \sqrt{1 + \left(\frac{a}{r}\right)^2 - 2 \frac{a}{r} \sin \theta \cos \phi'}$$

还有

$$\begin{aligned} d\mathbf{l}' &= a d\phi' \mathbf{e}_{\phi'} \\ \mathbf{e}_{\phi'} &= \cos \phi' \mathbf{e}_y - \sin \phi' \mathbf{e}_x \end{aligned}$$

电磁波传播速度

$$v = \frac{c}{9}$$

其中 c 为光速.

$$I(\mathbf{r}', t) = I \sin(2\pi ft)$$

将上述各式代入式 (6) 得到

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(\mathbf{r}) &= \frac{\mu_0 a}{4\pi r} \int_0^{2\pi} \frac{I(\mathbf{r}', t - \frac{9|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}{c})}{\sqrt{r^2 + a^2 - 2ar \sin \theta \cos \phi'}} (\cos \phi' \mathbf{e}_y - \\ &\quad \sin \phi' \mathbf{e}_x) d\phi' \end{aligned}$$

代入式 (5) 求得

$$\mathbf{B}_1(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0 I \sin(2\pi ft) na^2}{2(a^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} dz \mathbf{e}_z$$

则水管中心点的磁感应强度为

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \mathbf{B}_1(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0 I \sin(2\pi ft) n}{2\sqrt{a^2 + \frac{1}{4}l^2}} \mathbf{e}_z$$

以 \mathbf{B} 为实验参数,进行实验.

2 实验材料和方法

2.1 实验装置

为了检验电子除垢仪的除垢阻垢效果,进行了换热器除垢阻垢实验,实验装置如图 4 所示.

溶液罐 1 中为氯化钙和碳酸氢钠的混合溶液,溶液罐 2 中为碳酸钠溶液,两种液体混合后进电子除垢仪. 换热器由一根黄铜管和有机玻璃管组成,铜管的半径为 22 mm,长度为 3 m,相对磁导率为 0.999,壁厚 0.2 mm,铜管较细,架在有机玻璃管中间,铜管中流氯化钙、碳酸氢钠和碳酸钠混合溶液;铜管和有机玻璃管之间通热水,使碳酸钙垢结在铜管内壁上. 为测量水温,在试验段安装了 6 个测温热

电偶. 通过水泵来控制溶液的流速,流速 1~10 m/s 可调;使用一台泵加压,让溶液的压力产生变化.

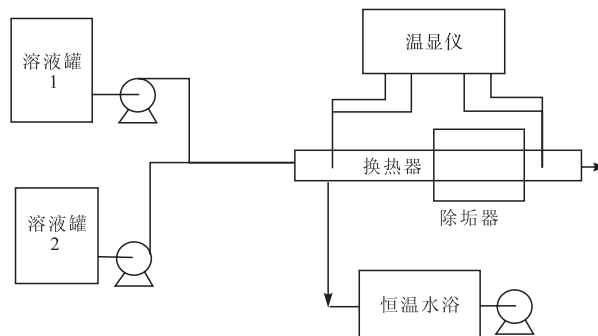


图 4 实验装置图

Fig. 4 Schematic diagram of experimental set-up

2.2 实验方法

铜管使用前先清洁,铜管中流碳酸钠、氯化钙和碳酸氢钠溶液的混合溶液. 试验过程中,取流出液体观察,可发现溶液中有白色混浊物. 在试验阶段改变流速、压力、温度、硬度等参数. 每次试验进行 8 h,拆下铜管用水冲洗,冲掉软垢和杂质. 然后将铜管烘干后称重,计算出结垢量.

3 结果与讨论

3.1 结垢量与磁场的关系

通过改变缠绕在水管上的线圈中的电流来改变水管中的磁感应强度,以水管轴线中心点的磁感应强度作为参数进行实验,得到图 5 所示的结垢量与磁感应强度的关系曲线.

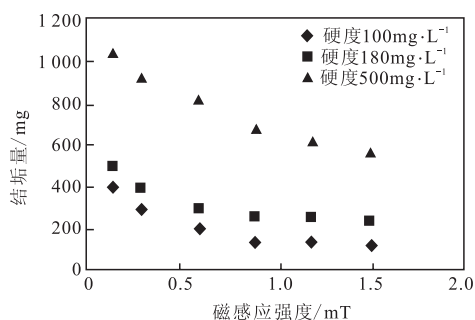


图 5 结垢量与磁感应强度的关系

Fig. 5 Relation of scaling amount and magnetic induction intensity

从图 5 可以看出,对于不同的水硬度,当磁感应强度增加超过到 1mT 时,结垢量变化趋于饱和. 定义结垢量最小值的 110%对应的磁感应强度为结垢量磁感应强度阈值. 从图中可以看出阈值为 0.9 mT.

根据此阈值给出了对应不同水管管径的磁场功率阈值,如表1所示。

表1 管径与磁场功率阈值对应关系
Tab. 1 Relation of diameter and magnetic power threshold

管径/cm	2.54	5.08	7.62	10.16	12.70	15.24	17.78	20.32
功率阈值/W	15	20	40	45	60	65	70	74

3.2 结垢量与硬度的关系

在不同的初始硬度下,管壁的结垢情况如图6所示。实验在水温为95℃,流速为1 m/s,常压的条件下进行。

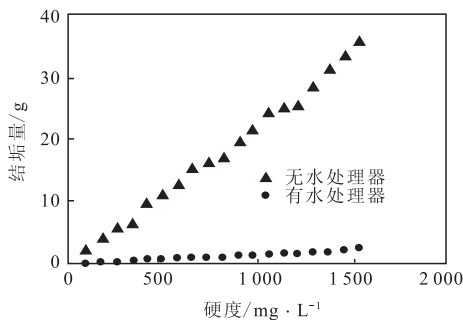


图6 结垢量与硬度关系

Fig. 6 Relation of scale amount and hardness

从图6中可以看出,在未使用电子除垢仪的情况下,结垢量随着水中的钙离子的增加几乎成正比地增加,这是因为钙离子与碳酸根离子形成碳酸钙沉积在管壁上的结果。在使用电子除垢仪后,电子除垢仪在管道中形成一个交变的磁场,覆盖了水分子团的共振频率范围,水分子团在磁场的作用下,分裂为单极性水分子,从而水的溶解度提高,降低了结晶的概率。此外,这个交变磁场影响了碳酸钙的结晶过程,导致碳酸钙晶体的多样性,使浮在水中的钙离子和碳酸根离子相互碰撞,形成特殊的文石碳酸钙体^[7,8],其表面无电荷,因此,不易附着在管道壁表面上。

3.3 温度对结垢量的影响

在硬度为500 mg/L,流速为1 m/s,常压的条件下,考察了温度对结垢量的影响,结果见图7。

从图7可以看出,当不使用电子除垢仪,且温度较低时,结垢量很少,当温度升高到75℃时,结垢量出现了拐点,结垢量呈指数上升的趋势,主要是因为随着温度的升高,离子的热运动增强,碰撞的几率增大,化学反应速度加快,导致碳酸钙数量激增,结垢量相应增加。当使用了电子除垢仪后,由于水的溶解度提高,大量水分子包围钙离子,进而结垢量显著下降。

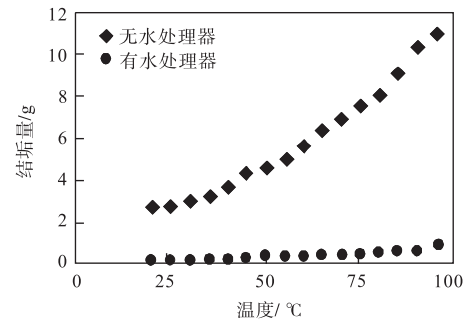


图7 结垢量与温度关系

Fig. 7 Relation of scale amount and temperature

4 结 语

分析了电磁除垢原理,对电磁除垢参数进行了实验研究。提出了磁感应强度阈值的概念,并确定磁感应强度阈值为0.9 mT,得出对应不同管径的磁场功率阈值,为工程设计提供了参考。此外,结垢与水分子的物理状态密切相关,特别是宽频交变磁场对结垢过程的影响较大,参数中温度的升高导致结垢量较大的变化。

参 考 文 献:

- [1] Cho Y I, Lane J, Kim W T. Pulsed-power treatment for physical water treatment [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2005, 32: 861—871.
- [2] Cho Y I, Lee S H. Reduction in the surface tension of water due to physical water treatment for fouling control in heat exchangers [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2005, 32: 1—9.
- [3] Cho Y I, Lee S H, Kim W T. Physical water treatment for the mitigation of mineral fouling in cooling-tower water applications [J]. Ashrae Transactions, 2003, 109: 346—357.
- [4] Cho Y I, Fridman A, Kim W T. Physical water treatment for fouling prevention in heat exchangers [J]. Advances in Heat Transfer, 2004, 38: 1—72.

(下转第76页)