

声场与电场作用下空化泡的动力学特性*

沈壮志[†] 吴胜举

(陕西师范大学应用声学研究所, 陕西省物理研究所, 陕西省超声学重点实验室, 西安 710062)

(2011年9月12日收到; 2011年11月3日收到修改稿)

以液体为工作介质, 利用空化泡的 RP 控制方程, 模拟分析了无量纲化的电场频率、场强的幅值以及无量纲化的声波频率、声压幅值的变化对空化泡运动特性的影响. 结果表明: 声场和电场联合作用时, 空化泡运动处于混沌区域范围远高于两者单独作用下空化泡的混沌区域范围. 这不仅对声空化的进一步研究具有重要的理论意义, 而且对于提高和改进空化降解有机污染物的技术也具有指导意义.

关键词: 声场, 电场, 空化, 分岔

PACS: 43.35.+d, 47.55.dd, 02.30.Oz, 05.45.-a

1 引言

随着工业的高速发展, 工业和生活污水排放量也随之增大, 同时进入水体的有机物的数量和种类都在急剧增加, 造成了水资源的严重污染, 对于那些含有高毒性且难降解有机物的废水, 传统的生物处理已不能满足处理要求, 不得不考虑其他的处理方法. 高级氧化技术是 20 世纪 80 年代发展起来的一种用于处理难降解有机污染物的新技术^[1]. 一般说来, 能够产生 $\cdot\text{OH}$ 的工艺都可以归入高级氧化工艺的范畴, 如微波工艺、超声波氧化工艺、臭氧氧化工艺、电化学工艺等等. 针对高浓度、多组分、难降解的工业废水, 单独使用上述高级氧化工艺时, 产生的 $\cdot\text{OH}$ 的浓度一般不高, 更有效的方法是将这些单独工艺组合起来联合使用, 以产生高浓度的 $\cdot\text{OH}$ 来加速有机污染物的分解速率^[2]. 超声波与电化学氧化工艺的组合就是其中的典型代表.

卞华松等^[3]研究了水溶液中硝基苯的超声微电场降解. 结果表明, 超声与微电场的耦合作用大大提高了硝基苯的降解效率, 在电压 10 V

条件下, 协同作用的降解速率比简单加和作用的速率高 1 倍以上, 经过 30min 协同处理后可以获得 93.8% 的去除率. 刘静等^[4]进行了超声电化学处理印染废水的实验研究, 结果表明, 超声波与微电场的协同作用大大提高了脱色率, 在最佳条件下处理 60 min, 色度去除率可达 96.0%. Trabelsi 等^[5]采用高频 500kHz 的声波对苯酚进行电化学降解, 10min 苯酚的降解率高达 95%. De Lima Leite 等^[6]利用 Pt 电极对 2,4 二羟基安息香酸进行超声联合降解, 结果表明, 该溶液的降解率很高. 对上述实验结果的解释普遍认为: 单纯的电解法处理有机废水, 有机物在电极上被氧化或还原时, 会在电极表面形成一层聚合膜, 导致电极活性下降甚至失活. 而超声波的空化作用有利于及时清洗电极表面, 提高活性电极的表面积, 还可以驱除电极表面气泡, 保持电流顺利通过电极, 提高阳离子至阴极的移动速度, 从而加强了有机物的降解能力. 这种解释只是依据实验结果, 还缺乏理论依据.

现已知道, 超声波处理污水, 利用的是超声空化效应, 污水处理效果是由声场中空化泡的运动特性所确定的, 因此研究气泡的振荡特性, 是研究

* 国家自然科学基金(批准号: 11174191, 11074158)和陕西省自然科学基金(批准号: 2011JM1002)资助的课题.

[†] E-mail: szz6@163.com

气泡是否空化的一个非常重要因素. 董伟等^[7,8]研究认为, 如果对有气泡的液体中施加电场, 则电场的存在使气泡的运动行为发生变化, 同时气泡的存在也使周围的电场分布发生变化, 尤其是大气泡(半径为 1 mm)的存在更是这样. 本文从空化泡的控制方程着手, 探讨超声和电化学氧化工艺联合提高声电空化降解有机污染物的途径和方法.

2 数学模型与数值方法

2.1 空化泡动力学方程

空化泡在声、电场作用下会发生膨胀、收缩、崩溃等现象, 同时伴随有热交换等物理现象、化学变化的发生, 为了研究声场和电场中空化泡动力学特性, 模型采用以下假设: 1) 液体介质内和空化泡表面没有自由电荷; 2) 液体介质和空化泡内部的介电常数都是均匀的; 3) 不计入空化泡运动时向液体辐射声波而存在的辐射阻尼项; 4) 不考虑热交换、液体蒸汽的相变、气体质量交换及泡内的化学反应. 声场和电场联合作用下的空化泡的控制方程采用简单的 Rayleigh-Plesset 方程^[9]:

$$R^* \ddot{R}^* + \frac{3}{2} (\dot{R}^*)^2 = \frac{1}{\rho} \left[-P_\infty(t^*) + P_v + P_g \times \left(\frac{R_0^*}{R^*} \right)^{3k} \right] - \frac{2\gamma}{\rho R^*} - \frac{4\mu}{\rho} \frac{\dot{R}^*}{R^*} - \frac{3(1-q)}{2(2+q)} \frac{\varepsilon}{\rho} [E_0^*(t^*)]^2, \quad (1)$$

其中各表达式意义如下:

$$P_g = \frac{2\gamma}{R_0^*} + P_0 - P_v + \varepsilon \frac{3(1-q)}{2(2+q)} \overline{E_0}, \quad (2)$$

$$P_\infty(t^*) = P_0 - P_{US}, \quad (3)$$

$$q = \frac{\varepsilon_{in}}{\varepsilon}, \quad (4)$$

R_0^* 为空化泡的初始半径, R^* 为空化泡任意时刻 (t^*) 的半径, \dot{R}^* 为空化泡半径的变化率, \ddot{R}^* 为空化泡脉动速度的变化率, P_0 为环境压力, $P_\infty(t^*)$ 为无穷远处的压力, P_v 为液体在某温度下的蒸汽压, P_g 为泡内的气体压力, ρ 为液体的密度, γ 为液体的表面张力, μ 为液体的黏度, $E_0^*(t^*)$ 为电场强度

随时间的变化, $\overline{E_0}$ 为平均电场强度, ε 为液体的介电常数, ε_{in} 为泡内气体的介电常数. k 为气体绝热指数.

为了便于分析, 将 (1) 式归一化处理, 设其特征值^[9,10]

$$l_c = R_0^*, \quad t_c = \left(\frac{\rho(R_0^*)^3}{\gamma} \right)^{1/2},$$

$$P_c = \frac{\gamma}{R_0^*}, \quad E_c = \overline{E_0}; \quad (5)$$

$$R = \frac{R^*}{l_c}, \quad t = \frac{t^*}{t_c},$$

$$P = \frac{P^*}{P_c}, \quad E_0(t) = \frac{E_0^*(t^*)}{E_c}. \quad (6)$$

将 (5) 式经过微分处理代入 (1) 式得到

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \Delta P + \frac{1}{R^{3k}} \left[2 - \overline{\Delta P} + \frac{3(1-q)}{2(2+q)} W \right] - \frac{2}{R} - \frac{4}{Re} \frac{\dot{R}}{R} - \frac{3(1-q)}{2(2+q)} W [E_0(t)]^2, \quad (7)$$

(7) 式是无量纲化的空化泡在电场和声场中的运动方程, 其中, $\Delta p = \frac{R_0^*}{\gamma} (P_v - P_\infty(t^*))$ 为无量纲 (无因次) 的压力差, $\overline{\Delta P} = \frac{R_0^*}{\gamma} (P_v - P_0)$, $Re = \frac{(\rho R_0^* \gamma)^{1/2}}{\mu}$ 为雷诺数, $W = \frac{\varepsilon R_0^* \overline{E_0}^2}{\gamma}$ 为电韦伯数. $E_0(t)$ 为随时间变化的无量纲化的电场强度.

2.2 数值方法

在具有周期性外部能量场的作用下, 气泡的动力学行为表现的是非线性运动, 这种非线性方程的解在经过初始阶段的暂态过程后, 即达到一稳定的形式^[11]. 为了分析这一稳定形式, 本文采用非线性运动的分岔图来研究气泡在电场和声场作用下的运动特性. 为此, 对无量纲化的方程 (7) 采用 4—5 阶龙格—库塔法进行数值模拟, 研究各操作参数对空化泡运动特性的影响. 初始条件: $t = 0, R_0 = 1, dR/dt = 0$.

3 结果与讨论

3.1 电场作用下空化泡的运动特性

气泡非线性运动是在具有周期性外部能量场作用下的动力学行为. 假设无量纲化的电场按 $E_0(t) = 1 + E \cos(\omega_1 t)$ 规律变化, 其中 E 为无量纲化的电场强度, ω_1 为无量纲化的电场频率, 得到空化泡的运动特性如图 1 所示.

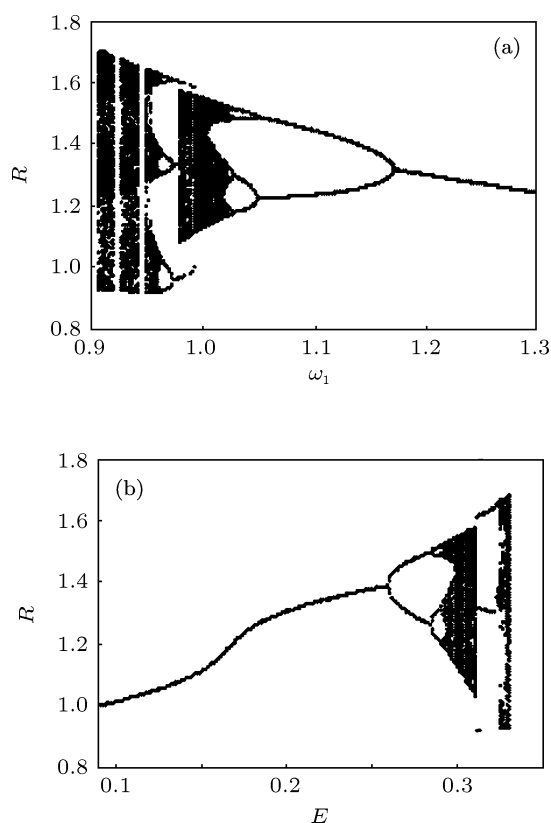


图 1 电场作用下空化泡运动特性 (a) $E = 0.3$ (b) $\omega_1 = 1.0$

图 1(a) 是在 $E = 0.3$ 情况下的空化泡的半径随电场频率变化的特性图, 图中表明空化泡的运动状态呈现的是一个倒分岔特性. 作者在文献 [12] 中详细分析了空化泡的运动特性对空化处理效果的影响, 指出当空化泡的运动状态处于周期一 (表明空化泡振荡每隔一个外激励周期重复出现一次, 然后周而复始) 特性时, 空化不可能发生; 当空化泡运动处于周期二 (空化泡振荡在两个外激励周期内才恢复原状, 然后周而复始, 其他状态依此类推) 特性时, 不剧烈的空化开始发生了; 一直到空

化泡运动处于混沌特性时, 强烈的空化已经发生了. 因此, 在利用空化效应对有机污水进行处理时, 空化泡的运动状态必须处于混沌特性. 图 1(a) 显示, $\omega_1 > 1.173$ 时, 空化泡处于周期一运动状态; 当 $1.05 < \omega_1 < 1.173$ 时, 空化泡处于周期二运动状态; $1.027 < \omega_1 < 1.05$ 时, 空化泡处于周期四运动状态; $1.022 < \omega_1 < 1.027$ 时, 空化泡处于周期八运动状态; $0.978 < \omega_1 < 1.022$ 时, 空化泡处于混沌运动状态; 而当 $0.972 < \omega_1 < 0.978$ 时, 空化泡处于周期三运动状态, 当 $0.962 < \omega_1 < 0.972$ 时, 空化泡处于周期六运动状态; 随后当 $0.9 < \omega_1 < 0.962$ 时, 空化泡又处于混沌运动状态; 显然, 空化泡的运动特性呈现倍周期分岔特征 [13]. 从整个空化泡运动状态的特性图上可知, 空化泡处于混沌状态下的电场频率变化范围很窄.

图 1(b) 是在 $\omega_1 = 1.0$ 情况下, 空化泡的半径随电场强度变化的特性图, 图中表明空化泡的运动状态呈现的是一个正分岔特性. 从图 1(b) 上可知, 当 $E < 0.25$ 时, 空化泡运动处于周期一运动状态; 当 $0.259 < E < 0.284$ 时, 空化泡运动处于周期二状态; 当 $0.284 < E < 0.29$ 时, 空化泡运动处于周期四状态; 当 $0.29 < E < 0.293$ 时, 空化泡运动处于周期八状态; 当 $0.293 < E < 0.311$ 时, 空化泡运动处于混沌状态; 进一步提高电场强度的幅值时, 空化泡的运动呈现出周期二运动特性; 而当 $0.324 < E < 0.331$ 时, 空化泡运动处于混沌状态; 从整个空化泡运动状态的特性图上, 可知, 空化泡处于混沌状态下的电场强度的变化范围同样也是很窄.

由此可见, 如果单纯通过电场的途径来提高空化对有机污水的处理, 则由于存在电场强度幅值和频率可调范围狭窄, 处理效果很难保证.

3.2 声场对空化泡运动特性的影响

根据 (7) 式可知, 声场强度与 ΔP 有关, 假设声场强度按 $\Delta P = \overline{\Delta P} \times (1 + p \sin(\omega_2 \times t))$ 规律变化, p 为无量纲化的声压幅值, ω_2 为无量纲化的声波频率值. 得到空化泡在声场作用下的运动特性图 (如图 2 所示). 图 2(a) 是在 $\overline{\Delta P} = 1.5$, $p = 0.155$ 参数下空化泡的半径随声波频率变化的特性图, 图

中表明空化泡的运动状态也呈现出一个倒分岔特性. 图 2(a) 显示, $\omega_2 > 1.326$ 时, 空化泡处于周期一运动状态; 当 $1.203 < \omega_2 < 1.326$ 时, 空化泡处于周期二运动状态; 当 $1.184 < \omega_2 < 1.203$ 时, 空化泡处于周期四运动状态; 当 $1.176 < \omega_2 < 1.184$ 时, 空化泡处于周期八运动状态; 而当 $1.013 < \omega_2 < 1.176$ 时, 空化泡处于混沌运动状态; 显然处于混沌运动状态的频率范围也是很窄的.

图 2(b) 是 $\omega_2 = 1.155$ 条件下, 空化泡的运动状态图. 从图 2(b) 可知, 空化泡的运动状态随无量纲化的声压幅值的增加呈现倍频分岔特性. 即当 $p < 0.1442$ 时, 气泡的运动特性呈现周期一运动状态; 当 $0.1442 < p < 0.1507$ 时, 气泡的运动特性呈现周期二运动状态; 当 $0.1507 < p < 0.1523$ 时, 气泡的运动特性呈现周期四运动状态; 当 $0.1523 < p < 0.1527$ 时, 气泡的运动特性呈现周期八运动状态; 当 $0.1527 < p < 0.1562$ 时, 气泡的运动特性呈现混沌运动状态, 显然气泡处于混沌运动状态的范围仍然很狭窄. 因此通过对声场强度幅值变化来确保空化泡运动处于混沌状态, 同样也是很难做到的.

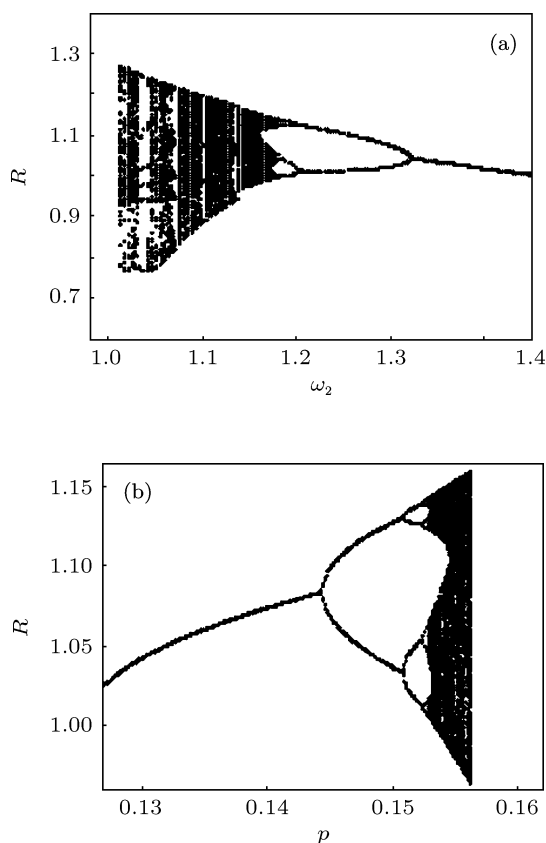


图 2 声场作用下空化泡的运动特性图 (a) $p = 0.155$; (b) $\omega_2 = 1.155$

由此可见, 不论是电场还是声场, 如果它们单独作用于有机污水处理, 存在着频率和强度幅值可调空间有限, 很难做到使空化泡运动处于混沌状态, 因而处理效果也就难以达到较好的水平.

3.3 声场与电场的联合作用对气泡运动特性的影响

图 3 是空化泡在电场和声场联合作用下的运动特性图. 图 3(a) 是 $E = 0.3$, $p = 0.155$, $\omega_2 = 1.155$ 的参数下, 空化泡的运动状态随电场无量纲化的频率变化特性图. 从该图中近似可知, 当 $\omega_1 > 3.11$ 时, 空化泡的运动在很大的范围内 (图中只截取其中一部分) 都处于混沌运动状态, 虽然在 ω_1 近似为 6.0 处出现分岔, 但空化泡的行为仍然表现为混沌运动特性. 对比图 1(a) 可知, 声场的存在, 可以使电场的频率在较大的范围内, 满足空化泡始终处于混沌运动状态.

由图 3(b) 可知, 在声场参数同样的情况下, 当电场无量纲频率为 $\omega_1 = 4.0$, $E < 0.015$ 时, 气泡运动处于周期四状态; 当 $0.015 < E < 0.032$ 时, 气泡运动处于周期八状态; 随后在 $0.032 < E < 0.206$ 时, 气泡运动处于混沌状态. 随后气泡在 $0.206 < E < 0.246$ 时, 处于周期三和周期六状态; 当 $0.246 < E < 0.684$ 时, 气泡运动又处于混沌状态. 对比图 1(b) 可知, 声场的存在导致电场的幅值在较大的范围内变动时, 空化泡运动始终处于混沌运动状态.

由图 3(c) 可知, 在电场参数 $E = 0.3$, $\omega_1 = 4.0$ 以及声压幅值为 $p = 0.155$ 时, 声波频率 ($\omega_2 > 1.5$) 在很大范围内都可以使空化泡运动处于混沌状态 (图中只截取了一部分), 它表明电场的存在, 有利于提高空化泡的运动处于混沌状态的声波的频率范围.

由图 3(d) 可知, 在电场参数 $E = 0.3$, $\omega_1 = 4.0$ 以及声频率 $\omega_2 = 1.155$ 时, 当声压 $p < 0.375$ 时, 气泡运动处于周期一状态; 当 $0.375 < p < 0.376$ 时, 气泡运动处于周期四状态; 随后在 $0.376 < p < 0.555$ 时, 空化泡运动处于混沌状态. 虽然在上述参数下, 空化泡运动的混沌范围并不宽广, 但对于图 2(b) 来说, 混沌区域范围扩大了 10 倍多左右.

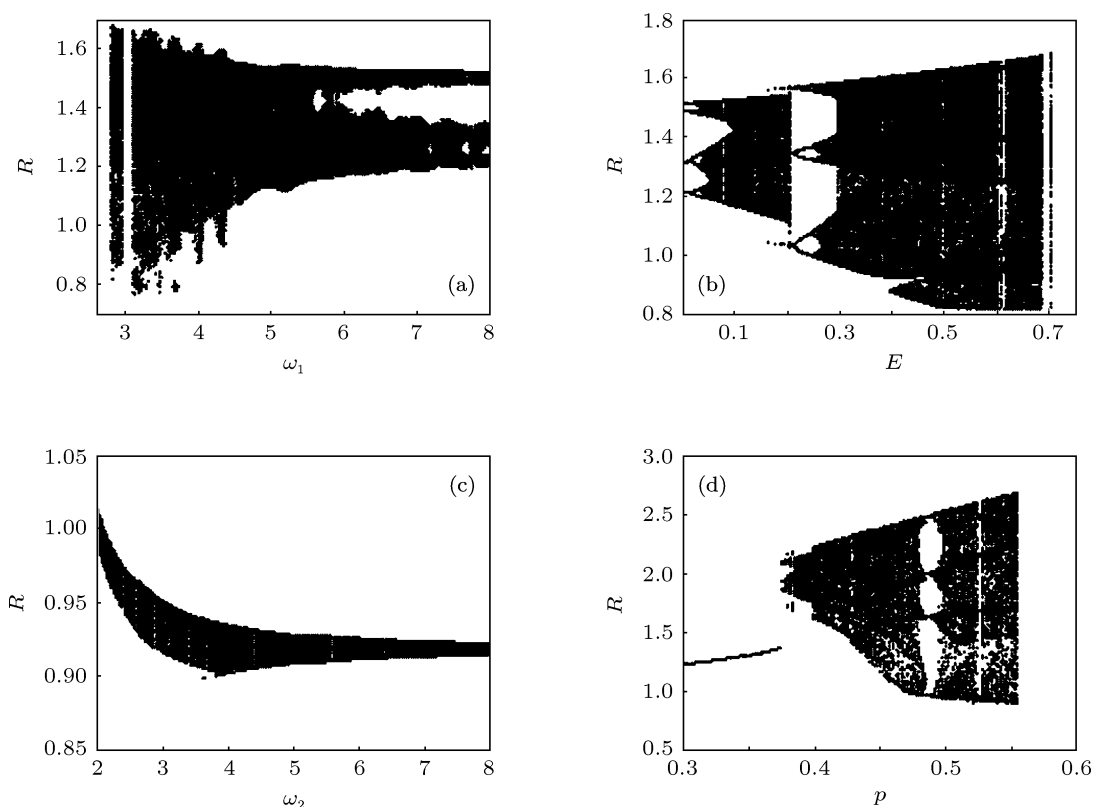


图3 电场和声场的联合对气泡运动特性的影响 (a) $E = 0.3, p = 0.155, \omega_2 = 1.155$; (b) $\omega_1 = 4.0, p = 0.155, \omega_2 = 1.155$; (c) $E = 0.3, \omega_1 = 4.0, p = 0.155$; (d) $E = 0.3, \omega_1 = 4.0, \omega_2 = 1.155$

4 结论

本文以液体为介质,对电场、声场作用下空化泡的动力学特性进行了研究.研究表明:电场和声场单独作用于空化泡时,频率的作用使空化泡的运动处于倒分岔特性,而电场和声场强度使空化泡处于正分岔特性,且它们都存在空化泡运动的混沌范

围狭窄的弊端,不利于对控制参数的调节,难以满足空化现象的发生.当电场和声场联合作用时,空化泡始终处于混沌运动状态的频率范围,不论是电场参数还是声场参数,都很宽广,这有利于控制参数的调节;而使空化泡始终处于混沌运动状态的场强的幅值范围,相对于电场和声场单独作用来说,虽然也得到较大的提高,但仍然有限,应加以注意.

- [1] Zhang X, Wang Q S 2009 *Technol. Water Treat.* **35** 18 (in Chinese) [张旋,王启山 2009 水处理技术 **35** 18]
- [2] Tang J, Zhang H, Wang Y 2006 *Cleaning World* **22** 18 (in Chinese) [唐杰,张辉,王耀 2006 清洗世界 **22** 18]
- [3] Bian H S, Zhang D N, Zhao Y X, Liu J, Jin Z Z, Hua B 2002 *Environ. Chem.* **21** 264 (in Chinese) [卞华松,张大年,赵一先,刘静,金至清,华彬 2002 环境化学 **21** 264]
- [4] Liu J, Xie Y, Bian H S 2001 *Shanghai Environ. Sci.* **20** 151 (in Chinese) [刘静,谢英,卞华松 2001 上海环境科学 **20** 151]
- [5] Trabelsi F, Ait-Lyazidi H, Ratsimba B 1996 *Chem. Eng. Sci.* **51** 1857
- [6] De Lima Leite R H, Cognet P, Wilhelm A M, Delmas H 2002 *Chem. Eng. Sci.* **57** 767
- [7] Dong W, Li R Y, Yu H L, Huang X 2004 *J. Eng. Thermophys.* **25** 439 (in Chinese) [董伟,李瑞阳,郁鸿凌,黄焯 2004 工程热物理学报 **25** 439]
- [8] Dong W, Li R Y, Yu H L 2004 *Energy Res. Infor.* **20** 110 (in Chinese) [董伟,李瑞阳,郁鸿凌 2004 能源研究与信息 **20** 110]
- [9] Oh J M, Kim P J, Kang I S 2001 *Phys. Fluids* **13** 2820
- [10] Spelt P D M, Matar O K 2006 *Phys. Rev. E* **74** 046301
- [11] Liu B Z 1984 *Nonlinear Dynamic and Chaotic Foundation* (Changchun: Northeast Normal University Press) p19 (In Chinese)

- [刘秉正 1984 非线性动力学与混沌基础 (长春: 东北师范大学出版社) 第 19 页]
- [12] Shen Z Z, Lin S Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 104302 (in Chinese)
[沈壮志, 林书玉 2011 物理学报 **60** 104302]
- [13] Qian Z W 2009 *Non-Linear Acoustics* 2nd Ed. (Beijing: Science Press) (in Chinese) p316 [钱祖文 2009 非线性声学 第二版 (北京: 科学出版社) 第 316 页]

Dynamic behavior of a cavitation bubble in acoustic field and electric field*

Shen Zhuang-Zhi[†] Wu Sheng-Ju

(*Institute of Applied Acoustics, Shaanxi Normal University, Shaanxi Institute of Physics, Key Laboratory of Ultrasonics of Shaanxi Province, Xi'an 710062, China*)

(Received 12 September 2011; revised manuscript received 3 November 2011)

Abstract

The dynamics of a cavitation bubble under acoustic field and an electric field is studied by regarding liquid as a working medium. The effects of the dimensionless frequency and strength of acoustic field and electric field on cavitation bubble dynamical behaviors by Rayleigh-Plesset equation are numerically investigated. The results show that when acoustic field and electric field are combined, chaos area range of cavitation bubble motion is larger than that when only acoustic field or single electric field exists. This is of significance not only for further research of acoustic cavitation but also for enhancing and improving the cavitation degradation of organic pollutant technology.

Keywords: acoustic field, electric field, cavitation, bifurcation

PACS: 43.35.+d, 47.55.dd, 02.30.Oz, 05.45.-a

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 11174191, 11074158), and the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China(Grant No.2011JM1002).

[†] E-mail: szz6@163.com