

文章编号:1000-582X(2012)09-094-05

高频电磁水处理器处理腔的仿真与设计

熊 兰,伍懿美,席朝辉,杨子康,郑家波,何 为

(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:处理腔是高频电磁水处理器的的重要组成部分,为了确定何种处理腔结构对高频电磁阻垢除垢具有更佳的效果,利用 Ansoft Maxwell 软件建立了有限元模型,对两种常见的处理腔,即同轴电极式处理腔和缠绕电极式处理腔内的电磁场能量分布进行仿真计算,比较了两种处理腔向水体释放电磁能量的大小以及处理腔内观测点的瞬时能量密度的分布特征。仿真分析表明,当施加相同的激励源并处理相同体积的水时,同轴电极式处理腔内的电磁能量远大于缠绕电极式处理腔;但是同轴电极式处理腔内电磁能量分布不均匀,由阳极向阴极依次递减,而缠绕电极式处理腔内电磁能量分布较为均匀。这些结论对于高频电磁水处理器处理腔的设计具有重要的指导意义。

关键词:水处理;电磁场;Ansoft Maxwell 软件;处理腔

中图分类号:TM 154.1

文献标志码:A

Simulation and design of the processing chamber of high-frequency electromagnetic processor

XIONG Lan, WU Yimei, XI Zhaohui, YANG Zikang, ZHENG Jiabo, HE Wei

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

Abstract: Processing chamber is an important part of high-frequency electromagnetic water processor. To determine what kind of processing chamber has better effect of antiscaling, the software, Ansoft Maxwell, which is based on the finite element method, is applied to simulate electromagnetic energy distribution in two common processing chambers. One processing chamber is set with coaxial electrodes and the other one is wrapped by spirals. The electromagnetic energy released to water and the distribution of instantaneous energy density of each chamber are compared. According to the simulation analysis, when the same electrical excitation is imposed on the same volume of water, electromagnetic energy of processing chamber with coaxial electrodes is far more than that of processing chamber wrapped by spirals. However, the electromagnetic energy of processing chamber with coaxial electrode decreases from the anode to the cathode, while the electromagnetic energy of processing chamber wrapped by spirals is distributed evenly. These analysis results can be definitely instructive to design the chamber of high-frequency electromagnetic processor.

Key words: water treatment; electromagnetic field; Ansoft Maxwell software; processing chamber

收稿日期:2012-04-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51077139)

作者简介:熊兰(1972-),女,重庆大学教授,博士,主要从事脉冲功率技术及电气设备在线监测技术的研究,
(E-mail)lxiong@cqu.edu.cn.

高频电磁阻垢除垢方法以其操作简单、维护方便、绿色环保等优势被广泛应用于工业和民用的冷却水系统、空调系统、热交换系统以及锅炉的水处理过程中^[1-4]。处理腔是高频电磁水处理器的的重要组成部分,有研究者提出^[5-6],高频电磁水处理装置的处理效果是通过向水中释放电磁能量而产生的,因此,处理腔内电磁场能辐射结构的形状不同、电极位置不同,将导致电磁场的分布不同,从而会产生不同的处理效果。上述观点虽然得到公认,但尚无相关文献对处理腔内电磁能量的量化分析进行报道。目前常见处理腔的电极形式有同轴式和缠绕式,笔者根据这两种处理腔的结构特点和实际工作条件建立有限元分析模型,采用 Ansoft Maxwell 软件分析两种处理腔内电磁能量的分布情况,进而确定施加相同的信号源处理相同体积的水体时,阻垢除垢效果更佳的处理腔结构,从而为高频电磁水处理器处理腔的设计提供理论依据。

1 高频电磁水处理器简介

高频电磁水处理器主要包括高频电磁信号发生装置与处理腔,其工作原理如图 1 所示。目前,比较公认的电磁阻垢除垢机理^[7-9]解释如下:当水体经过高频电磁水处理器的处理腔时,水体吸收高频电磁能量,物理结构发生变化,原缔合链状大分子断裂成单个水分子,水中溶解盐的正负离子被单个水分子包围,静电引力下降,运动速度降低,有效碰撞次数减少,从而使水中的钙镁离子无法与碳酸根离子相结合成碳酸钙和碳酸镁,进而达到阻垢的效果。同时,由于水体吸收大量被激活的电子,使水的偶极矩增大,与盐的正负离子的亲合能力增大,从而使管壁上原有的水垢逐渐松软以至脱落,从而达到有效的除垢效果。因此,笔者拟采用 Ansoft Maxwell 有限元分析软件对高频电磁水处理器常见的两种处理腔结构的电磁场能量分布进行仿真分析以辅助处理腔的结构设计。

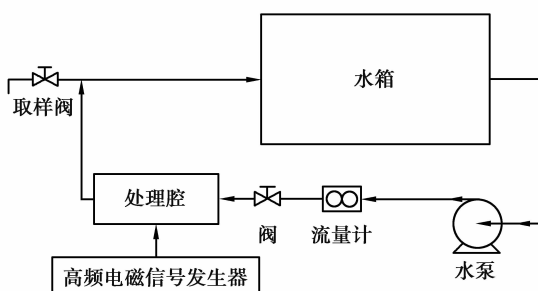


图 1 高频电磁除垢阻垢模拟系统的工作原理图

2 处理腔的电磁场分布仿真

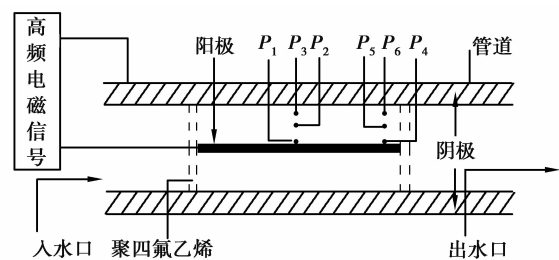
2.1 处理腔的常见结构

由于工业循环水系统的主水管道直径较大,且规格不一,难以针对所有管道进行处理腔设计和实验分析,因此在模拟实验系统的设计中,笔者自行配兑特定的水体(由氯化钙和碳酸氢钠配置钙离子浓度为 3mmol/L),用较细的管道代替实际管道,并设计了两种结构的处理腔,处理腔剖面图如图 2 所示。图 2(a)为同轴电极式处理腔,腔体管道为空心的圆柱体,作为阴极;阳极为实心细棒,通过漏筛状的聚四氟乙烯材料将其固定在圆柱腔体中轴处。缠绕电极式处理腔剖面图如图 2(b)所示,在管道外壁上使用一定数量的漆包线紧密缠绕形成螺线管。两电极的尺寸如下:同轴电极式处理腔的阳极棒半径为 1.5 mm,阴极管道内半径为 7.65 mm、外半径为 11.15 mm,阳极棒和阴极腔体长为 220 mm。缠绕式处理腔的管壁内半径 7.5 mm、外半径 11 mm、长 220 mm,漆包线直径 0.56 mm,缠绕 400 匝。这样设计就考虑了同轴电极式处理腔阳极棒占用的体积,从而使两种处理腔的容量保持一致。

为了更好地研究处理腔内局部能量随时间变化的趋势,在仿真过程中分别选取两种处理腔内 6 个具有代表性的观测点进行比较($P_1' \sim P_6'$ 为缠绕电极式处理腔的观测点, $P_1 \sim P_6$ 为同轴电极式处理腔的观测点),各点具体位置如下:

1) 横向位置: $P_1(P_1')$ 、 $P_2(P_2')$ 、 $P_3(P_3')$ 距离入水口 110 mm, $P_4(P_4')$ 、 $P_5(P_5')$ 、 $P_6(P_6')$ 距离入水口 200 mm;

2) 纵向位置: $P_1(P_1')$ 和 $P_4(P_4')$ 、 $P_2(P_2')$ 和 $P_5(P_5')$ 、 $P_3(P_3')$ 和 $P_6(P_6')$ 三组点分别距离处理腔中轴线 2.5、4、6 mm,具体各点分布如图 2 所示。



(a) 同轴电极式处理腔

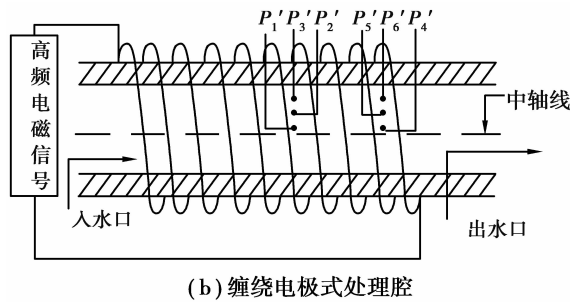


图 2 处理腔结构剖面图

2.2 Ansoft 有限元分析处理腔的电磁场分布

2.2.1 Ansoft Maxwell 软件分析流程简介

Ansoft Maxwell 是专业的电磁场分析软件,所采用的有限元计算方法是目前电磁场计算中最常用的方法,它以变分原理和剖分插值为基础,这种方法能处理任意形状场域、多介质、复杂交界面等情况,所形成的代数方程系数矩阵对称、正定、稀疏,因而收敛性好,容易求解^[10]。

Ansoft Maxwell 软件仿真分析主要包括以下步骤:1)建立有限元模型,指定材料属性。本实例设置的属性如下:同轴电极式处理腔两电极材料均为不锈钢(不锈钢导电能力好,且耐腐蚀能力强),缠绕电极式处理腔管道材料为聚四氟乙烯(由于不锈钢管道对电磁场具有屏蔽效应,而实际工业应用中常选取价廉且性能良好的聚四氟乙烯水管,此材料的水管对电磁场无屏蔽,使用缠绕电极式处理腔除垢方法时只需在管道外缠绕一定数量的漆包线作为电极即可),两处理腔内水体的相对介电常数为 0.999 91,导电率为 0.1 S/m。2)指定边界条件,加载激励源。对同轴电极式处理腔的阳极施加幅值 200 V、频率 200 kHz 的双极性方波信号,激励源波形如图 3 所示,阴极接地。对缠绕电极式处理腔加载与同轴电极式处理腔相同的激励源。3)确定求解类型。笔者施加的激励源为时变信号,因此属于瞬态电磁场的问题。4)指定求解规范、细化网格。网格剖分是最关键的步骤,决定求解结果的准确性,也决定了软件求解的精度。Ansoft Maxwell 软件能全自动建立自适应网格,只需要人工设置好自适应的步数和最后的误差精度。至于网络的细化加密,软件可以自动进行,对于场域变化剧烈的区域,则可以进行手动剖分。在剖分时对同轴电极式和缠绕电极式处理腔电磁场空间尽量保持相同的剖分程度,剖分单元均为 5 000 个。两种处理腔的仿真图和剖分图如图 4 所示。5)求解分析。通过 Ansoft Maxwell 软件可以计算两种结构处理腔内各点各个

时刻的电场 E 和磁场 B 等参数的值。6)后处理。Ansoft Maxwell 软件提供强大的后处理功能,例如可以绘制场图、查看参数解等,还可以利用场计算器编写宏命令来计算一些参数。

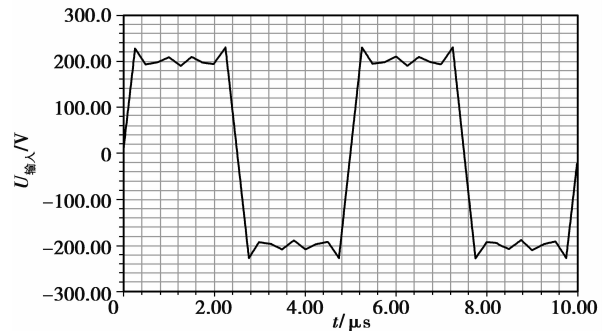
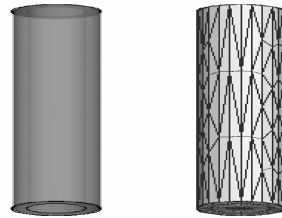


图 3 激励源波形图



(a) 同轴电极式处理腔模型图(左)和部分图(右)



(b) 缠绕电极式处理腔模型图(左)和部分图(右)

图 4 处理腔仿真图

2.2.2 处理腔电磁能量分布

当对两种处理腔都施加图 3 所示的电信号(激励源)时,根据麦克斯韦方程组的前两个表达式^[11]:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}. \quad (2)$$

可知在处理腔内必定会产生时变的电磁场。再根据电磁学原理,电场能量密度瞬时表达式为

$$\omega_e = \frac{1}{2} \mathbf{E} \cdot \mathbf{D}. \quad (3)$$

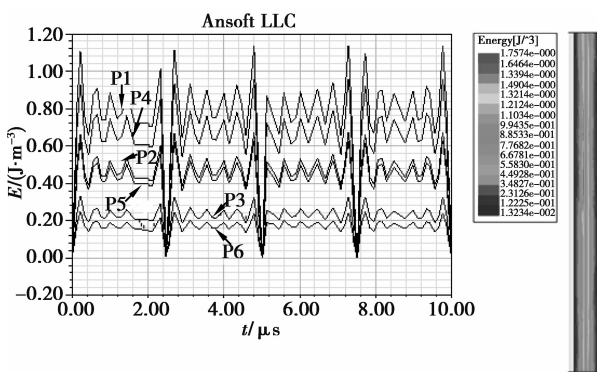
磁场能量密度瞬时表达式为

$$\omega_m = \frac{1}{2} \mathbf{B} \cdot \mathbf{H}. \quad (4)$$

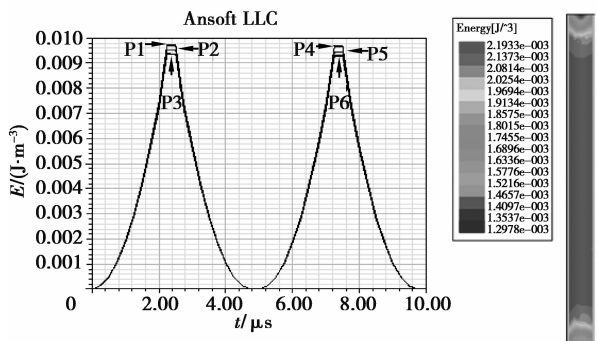
Ansoft Maxwell 软件通过公式(3)和式(4)可以计算出处理腔内任意点的瞬时能量密度,图5(a)为同轴电极式处理腔6个检测点的能量密度随时间变化的趋势图。通过分析处于同一轴向或同一径向位置的检测点可以得到以下结论:

1)轴向位置。由图2(a)可知, P_1 和 P_4 、 P_2 和 P_5 、 P_3 和 P_6 三组点对分别处于同一轴线上,再从图5(a)(左)可以看到每组点对的能量密度-时间曲线接近,即同轴向位置上的点在相同时刻的能量密度相近;从图中还可以看出,越靠近处理腔中心圆截面观测点的能量密度越大,即 $P_1 > P_4$ 、 $P_2 > P_5$ 、 $P_3 > P_6$ 。

2)径向位置。通过比较处于同一径向位置的两组检测点 P_1 、 P_2 、 P_3 或 P_4 、 P_5 、 P_6 可知同时刻的能量密度 $P_1 > P_2 > P_3$ ($P_4 > P_5 > P_6$),即离阳极棒越近,能量密度越大。图5(a)(右)为 $1 \mu\text{s}$ 时处理腔水体内部电磁能量密度剖面图,也反映了能量密度大小与阳极棒距离的关系,靠近阳极棒附近区域能量密度约为 1.2 J/m^3 ,靠近阴极管道的区域能量密度为 $1.3 \times 10^{-2} \text{ J/m}^3$ 。



(a) 同轴电极式处理腔检测点能量密度-时间图(左)和处理腔能量密度剖面图(右)



(b) 缠绕电极式处理腔检测点能量密度-时间图(左)和处理腔能量密度剖面图(右)

图5 两种处理腔检测点能量密度-时间图和能量密度剖面图

图5(b)(左)是缠绕电极式处理腔的能量密度-时间关系图,图中6个检测点的能量密度-时间曲线基本重合,即6个检测点在相同时刻的能量密度非常接近。图5(b)(右)为能量密度剖面图,从图中可以看出除处理腔两端即入水口和出水口处能量密度稍小,约为 $1.8 \times 10^{-3} \text{ J/m}^3$,其余各处约为 $2.2 \times 10^{-3} \text{ J/m}^3$,因此处理腔内的能量分布基本是均匀的,但是由于受边缘效应的影响,处理腔两端的能量分布产生微量畸变^[12-13]。

以上分析了处理腔内检测点任意时刻的电磁能量密度,通过公式(5)可计算处理腔水体某一时刻吸收的总电磁能量,即

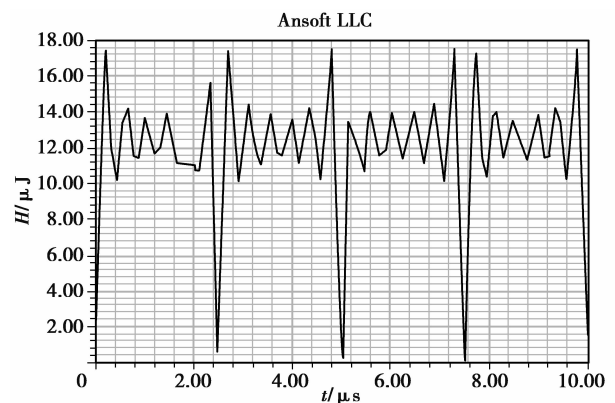
$$e = \int_V (\omega_m + \omega_e) \cdot dV, \quad (5)$$

式中 V 为处理腔内水体的体积。

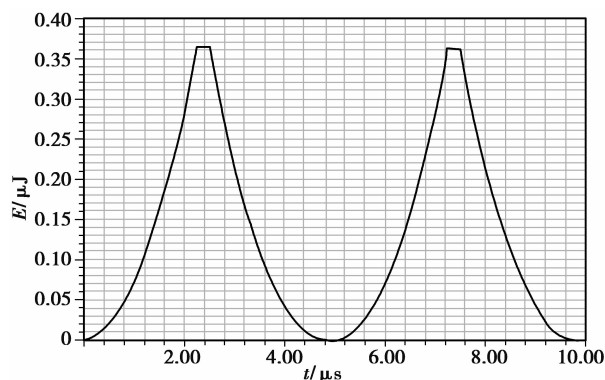
图6为两种处理腔内水体吸收的瞬时总电磁能量-时间趋势图。对比由图6(a)和(b)可知,同轴电极式处理腔向水体释放电磁能量最小值出现在激励源的转折点,即 $n \times 2.5 \mu\text{s}$ ($n=0,1,2,\dots$),约为 $1 \mu\text{J}$,在紧靠激励源转折点前后时刻出现两个最大值,约为 $17.6 \mu\text{J}$;而缠绕电极式处理腔的总能量在激励源正半周缓慢上升,到激励源有正半周向负半轴变化时到达最大值 $0.36 \mu\text{J}$,然后在激励源负半轴缓慢下降到0。显然同轴电极式处理腔内水体总的瞬时电磁能量远大于缠绕电极式处理腔,再通过公式:

$$p = \frac{1}{T} \int_0^T e \cdot dt. \quad (6)$$

可求出同轴电极式处理腔和缠绕电极式处理腔向水体释放的平均电磁能量分别为:12J和0.124J,可见,同轴电极式处理腔释放的电磁能量远大于缠绕式处理腔。因此,要想提高缠绕式处理腔内电磁能量的供给,就得施加更强的电信号,但这意味着会消耗更多的电能。



(a) 同轴电极式处理腔电磁总能量-时间分布图



(b) 缠绕电极式处理腔电磁总能量-时间分布图

图 6 两种处理腔电磁总能量-时间分布图

3 结 论

1) 同轴电极式处理腔内的电磁能量分布不均匀:越靠近阳极棒的位置电磁能量越大,两端的能量略低于中间位置;另外,能量分布随激励源波动而波动。缠绕电极式处理腔内的电磁能量分布较均匀,但由于受边缘效应的影响,在处理腔两头的能量分布出现了微量畸变。

2) 当施加相同的激励源处理相同容量的水体时,同轴电极式处理腔中水体吸收的电磁能量远大于缠绕电极式处理腔(约为 100 倍),因此推测同轴电极式处理腔的除垢阻垢效果更好。但缠绕电极式处理腔比同轴电极式处理腔加工更容易,安装与维护更简单,只需在水管外缠绕一定数量的漆包线,无需停产操作,而且节省材料(电极材料),运行安全。

3) 仿真分析结果为处理腔的结构设计提供了理论和仿真基础,但尚需实验来加以验证,这将是下一步需进行的研究工作。

参考文献:

- [1] Potenza L, Ubaldi L, Sanctis R D, et al. Effects of a static magnetic field on cell growth and gene expression in *Escherichia coli*[J]. *Mutation Research*, 2004, 561(1/2):53-62.
- [2] 熊兰, 蒋飏, 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.
- [3] Botello-Zubiate M E, Alvarez A, Martinez-Villafane 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.

- [4] Shelver W L, Kamp L M, Church J L, et al. Measurement of triclosan in water using a magnetic particle enzyme immunoassay [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55(10): 3758-3763.
- [5] 王佩琼. 高频电磁场防垢技术在循环水中的应用机理初探[J]. *电力建设*, 2001, 22(9):43-45.
Wang Peiqiong. Primary Inquire into Application Mechanism of High-frequency Electromagnetic Field Antiscaling Technique in Circulating Water System[J]. *Electric Power Construction*, 2001, 22(9):43-45.
- [6] 员建, 崔玉川, 侯治. 电子水处理器控垢机理探讨[J]. *太原理工大学学报*, 1999, 30(4):385-388.
YUAN Jian, CUI Yuchuan, HOU Zhi. Study on mechanics of scale control of electron water treatment device [J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 1999, 30(4):385-388.
- [7] Toledo E J L, Ramalho T C, Magriotis Z M. Influence of magnetic field on physical-chemical properties of the liquid water: Insights from experimental and theoretical models[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2008, 888(1/2/3):409-415.
- [8] 柴天禹. 高频电场处理水的试验研究[J]. *水处理技术*, 1997, 23(4):222-225.
CHAI Tianyu. Study on water treatment test by high-frequency electric field [J]. *Technology of Water treatment*, 1997, 23(4):222-225.
- [9] Otsuka I, Ozeki S. Does magnetic treatment of water change its properties[J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2006, 110(4):1509-1512.
- [10] 赵博. Ansoft 12 在工程电磁场中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2010.
- [11] 周克定, 张肃文, 董天临, 等. 电磁场与电磁波[M]. 北京:机械工业出版社, 2000.
- [12] 黄文力, 孙广生, 严萍, 等. 同轴电极内电极直径变化的边缘效应仿真研究[J]. *电工技术学报*, 2006, 21(4): 117-121.
HUANG Wenli, SUN Guangsheng, YAN Pin, et al. Simulation of brim-effects of coaxial electrode varying with the diameter of internal electrode[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2006, 21(4): 117-121.
- [13] 李家辉, 魏新劳, 张春旭. 不同电极结构处理腔下的脉冲电场灭菌对比[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2010, 15(2):9-13.
LI Jiahui, WEI Xinlao, ZHANG Chunxu. Comparison of bacteria inactivation by PEF in treatment chamber with different electrodes treatment chambers[J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2010, 15(2):9-13.