驻波场中环状空化泡聚集结构的稳定性分析*

雷照康# 武耀蓉# 黄晨阳 莫润阳 沈壮志
王成会† 郭建中‡ 林书玉

(陕西师范大学, 陕西省超声学重点实验室, 西安 710062)

(2023 年 12 月 12 日收到; 2024 年 2 月 1 日收到修改稿)

利用高速摄影和图像分析技术研究频率为 40 kHz 超声清洗槽中产生的环状空化泡聚集结构的演化过程. 环状结构通常出现在波节附近, 其半径小于 1/8 波长; 在一个包络波周期内, 结构经历建立、稳定、消失 3 个阶段, 结构形貌具有稳定性. 环状空化结构存在气泡的输运现象, 且在气泡主聚集区内有小泡团形成后向环内溢出, 随后消失成离散的空化泡或泡核再次进入气泡输运循环. 环状结构大小和气泡聚集区随时间小幅振荡变化, 且存在结构整体旋转现象, 主要取决于主声场和气泡间次级辐射场的共同作用. 基于双气泡模型分析环状结构形成的物理机制, 发现主声场是导致气泡形成环状聚集的控制因素. 基于环链状模型分析了结构稳定性, 通过数值计算得到了类环形结构等效势分布, 且声压越高的地方等效势越高, 此处气泡越易聚集. 驱动声场越强, 环链结构可能越完整, 但是, 声压过高导致高数密度的气泡聚集也可能破坏气泡的环状聚集稳定性进而演化成其他类型泡群结构. 理论分析结果与实验现象具有很好的一致性.

关键词: 超声空化, 环状气泡结构, 等效势能, 稳定性

PACS: 43.35.+d, 43.25.+y, 47.55.dp **DOI:** 10.7498/aps.73.20231956

1 引 言

超声换能器辐射的超声波在液体中传播可激发空化现象, 表现为空化气泡的生长、振荡、坍缩等一系列动力学过程[1]. 声空化泡的急剧坍缩可导致泡内气体形成高温高压状态[2], 同时还可能在外部液体中激发高速射流[3]和冲击波等局域极端效应, 是超声清洗、声化学和声致核聚变等领域声能应用的源动力. 最新研究发现, 在 succinonitrile-8.3% 水溶液凝固过程中, 不同情形下稳态空化气泡能够促进枝晶生长、枝晶臂断裂以及吸附球状晶生长[4].

声波激励下的空化气泡振动在液体中形成次级声辐射, 扰动局域声场分布的同时也影响邻近空化泡的振动行为, 从而, 空化泡彼此耦合. 因此, 多空化泡体系中极易出现不同结构类型的空化云, 主要表现为球状、水母状、海星状、ALF (acoustic lichtenberg figure)[5,6]. 实验发现, 在声空化场中还存在一种环状空化结构. Lauterborn 等[7]最早报道了这种由两个中心气泡和环状气泡云组成的带有拖尾的特殊空化云结构. 随后, Hatanaka 等[8]使用水听器测量了超声换能器在容器中产生的空化场的等效声压分布, 并使用高速摄像机记录了容器中产生的半圆形空化结构, 发现空化结构环绕压力波节存在. Mettin 等[5]在驻波声场中观察到了环绕压力波节但也更加靠近压力波腹的环状气泡结构, 并发现该环状结构在更高的声压下会转变为

* 国家自然科学基金 (批准号: 12374441, 11974232) 资助的课题.

同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: wangld001@snnu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: guojz@snnu.edu.cn

© 2024 中国物理学会 Chinese Physical Society

双层结构. 为更好研究气泡的聚集行为, Fatjó等[9]使用高速摄像机记录了直径仅为 15.9 mm 的小尺寸超声变幅杆与玻璃器壁间的薄层液体中形成的环状空化结构及其中心的空化泡团, 发现环状空化结构能在超声变幅杆表面产生环状空蚀, 并用分析力学理论建立了确定空化结构位置的方法. Yamashita 等[10]使用高速摄像机记录了氧气过饱和水中产生的类环状空化结构, 使用粒子图像测速方法研究气泡速度场和液体速度场与水中氧气无量纲过饱和度之间的关系, 发现气泡数密度过高时可能影响声场局域分布, 从而破坏类环状空化结构. 研究表明, 液体中同轴平行环状泡的耦合振动在其轴线上产生了局部高强度平面波场, 并发现该气泡系统的集体谐振频率降低[11], 因此, 液体内空化泡的环状聚集也可能对局域声场形成重要影响.

为探索多气泡体系可能形成的耦合空化影响, 研究者们基于泡群结构特征进行理论探索, 分析其潜在的动力学效应. Zhang 等[12]使用气泡动力学统一理论建立了研究中心气泡和环形气泡云之间相互影响的数学模型, 发现中心气泡的振动会受到环形气泡云的阻碍, 表现为振动周期延长、坍缩造成的能量损失降低[13]. Wu 等[14,15]研究了薄层液体中空化结构的演化过程, 发现超声频率、液体层厚度等因素可影响薄层液体中环状空化结构的稳定性. 李凡等[16]建立了薄层液体中环状空化结构的理论模型, 通过分析空化结构中气泡所受次 Bjerknes 力发现气泡初始半径、驱动声波的频率和压强会影响环状空化结构的稳定性. Bai 等[17,18]通过高速摄影与图像分析技术研究了附着在壁面上的亚毫米气泡的圆形环绕运动, 发现游移气泡的轨迹在气泡阵列的形状等多种因素的共同影响下表现出不稳定、不规则、不光滑的特点. 此外, 也有学者从其他方面研究该问题. 许龙和汪尧[19]使用 Fluent 软件建立双泡耦合超声空化三维有限元仿真模型, 并监测空化泡内部与周围液体中的压强变化, 发现双泡间的耦合会抑制空化泡的扩张、增强空化泡的能量转换能力并加剧空化现象. Zhang 等[20]考虑了耦合双泡的平移现象, 发现气泡径向脉动的无序性可能由其非线性平移引起, 即气泡的平动会影响其脉动. Wu 等[21]考虑了主 Bjerknes 力、拖曳力和附加质量力等力的影响, 使用欧拉-拉格朗日方法追踪气泡的迁移轨迹, 成功模拟了超声变幅杆下产生的锥形空化结构. 这些研究为认识气泡间相互作用机制提供了强有力的理论和实验支持, 但是, 在体空化声场中环形气泡聚集的内在物理机制尚不清晰, 有必要通过进一步的实验观察表征其演化行为.

本文通过高速摄像机对空化气泡环形聚集结构进行实验观察, 基于图像分析表征环状聚集气泡的行为演化特征, 重点关注环状结构出现位置和环内小气泡团运动轨迹等. 考虑气泡次级声辐射的时间延迟效应, 建立环链状气泡分布理论模型得到修正的气泡动力学方程, 并以此分析泡群结构等效势的空间分布. 本研究有助于理解多气泡形成环状稳定结构的物理机制, 可为声空化应用相关的声场调控方案制定提供理论和实验支持.

2 环形结构的空化泡聚集行为的实验观察

观察声空化场中环状气泡结构演化过程的实验装置主要由超声清洗机、透明亚克力水缸、高速摄像机、强光光源、水听器和示波器组成, 如图 1 所示. 以亚克力水缸底面几何中心为原点建立笛卡尔坐标系 O-xyz, 亚克力水缸底面与超声清洗机底面之间的距离为 5.08 cm, 超声清洗机中水面高度为 5.20 cm, 亚克力水缸中的水面高度为 22.50 cm. 超声清洗机 (深圳市佳源达科技有限公司) 的工作频率为 40 kHz, 最大电功率为 360 W. 在强光光源 (上海兆季电子科技有限公司) 的照明下用高速摄像机 (i-SPEED 727, iX Cameras Ltd. UK) 以每秒 5 万帧的帧率观察透明水缸 (9.42 cm × 9.43 cm× 29.50 cm) 的去离子水中的环状空化结构; 用水听器 (Miniature Hydrophone Type 8103, Bruel & Kjar, Denmark) 测量液体内的空化信号. 实验时水温保持为 26 ℃, 仅开启超声清洗机约 80% 的最大功率以避免过强的超声损坏水听器. 图 2(a) 中黄色线条为液体内空化信号波形, 具有典型的周期性分布特性[22], 红色线条和黑色线条分别为该信号的上侧包络线和下侧包络线. 受市电信号造成的工频干扰的影响[22,23], 红色包络线的频谱 (图 2(c)) 中存在频率约 100 Hz 的调制波; 空化信号中基频约为 38.15 kHz, 略低于清洗机预设频率 40 kHz; 除此之外还可观察到二分频、二分之三倍频和二倍频等频率成分的波 (图 2(b)); 调制波的二倍频和三倍频成分幅度较高 (图 2(c)), 说明该频率的调制

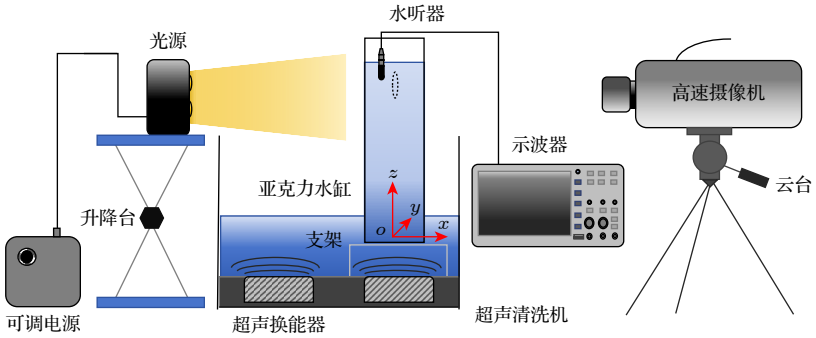

图 1 实验装置示意图

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

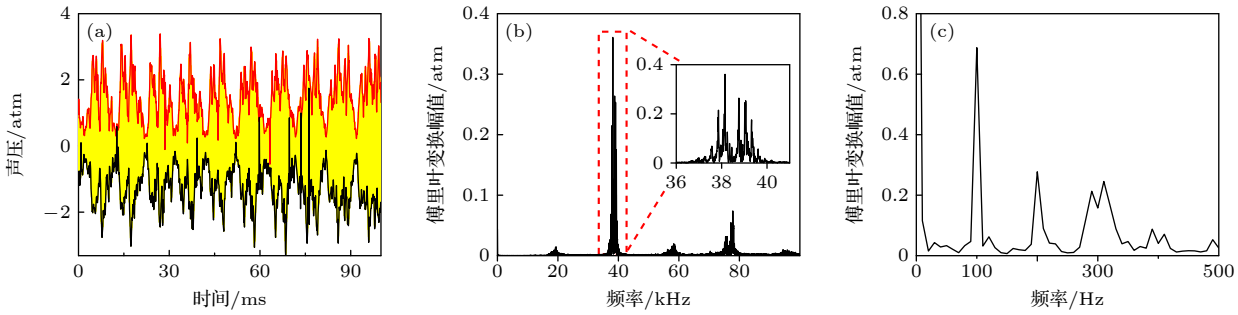

图 2 液体的空化信号 (a) 波形图 (红色和黑色曲线分别为空化场信号的上下包络线); (b) 空化信号幅度谱; (c) 空化信号上包络线的幅度谱

Fig. 2. Cavitation signal of liquid: (a) Waveform diagram (the red and black curves are the upper and lower envelope lines of the cavitation field signal, respectively); (b) amplitude spectrum of cavitation signal; (c) amplitude spectrum of envelope on cavitation signal.

波倍频成分也是声场内的空化信号的重要组成部分. 声空化场内的声信息复杂, 还包含和差频波成分, 因此, 其幅度谱中除了主峰外, 还包含了较为丰富的边带峰值, 其相邻峰值之间相距约 100 Hz.

环状空化结构出现的位置大约在 $z = 20.7$ cm 处, 其直径约 5.7 mm, 图 3 给出了环状空化结构演化时序图, 相邻两帧的时间间隔为 0.02 ms, 每 5 帧大致对应 4 个声周期[24]. 图像分析表明, 该结构主要由两个半弧形结构组成且气泡分布不均匀, 存在局部聚集密度较高的区域, 从补充材料视频 1 (online) 观察可发现气泡从气泡分布极为稀疏的区域 I 沿环状分布结构向气泡聚集区 II 移动, 进而导致该区域气泡数密度增大, 气泡聚合或聚集成小泡团的概率增大, 聚集而成的小泡团在主声场作用下向环结构中心位置方向移动, 随后消失. 因此, 分析认为, 气泡聚集区域声压相对较高, 气泡分布极为稀疏的区域声压较低, 可近似认为在声波节附近, 声压低到一定程度时, 小泡团因聚集状态不能维持而分散成许多离散的空化泡或泡核, 这些空化泡或泡核在主声场和环状结构上气泡形成的次级辐射声场的共同影响下重新向气泡聚集区运动. 由于小泡核更易于被近侧聚集的气泡结构吸引, 因此, 可近似认为波节两侧不发生离散的空化泡的交换, 即波节两侧的弧状环形结构各自形成气泡输运循环.

由于驻波场中波节两侧声压相位相反, 因此, 当上侧气泡处于膨胀期时, 下侧气泡可能处于坍缩期, 所以, 波节线两侧气泡聚集区内图案颜色深浅具有较为显著的差异. 在我们展示的代表帧内, 主要表现为波节线上侧气泡处于膨胀期且有明显的气泡聚集成小泡团的现象, 聚集的小泡团数量会随着结构存续时间的增加而小幅增加. 为验证包络波的影响, 选取间隔约为 10 ms 的代表帧进行对比分析, 如图 4 所示. 需要说明的是, 气泡聚集区分布位置在图片中采用虚线椭圆进行了标示, 气泡聚集区内的小泡团的位置用实线圆予以标示, 系列图片中深色影迹代表气泡群结构分布. 基于照片的时序分析结果发现, 环状结构具有较好的周期性演变特征, 主要表现为气泡聚集区分布位置具有一致性, 当聚集区内周期性振动气泡的崩溃期到来时, 环结

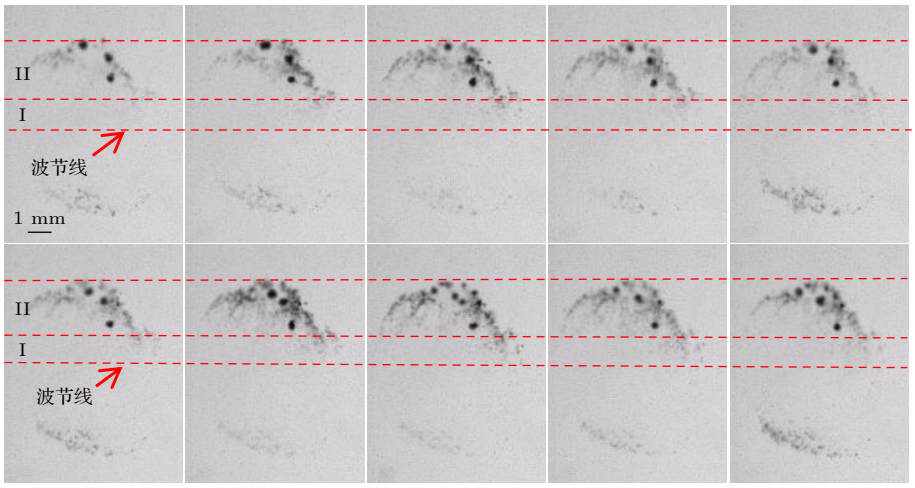

图 3 环状空化结构演化时间序列 (代表帧选自补充材料视频 1(online)), 图中红色虚线用于区分上环状结构分布的不同区域形貌

Fig. 3. Ring-like cavitation structure evolution time series (representative frame selected from supplementary video 1 (online)), the red dotted line in the figure is used to distinguish the topography of different regions of the upper ring-like structure distribution.

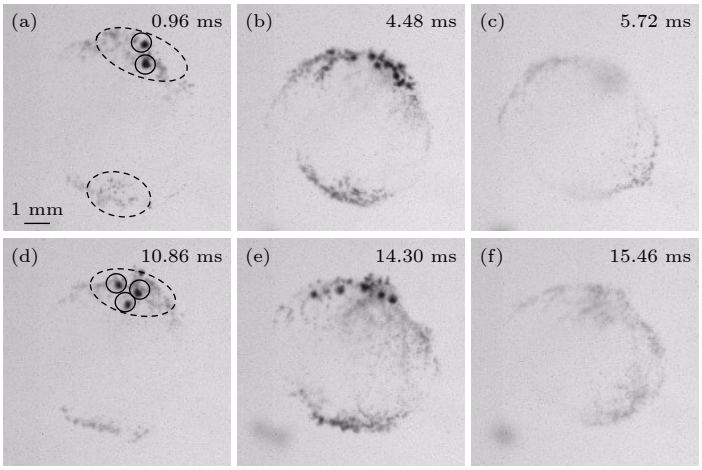

图 4 包络波周期对环形结构演化行为的影响 (虚线椭圆用于标注气泡聚集区, 实线圆圈用于标注气泡聚集区内的小泡团, 代表帧选自补充材料视频 1 (online))

Fig. 4. Influence of envelope wave period on evolution behavior of ring structure (the dotted ellipse is used to mark the bubble aggregation area, and the solid circle is used to mark the bubble clusters in the bubble aggregation area, representative frame selected from Supplementary Video 1 (online)).

构颜色变浅乃至消失. 聚集的小泡团的数量和分布位置可能会发生变化, 由于介质中声压幅值受调制波影响周期性变化, 其可能减小至低于空化阈值, 从而导致空化泡振动减弱且聚集的小泡团消失 (图 4(c), (f)). 结构可在较长时间内稳定地重复出现, 在一个包络波周期内会经历建立、稳定、消失 3 个阶段.

使用开源软件 Tracker 追踪小气泡团的运动轨迹, 如图 5 所示, 其中被追踪的小泡团用红色实线圆圈予以标注, 其他颜色点状标志线代表小泡团运动轨迹, 箭头表示运动方向. 从整体趋势看, 处于波节线上侧的气泡脱离聚集区向环内侧运动的同时, 还有向与主声场波节线垂直的环对称轴聚集的趋势. 小泡团间的相互吸引效应增加了气泡聚并概率. 同理, 波节线下侧小泡团也向环中心运动, 即存在与上侧气泡团相似的运动行为. 不仅如此, 小泡团还可能沿着环线小幅漂移, 这可能与局域声场改变导致的较高气泡密度聚集中心在环上的位置转移有关. 为此, 对补充材料视频 1 (online) 中出现的空化环状结构的直径、波节线上侧弧形部分最高点、下侧弧形部分最低点、以及不同时刻结构上泡团出现的数量和位置进行了追踪, 追踪总时间为 6 ms, 即 240 个声周期. 视频中小泡团出现位置的标注方法说明如下: 采用按 30°依次对环形结构

分区并将在各区段内环状结构上出现的小泡团在刻度线上集中标注, 如图 6(a), (b) 所示. 从图 6(c) 给出的 z 坐标变化趋势可以看出, 环结构的最高点和最低点位置存在一定的起伏变化, 上半段弧平动距离大约 1.1 cm, 下半段弧平移距离约 0.6 cm, 因此, 上半段弧受到的扰动影响更为显著. 随着时间的推移, z 方向直径可在一定时间范围 (图 6(d) 中两垂直虚线对应间隔) 内保持相对稳定, 但在 1.5 ms 和 4.5 ms 附近之间出现了两次阶跃现象, 表明结构可能在上下移动或者旋转. 从视频分析看, 环状结构并不是一个在竖直面内结构, 其与竖直面间的夹角可能随时间发生变化, 因此, 这种起伏变化可能源于结构的小幅上下移动等因素导致的观察误差. 由于界面、自身气泡次级声辐射以及周围气泡或泡

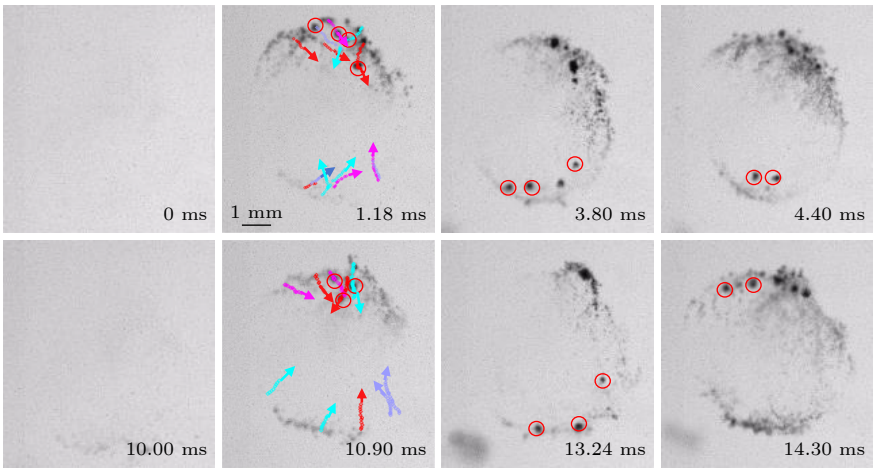

图 5 小气泡团在环状空化结构中的运动轨迹追踪 (代表帧选自补充材料视频 1 (online)), 红色圆圈标注被追踪的小泡团, 其他带箭头的标志线代表各气泡团的运动方向和轨迹

Fig. 5. Trajectory tracking of small bubble clusters in ring-like cavitation structures (representative frame selected from Supplementary Video 1 (online)). The red circle marks the tracked bubble clusters, and other marked lines with arrows represent the movement direction and trajectory of each bubble cluster.

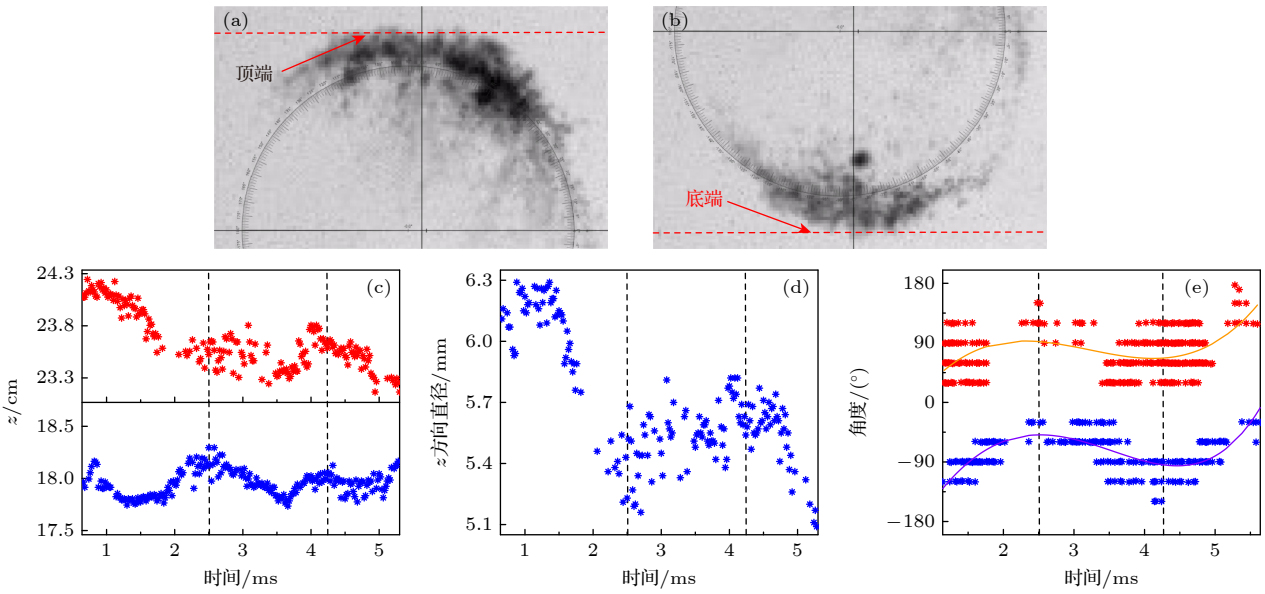

图 6 环状空化结构的演化规律, 追踪时间段为补充材料视频 1 (online) 的前 6 ms (a), (b) 环状结构气泡追踪示意图; (c) 环状结构弧形顶端和底端位置变化; (d) 结构直径变化 (左右垂直虚线用于标注直径相对稳定变化时间段); (e) 小泡团聚集位置所在的环结构角度分布

Fig. 6. The evolution law of the ring-like cavitation structure and the tracking period are in the first 6 ms of Supplementary Video 1 (online): (a), (b) Schematic diagram of ring-like structure bubble tracking; (c) changes in the position of the top and bottom of the arc of the ring structure; (d) changes in structural diameter (the left and right vertical dashed lines are used to mark the period of relatively stable change in diameter.); (e) angle distribution of a ring-like structure where small bubble clusters gather.

群结构的次级声辐射的影响, 环结构两半弧段分界线可能发生偏转, 结构本身也可能发生旋转. 通过跟踪环形结构上小泡团出现的角度区域 (图 6(e)) 我们发现, 上半段弧结构内小泡团分布主要集中在 30°—120°之间, 下半段弧结构内小泡团分布主要集中在–30°— –120°之间, 具有较好的对称性, 但是, 从分布的时间段看, 二者之间存在较为显著的相位差异. 从分布的均匀性看, 上半弧段更为均匀, 这可能是因为该部分结构更接近水面, 更易于受到水面扰动影响和吸收上部区域分布的泡核有关[25,26].

事实上, 结构并不是圆环状, 因此, 环形气泡结构的直径等参量估计只是从结构演化的角度粗略地反映了其变化特征, 但对气泡间相互作用的认识以及气泡在结构内生长、崩溃以及输运行为的分析具有重要的参考意义. 结构中心距离水面约为 18 mm, 非常接近水中 40 kHz 超声波的半波长, 水面作为声软界面, 为主声场的波节面, 因此, 可推断结构中心位置在与水面相邻的波节面附近. 波节面两侧气泡的动力学行为分析有利于认识结构本身的稳定性和演化行为, 因此, 我们将以双气泡和环状气泡链模型为基础研究气泡的振动特性.

3 理论模型

3.1 波节两侧双气泡间的相互作用

设一对耦合振动气泡对称分布在驻波波节两侧, 如图 7 所示, 气泡中心连线中点 C 处在波节线上. 此时气泡振动方程为[27,28]

$$\begin{aligned}&(1-M_i)R_i\ddot{R}_i+\frac{3}{2}\left(1-\frac{M_i}{3}\right)\dot{R}_i^2\\&=(1+M_i)\frac{1}{\rho}[p_{\mathrm{l}i}-p_\infty-p_{\mathrm{v}}-p_{\mathrm{z}}(t+t_{R_i})]\\&\quad+\frac{t_{R_i}}{\rho_l}\dot{p}_{\mathrm{l}i}-\frac{(2R_j\dot{R}_j^2+R_j^2\ddot{R}_j)|_{t-2|\boldsymbol{d}_{ij}|/c}}{|\boldsymbol{d}_{ij}|},\end{aligned}\tag{1}$$

下标 i,j 是气泡编号, 且 $i,j\in(1,2)$, $i\neq j$; (1) 式等号右侧最后一项代表气泡 j 作用在气泡 i 上的次级辐射声压, 可记为 P_{int}/ρ; ρ 和 c 分别为水的密度和声速; p_∞ 为无穷远处的静压强; R_i 为气泡瞬时半径; $M_i=\dot{R}_i/c$ 为马赫数. 气泡壁外侧液体压力 $p_{\mathrm{l}i}=p_{\mathrm{g}}(R,t)-4\eta\dot{R}_i/R_i-2\sigma/R_i$, 其中 η 和 σ 分别是液体黏度系数和表面张力系数; $p_{\mathrm{g}}=\mu\bar{R}T/(V_i-b)+p_{\mathrm{v}}$ 为泡内气体压力, μ 为泡内气体摩尔数, b 为泡内气体的范德瓦耳斯常数, T 为泡内气体温度, $\bar{R}$ 为理想气体常数, V_i 为气泡体积, p_{v} 为泡内气体的饱和蒸气压. 驱动声压 $p_z=2p_{\mathrm{A}}\sin(kx)\sin(2\pi ft)$, 其中 $k=2\pi f/c$ 为波数, f 为驱动频率, p_{A} 为压力幅值, $t_{R_i}=R_i/c$. R_0 为气泡初始半径. 气泡所受的主 Bjerknes 力、次 Bjerknes 力以及其合力分别为[29]

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{B}_1i}=\langle V_i\nabla p_{\mathrm{z}}\rangle,\tag{2}$$

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{B}_2ij}=\frac{\rho}{4\pi}\langle\dot{V}_i\dot{V}_j\rangle\frac{\boldsymbol{d}_{ij}}{|\boldsymbol{d}_{ij}|^3},\tag{3}$$

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{B}i}=\boldsymbol{F}_{\mathrm{B}_1i}+\boldsymbol{F}_{\mathrm{B}_2ij},\tag{4}$$

其中 $\boldsymbol{d}_{ij}$ 为从气泡 i 指向气泡 j 的矢量, 其模表示气泡间距, $\langle\cdot\rangle$ 为时间周期平均.

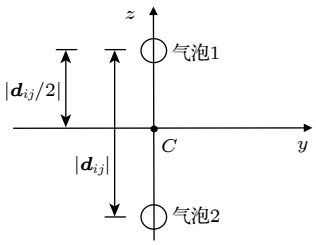

图 7 波节两侧双泡相互作用示意图

Fig. 7. Diagram of two bubbles located on both sides of the wave node.

3.2 波节处的环形气泡链

位于 yoz 平面内的环形气泡链如图 8(a) 所示. 假设 N 个互相耦合的初始状态一致的气泡在环形气泡链圆周上均匀分布, 两气泡之间的距离对圆心的张角为 θ_0, 环链上气泡振动的方程为

$$\begin{aligned}&(1-M_i)R_i\ddot{R}_i+\frac{3}{2}\left(1-\frac{M_i}{3}\right)\dot{R}_i^2\\&=(1+M_i)\frac{1}{\rho}[p_{\mathrm{l}i}-p_\infty-p_{\mathrm{v}}-p_z(t+t_{R_i})]\\&\quad+\frac{t_{R_i}}{\rho}\dot{p}_{\mathrm{l}i}-\sum_{j=1}^{N}\frac{(2R_j\dot{R}_j^2+R_j^2\ddot{R}_j)|_{t-|r_{ij}|/c}}{|r_{ij}|},\end{aligned}\tag{5}$$

其中下标 i,j 代表气泡的编号, 且 $i,j\in(1,2,\cdots,N)$, $i\neq j$; $\boldsymbol{r}_{ij}$ 为气泡 i 指向气泡 j 的矢量, 其模表示气泡间距. P_{int} 为除气泡 i 外的所有气泡的次级辐射声压在气泡 i 处的叠加, 则气泡 i 处的等效势能和其所受次 Bjerknes 力为[27]

$$U_i=\langle V_iP_{\mathrm{int}}\rangle,\tag{6}$$

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{B}_2i}=\sum_{i,j}\frac{\rho}{4\pi}\left\langle\dot{V}_i\dot{V}_j\right\rangle\frac{\boldsymbol{r}_{ij}}{|\boldsymbol{r}_{ij}|^3}=\langle V_i\nabla P_{\mathrm{int}}\rangle.\tag{7}$$

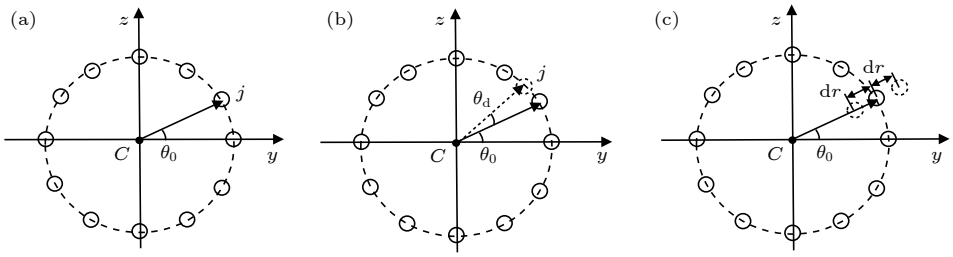

图 8 环形气泡链的结构示意图 (a) 气泡在环形气泡链上的分布示意图; (b) 计算等效势能 θ 方向分布的示意图; (c) 计算等效势能径向分布的示意图

Fig. 8. Structural diagram of the ring bubble chain: (a) Distribution diagram of the bubble on the ring bubble chain; (b) schematic diagram for calculating the distribution of the equivalent potential in the direction of θ; (c) schematic diagram for calculating the radial distribution of the equivalent potential.

图 8(b), (c) 给出了考虑气泡在环链方向或者径向发生偏离时的等效势能计算示意图, 数值计算参数设置如下[1]: $c = 1500$ m/s, $\rho = 1000$ kg/m^3, $p_\infty = 1$ atm (1 atm = 1.01×10^5 Pa), $\eta = 0.001$ Pa·s, $\sigma = 0.072$ N/m, $b = 0.032$ L/mol, $p_v = 2338$ Pa, $\bar{R} = 8.314$ J/(mol·K), $R_0 = 4.5$ μm.

4 结果讨论

4.1 波节两侧气泡受力特征分析

为更好地与前文实验结果对照, 基于图 2 信号分析结果, 后文中数值计算所取声波频率为 38.15 kHz. 根据图 4 中展示的环状空化结构在 10 ms 周期中稳定存在的时间占比, 结合图 2(a) 中的空化信号幅度分析估算超声清洗机以最大功率运行下环状空化结构稳定存在时波腹处的平均有效声压约为 1.310 atm, 故取 $p_A = 0.655$ atm. 在驻波场中 $\lambda/4$ 范围内空化泡所受主 Bjerknes 存在 4 个零点, 即存在主 Bjerknes 符号变化的 3 个区间, 因此处在驻波场相邻波腹波节间的气泡随位置变化可表现出不同的运动变化趋势[30]. 图 9(a) 显示波节 ($z = 20.7$ cm) 附近主 Bjerknes 力较小且基本呈线性增长, 波节两侧气泡受力方向相反, 在环状结构分布的范围内波节面两侧还各存在一个力零点, 即力可能在此位置附近改变方向, 气泡相对于波节面的运动速度变化趋势将受到影响. 由图 9(b) 知次 Bjerknes 力远小于主 Bjerknes 力, 但是在波节位置处次 Bjerknes 力随气泡间距的减小而迅速增强并会超过主 Bjerknes 力. 因此, 在波节面附近极小的区域内, 气泡间的相互作用主要由次 Bjerknes 力控制, 且两气泡受力方向相反, 二者之间表现为吸引作用, 然而, 随着距离的小幅增大, 气泡间的相互作用很快过渡到主 Bjerknes 力占主导地位且表现为相互排斥的情形, 这就是在波节附近较难以观察到气泡聚集的原因, 如图 9(c) 内放大图所示. 并且, 在波节以外的区域, 随两气泡间距增大, 气泡间的相互作用力有增大的趋势, 即二者排斥作用增强, 但在超过距离波节约 8 mm 后 (即波节 ($z = 20.7$ cm) 右侧的第一个峰值点), 排斥力的影响减弱, 逐渐过渡到吸引区, 由此, 我们

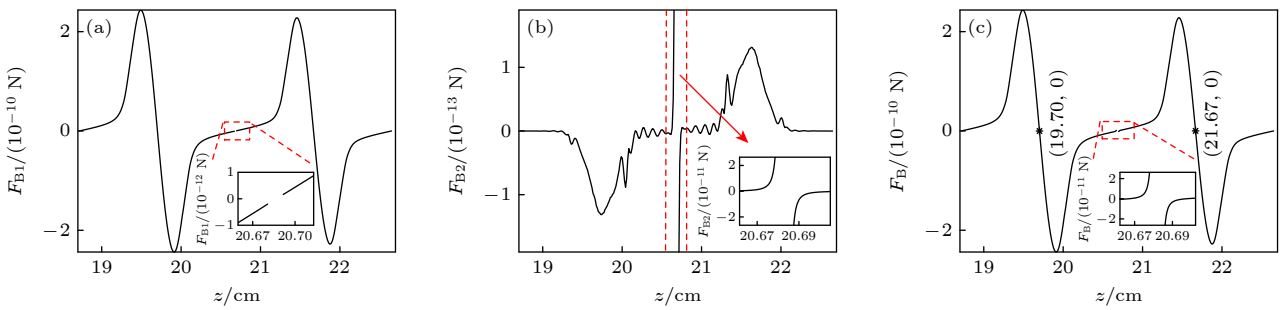

图 9 波节两侧对称耦合双泡在驻波场中的受力情况 (a) 所受的主 Bjerknes 力; (b) 次 Bjerknes 力; (c) 主 Bjerknes 力与次 Bjerknes 力的合力

Fig. 9. The force of a symmetrically coupled double bubble on both sides of the node in a standing wave field: (a) The primary Bjerknes force; (b) the secondary Bjerknes force; (c) the resultant of the primary Bjerknes force and the secondary Bjerknes force.

预测环半径小于 8 mm, 实际观察到环半径约为 3 mm, 小于理论预测半径, 这可能与我们设置的驱动压力幅值和气泡平衡半径有关, 还可能与环面倾斜有关. 基于双气泡在驻波场内相互作用的理论分析能够很好地解释环链结构尺寸形成的内在机制.

4.2 驻波场中环形气泡链结构稳定性分析

双气泡模型能有助于预测环状空化结构可能的最大半径, 但结构的稳定性存在的机制还不清晰, 因此, 基于图 8 所示环链模型进一步讨论气泡间的耦合作用. 数值计算参数与 4.1 节相同. 根据图 3 中的分析, 假设环形气泡链的直径 D 为 $\lambda/4$. 为简化分析, 设环形气泡链上均匀分布 80 个气泡, 利用 (6) 式计算等效势能在 θ 方向与径向分布. 图 10 中蓝色空心圆点代表气泡所处位置, 黑色点线为等效势分布, 0°和 180°处为波节平面. 对直径为 $\lambda/4$ 的环链而言, 其上每个气泡都位于等效势的势阱中, 即气泡可在半径一定的环链上保持位置稳定; 但是不同位置处等效势能值存在较大差异. 波节附近的气泡的等效势能几乎为 0; 随着偏离波节距离的增加, 由于声压增大, 气泡的振动增强, 等效势随之增大. 此外, 等效势的变化还与气泡间的相互作用密切相关, 气泡间耦合振动的彼此增强或抑制效应也会影响等效势的大小. 因此, 在±90°处气泡振动最强, 等效势最高. 振动较强区域气泡聚并机率变大, 形成的大气泡可能吸引周围小气泡向其汇集, 进而出现实验观察到的气泡输运现象.

在 $r \in (0,D)$ 范围内计算每个气泡的等效势能的径向分布以及每个气泡的归一化等效势能的径向分布. 为了进一步探索超声清洗机输出功率对环状空化结构稳定性的影响, 在数值计算中分别取 p_A 为 0.217 atm, 0.655 atm, 0.755 atm, 所得结果如图 11 所示. 等效势能在圆周上的径向分布呈现良好的类环形结构, 总体表现为±90°附近角度范围内等效势最强. 从归一化的等效势分布图看, 随着声压的增加, 环形结构越完整, 而 0.217 atm 的低声压情形下环形结构主要分布在波节线的上部, 且存在多个同心的平行半环. 低声压下气泡振动弱, 气泡相对难以聚集, 若能形成环状聚集, 可能极不稳定, 有向平面结构转化的趋势[16]. 随着声压增加到 0.655 atm, 观察到不完整的分段弧形组成的环状结构, 在更高声压 0.755 atm 作用下, 可观察到完整的环结构. 实验比较了超声波清洗机不同输入电功率情形下距离水面约一个波长处的环状聚集行为, 发现在较低的声功率下可以观察到气泡数密度较低的类环状空化结构, 且随着输入电功率的增大, 结构越来越完整, 但是, 过高的输入功率也可能导致结构溃散或演化成球状泡团聚集结构, 详见补充材料视频 2 (online). 需要特别说明的是, 从实验观察看, 气泡的数密度和我们选定的环链气泡数 $N = 80$ 相比要高得多, 但是, 基于环链理论模型的分析与实验观察具有很好的一致性, 说明此简化模型在一定程度上可以反映环链上气泡间相互作用以及气泡与声场间的相互作用机制.

5 结 论

本文基于高速摄影和图像分析技术对环状空化结构在超声空化场中的演化行为进行实验观察, 发现环状空化结构中心通常位于波节处, 可以较长时间内稳定地重复出现, 在一个包络波声周期内会经历建立、稳定、消失 3 个阶段. 环形结构上与环内区域形成气泡输运循环, 即在主聚集区形成的小泡团向环内运动至声压较低处消失形成许多离散的空化泡或泡核又重新回到环状结构中. 基于波节两侧的双气泡模型分析了结构生成的物理机制,

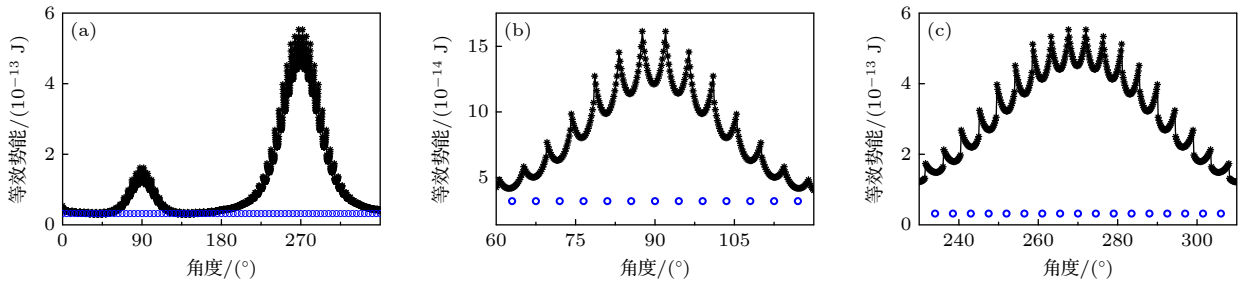

图 10 等效势在环形气泡链圆周上 θ 方向的分布 (a) 圆周上的分布; (b) 90°附近的分布; (c) 270°附近的分布

Fig. 10. The distribution of the equivalent potential in the θ direction along the circumference of the ring bubble chain: (a) The distribution on the circumference; (b) distribution near 90°; (c) distribution near 270°.

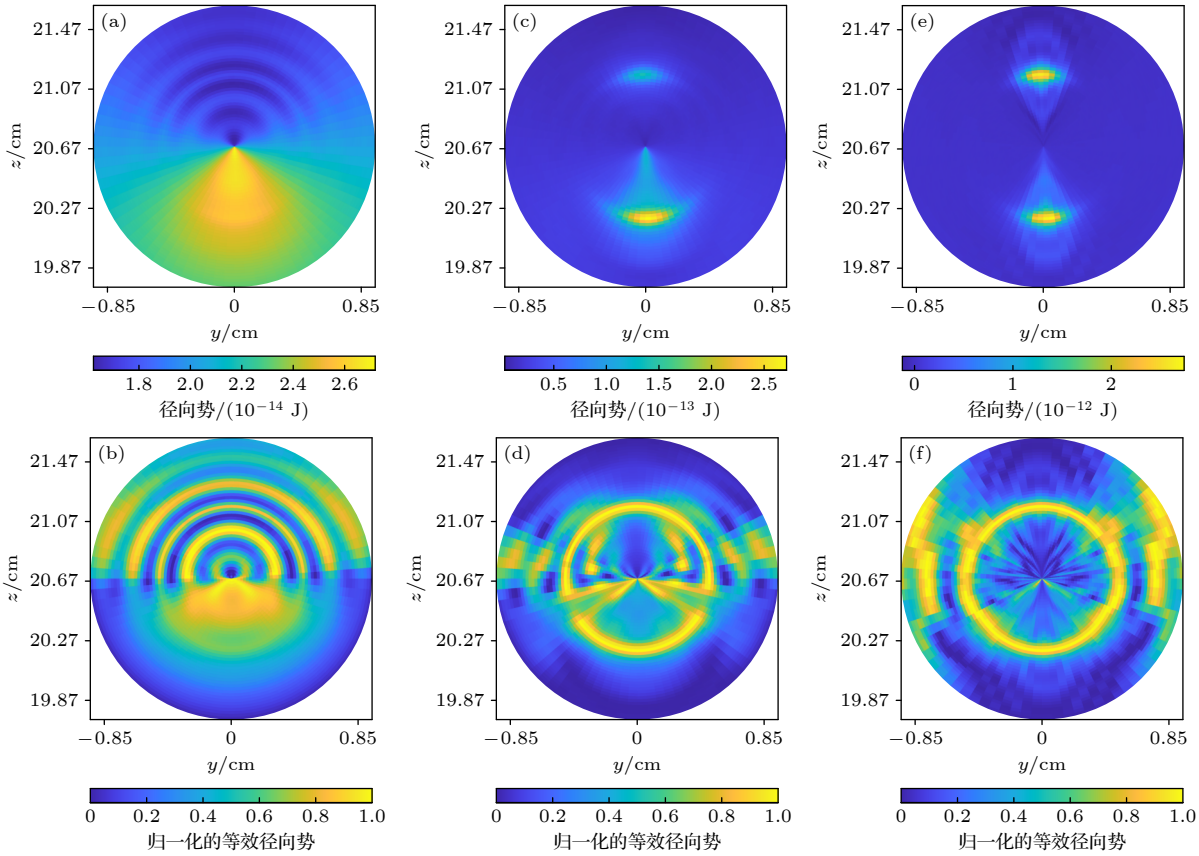

图 11 环形气泡链上等效势的径向分布 (a), (b), (c) 等效势的径向分布; (d), (e), (f) 归一化等效势的径向分布; (a), (d) p_A = 0.217 atm; (b), (e) p_A = 0.655 atm; (c), (f) p_A = 0.755 atm

Fig. 11. The radial distribution of the equivalent potential on the ring bubble chain: (a), (b), (c) The radial distribution of the equivalent potential; (d), (e), (f) the radial distribution of the normalized equivalent potential; (a), (d) p_A = 0.217 atm; (b), (e) p_A = 0.655 atm; (c), (f) p_A = 0.755 atm.

发现结构稳定性与驻波声场分布以及气泡相互作用密切相关. 基于简化的环状链式空化结构理论模型, 从耦合振动的气泡间的等效势能出发, 分析了驻波场中环状空化结构的稳定性. 结果表明, 半径接近 1/8 波长的环形气泡链等效势能分布可使每个气泡都稳定于势阱中, 径向分布呈现类环形势垒结构, 与气泡环状空化结构形状一致. 高声压可激发更剧烈的气泡振动形成更高的等效势分布, 此处气泡聚集事件更易发生. 过强的声场可能破坏等效势能径向分布的类环形结构, 即环形气泡结构崩溃. 气泡环状聚集行为的观察和理论分析有利于认识声空化场中气泡的聚集演化行为, 也可为空化场的调控提供参考. 此外, 市电信号可形成工频干扰使超声清洗机内液体的空化信号存在约 100 Hz 的调制波, 评估工频干扰对声空化场的时间均匀性的影响以及探究如何避免工频干扰将成为我们后续研究的关注点之一.

参考文献

[1] Chen W Z 2014 *Acoustic Cavitation Physics* (Beijing: Science press) p140 (in Chinese) [陈伟中 2014 声空化物理 (北京: 科技出版社) 第 140 页]

[2] Behnia S, Jafari A, Soltanpoor W, Jahanbakhsh O 2009 *Chaos Soliton. Fract.* **41** 818

[3] Chahine G L, Kapahi A, Choi J K, Hsiao C T 2016 *Ultrason. Sonochem.* **29** 528

[4] Zhang Y, Wu W H, Wang J Y, Zhai W 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 244303 [张颖, 吴文华, 王建元, 翟薇 2022 物理学报 **71** 244303]

[5] Mettin R 2005 *Mod. Trends Appl. Res. Signpost* 1

[6] Mettin R, Luther S, Ohl C D, Lauterborn W 1999 *Ultrason. Sonochem.* **6** 25

[7] Lauterborn W, Kurz T, Mettin R, Ohl C D 1999 *Adv. Chem. Phys.* **110** 295

[8] Hatanaka S I, Yasui K, Kozuka T, Tuziuti T, Mitome H 2002 *Ultrasonics* **40** 655

[9] Fatjó G G A, Torres Pérez A, Hadfield M 2010 *Ultrason. Sonochem.* **17** 73

[10] Yamashita T, Ando K 2019 *Ultrason. Sonochem.* **52** 268

[11] Alloul M, Dollet B, Stephan O, Bossy E, Quilliet C, Marmottant P 2022 *Phys. Rev. Lett* **129** 134501

[12] Zhang A M, Li S M, Cui P, Li S, Liu Y L 2023 *Phys. Fluids* **35** 033323

[13] Zhang A M, Li S M, Cui P, Li S, Liu Y L 2023 *Theor. Appl. Mech. Lett.* **13** 100438

[14] Wu P F, Bai L X, Lin W J, Yan J C 2017 *Ultrason. Sonochem.* **38** 75

[15] Bai L X, Wu P F, Li C, Deng J J, Zeng Z J 2018 *Appl. Acoust.* **37** 614 (in Chinese) [白立新, 吴鹏飞, 李超, 邓京军, 曾志杰 2018 应用声学 **37** 614]

[16] Li F, Zhang X M, Tian H, Hu J, Chen S, Wang C H, Guo J Z, Mo R Y 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 084303 (in Chinese) [李凡, 张先梅, 田华, 胡静, 陈时, 王成会, 郭建中, 莫润阳 2022 物理学报 **71** 084303]

[17] Bai L C, Sun J G, Gao Y D, Xu W L, Zeng Z J, Ma Y H, Bai L X 2021 *Ultrason. Sonochem.* **74** 105577

[18] Bai L C, Sun J G, Gao Y D 2021 *Acta Phys. Sin* **70** 054701 (in Chinese) [白立春, 孙劲光, 高艳东 2021 物理学报 **70** 054701]

[19] Xu L, Wang Y 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 024303 (in Chinese) [许龙, 汪尧 2023 物理学报 **72** 024303]

[20] Zhang L L, Chen W Z, Shen Y, Wu Y R, Zhao G Y, Kou S Y 2022 *Chin. Phys. B* **31** 044303

[21] Wu W H, Yang P F, Zhai W, Wei B B 2019 *Chin. Phys. Lett.* **36** 084302

[22] Avvaru B, Pandit A B 2009 *Ultrason. Sonochem.* **16** 105

[23] Li X S, Wang S Z 2014 *Automatic Measurement Technique* (Beijing: Metallurgical Industry Press) p226 (in Chinese) [李希胜 王绍纯 2014 自动检测技术 (北京: 冶金工业出版社) 第 226 页]

[24] Li F, Zhang X M, Tian H, Hu J, Chen S, Mo R Y, Wang C H, Guo J Z 2022 *Ultrason. Sonochem.* **87** 106057

[25] Li F, Huang C Y, Zhang X M, Wang C H, Guo J Z, Lin S Y, Shen Z Z, Tian H 2023 *Ultrasonics* **132** 106992

[26] Li F, Huang C Y, Zhang X M, Wang C H, Hu J, Chen S, Tian H, Shen Z Z, Guo J Z, Lin S Y 2023 *Ultrason. Sonochem.* **98** 106500

[27] An Y 2011 *Phys. Rev. E* **83** 066313

[28] Zhang W J, An Y 2013 *Phy. Rev. E* **87** 053023

[29] Mettin R, Ohl C D, Lauterborn W 1999 *Ultrasonics* **524** 139

[30] Shen Z Z 2015 *Acta Phys. Sin* **64** 124702 (in Chinese) [沈壮志 2015 物理学报 **64** 124702]

Stability analysis of ring-like cavitation bubble cluster structure in standing wave field*

Lei Zhao-Kang # Wu Yao-Rong # Huang Chen-Yang Mo Run-Yang
Shen Zhuang-Zhi Wang Cheng-Hui † Guo Jian-Zhong ‡ Lin Shu-Yu

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

(Received 12 December 2023; revised manuscript received 1 February 2024)

Abstract

Multi-cavitation bubble system can easily produce cavitation clouds with various structure types, including ring-like cavitation structures. Nonetheless, the evolutionary behavior of the structure and the physical mechanism of its formation are less investigated. In this work, high-speed photography and image analysis techniques are used to study the evolution of ring-like cavitation bubble aggregation structure in an ultrasonic cleaning tank with a frequency of 40 kHz. The ring-like structure usually appears near the pressure nodule, and its radius is less than a one-eighth wavelength. The structure involves establishment, stability and disappearance during an envelope wave period, and its morphology is stable. The ring-like cavitation structure exists as a bubble transport phenomenon, and the formed small bubble clusters flow to the outside of the ring and become discrete cavitation bubbles, or the bubble nuclei rejoin the cycle of bubble transport in the main accumulation area of the bubble. The size of the ring structure and the bubble accumulation area oscillate slightly, and there exists the whole structure rotation phenomenon, which depends on the interaction of the main sound field and the secondary radiation field with the bubbles. Furthermore, in this work, a mathematical model of two bubbles is used to investigate the physical mechanism behind the formation of a ring. It is found that the sound field is a key factor in ring formation. The ring chain model is used to analyze the structural stability by taking into account the time delay caused by the secondary acoustic radiation of the bubble. The numerical results show that the equivalent potential energy distribution of a ring bubble chain with a one-eighth wavelength in radius can stabilize each bubble in the potential well, and the radial distribution presents a ring-like barrier structure. The higher the sound pressure, the greater the equivalent potential, and the more the bubbles are clustered. The higher the driving sound field, the more complete the ring chain structure is. However, high sound pressure may cause the agglomeration of bubbles with high number density to disintegrate the stability of the ring aggregation of bubbles and evolve into other types of bubble aggregation structures. The theoretical results are in good consistence with the experimental phenomena.

Keywords: ultrasonic cavitation, ring-like bubble structure, equivalent potential energy, stability

PACS: 43.35.+d, 43.25.+y, 47.55.dp **DOI:** 10.7498/aps.73.20231956

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12374441, 11974232).

# These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: wangld001@snnu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: guojz@snnu.edu.cn

物理学报 Acta Physica Sinica

Chinese Physical Society

Institute of Physics, CAS

驻波场中环状空化泡聚集结构的稳定性分析

雷照康 武耀蓉 黄晨阳 莫润阳 沈壮志 王成会 郭建中 林书玉

Stability analysis of ring-like cavitation bubble cluster structure in standing wave field

Lei Zhao-Kang Wu Yao-Rong Huang Chen-Yang Mo Run-Yang Shen Zhuang-Zhi Wang Cheng-Hui Guo Jian-Zhong Lin Shu-Yu

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 73, 084301 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231956

在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.73.20231956

当期内容 View table of contents: http://wulixb.iphy.ac.cn

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

液体薄层中环链状空化泡云结构稳定性分析

Structure stability of cyclic chain-like cavitation cloud in thin liquid layer

物理学报. 2022, 71(8): 084303 https://doi.org/10.7498/aps.71.20212257

考虑水蒸气蒸发和冷凝的球状泡群中泡的动力学特性

Dynamic characteristics of bubbles in spherical bubble group considering evaporation and condensation of water vapor

物理学报. 2021, 70(19): 194301 https://doi.org/10.7498/aps.70.20210045

中性和阳离子丁酮团簇的结构及稳定性的理论研究

Theoretical study on the structure and stability of neutral and cationic butanone clusters

物理学报. 2018, 67(3): 033601 https://doi.org/10.7498/aps.67.20171862

磁场对二元合金凝固过程中糊状层稳定性的影响

Effect of magnetic field on stability in mushy layer during binary alloy solidification

物理学报. 2021, 70(6): 066401 https://doi.org/10.7498/aps.70.20201748

发光铅卤钙钛矿纳米晶稳定性的研究进展

Research progress of stability of luminous lead halide perovskite nanocrystals

物理学报. 2020, 69(11): 118501 https://doi.org/10.7498/aps.69.20191767

氢化二维过渡金属硫化物的稳定性和电子特性: 第一性原理研究

Stability and electronic structure of hydrogenated two-dimensional transition metal dichalcogenides: First-principles study

物理学报. 2019, 68(3): 037102 https://doi.org/10.7498/aps.68.20181597