

◇ 研究报告 ◇

超声清洗过程环境压力对声空化效应的影响^{*}

吴强 姚澄 朱昌平[†] 韩庆邦

(河海大学常州市传感网与环境感知重点实验室并江苏省输配电装备技术重点实验室 常州 213022)

摘要 在不同深度条件下的水下构筑物超声清洗中,声空化是重要的源动力之一。为探明水下环境压力对声空化的影响,本文基于数值计算的方法,通过对超声波作用下气泡动力学的研究,讨论了环境压力对空化泡溃灭时的气泡最大半径、释放能量以及溃灭功率等因素的影响。结果表明:空化泡最大半径与环境压力在一定范围内呈近似线性关系;随着环境压力增大,空化泡释放能量和溃灭功率均显著减小,且两者在变化趋势和变化幅度上几乎一致;当环境压力大于声压幅值时,空化泡的最大半径、内部压强、内部温度与释放能量均远低于空化发生在环境压力小于声压幅值时的情形。

关键词 超声清洗,环境压力,最大半径,释放能量,溃灭功率

中图分类号: TB559, O426.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2015)05-0391-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2015.05.003

The influence of ambient pressure on acoustic cavitation during the process of ultrasonic cleaning

WU Qiang YAO Cheng ZHU Changping HAN Qingbang

(Changzhou Key Laboratory of Sensor Networks and Environmental Sensing, Jiangsu Key Laboratory of Power Transmission and Distribution Equipment Technology, Hohai University, Changzhou 213022, China)

Abstract Ultrasonic cavitation is one of the most important sources in the application of ultrasonic cleaning for submerged structure in different depths. In order to investigate the influence of ambient pressure on ultrasonic cavitation, a numerical approach was used to study the bubble dynamics under ultrasonic operation. In this paper, the effect of ambient pressure on the maximum radius, released energy and collapsing power of cavitation bubbles was investigated. The results indicate that the relationship between the bubble's maximum radius and ambient pressure is approximately linear to some extent. The bubble's released energy and collapsing power are both significantly reduced with the increasing ambient pressure and have the same change trend in the variation of amplitude. When ambient pressure is greater than acoustic amplitude, the bubble's maximum radius, internal pressure, internal temperature and released energy are far below their values in the situation where ambient pressure is lower than acoustic amplitude.

Key words Ultrasonic cleaning, Ambient pressure, Maximum radius, Released energy, Collapsing power

2014-12-24 收稿; 2015-01-30 定稿

^{*}国家自然科学基金项目 (11274092, 11274091, 11304026)

作者简介: 吴强 (1991-), 男, 江苏常州人, 硕士研究生, 研究方向: 声学通信技术。

[†]通讯作者 E-mail: cpzhu5126081@163.com

1 引言

超声空化是强超声在液体媒质中引起的一种特有的物理现象,它往往伴随有高温、高压、冲击波、微射流、发光甚至放电等极端现象和效应的产生^[1-2]。这些特殊效应使得超声波在物体清洗方面有着突出表现。现有的对小型器件的超声清洗技术已得到广泛应用,但利用功率超声在深水域实现对大型构筑物清洗(如大坝、水闸的探伤性清洗)尚不多见,其难度主要在于深水环境下发生空化的条件更为严苛,空化机理更加复杂,实现难度也更大。因此,探究水下环境尤其是变化压力环境下空化泡的动力学行为对声空化效应的影响很有必要。

在不同深度的水环境下,影响超声空化强度的主要因素是环境压力(或环境压强,大于1 atm)。Kondic等^[3]研究了环境压力对单泡声致发光的影响,发现压力仅仅减小5%,声致发光的辐射强度就增加了200%;Dan和Cheeke等^[4]研究了环境压力对单泡声致发光辐射光子数目的影响,发现光子数目随压力减小而线性增加;杨日福等^[5]通过对亚临界水中超声激励空化泡的动力学分析,得到了环境压强与温度对空化泡运动过程的影响结果;Lu等^[6]研究了环境压力对脉冲式放电产生气泡特性的影响,发现气泡再膨胀时产生的二次冲击波的峰值压力随环境压力增大而减小。

然而,现有的对空化泡动力学的评估参数主要围绕气泡半径、泡内压强和泡内温度这三个参量展开^[5-7],其在反映空化效应时有一定局限性。本文在分析以上三个参量的基础上,考查了空化过程中气泡溃灭的释放能量与溃灭功率^[8]这两个更直接体现空化效应强弱的概念,从能量与功率的角度来反映空化泡溃灭的剧烈程度。空泡的剧烈溃灭伴随强冲击力和微射流产生。溃灭过程释放能量越大,空化泡传递给周围液体的机械能就越大,形成的微射流动能越大,达到的清洗效果也就越好;另一方面,空化溃灭功率越高,气泡溃灭越剧烈,造成液体分子间的碰撞越激烈,产生的冲击力越大,从而对壁面污物的撞击与清洗作用就越强,因此空化释放能与溃灭功率是体现空化强度与超声清洗效果的重要指标。本文通过研究不同环境压力条件下空化泡最大半径、释放能量与溃灭功率等参数的变化规律,并综合考虑了声频率与声压对结果的影响,可以为超声波在不同深度水环境下实现大功率超声清洗

提供借鉴依据。

2 数学模型

超声清洗过程实质上是多气泡环境的作用结果。文献[9]指出,与单空化泡情况相比,声场作用下泡群中空化泡运动变化的周期性下降,但基本还是缓慢膨胀,剧烈压缩,然后反弹的脉动模式。可见单泡与泡群中气泡的运动特性虽有差异但基本相似,而此差异对本文考察的参量影响不大,因此,为简化模型,本文以单泡模型进行计算。

假设空化泡始终以球形作径向运动,考虑液体的可压缩性、表面张力、粘滞性和蒸汽压等因素,并假设泡内蒸汽压在空化周期内始终保持恒定,不考虑气体扩散、质量交换和热交换。适用于此假设条件下的空化泡运动方程为经Prosperetti^[10]修改后的Keller-Miksis方程^[11]:

$$R\ddot{R}\left(1-\frac{\dot{R}}{c}\right)+\frac{3}{2}\dot{R}^2\left(1-\frac{\dot{R}}{3c}\right)=\frac{P_l}{\rho}\left(1+\frac{\dot{R}}{c}\right)+\frac{R}{\rho c}\frac{dP_l}{dt}, \quad (1)$$

其中, P_l 为作用于泡壁上的液体压力,满足:

$$P_l=\left(P_0+\frac{2\sigma}{R_0}-P_v\right)\left(\frac{R_0}{R}\right)^{3\kappa}-P_0-\frac{2\sigma}{R}-4\mu\frac{\dot{R}}{R}+P_v-P_a\sin(2\pi ft), \quad (2)$$

式(1)和式(2)中, R 为气泡任意时刻的半径, \dot{R} 为气泡半径的变化率, \ddot{R} 为气泡径向速度的变化率, R_0 为气泡初始半径, c 为声波在液体中的传播速度, ρ 是液体密度, κ 是泡内气体的多方指数, σ 是液体的表面张力, μ 是液体粘滞系数, P_0 为环境压力, P_v 是泡内蒸汽压, P_a 为声波幅值, f 是声波的频率。

空化泡的振荡过程,包括等温的膨胀阶段和绝热的收缩阶段^[12-13]。运用绝热定律,空化泡在收缩阶段的泡内瞬时压强与瞬时温度可表示为^[14]

$$p=\left[P_v+\left(P_0+\frac{2\sigma}{R_0}-P_v\right)\left(\frac{R_0}{R_{\max}}\right)^3\right]\times\left(\frac{R_{\max}}{R}\right)^{3\kappa}, \quad (3)$$

$$T=T_0\left(\frac{R_{\max}}{R}\right)^{3(\kappa-1)}, \quad (4)$$

其中, R_{\max} 代表气泡膨胀的最大半径, T_0 为初始环境温度。

在等温膨胀阶段, 气泡能量变化为0。在绝热收缩阶段, 由于不考虑热交换因素, 故空化泡的总能量变化 E 只对应于绝热相时自身的变化, 可用式(5)表示 [8]:

$$E(t) = \frac{p(t)V(t) - p_{\min}V_{\max}}{\kappa - 1}, \quad (5)$$

式(5)中, $V(t)$ 代表空化泡体积随时间的变化关系, V_{\max} 为空泡膨胀所能达到的最大体积, 此时半径为 R_{\max} , 所对应的泡内压强最小为 p_{\min} 。当空化泡振荡进入压缩相后, 其半径 R 迅速减小直至气泡溃灭, 能量被完全释放, 用 E_{\max} 表征空化泡溃灭所释放的能量。将空化泡的溃灭功率定义为释放能量 E_{\max} 与收缩时间之比:

$$w = \frac{E_{\max}}{\Delta t}, \quad (6)$$

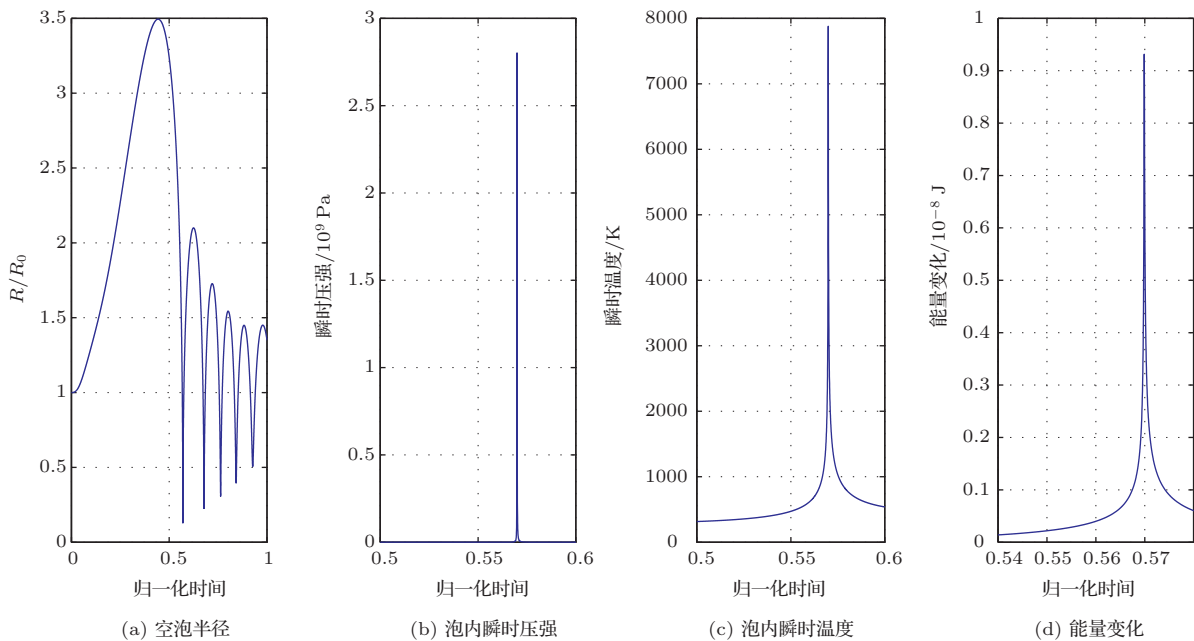


图1 空化泡振荡过程中各参数时变特性曲线

Fig. 1 Time-variant characteristics of the parameters during the process of cavitation bubble's oscillation

从图1(a)可以看出, 空化泡在超声作用下先相对缓速增大, 在 $t = 0.46T$ 时气泡达到最大后便急速收缩直至最小, 空化泡发生溃灭。气泡从最大收缩至最小的持续时间仅占整个时间周期的11%(约 $1.47 \mu\text{s}$)。图1(b)、1(c)中, 泡内压强与温度变化具有显著的脉冲性, 在气泡溃灭之际, 二者急剧增大, 并在空化泡半径达到最小时, 泡内压强与温度各自达到最大。图1(d)显示的气泡能量变化与泡内压强和温度具有类似特性, 其从开始急剧增加到达到

其中, Δt 为气泡从半径最大 R_{\max} 至溃灭所需要的时间。

3 数值仿真分析

对于空化泡的运动方程(1)和(2), 采用四阶龙格-库塔算法对其进行数值迭代计算。式中参数初始值为: $R_0 = 5 \mu\text{m}$, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $c = 1481 \text{ m/s}$, $f = 75 \text{ kHz}$, $P_0 = 1 \text{ atm}$, $P_v = 2338 \text{ Pa}$, $P_a = 1.2 \text{ atm}$, $\kappa = 4/3$, $\sigma = 0.076 \text{ N/m}$, $\mu = 0.001 \text{ N}\cdot\text{s/m}^2$, $T_0 = 20^\circ$, 初始条件为: $t = 0$ 时 $R = R_0$, $dR/dt = 0$ 。图1是在上述参数条件下空化泡在一个时间周期 T ($T = 1/f$) 内的运动情况及其内部瞬时压强、瞬时温度和气泡能量变化在绝热阶段随时间变化的曲线图。

峰值的时间还不足0.01个时间周期 ($0.13 \mu\text{s}$), 在如此短时间内产生几十倍的能量变化, 这正是超声空化能产生众多效应的原因之一。对于多泡环境, 多泡的振动幅度要低于单泡的振动幅度 [15], 从而对应的泡内压强、泡内温度与能量变化相较单泡时也有所降低, 但各参量仍然基本符合图1中的曲线变化特性, 如文献 [15] 中泡群溃灭时的压力脉冲特性与图1(b)类似。因此多泡环境下气泡也满足单泡时的参量变化规律。

3.1 环境压力(压强)对气泡最大半径的影响

空化泡的 R_{\max} 是气泡运动过程中衡量空化效应的一个重要参数,它反映空化泡膨胀所能达到的最大幅度^[16],同时也是等温和绝热阶段的分界点。 R_{\max} 的大小的在理论上受声压振幅 P_a 和环境压力 P_0 直接影响^[17-18]:

$$R_{\max} = \frac{4}{3\omega} (P_a - P_0) \left(\frac{2}{\rho P_a} \right)^{1/2} \times \left[1 + \frac{2}{3P_a} (P_a - P_0) \right]^{1/2}, \quad (7)$$

当 P_a 恒定时,可得到 R_{\max} 与 P_0 的理论关系。图2是在 $f = 35 \text{ kHz}$, P_a 恒为 2 atm 超声作用下气泡最大半径 R_{\max} 与环境压力 P_0 的关系图,其中实线表示理论情况,离散点则是根据式(1)与式(2)在具体参数值模拟下的取样值。

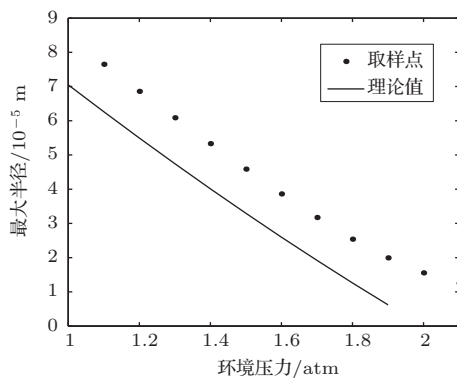


图2 环境压力对空化泡最大半径的影响

Fig. 2 Effect of ambient pressure on the maximum radius of cavitation bubble

由图2可以发现,离散的取样值与理论曲线在趋势上大致相同。随着环境压力的增加,空化泡的最大半径减小。在数值上,二者也比较接近,离散值要稍大于理论值,原因可能在于理论公式是从压力平衡角度推导而来,重点考虑声参数的限制,而取样值是在模拟声场和具体液体环境下得到的,某些液体参数可能有助于气泡增长。因此后者相较于前者能更真实地反映空化泡的运动情况。图2中理论曲线与仿真结果描绘的最大半径与环境压力之间其实都是非线性关系,这与文献[19]中研究的激光诱发的空化泡具有类似的结论。不同的是,此处的非线性关系比较弱,甚至基本可以看作是线性关系。因此,空化泡最大半径随环境压力增大呈近似线性地减小。此外,从图2中的取样值可见,当 P_0 的大

小接近 P_a 时, R_{\max} 随 P_0 增大而减小的趋势有微弱的变缓,而在 P_0 越小于 P_a 处, R_{\max} 与 P_0 之间的线性相对越强。

3.2 环境压力对空化释放能量的影响

为进一步探究环境压力变化对空化泡溃灭过程能量释放与溃灭功率的影响,对不同 P_0 时的释放能量 E_{\max} 与溃灭功率 w 进行了数值计算(本节描述 P_0 对 E_{\max} 的影响,3.3节描述 P_0 对 w 的影响)。在研究环境压力因素的同时,还考虑了声参数因素(超声频率 f 和声压幅值 P_a)对结果的影响。图3与图4分别是不同 f 和不同 P_a 下环境压力对释放能量的影响曲线图。

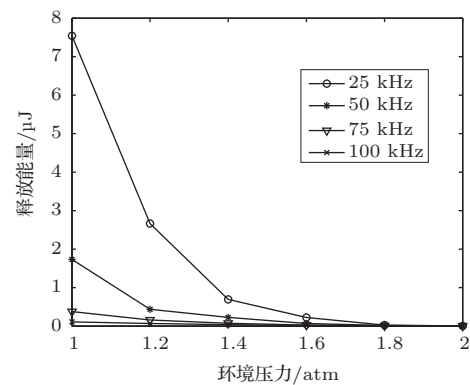


图3 不同频率下环境压力变化对空化泡溃灭过程能量释放的影响 (P_a 恒为 2 atm)

Fig. 3 Effect of ambient pressure on released energy of cavitation bubble's collapse under different acoustic frequency ($P_a = 2 \text{ atm}$)

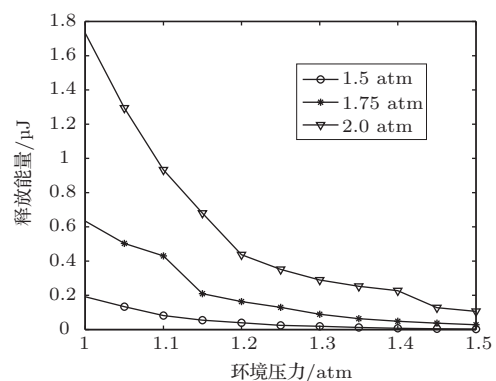


图4 不同声压幅值下环境压力变化对空化泡溃灭过程能量释放的影响 ($f = 50 \text{ kHz}$)

Fig. 4 Effect of ambient pressure on released energy of cavitation bubble's collapse under different acoustic amplitude ($f = 50 \text{ kHz}$)

由图3和图4可以发现,随着环境压力增加,空化泡溃灭过程的释放能量 E_{\max} 显著下降,说明空化效应的强度随环境压力增加而减弱,这与 P_0 增大时气泡 R_{\max} 的减小是对应的。以图3中 $f = 25$ kHz 曲线为例,当 P_0 从1 atm 增大至1.4 atm 时,释放能量 E_{\max} 降低了超过90%;而在图4中, P_0 从1 atm 升高至1.5 atm,各 P_a 下的 E_{\max} 亦减小了90%以上。由此可见, E_{\max} 随环境压力增大而减小的趋势相当明显。另一方面,对图3中各频率曲线进行对比发现,频率越低,空化泡的释放能量越高,从而反映出空化效应越强。在 P_0 不大时,25 kHz 对应的 E_{\max} 可以达到75 kHz 时的15至25倍。其原因可能是超声频率越高,空化周期就越短,空化泡膨胀与收缩的时间也相应变短,气泡尺寸变小,存储与释放的能量也减少,造成空化效应减弱。图4显示了声压幅值分别为1.5, 1.75和2.0 atm 时的 E_{\max} - P_0 特性,不难发现,在一定范围内声压幅值越高,空化泡释放能量就越大。

3.3 环境压力对空化泡溃灭功率的影响

溃灭功率 w 的定义为空化释放能量与收缩时间之比,描述的是空化泡溃灭过程能量变化的快慢,因此溃灭功率 w 比释放能量 E_{\max} 更能体现空化泡溃灭时的剧烈程度,即空化效应的强度。图5和图6分别是在系列超声频率和声压幅值下环境压力对空化泡溃灭功率的影响曲线图,相关参数同3.3节。

图5和图6描述的曲线特征与图3和图4非常相似。在横轴变化上,随着环境压力增大,溃灭功率显著减小。可见增大 P_0 不仅降低了总的能量变化,还使单位时间内的能量变化减少,高环境压力对空化强度有较大的限制。对于声参数影响,图5亦显示了超声频率越高,空化泡溃灭功率越小的规律,因此在功率超声清洗应用中,应当选用较低频段的超声波,一般以20 kHz~40 kHz 为宜。而由图6可见,声压幅值越高,则溃灭功率越大。 P_a 等于2.0 atm 时气泡溃灭功率可以达到1.5 atm 时的6倍以上。故当空化发生在 P_0 较大的水环境时,由于空化强度较弱,为了仍能达到预期的清洗效果,应当适当地增大声压。此外,分别对比图3与图5、图4与图6的曲线特征发现,释放能量 E_{\max} 和溃灭功率 w 随环境压力改变时在变化趋势和变化幅度上几乎是一致的,可见虽然不同 P_0 下空化泡溃灭的收缩时间 Δt 不同,但并不影响 E_{\max} 和 w 在变化规律上的相似性。

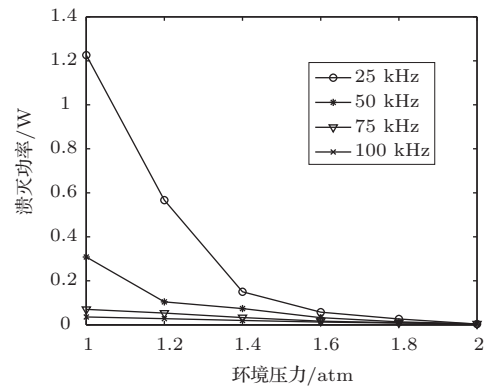


图5 不同频率下环境压力变化对空化泡溃灭功率的影响

Fig. 5 Effect of ambient pressure on collapsing power of cavitation bubble under different acoustic frequency

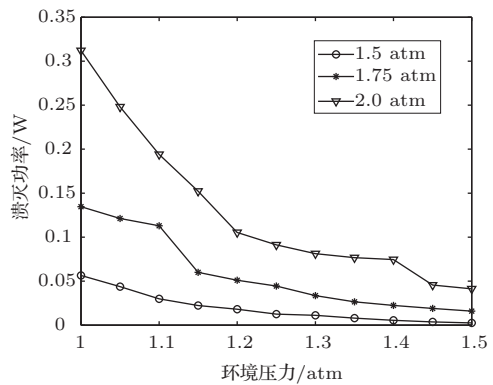


图6 不同声压幅值下环境压力变化对空化泡溃灭功率的影响

Fig. 6 Effect of ambient pressure on collapsing power of cavitation bubble under different acoustic amplitude

3.4 环境压力大于声压幅值时的空化

对于描述空化泡 R_{\max} 与 P_a 和 P_0 关系的理论公式(7),其本身只有在 $P_a > P_0$ 时才符合实际意义,因为 R_{\max} 不可能小于0。但事实上,由图2中数值计算出的离散取样值可以发现,当 P_0 等于或大于 P_a (2 atm) 时, R_{\max} 仍有一定大小的量值,说明此时仍存在一定程度的空化效应。此前所述的环境压力变化对空化效应中气泡最大半径、释放能量与溃灭功率的影响,都是建立在环境压力小于声压幅值的条件上的,而实际应用中不能确保变化的 P_0 始终小于 P_a 。因此,为了更详尽地描述环境压力对声空化效应的影响,考虑了 P_0 大于 P_a 时的情形。图7为

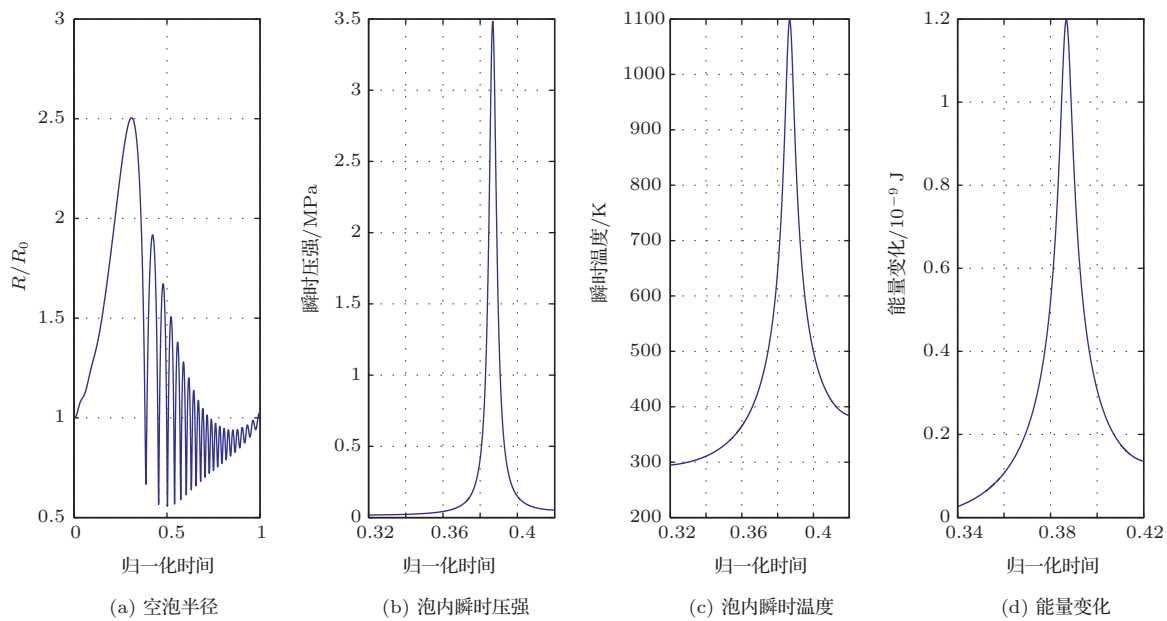


图7 $P_0 = 2.1 \text{ atm}$, $P_a = 2.0 \text{ atm}$ 时空化泡振荡过程中各参数时变特性曲线

Fig. 7 Time-variant characteristics of the parameters during the process of cavitation bubble's oscillation when $P_0 = 2.1 \text{ atm}$ and $P_a = 2.0 \text{ atm}$

P_0 略大于 P_a 时($P_0 = 2.1 \text{ atm}$, $P_a = 2.0 \text{ atm}$), 空化泡的运动情况以及泡内瞬时压强、瞬时温度与气泡能量变化随时间变化曲线图。

图7描绘了 $P_0 > P_a$ 时各空化参数在时间域上的变化特性, 将其中各子图分别与图1所描绘的 $P_0 < P_a$ 时对应的各参数变化特性进行对比, 可见明显差异。首先, 在数值上, 相较图1空化泡最大半径减小了约30%, 泡内瞬时压强和气泡释放能量降低了几个数量级, 最高瞬时温度也从7800 K降为了1100 K左右。其次, 图7(a)中空化泡运动的振荡过程加剧, 图7(b)、7(c)、7(d)中曲线的强脉冲性减弱, 变化所需的时间跨度增大。很明显, 此时气泡产生的空化效应已经极弱, 甚至可以认为其只进行简单膨胀压缩运动而不发生溃灭, 空化反应已不再发生。而在多泡环境下, 文献[14]研究表明, 多泡溃灭后的反弹现象相较单泡明显减少, 因此此时多泡运动的振荡过程不如单泡明显, 但多泡的泡内压强、温度和能量变化是由溃灭的剧烈程度决定, 与其后的反弹关系不大, 因此仍与图7(b)、7(c)、7(d)类似。但无论单泡还是泡群, $P_0 > P_a$ 时的空化效应都明显的弱于 $P_0 < P_a$ 时。因此, 在超声清洗的实际工程应用中, 为了保证一定强度的空化效应, 声压幅值必须始终大于变化的环境压力一定量值。但也不是无限增大 P_a 就越好, 因为 P_a 特别大时, 气泡膨胀增长会非常大, 以致在声波压缩相到来时来不及溃灭, 反

而削弱了空化效应^[18]。

4 讨论与结论

声空化是对水下构建物实现超声清洗的主要动力源, 而液体环境压力是影响空化效应的主要因素。为探究环境压力变化对空化效应的影响, 本文基于数值计算的方法, 计算了空化泡在溃灭时的最大尺寸、泡内压强和泡内温度, 并据此得到了气泡溃灭的释放能量和溃灭功率。通过研究声空化泡在不同环境压力 P_0 下最大半径 R_{\max} 、溃灭过程释放能量 E_{\max} 和溃灭功率 w 等因素的变化规律来直观反映 P_0 对空化效应强度的影响, 同时综合考虑了声压幅值和频率对结果的影响。结果显示:

(1) 空化泡最大半径随环境压力增大呈近似线性减小, 且环境压力越小于声压幅值, 线性关系越强;

(2) 空化释放能量 E_{\max} 与溃灭功率 w 都随环境压力增大而显著减小; 高环境压力下可以通过降低频率、适当提高声压来增大 E_{\max} 和 w ;

(3) E_{\max} 和 w 随环境压力改变时在变化趋势和变化幅度上几乎是一致的, 并不因收缩时间 Δt 不同而产生太大影响;

(4) 当环境压力大于声压幅值时, 空化泡的最大半径、内部压强、内部温度与释放能量均远低于空

化发生在环境压力小于声压幅值时的情形,且运动过程振荡加剧,此时可认为空化已基本不发生。

本文通过对空化泡最大半径、释放能量以及溃灭功率等因素的分析,得到了环境压力对空化效应的影响,并给出了在高环境压力下适当降低频率和提高声压以增强空化效应的方法。这些结论可以推广到多空化泡环境,对变化深度下的水下构筑物超声清洗有一定借鉴意义。但如何在特定和变化环境下利用最优化的超声频率和声压最大化增强空化效应以达到最佳效果,还有待后续探索。

参 考 文 献

- [1] 冯若. 超声手册[M]. 南京: 南京大学出版社, 1999: 78-85.
- [2] 郑仁杰, 葛林男, 卫东, 等. 超声清洗技术的应用和发展[J]. 清洗世界, 2011, 27(5): 29-32, 46.
ZHENG Renjie, GE Linnan, WEI Dong, et al. Applied and development of ultrasonic cleaning technique[J]. Cleaning World, 2011, 27(5): 29-32, 46.
- [3] KONDIC L, YUAN C, CHAN C K. Ambient pressure and single-bubble sonoluminescence[J]. Physical Review E, 1998, 57(1): R32-R35.
- [4] DAN M, CHEEKE J D N, KONDIC L. Ambient pressure effect on single-bubble sonoluminescence[J]. Physical Review Letters, 1999, 83(9): 1870-1873.
- [5] 杨日福, 赵超, 丘泰球. 亚临界水中超声激励空化泡动力学分析[J]. 应用声学, 2012, 31(3): 184-189.
YANG Rifu, ZHAO Chao, QIU Taiqiu. The dynamics analysis of ultrasonic cavitation bubble in subcritical water[J]. J. Appl. Acoust., 2012, 31(3): 184-189.
- [6] LU X P, LIU M H, JIANG Z H, et al. Effects of ambient pressure on bubble characteristics [J]. Chinese Physics Letters, 2002, 19(5): 704-706.
- [7] KIM K Y, BYUN K T, KWAK H Y. Temperature and pressure fields due to collapsing bubble under ultrasound[J]. Chemical Engineering Journal, 2007, 132(1-3): 125-135.
- [8] MEROUANI S, HAMDAOUI O, REZGUI Y, et al. Energy analysis during acoustic bubble oscillations: Relationship between bubble energy and sonochemical parameters[J]. Ultrasonics, 2014, 54(1): 227-232.
- [9] 安宇. 硫酸中多气泡声致发光光谱[J]. 应用声学, 2013, 32(3): 205-211.
AN Yu. Spectrum of multi-bubble sonoluminescence in sulfuric acid[J]. J. Appl. Acoust., 2013, 32(3): 205-211.
- [10] PROSPEREYI A. Bubble phenomena in sound fields[J]. Ultrasonics, 1984, 22(3): 115-124.
- [11] KELLER J B, MIKISIS M J. Bubble oscillations of large amplitude[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1980, 68(2): 628-633.
- [12] COLUSSI A J, WEAVERS L K, HOFFMANN M R. Chemical bubble dynamics and quantitative sonochemistry[J]. Journal of Physical Chemistry A, 1998, 102(35): 6927-6937.
- [13] VICHARE N P, SENTHILKUMAR P, MOHOLKAR V S, et al. Energy analysis in acoustic cavitation[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2000, 39(5): 1480-1486.
- [14] MEROUANI S, HAMDAOUI O, REZGUI Y, et al. Effects of ultrasound frequency and acoustic amplitude on the size of sonochemically active bubbles-Theoretical study[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2013, 20(3): 815-819.
- [15] 沈壮志, 吴胜举. 声场中气泡群的动力学特性[J]. 物理学报, 2012, 61(24): 244301.
SHEN Zhuangzhi, WU Shengju. Dynamical behaviors of a bubble cluster under ultrasound field[J]. Acta Phys. Sin., 2012, 61(24): 244301.
- [16] WU Q, ZHU C P, YAO C, et al. Ultrasonic cleaning device with adjustable power for submerged structure[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 578-579: 1087-1091.
- [17] 符卫春. 基于谱分析方法的超声空化特征实验研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2008: 28.
- [18] 王萍辉. 超声空化影响因素[J]. 河北理工学院学报, 2003, 25(4): 154-161.
WANG Pinghui. The influence factors of ultrasonic cavitation[J]. Hebei Institute of Technology, 2003, 25(4): 154-161.
- [19] LI B B, ZHANG H C, LU J, et al. Experimental investigation of the effect of ambient pressure on laser-induced bubble dynamics[J]. Optics and Laser Technology, 2011, 43(8): 1499-1503.