

超声与静电场协同作用对水电导率的影响

陈维楚¹, 杨日福¹, 丘泰球²

(1. 华南理工大学理学院, 广州 510640; 2. 华南理工大学轻工与食品学院, 广州 510640)

摘要: 超声和静电场的协同作用对水的电导率产生明显的影响。首先通过单独的超声和静电场作用, 研究了其对水电导率的影响, 并通过改变超声和静电场的强度, 发现在一定范围内, 随着超声功率的增大, 水电导率随时间逐渐提高, 而单独的静电场对水的电导率没有明显影响。最后, 通过超声和电场的协同作用, 发现水的电导率相对其单独作用有了明显的提高, 并且, 随着超声电功率和静电场强度的增大, 水的电导率提高明显。

关键词: 超声; 静电场; 协同作用; 电导率

中图分类号: O426.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2011)-05-0422-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2011.05.010

The co-effect of ultrasound and electrostatic field on the electrical conductivity of water

CHEN Wei-chu¹, YANG Ri-fu¹, QIU Tai-qiu²

(1. College of Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. College of Light Industry and Food Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The combined irradiation of ultrasound and electrostatic field has obvious influence on the electrical conductivity of aqueous solution. The effects of the independent action of ultrasound and electrostatic field on the electrical conductivity of aqueous solution are firstly studied. Through changing their intensity, it is seen that within a specific limit, the electrical conductivity of aqueous solution gradually increases with enhancing ultrasonic power, but no obvious effect of the electrostatic field is found. However, under the combined irradiation of ultrasound and electrostatic field, more significant influence relative to independence function appears, moreover, the greater the ultrasonic power and electrostatic field strength enhance, the more obvious increase the electrical conductivity of aqueous solution has.

Key words: ultrasound; electrostatic field; synergy; electrical conductivity of water

0 引言

当超声波作用于溶液时, 能有效地改善和强化溶液的物理化学过程, 如溶液的电导率、表面张力和粘度等等^[1], 而溶液的这些性质对其产额、利用率及其在实际生活和生产中起到了重要作用^[2]。超声与媒质的相互作用可归结于热机制和非热机制, 非热机制中又可以分为机械(或力学)机制和空化机制^[3], 因此, 超声效应也可相应地分为热效应、机械效应和空化效应。

通常情况下, 氮气的化学性质很不活泼, 不能与氧气发生反应, 但在超声空化所形成的高温高压等极端条件下, 氮气将与溶解在水中的氧气发生反应生成一氧化氮, 并进一步氧化生成二氧化氮, 二

氧化氮与水作用可生成硝酸和亚硝酸, 从而使水的电导率增加。由此可知, 电导率的变化间接地反映了空化效应的产额^[4,5], 通过测量超声辐照的水样品的电导率, 即可方便地研究声空化规律^[6]。

关于超声对溶液电导率的影响已经有了较多的研究, 对于影响溶液电导率的超声机理看法比较统一, 均认为其主要受超声波的强度及其空化机制的影响, 而空化效应所产生的高温高压、微射流和冲击波等是溶液性质(如电导率、粘度和张力等)变化的主要原因。但是, 对于电导率随超声功率及其作用时间的变化关系却存在一定的分歧。王成会等通过实验发现弱电解质溶液的电导率随超声功率的增大先变小后变大, 在 800 W 左右达到最低值, 且在一定功率超声波作用下, 有杂质的水溶液电导率几乎不随时间变化^[7]; 薛娟琴等通过对 NaCl 和 Na₂CO₃ 溶液的研究则发现, 超声作用前 10 min, 溶液的电导率变化较快, 此后电导率缓慢增大^[8]; 胡松青等通过对 NaCO₃ 和 NaHCO₃ 的研究发现适宜的超声波可以在一定程度上长期改变溶液的电导率,

收稿日期: 2010-09-02; 修回日期: 2010-12-09

基金项目: 广东省教育部产学研结合项目(2009A090100041)

作者简介: 陈维楚(1986—), 男, 硕士, 研究方向为超声技术及其应用。

通讯作者: 杨日福, E-mail: yangrifu@scut.edu.cn

使电导率随超声作用时间的延长而增大, 并且在一定范围内, 较高频率和功率的超声对电导率的影响更大^[1]。而冯若等研究了亚沸水和去离子水中电导率随声强的变化关系^[6], 并研究了低频超声作用下水电导率随声功率和声辐照时间的变化关系^[4]。针对上述研究结果, 本文将通过实验进一步验证超声波作用于溶液时电导率随声功率和时间的变化关系, 并提出了超声协同静电场作用提高水电导率的新方法。目前, 关于超声与静电场的协同作用的研究还极少, 有文献指出, 直流电场将对超声信号的振幅产生显著影响^[9]。本文通过研究超声协同静电场对水电导率的变化规律, 得出对提高水电导率即声化学产额具有参考价值的数据和结论。

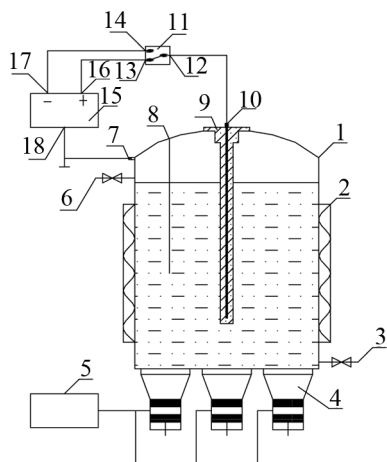
1 实验仪器及方法

1.1 实验装置

超声协同静电场提取装置如图 1 所示, 罐底面换能器排列示意如图 2 所示。提取罐是一种清洗槽式圆柱体声反应器, 在提取罐内设置中央电极, 中央电极为实心型导体, 插入绝缘体内部, 绝缘体固定在提取罐盖中央, 通过绝缘体与金属侧壁和溶剂绝缘。静电发生器正、负极通过控制开关与中央电极进行连接, 静电发生器的接地端与提取罐的侧壁进行连接。静电场的电压为 $-50\sim 50\text{kV}$, 超声频率为 20kHz , 声强为 $0.2\sim 1\text{W}/\text{cm}^2$ 。电导率测量采用上海康仪仪器有限公司 DDs-320 型精密电导率仪。

1.2 实验方法

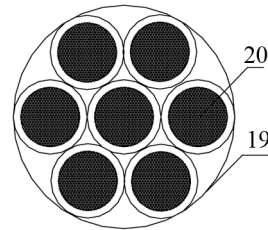
将自来水装满超声协同静电场提取罐, 超声发



1: 提取罐; 2: 加热套; 3: 排液口; 4: 超声换能器; 5: 超声发生器; 6: 进液口; 7: 外壳接地端; 8: 液位开关; 9: 绝缘体; 10: 中央电极; 11: 控制开关; 12: 静触点; 13: 动触常闭点; 14: 动触常开点; 15: 静电发生器; 16: 正电压输出端; 17: 负电压输出端; 18: 地输出端

图 1 超声协同静电场提取装置示意图

Fig.1 Collecting device of ultrasound with electrostatic field



19, 提取罐底面; 20, 换能器

图 2 提取罐底面换能器排列示意图

Fig.2 Arrangement of transducer in bottom

生器的频率为 20kHz , 检测不同超声功率、不同静电场强度及其正交作用下电导率随时间的变化。每组数据测量三次, 自来水的初始温度均为 32℃ 。

1.2.1 不同超声电功率对水电导率的影响

选取 100W 、 150W 、 200W 和 250W 四种超声电功率分别对水作用 90min , 观察水电导率随作用时间的变化关系。

1.2.2 静电场对水电导率的影响

选取 10kV 和 20kV 两种静电电压分别对水作用 90min , 观察水电导率随作用时间的变化关系。

1.2.3 超声与静电场正交作用对于水电导率的影响

用上述四种超声电功率和两种静电电压正交作用于水 90min , 观察水电导率随作用时间的变化关系。

2 实验结果与讨论

2.1 不同超声电功率对水电导率的影响

图 3 是采用 100W 、 150W 、 200W 、 250W 四种超声电功率作用下, 电导率随时间的变化关系。图中曲线上“ I ”为标准差范围, 下同。由图可以见, 电导率随超声作用时间的增加而提高, 而且超声功率越大, 电导率的变化速率越快。在 100W 功率作用下, 水温度基本不变(前后温差不超过 1℃), 可以忽略热效应的影响, 另据文献^[10], 机械效应对溶液主体没有明显影响, 因此溶液电导率的升高主要受超声空化机制的影响。超声空化分为稳态空化和瞬态空化, 通过理论估算和实际的声化学研究已表明, 当液体媒质中发生瞬态空化时, 在空化泡的内部和周围将产生高温高压, 并伴有速度极快的微射流(非均相)或强大的冲击波(均相), 其温度可达 5000K 以上, 温度变化率高达 $10^9\text{K}/\text{s}$, 压力可高达数百乃至上千个大气压。这就为在一般条件下难以实现或不可能实现的化学反应, 提供了一种新的非常特殊的物理环境, 开启了新的化学反应通道。

当 100W 超声作用于水时, 瞬态空化产生的高

温使水裂解为·OH和·H自由基,而高压释放所产生的微射流会破坏水中的 HCO_3^- 、 H^+ 和其它一些矿物质等所形成的水合离子,从而使离子数目增加。另外,超声波作用于水所产生的微扰效应和界面效应等会导致离子的迁移速度加快,从而提高了水的导电能力,电导率随之提高。

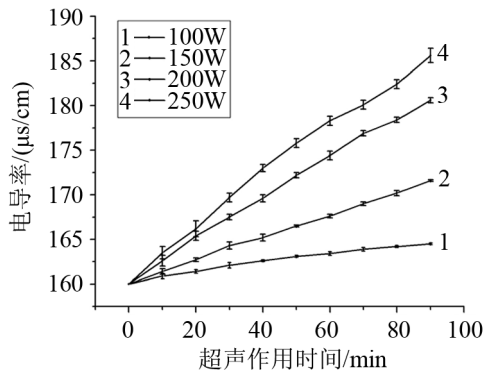


图3 不同功率超声作用下水电导率变化图

Fig.3 The electrical conductivity of water under the action of ultrasound with different power

在150W、200W和250W超声作用下,水的温度分别升高了 3°C 、 6°C 和 7°C ,因此电导率的升高除了上述影响外,还受到超声热效应的影响,即由于温度的升高,使水中离子的运动速度加快,从而使电导率上升。因此,随着超声功率的增大,水电导率速率的提高受到超声空化效应和热效应两方面的影响。一方面,超声功率的增大将使水中产生更多的空化泡,并且使得空化泡的崩溃时间缩短,崩溃时的最高温度及最大压力增大,从而使瞬态空化增加,溶液电导率的上升速率加快;另一方面,超声功率的增大将使超声热效应增强,水的温度上升加快,水导电率升高。

为了研究单纯的超声机械机制和空化机制对水电导率的影响,在室温(32°C)条件下通过本提取装置加热套进行加热,使水温度上升 3°C 、 5°C 和 6°C ,测量发现水电导率分别上升了 $6.1\mu\text{s}/\text{cm}$ 、 $10.3\mu\text{s}/\text{cm}$ 和 $12.5\mu\text{s}/\text{cm}$,可知超声热效应对水电导率上升存在一定影响,但对比图3可知,空化效应对水电导率提高仍占主导地位,此对比在超声功率相对较低的情况下尤为明显。

2.2 静电场对水电导率的影响

图4是分别采用10kV和20kV静电场作用于水时,其电导率随时间变化的关系。从图中可以看出,单独的静电场对水的电导率影响不大。但据文献[11],气泡在电场作用下将产生明显的形变,表现为沿着电场方向气泡受到拉伸,而平行于电场方向气泡受到压缩,从而造成气泡长径比增大。

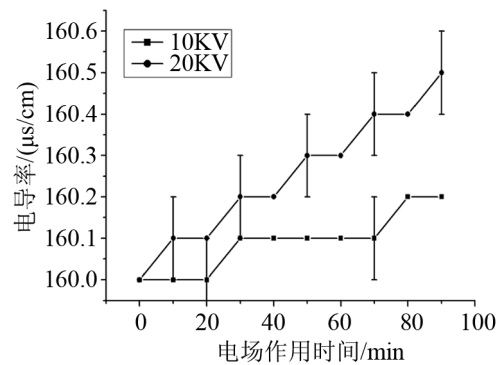


图4 不同静电场作用下水电导率变化图

Fig.4 The electrical conductivity of water under the action of electrostatic field with different intensity

2.2 超声与静电场正交作用对于水电导率的影响

图5~8是采用一定的超声功率与不同静电场正交作用下水电导率随作用时间的变化关系。与图3和图4比较可知,超声与静电场的联合作用比单独运用超声或静电场的情况下,电导率的速率变化均有明显的提高。

由于不同静电压下水温度变化没有太大的差异(不超过 1°C),因此,电导率的提高主要是由于静电场的存在强化了超声的空化效应,使水中的湍动效应、微扰效应和界面效应等有所增强,从而加快

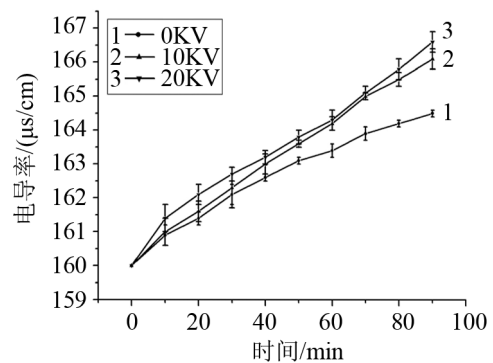


图5 100W超声与不同静电场正交作用下水溶液电导率变化图
Fig.5 The electrical conductivity of water under the action of 100W ultrasound and electrostatic field of different intensity

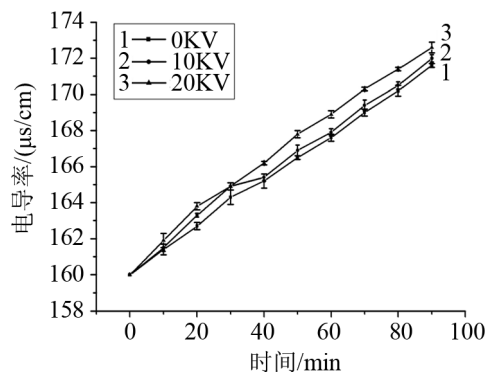


图6 150W超声与不同静电场正交作用下水电导率变化图
Fig.6 The electrical conductivity of water under the action of 150W ultrasound and electrostatic field of different intensity

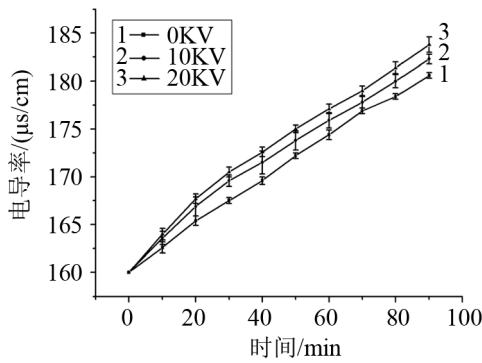


图 7 200W 超声与不同静电场正交作用下水溶液电导率图
Fig.7 The electrical conductivity of water under the action of 200W ultrasound and electrostatic field of different intensity

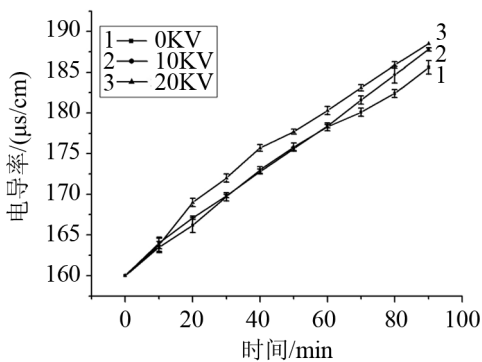


图 8 250W 超声与不同静电场正交作用下水电导率变化图
Fig.8 The electrical conductivity of water under the action of 250W ultrasound and electrostatic field of different intensity

了离子的迁移速度,使水的电导率有所提高。另外,比较图 5~8 可知,随着超声强度和电场强度的增加,电导率的提升速率也加快了,说明提高声场和电场强度可以强化这种正交作用。

由图 4 我们已经得出,单独的静电场对水的空化效应的影响不大,即可以将静电场看做空化效应的一个微扰。据文献[12],由于微扰的存在,发生空化效应的空化泡的共振半径将增大,因此更多的大尺寸空化泡将参与反应,而通常情况下,大气泡只是在声场中作大振幅的振动,即稳态空化,在一定条件下会上浮掉。因此,静电场的存在,使得更多的稳态空化转化为瞬态空化。

比较图 3 和图 4 可知,对于水电导率的提高,静电场相对超声场可看做微扰作用,据文献[12]可知,对于充汽空化泡的崩溃时间,仍满足 Zhoroshev 的表达式:

$$\tau = 0.915 R_m \left(\frac{\rho}{P_m} \right)^{\frac{1}{2}} \left(1 + \frac{P_v}{P_m} \right)$$

空化泡空化后泡内的温度的表达式为:

$$T_{\max} = T_c \left[\frac{P_m (\gamma - 1)}{P_v} \right]$$

式中 P_m 是半径为 R_m 的空化泡开始崩溃(即开始收

缩走向崩溃)那一时刻的液体内部压力。当只有声场作用时, $P_m = P_h + P_a$, P_h 为流体静压力, P_a 为声场压力, $P_a = P_A \sin \omega t$; 当声场与静电场协同作用时,由于静电场的影响, P_m 必定增大,使空化泡崩溃所需的时间变短,从而使空化效率得到提高,同时,空化后空化泡的温度将增大,使空化反应更加剧烈。

水分子是一种强极性分子,它的正负电中心不重合,存在分子电偶极矩,由于静电场的存在,对于水产生微干扰,水中大直径气泡增多,增加了空化效应。另外,静电场作用使空化气泡产生形变,沿场强方向拉伸拉长,使空化泡变成椭圆形,使处于稳态空化核中的一部分转化成瞬态空化,从而增加了空化效应。因此,随着水中空化效应的增加,空化效应所产生的微射流、微声流和冲击波以及伴随的微扰效应、界面效应等,破坏了水的水合离子,使水中带电粒子增多,并加快了带电粒子的迁移速度,使水的导电能力增强,电导率升高。

3 结论

本文在总结超声对电导率分析的理论基础上,对前人的结论进行了验证,并运用超声与静电场的正交作用研究其对水电导率的影响,结论如下:

- (1) 在一定范围内,随着超声功率的增加,空化泡的崩溃时间缩短,瞬态空化增加,同时超声热效应增强,使水的电导率逐步升高。其中,超声的空化效应对水电导率提高起主导地位。
- (2) 单独的静电场对水电导率没有太大影响。
- (3) 超声协同静电场作用时,静电场可使空化泡发生形变,使部分稳态空化核转化成瞬态空化,同时增加水中离子的迁移速度,使水中电导率显著提高。

参 考 文 献

- [1] 胡松青,李琳,郭祀远,等. 功率超声对溶液性质的影响[J]. 应用声学, 2003, 22(1): 26-30.
HU Songqing, LI Lin, GUO Qiyuan, et al. Effect of power ultrasound on some properties of several solutions[J]. Applied Acoustics, 2003, 22(1): 26-30.
- [2] 郭孝武. 用电导率法研究低频超声提取小檗碱成分的产额[J]. 天然产物研究与开发, 2001, 13(5): 57-59.
GUO Xiaowu. Study on the Berberine component yield of low frequency ultrasonic extraction by using specific Conduction[J]. Natural Product Research and Development, 2001, 13(5): 57-59.
- [3] 冯若,李化茂. 声化学及其应用[M]. 合肥:安徽科学技术出版社, 1992, 23-25.
FENG Ruo, LI Huamao. Phonochemistry and application[M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 1992, 23-25.
- [4] 朱昌平,冯若,陈兆华,等. 用声致电化学检测方法研究低频超声

- 的空化效应[J]. 南京大学学报, 1995, 31: 180-192.
ZHU Changping, FENG Ruo, CHEN Zhaohua, et al. Study on the cavitation effects of low frequency ultrasound by electrical method. Journal of Nanjing University, 1995, 31: 180-182.
- [5] 冯若, 黄金兰, 朱昌平, 等. 用声致电化学检测方法研究脉冲空化峰. 南京大学学报(自然科学), 1995, 31(2): 194-196.
FENG Ruo, HUANG Jinlan, ZHU Changping, et al. Study of the "pulse cavitation peak" by sonoelectrochemical determination[J]. Journal of Nanjing University(Natural Science), 1995, 31(2): 194-196.
- [6] 冯若, 赵逸云, 陈兆华, 等. 声化学主动力-声空化及其检测技术[J]. 声学技术, 1994, 13(2): 56-61.
FENG Ruo, ZHAO Yiyun, CHEN Zhaohua, et al. Sound cavitation-motivation of sonochemical reaction and its detection technique[J]. Technical Acoustics, 1994, 13(2): 56-61.
- [7] 王成会, 林书玉. 超声空化效应对溶液电导率的影响[J]. 声学技术, 2006, 25(4): 309-312.
WANG Chenghui, LIN Shuyu. Impact of ultrasonic cavitation upon electrical conductivity of solution[J]. Technical Acoustics, 2006, 25(4), 309-312.
- [8] 薛娟琴, 吴川眉. 超声波对溶液性质的影响[J]. 金属世界, 2008 (01): 25-28.
XUE Juanqin, WU Chuanmei. Influence of ultrasonic wave on the properties of several solution[J]. Metallic World, 2008, (01): 25-28.
- [9] 彭耀, 陈凤, 宋耀祖, 等. 电场作用下单气泡行为的数值模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(2): 294-297.
PENG Yao, CHEN Feng, SONG Yaozu, et al. Numerical simulations of single bubble behavior in DC electric fields[J]. J T singhua Univ(Sci & Tech), 2008, 48(2): 294-297.
- [10] Sobotka Jerzy, Longitudinal ultrasonic waves in DC electric field[J]. Acta Geophysica, 2009, 57(2): 247-256.
- [11] Venault L, Moisy Ph, Nikitenko S I, et al. Kinetics of nitrous acid formation in nitric acid solution under the effect of power ultrasound[J]. Ultrasonic Sonochemistry, 1997, 4(2): 195-204.
- [12] 刘岩. 增加超声空化效应的一个途径——给空化声场一个随机微扰[J]. 应用声学, 1996, 16(2): 43-45.
LIU Yan. A way to increase ultrasonic cavitation effect--give cavitation ultrasonic a stochastic infinitesimal disturbance[J]. Applied Acoustics, 1996, 16(2): 43-45.

《声学技术》成为中国科学引文数据库 2011-2012 年来源期刊

中国科学引文数据库自 1989 年建库以来, 经过 20 多年的发展, 中国科学引文数据库成为科研绩效评估、科研进展发现的重要工具。目前中国科学引文数据库共收录我国出版的 1100 多种学术期刊, 覆盖自然科学、医学、工程技术等学科领域。

《声学技术》是一本反映声学科技工作者学术研究和工程应用进展的学术刊物, 近几年在主办单位的直接领导下, 编委会专家及编辑部全体同志与时俱进、开拓创新和努力拼搏, 使期刊取得了较大进步。期刊影响因子、被引频次显著增长, 来稿质量、数量逐年上升, 期刊由季刊改为双月刊, 订购用户分布 10 多个国家和地区。目前《声学技术》已成为我国声学界有重要影响的学术期刊, 为相关领域的科研发展和学术交流做出了重要的贡献。

《声学技术》自 2007 年起成为中国科学引文数据库的来源期刊, 经过新一轮的遴选, 《声学技术》为中国科学引文数据库的 2011-2012 年来源期刊。