

◇ 研究报告 ◇

双超声激励空化泡动力学耦合因素研究*

杨日福[†] 张 凡 耿琳琳

(华南理工大学物理与光电学院 广州 510640)

摘要 研究双超声各因素对空化气泡动力学影响,找出最佳的耦合效果。对 Rayleigh-Plesset 方程模型进行修改,并利用 MATLAB 提供的 Runge-Kutta 算法进行数值求解,考察频率、相位差,声强的不同耦合对双超声激励空化泡动力学过程的影响。结果表明:在其他条件相同的情况下,双超声与单超声相比,空化泡运动过程中的最大半径较大,空化泡半径收缩的变化率也较大,同时可知,采用相同频率低频超声组合的空化强度最强;保持双超声初相位相同,避免两者反相,以及超声声强组合平均分配等,有利于提高空化效果。当采用不同频率组合激励时,要根据实验条件选择合适的双超声频率组合、相位差和声强的分配,才能起到协同强化作用。

关键词 双超声,空化泡,动力学模型,数值模拟,耦合因素

中图分类号: O427.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2016)04-0364-05

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2016.04.012

Coupling factors in cavitation bubble dynamic driven by double ultrasound

YANG Rifu ZHANG Fan GENG Linlin

(School of Physics and Optoelectronics, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract In order to find the best coupling effect, the effects of some parameters for double ultrasound cavitation dynamics are studied. The Rayleigh-Plesset equation model is modified and the numerical result is obtained by using the Runge-Kutta algorithm provided by MATLAB software. Effects of cavitation bubble dynamic driven by double ultrasound under different coupling conditions like frequency, phase difference and ultrasonic intensity are investigated. The results show that the double ultrasound could, under the same condition, increase the cavitation bubble's maximum radius and the shrinkage rate of radius by comparison with single ultrasound, at the same time, it can be known that the cavitation intensity becomes stronger by combining low and the same low frequency ultrasound in double ultrasound. Keeping same-phase, avoiding phase inverting and distributing the total ultrasonic intensity equally help to improve cavitation effect. When taking different frequency ultrasonic, the dual ultrasound should choose suitable coupling factors according to experimental conditions in order to get a significant synergetic effect.

Key words Double ultrasound, Cavitation bubble, Dynamic model, Numerical simulation, Coupling factors

2015-10-14 收稿; 2015-12-22 定稿

*国家自然科学基金项目 (11464002), 广东省省部产学研结合项目 (2013B090600034)

作者简介: 杨日福 (1969-), 男, 广东吴川人, 博士, 教授, 研究方向: 超声化工研究。

[†] 通讯作者 E-mail: yangrifu@scut.edu.cn

1 引言

超声空化是液体中微小泡核在超声作用下的振荡、生长、收缩及崩溃等一系列动力学过程^[1]。当空化气泡崩溃时,伴随着产生数千度的高温和数百个大气压的高压、气泡云,温度变化率可达到 10^9 K/s,并产生强烈的冲击波,可使媒质的功能、结构、状态等发生变化,从而为作用媒质提供了一个极特殊的物理与化学环境,因此,超声空化是功率超声在食品、化工、生物、医药等应用的基础及过程强化的主动力。近年来,许多研究分析和数值模拟了影响单超声空化的各因素^[2-3]。由于单超声辐照声场不够均匀,较易产生驻波,从而使空化事件减少。国内外不少学者已提出采用双超声可以获得更多的空化事件,提高声化学产额,并通过实验表明双超声可获得更多的空化事件,提高声化学产额^[4-7]。然而,有关双超声激励空化气泡动力学耦合因素的理论分析较少报道。Tatake^[8]进行了双频超声空化动力学研究,但对相位差和声强影响未作深入研究。

本文从超声空化气泡运动Rayleigh-Plesset方程出发,建立双超声激励动力学模型,通过数值计算模拟,探讨双超声与单超声对气泡生长过程的不同,以及不同频率、声强和相位差的双超声组合对激励空化泡动力学过程的影响,旨在为双超声能够在实验研究及工业化应用方面提供相应的理论指导。

2 双超声激励空化气泡运动模型及求解

2.1 双超声空化气泡运动的基本方程

声场中空化气泡壁的运动方程根据Rayleigh-Plesset方程^[9]表示如下:

$$R \left(\frac{d^2 R}{dt^2} \right) + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{1}{\rho_l} \left[P_i - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu}{R} \left(\frac{dR}{dt} \right) - P_\infty \right], \quad (1)$$

式(1)说明:

(1) R 是 t 时刻的空化泡半径(m), dR/dt 为空化泡壁上的质点运动速率(m/s), d^2R/dt^2 为空化泡壁上的质点运动加速度(m/s²), ρ_l 是液体的密度(kg/m³), P_i 是 t 时刻的空化泡内的压力(Pa), σ 是液体表面张力系数(N/m), μ 是液体的运动粘滞系数(Pa·s), P_∞ 是液体中的压力(Pa)。

(2) 假设实验中液体为不可压缩的连续介质,空化泡内的气体和蒸汽为理想气体,空化泡壁的运动满足球形对称运动,在计算中认为空化泡运动过程是绝热过程,则可得到

$$P_i = \left(P_h + \frac{2\sigma}{R_0} - P_v \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3k} + P_v, \quad (2)$$

其中: P_h 是作用在空化气泡壁上的流体静压力(Pa), R_0 是空化泡的初始半径(m), P_v 是空化泡内蒸汽压(Pa), k 为气体多变指数(取1.33)。

(3) 对于频率分别为 f_1 、 f_2 ,声压振幅分别是 P_1 、 P_2 ,相应的相位分别为 φ_1 、 φ_2 的超声波单独作用于液体中时,则液体中的压力的表达式分别为

$$P_{1\infty} = P_{t1} = P_h - P_1 \sin(2\pi f_1 t + \varphi_1), \quad (3)$$

$$P_{2\infty} = P_{t2} = P_h - P_2 \sin(2\pi f_2 t + \varphi_2), \quad (4)$$

其中:声压振幅和声强的关系为 $P = \sqrt{2I\rho_l C}$, I 为超声波声强(W/cm²), ρ_l 是介质的密度(kg/m³), C 是介质中的声速(m/s)。

当两列超声波都作用于液体中即双超声作用时,令 $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ 为两列超声波的相位差,则双超声作用时液体中的压力为

$$P_\infty = P_t = P_h - [P_1 \sin(2\pi f_1 t) + P_2 \sin(2\pi f_2 t + \varphi)]. \quad (5)$$

综上可得双超声中空化气泡壁的运动方程为

$$R \left(\frac{d^2 R}{dt^2} \right) + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{1}{\rho_l} \left\{ \left(P_h + \frac{2\sigma}{R_0} - P_v \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3k} + P_v - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu}{R} \left(\frac{dR}{dt} \right) - P_h + [P_1 \sin(2\pi f_1 t) + P_2 \sin(2\pi f_2 t + \varphi)] \right\}. \quad (6)$$

2.2 运动方程的求解

方程(6)是关于空化气泡半径 R 的二阶非线性常微分方程,直接得到它的一般解困难,可通过数值迭代法求其数值解。本文采用Matlab提供的一种自适应步长的四阶-五阶Runge-Kutta算法(ode45)进行求解^[10],初始条件为 $R(t=0) = R_0$, $dR/dt(t=0) = 0$ 。只要知道 ρ_l 、 P_h 、 R_0 、 σ 、 P_v 、 μ 、 f_1 、 P_1 、 f_2 、 P_2 、 φ 及 C 等参量之后就可以求解出空化泡的半径 R 随时间 t 的变化关系。

3 双超声激励空化泡动力学过程分析

3.1 双超声激励对空化泡动力学过程影响

以温度为30 °C和压力为标准大气压的水作为反应体系,由参考文献[11]可知: $p_h = 1.013 \times 10^5$ Pa, $\rho_l = 995.65$ kg/m³, $c = 1509.2$ m/s, $\mu = 0.00079735$ Pa·s, $\sigma = 0.071194$ N/m, $p_v = 4247$ Pa。双超声频率分别为25 kHz和40 kHz,总声强为1 W/cm²,即单超声激励时声强取1 W/cm²,双超声激励时在总声强相同的情况下,两种超声声强均取0.5 W/cm²,泡核初始半径取1 μm。分别计算空化泡半径随单超声和双超声激励的变化规律,结果如图1所示(为了便于比较,研究 R/R_0 随 t/T 或 t 的变化, T 为超声波的作用周期,以下同)。

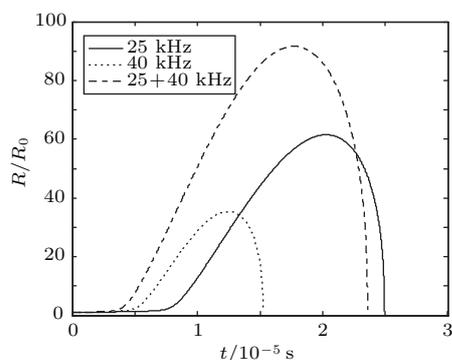


图1 单超声和双超声激励空化泡半径的变化

Fig. 1 The change of cavitation bubble radius under single- and dual-ultrasonic irradiation

从图1可以看出总声强相同的情况下,双超声激励空化泡最大半径比单超声激励空化泡的最大半径大(25 kHz的 R_{\max}/R_0 为61.51;40 kHz的 R_{\max}/R_0 为35.37;25 kHz+40 kHz的 R_{\max}/R_0 为91.61),达到最大半径后收缩至崩溃的时间分别为:25 kHz为 4.62×10^{-6} s;40 kHz为 2.73×10^{-6} s;25 kHz+40 kHz为 5.83×10^{-6} s,因此,空化泡半径收缩的变化率表明双超声激励最大,其次是25 kHz超声,最小是40 kHz超声,由于空化泡最大半径越大,空化泡半径收缩的变化率越大,空化强度越强,因此,同种条件下,实际应用中可考虑采用双超声,其次是采用低频超声,提高空化效果。

3.2 不同频率组合对双超声激励空化泡动力学过程影响

各参数取值同3.1。双超声频率分别取一组低频超声和低频超声组合,即25 kHz和25 kHz、

25 kHz和40 kHz、40 kHz和40 kHz,及另一组低频超声和低频超声组合,即25 kHz和40 kHz、25 kHz和100 kHz、25 kHz和200 kHz;相位差均为0,总声强为1 W/cm²,计算得空化泡半径随时间的变化关系如图2、图3所示。

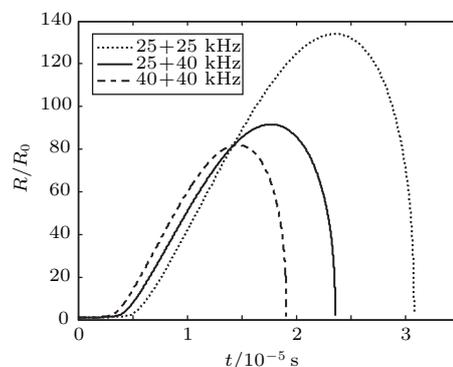


图2 低频超声和低频超声组合激励空化泡半径的变化

Fig. 2 The change of cavitation bubble radius under low/low frequency ultrasonic combination

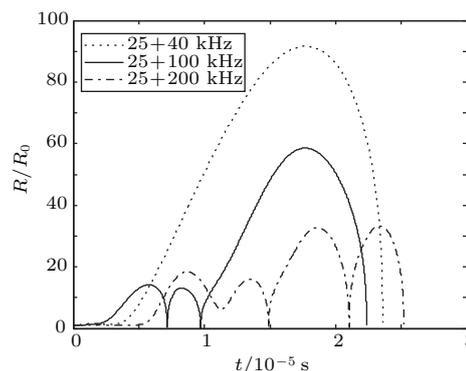


图3 低频超声和低频超声组合激励空化泡半径的变化

Fig. 3 The change of cavitation bubble radius under low/high frequency ultrasonic combination

由图2、图3可知,在其他条件保持不变时,当双超声中不同频率组合时,空化泡的运动过程有很大的不同。从图2可以看出,双低频25 kHz和25 kHz的组合方式 R_{\max}/R_0 的比值最大(R_{\max}/R_0 为134.04),25 kHz和40 kHz的组合方式 R_{\max}/R_0 的比值居中(R_{\max}/R_0 为91.61),40 kHz和40 kHz的组合方式 R_{\max}/R_0 的比值最小(R_{\max}/R_0 为82.00),达到最大半径后收缩至崩溃的时间分别为:25 kHz + 25 kHz为 7.19×10^{-6} s;25 kHz+40 kHz为 5.83×10^{-6} s;40 kHz + 40 kHz为 4.42×10^{-6} s,空化泡半径收缩的变化率表明25 kHz + 25 kHz双超声组合最大,其次是40 kHz + 40 kHz超声组合,最小是25 kHz + 40 kHz超声组

合,从而说明采用相同频率低频超声(比如 25 kHz + 25 kHz)组合的空化强度最强。从图3可以看出,正常情况下,随着超声频率的增高,膨胀和压缩时间都变短,空化泡核正压半周期来不及增长到最大半径,负压半周期也来不及崩溃,空化效果变差;而当高频频率为100 kHz和200 kHz时,超声空化从瞬态空化变成了稳态空化,双超声组合有削弱的作用。因此,在实际应用中要根据实验条件选择合适的双超声频率组合才能起到协同强化作用。

3.3 相位差对双超声激励空化泡动力学过程影响

各参数取值同3.1,总声强为1 W/cm²。分别计算空化泡半径随双超声相位差 φ (取0, $\pi/2$, π)的变化规律,结果如图4所示。

双超声相位差不同时,空化泡运动过程有较大的不同。从图4(a)可以看出,同频的双超声激励时,相位差为0时空化泡 R_{\max}/R_0 的比值最大,相位差为 π 时空化泡 R_{\max}/R_0 的比值为0。因此,采用同频的双超声激励时,尽量保持双超声初相位相同,避免双超声反相,提高空化效果。

从图4(b)、4(c)可以看出,对于不同频率的双超声,空化泡的运动与图4(a)有所不同,对于(25 kHz+40 kHz)的超声,相位差为0时空化泡 R_{\max}/R_0 的比值并非最大,而是相位差为 $\pi/2$ 时空化泡 R_{\max}/R_0 的比值最大。对于(25 kHz+80 kHz)的超声,相位差为0时空化泡 R_{\max}/R_0 的比值最大,但超声空化泡从瞬态空化变成了稳态空化。相位差为 $\pi/2$ 和 π 时的空化泡超声空化为瞬态空化,但相位差为 π 时 R_{\max}/R_0 的比值比相位差为 $\pi/2$ 大。因此,采用不同频率双超声激励时,要根据两种超声的频率组合情况选择合适的相位差,以便达到最佳的耦合效果。

3.4 不同声强组合对双超声激励空化泡动力学过程影响

双超声相位差均为0,其他参数取值同3.1。总声强1 W/cm²不变,25 kHz+25 kHz 双超声声强组合分别为50%+50%,70%+30%,80%+20%,90%+10%,空化泡半径变化情况见图5(a)所示。25 kHz+40 kHz 双超声声强组合分别为30%+70%,50%+50%,70%+30%,80%+20%,空化泡半径变化情况见图5(b)所示。

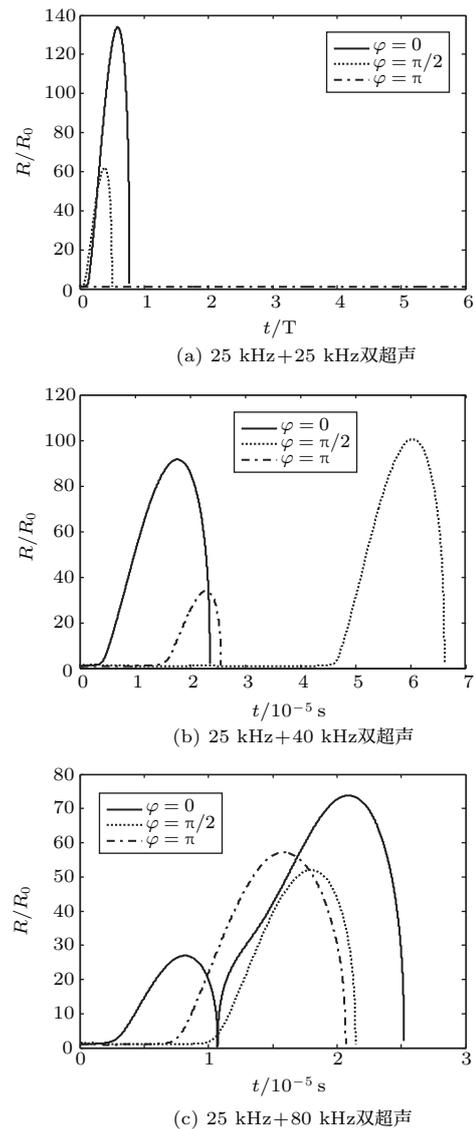


图4 双超声相位差对空化泡半径的影响

Fig. 4 Effect of phase difference on the cavitation bubble radius in dual ultrasonic

由图5可知,不同的声强组合方式,对双超声空化泡的运动过程也有所不同。从图5(a)可以看出,相同频率超声声强组合是平均分配时空化泡 R_{\max}/R_0 的比值最大。

从图5(b)可以看出,不同频率超声声强组合随着25 kHz和40 kHz双超声中25 kHz声强所占比重的增加,双超声的振幅先增大后减小,在25 kHz超声声强占70%附近时达到最大值。因此,对于25 kHz和40 kHz双超声,在总声强一定时,当声强的分配为25 kHz占70%,40 kHz占30%时,双超声的 R_{\max}/R_0 的比值最大。

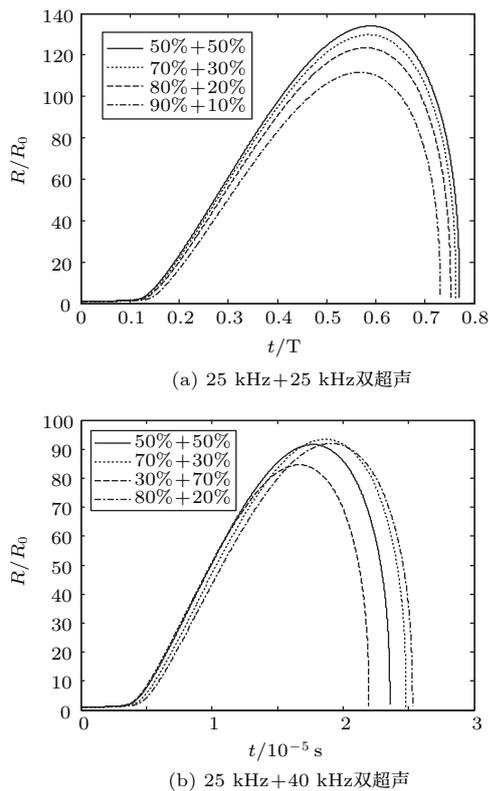


图5 双超声声强组合对空化泡半径的影响

Fig. 5 Effect of ultrasonic intensity combination on the cavitation bubble radius in dual ultrasonic

4 讨论与结论

根据 Rayleigh-Plesset 方程建立双超声激励空化气泡运动动力学方程, 采用 MATLAB 软件进行数值求解。结果表明: 在其他条件相同的情况下, 双超声与单超声相比, 空化泡运动过程中的最大半径较大, 空化泡半径收缩的变化率也较大, 同时可知, 采用相同频率低频超声组合的空化强度最强; 保持双超声初相位相同, 避免双超声反相, 以及超声声强组合平均分配等, 有利于提高空化效果。当采用不同频率组合激励时, 要根据实验条件选择合适的双超声频率组合、相位差和声强的分配, 才能起到协同强化作用。

值得一提的是, 一些学者通过实验表明三超声的空化效果更好^[12-13], 因此多超声空化效应的耦合因素理论研究将值得在实验研究的基础上进一步深入探索、分析、丰富及完善。为多超声空化效应的研究及其在工业化中更好的应用提供基础理论依据。

参 考 文 献

- [1] 冯若, 李华茂. 声化学及其应用[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1992: 67-100.
- [2] 崔方玲, 纪威. 超声空化气泡动力学仿真及其影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 24-29.
CUI Fangling, JI Wei. Dynamic simulation of ultrasonic cavitation bubble and analysis of its influencing factors[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(17): 24-29.
- [3] 李争彩, 林书玉. 超声空化影响因素的数值模拟研究[J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2008, 36(1): 38-42.
LI Zhengcai, LIN Shuyu. Numerical simulation of the factors influencing ultrasonic cavitation[J]. Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science Edition, 2008, 36(1): 38-42.
- [4] LEE M, OH J. Synergistic effect of hydrogen peroxide production and sonochemiluminescence under dual frequency ultrasound irradiation[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2011, 18(3): 781-788.
- [5] ZHENG J, LI Q, HU A, et al. Dual-frequency ultrasound effect on structure and properties of sweet potato starch[J]. Starch-Stärke, 2013, 65(7/8): 621-627.
- [6] 马艳, 张宁宁. 相向双频超声法提取陈皮中黄酮类化合物[J]. 中国实验方剂学杂志, 2013, 19(24): 49-52.
MA Yan, ZHANG Ningning. Extraction of total flavonoids from citri reticulatae pericarpium by opposite dual-frequency ultrasonic method[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2013, 19(24): 49-52.
- [7] 赵荔, 杨艳玲, 李星, 等. 单频和双频复合超声对水溶液中腐殖酸的降解[J]. 化工学报, 2014, 65(9): 3700-3704.
ZHAO Li, YANG Yanling, LI Xing, et al. Degradation of humic acid in water by single- and dual-frequency ultrasound methods[J]. CIESC Journal, 2014, 65(9): 3700-3704.
- [8] TATAKE P A, PANDIT A B. Modelling and experimental investigation into cavity dynamics and cavitation yield: influence of dual frequency ultrasound sources[J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57(22): 4987-4995.
- [9] PLESSET M S, PROSPERETTI A. Bubble dynamics and cavitation[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1977, 9(1): 145-185.
- [10] 张志涌. 精通 MATLAB R2011a[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012: 205-222.
- [11] National Institute of Standards and Technology. Thermophysical properties of fluid systems[EB/OL]. [2015-09-25]. <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>.
- [12] 张晓燕, 丘泰球, 徐彦渊, 等. 不同超声作用方式对葛根有效部位提取率的影响[J]. 应用声学, 2006, 25(3): 151-155.
ZHANG Xiaoyan, QIU Taiqiu, XU Yanyuan, et al. Influence of the form of ultrasound on the extraction of puerarin from Pueraria Lebata ohwi[J]. Applied Acoustics, 2006, 25(3): 151-155.
- [13] 胡爱军, 卢秀丽, 郑捷, 等. 不同频率超声对鲢鱼肌原纤维蛋白结构的影响[J]. 现代食品科技, 2014, 30(3): 23-27.
HU Aijun, LU Xiuli, ZHENG Jie, et al. Effect of different frequency ultrasonic treatments on the structures of silver carp myofibrillar protein[J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(3): 23-27.