



## 气泡在超声场中绕圈运动的高速摄影及其图像分析

白立春 孙劲光 高艳东

### High-speed photography and image analysis of orbital motion of gas bubbles in ultrasonic field

Bai Li-Chun Sun Jin-Guang Gao Yan-Dong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 054701 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201381

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201381>

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

声场中空化气泡的耦合振动及形状不稳定性的研究

Coupled oscillation and shape instability of bubbles in acoustic field

物理学报. 2018, 67(3): 034301 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171573>

液体材料超声处理过程中声场和流场的分布规律研究

Acoustic field and convection pattern within liquid material during ultrasonic processing

物理学报. 2017, 66(19): 194303 <https://doi.org/10.7498/aps.66.194303>

声场中球形空化云中气泡的耦合谐振

Coupled resonance of bubbles in spherical cavitation clouds

物理学报. 2019, 68(13): 134301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190360>

气泡与自由液面相互作用形成水射流的机理研究

Formation mechanism of water jets induced by the interaction between bubble and free surface

物理学报. 2017, 66(4): 044702 <https://doi.org/10.7498/aps.66.044702>

用于透明平板平行度和均匀性测量的单元件干涉仪

A single-element interferometer for measuring parallelism and uniformity of transparent plate

物理学报. 2017, 66(6): 069501 <https://doi.org/10.7498/aps.66.069501>

液态五元Ni-Zr-Ti-Al-Cu合金快速凝固过程的高速摄影研究

Rapid solidification mechanism of liquid quinary Ni-Zr-Ti-Al-Cu alloy investigated by high-speed cinematography

物理学报. 2019, 68(19): 196401 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190910>

# 气泡在超声场中绕圈运动的高速摄影及其图像分析\*

白立春 孙劲光<sup>†</sup> 高艳东

(辽宁工程技术大学电子与信息工程学院, 葫芦岛 125105)

(2020年8月23日收到; 2020年10月27日收到修改稿)

借助高速摄影和图像分析技术对首次发现的附壁气泡的绕圈现象进行了实验研究, 重点研究游移气泡的运动轨迹、附壁气泡的布阵过程、气泡的来源以及气泡的振动细节. 研究发现游移绕圈气泡的运动轨迹呈现出不稳定、不规则、不光滑的特点. 阵列气泡源于游移气泡, 而游移气泡变成阵列气泡的方式主要是通过合并增大体积, 从而减小所受的 Bjerknes 力, 降低活性的方式实现的. 游移气泡源于 ALF (acoustic lichtenberg figure) 空化云中大量空泡的合并, 使以径向振动为主的空泡逐渐过渡到以表面波动为主的气泡. 阵列气泡在 Bjerknes 力的作用下呈现出规则的表面波动, 而体积更小受力更大的游移空泡的表面完全失稳, 呈现极不规则的形貌, 并对附近阵列气泡的表面波动产生影响. 阵列气泡呈现出十分规则的排布, 相邻阵列气泡之间的振动相位是相反的, 表现为相互排斥.

**关键词:** 气泡, 超声场, 图像处理, 高速摄影

**PACS:** 47.55.db, 42.30.Va, 42.79.-e

**DOI:** 10.7498/aps.70.20201381

## 1 引言

气泡影响了流体的宏观物性和流动状态, 研究流体中的气泡运动对声学领域的超声清洗和声化学、水力学领域的泄洪效能及掺气减蚀等都具有重要意义. 流体中的气泡随着流体运动的同时, 还会和流体产生相对运动, 例如在水动力的作用下气泡会产生的“之”字形和螺旋形运动<sup>[1]</sup>. 液体中的气泡在超声场的作用下也会产生各种运动. 例如, 气泡可能径向振动<sup>[2]</sup>, 在空泡内部产生高温高压<sup>[3]</sup>, 在周围液体中产生微声流<sup>[4]</sup>, 气泡可能非对称溃灭<sup>[5]</sup>, 产生高速微射流<sup>[6]</sup>, 气泡可能产生表面波动或分裂<sup>[7,8]</sup>. 除了上述气泡的变形运动, 气泡在超声场的作用下还可能产生宏观移动. 例如气泡可能在主 Bjerknes 力的作用下根据与共振半径相对大小不同

向驻波声场的波节或波腹移动<sup>[9]</sup>, 考虑到气泡的非线性振荡, 在足够高的压力下, 所有气泡都会朝着背离压力波腹的方向移动<sup>[10]</sup>; 除了特别大或特别小的气泡受力可以忽略, 所有在行波场中的气泡都会向波的传播方向移动<sup>[11]</sup>; 气泡可能在二阶 Bjerknes 力的作用下会朝着同相位振动气泡方向移动并最终合并<sup>[12]</sup>; 此外, 气泡还可能在声场中产生一种比较特别的宏观运动——绕圈运动. 1977年, Miller<sup>[13]</sup>观察到气泡可能被困在压力节点附近并产生绕圈运动, 在忽略气泡径向振动的前提下, 他对这一现象进行了分析. 他认为扩散而引起的气泡尺寸变化和尺寸变化引起的在气泡辐射力变化上的相互作用是产生绕圈运动的原因. 2014年, Barbat 和 Ashgritz<sup>[14]</sup>在忽略黏度的理想流体假设前提下, 理论研究发现, 两个径向振动的气泡可能具有椭圆形的运动轨迹, 气泡可以通过离心力和

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2018YFB1403303) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: [sjg\\_lntu@163.com](mailto:sjg_lntu@163.com)

二阶 Bjerknes 力平衡来维持这种绕圈运动. 2001 年, Rensen 等<sup>[15]</sup> 实验研究了声场力对剪切流中单个气泡的影响, 研究发现声场力和流体动力的相互作用 (相互竞争) 导致气泡产生了螺旋轨迹的绕圈运动. 2012 年, Shirota 等<sup>[16]</sup> 在声致发光实验通常使用的加装了换能器的圆底烧瓶中发现两个气泡在声场的作用下沿椭圆轨道绕圈运动, 他们认为除了反相位振动气泡之间的相互排斥的二阶 Bjerknes 力, 还存在着指向中心的主 Bjerknes 力. 2013 年, Desjoux 等<sup>[17,18]</sup> 在一个圆柱形容器中发现超声激励的气泡由于容器的形状产生环形的绕圈运动, 他们认为这与 Bjerknes 力在容器中的分布有关.

上述对于气泡绕圈运动研究, 虽然工况不同, 但是气泡都是悬浮于液体之中的, 气泡都不与外物接触. 与上述研究不同, 本文发现在超声场中存在一种附壁气泡的绕圈运动——游移气泡附着于壁面, 并围绕着位置固定的附壁气泡阵列绕圈运动. 这种近乎于二维的运动非常适合基于高速摄影的图像分析研究. 本文利用图像分析技术对这种气泡绕圈现象进行了影像学分析.

## 2 实验方法

实验装置由玻璃水箱、超声电源及超声换能器、高速摄影机、光源、长焦微距镜头等组成, 如图 1 所示. 矩形玻璃水槽 (600 mm × 330 mm × 330 mm) 中盛有含气量较为丰富的新鲜自来水. 频率为 20 kHz 的换能器完全浸没在水中并辐射声波. 实验根据不同的需要采用两个高速摄影机 (Photron Fastcam SA-1.1, Photron Ltd., Japan 和 Photron Fastcam-Super 10, Photron Ltd., Japan), 配合两款长焦微距镜头 (Zoom 6000, Navitar, USA; LM50 JCM, Kowa, Japan) 以及不同的高亮度光源 (PI-Luminor high-light LED lamp

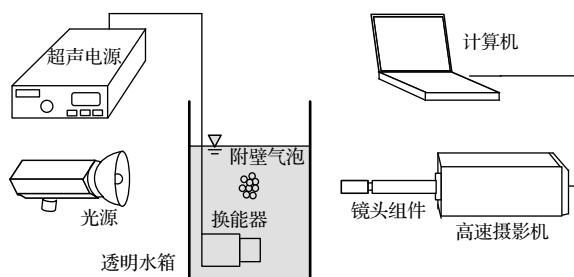


图 1 实验装置图

Fig. 1. Experimental setup.

(150 W); Halogen lamp (2600 W)) 拍摄气泡绕圈的动力学过程. 实验温度约为 20 °C, 压力约为 1 atm (1 atm = 1.01 × 10<sup>5</sup> Pa).

## 3 结果与讨论

实验发现在超声开启数分钟后, 水箱壁面的特定位置会出现排列有序的气泡阵列, 并有游移气泡环绕气泡阵列进行绕圈运动, 如图 2(a) 所示. 当声场固定时 (换能器和水箱相对固定, 液面保持不变), 气泡阵列位置也固定不变. 阵列中的气泡可以稳定存在, 除非在扰动情况下发生合并, 形成更大直径的气泡. 游移气泡与阵列气泡在同一平面 (贴附壁面), 并围绕气泡阵列进行绕圈运动. 实验中, 逆时针旋转的绕圈的方向和顺时针旋转的绕圈的方向都有发现, 但每一个气泡阵列的绕圈方向始终不变. 附壁气泡的绕圈运动与大水体中悬空气泡的绕圈运动不同, 绕圈轨迹并非正圆形或椭圆形, 每圈的轨迹都不完全相同, 甚至轨迹也极不光滑, 如图 2(c) 和图 2(d) 所示. 这是由于附壁气泡在二阶 Bjerknes 力的作用下粘附壁面, 使沿壁面方向的运动受到较大的阻力, 同时气泡随着超声周期的体积变化和剧烈变形使其所受的主 Bjerknes 力很不稳定, 此外, 阵列的形状以及阵列气泡的振动对游移气泡也有很大影响, 这些因素共同作用导致游移气泡的运动轨迹不稳定、不规则、不光滑. 图 2(c) 和图 2(d) 采用了不同的方式表现游移气泡的运动轨迹. 图 2(c) 是使用图像叠加技术对拍摄速度为 1000 fps 的高速摄影图片进行叠加处理所展示的气泡运动的真实轨迹 (每一圈约 100 张图片进行叠加); 图 2(d) 是使用 1/50 s 的长曝光时间拍摄技术对游移气泡的移动轨迹的真实光学显影 (每一圈约 6 段光轨进行衔接). 尽管两种游移气泡的运动轨迹都是真实轨迹, 但是明显看出图像叠加技术所显示的轨迹更加精细, 而长时光学显影技术则较为粗糙, 这主要是由于运动物体的摄像中长曝光时间和影像清晰度不可兼得引起的, 而图像叠加技术通过图片的后期处理规避了这一固有矛盾. 尽管游移空泡的运动轨迹很不稳定, 但是利用图像叠加技术将多圈轨迹叠加之后发现, 上部的运动轨迹基本重合, 而下部的运动轨迹较为分散, 而气泡阵列更接近轨迹圈的上部, 如图 2(b) 所示. 这说明游移气泡受到的 Bjerknes 力在圆周方向上分布并不均匀.

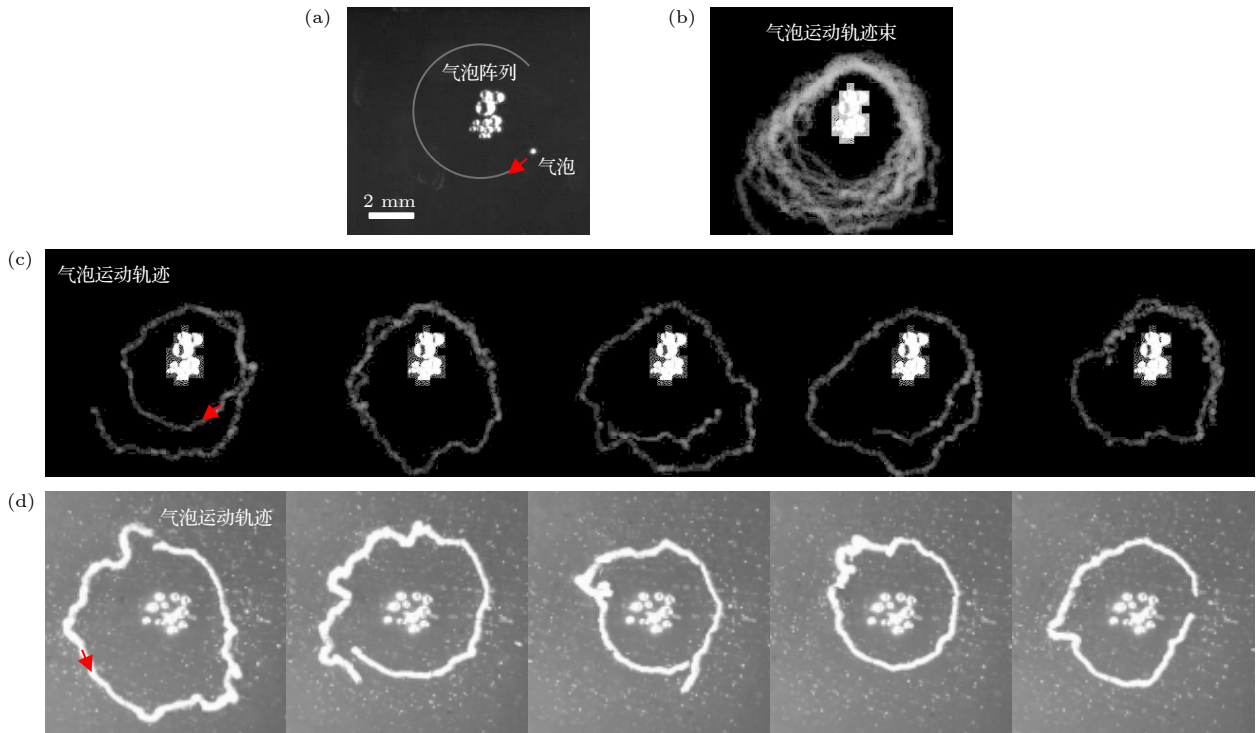


图 2 超声场中附壁气泡的绕圈运动 (a) 气泡绕圈运动的快照; (b) 图 (a) 中气泡运动轨迹束; (c) 图 (a) 中气泡单圈运动轨迹 (影像叠加); (d) 气泡单圈运动轨迹 (长时曝光)

Fig. 2. Orbital motion of a gas bubble attached to a boundary in ultrasonic field: (a) Snapshot of the orbital motion of a gas bubble; (b) trajectories of the gas bubble in Fig. 2(a); (c) single loop trajectory of the gas bubble in Fig. 2(a) (image overlay); (d) single loop trajectory of the gas bubble in Fig. 2(a) (long exposure).

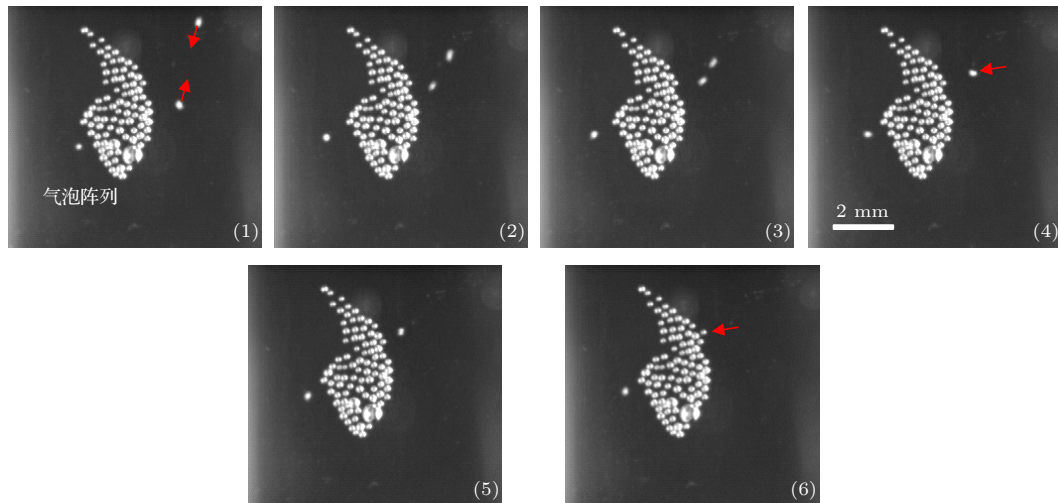


图 3 超声场中附壁气泡的布阵过程

Fig. 3. The arrangement of gas bubbles attached to the boundary in ultrasonic field.

绕圈的游移气泡不会永远进行绕圈运动, 最终将附着壁面上成为阵列气泡. 绕圈气泡是阵列气泡的唯一气泡来源. 而绕圈气泡变成阵列气泡的方式主要是通过合并实现的. 绕圈气泡的直径比阵列气泡更小, 尽管依然远远大于气泡的共振半径, 但其所受的主 Bjerknes 力比大气泡所受的力更大, 这

也是游移绕圈气泡比阵列气泡更为活跃的原因. 游移空泡通过和位于阵列边缘的较小的阵列气泡合并而停止绕圈成为阵列气泡, 或者通过和另外的游移空泡合并变成较大的气泡而减小所受的主 Bjerknes 力, 从而丧失活性, 附着在阵列边缘成为气泡阵列的一部分, 如图 3 所示.

阵列气泡源于游移气泡, 而游移气泡又来自何方? 研究发现, 游移气泡来源于 ALF (acoustic lichtenberg figure) 空化云, 如图 4 所示. ALF 空化云是一种强度较弱的超声空化场中常见的空化结构<sup>[19]</sup>. 在 ALF 结构中, 空泡顺次排着队向压力波腹运动, 形成枝状结构, 表现出较强的自组织现象. 在空泡运动过程中, 尤其在空泡运动终点 (节点) 处发生空泡的合并现象. 空泡的合并致使空泡的含气量增多, 体积变大, 最终由以径向振动为主的空泡逐渐过渡到以表面波动为主的气泡, 并最终由于体积变大, 所受的 Bjerknes 力变小, 所受的浮力增大而挣脱空化云的束缚变成游移气泡, 围绕附壁气泡阵列进行绕圈运动. 图 4(a) 为较短曝光时间的 ALF 空化云图像, 而图 4(b) 为较长曝光时间的 ALF 空化云图像. 可以发现, 当曝光时间较长时, 空泡以光带的形式表现出运动轨迹, 更直观地展现出闪电状或枝杈状的结构, 但空泡的细节缺失; 当曝光时间较短时, 空泡以颗粒状呈现出真实形态, 但整体结构表现效果不佳. 对于这种既存在自身变形, 又存在空间位置移动的高速运动现象, 应根据不同的需要, 选用不同的拍摄参数.

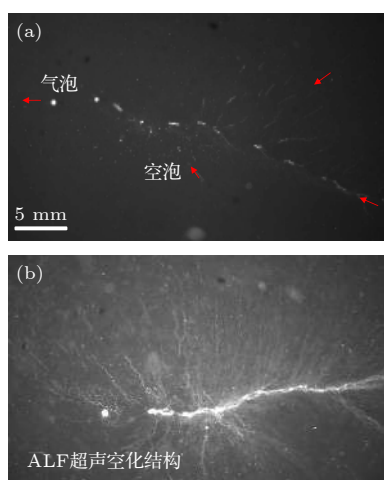


图 4 超声场中附壁气泡的来源 (a) ALF 超声空化云中空泡的运动和气泡的形成 (曝光时间 1/250 s); (b) ALF 超声空化云中空泡和气泡的运动轨迹 (曝光时间 1/50 s)

Fig. 4. The source of gas bubbles attached to the wall in ultrasonic field: (a) The motion of cavitation bubbles and the formation of gas bubbles in ALF structure (the exposure time is 1/250 s); (b) trajectories of cavitation bubbles and gas bubbles in ALF structure (the exposure time is 1/50 s).

游移绕圈气泡和阵列气泡在进行宏观运动分析时都呈现颗粒状, 但是通过更换放大倍数更高的显微镜头, 可以发现游移气泡和阵列气泡存在很大

的形貌差异, 如图 5 所示. 较大的阵列气泡因为所受的 Bjerknes 力很小, 所以不发生表面的波动或形变; 而较小的阵列气泡在 Bjerknes 力的作用下表现出规则的表面波动现象, 即多边形的边角反复互换的运动. 不同直径的阵列气泡, 其振动的波数也不同. 而游移空泡因为其直径比阵列气泡小, 在更强 Bjerknes 力的作用下, 气泡表面完全失稳, 呈现出极不规则的形貌, 甚至散裂出微泡<sup>[20]</sup>. 绕圈游移气泡由于在周期性声场作用下出现较大的体积和形态变化, 其本身也向外辐射声波, 可以发现, 当游移绕圈气泡移动到什么位置, 该位置相距较近的阵列气泡的表面波动就变强, 反之就变弱.

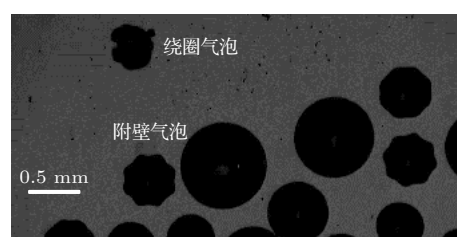


图 5 绕圈气泡与附壁气泡的表面形态

Fig. 5. Surface morphology of wandering gas bubble and holding bubble.

阵列气泡呈现出十分规则的排布, 除非出现较大的扰动 (比如换能器突然关闭或开启), 阵列气泡之间很少合并. 研究发现, 阵列气泡之间的振动相位是相反的, 换句话说, 相邻气泡之间是相斥的, 如图 6(a) 所示. 我们截取相邻气泡振动的半个周期进行分析, 在图 6(a1) 中, 当左上部的气泡在相近位置为凸角时, 右下部的气泡在此位置为凹角 (尽管透射光无法呈现凹角, 但动力学分析和图 6(b) 的反射光影像都显示, 此时的凹角应该存在). 在图 6(a2) 中, 右下部的边与图 6(a1) 相比较一直显示没有变化, 这与动力学分析不符, 唯一的解释就是图 6(a1) 中尽管显示为边, 实际上是凹角. 随着时间的推移, 在图 6(a3) 中, 左上部的气泡由多边形演化为球形 (此时气泡表面存在速度分布), 右下部的气泡由凹角演化为边. 在图 6(a4) 中, 左上部的的气泡由球形演化为多边形 (在相邻位置为边, 而在图 6(a1) 中此位置为凸角), 右下部的的气泡由边演化为球形. 再经过 20  $\mu$ s 的演化, 在图 6(a6) 中, 左上部的的气泡在相邻位置为凹角, 右下部的的气泡在相邻位置为凸角, 这与图 6(a1) 完全相反. 这种相互

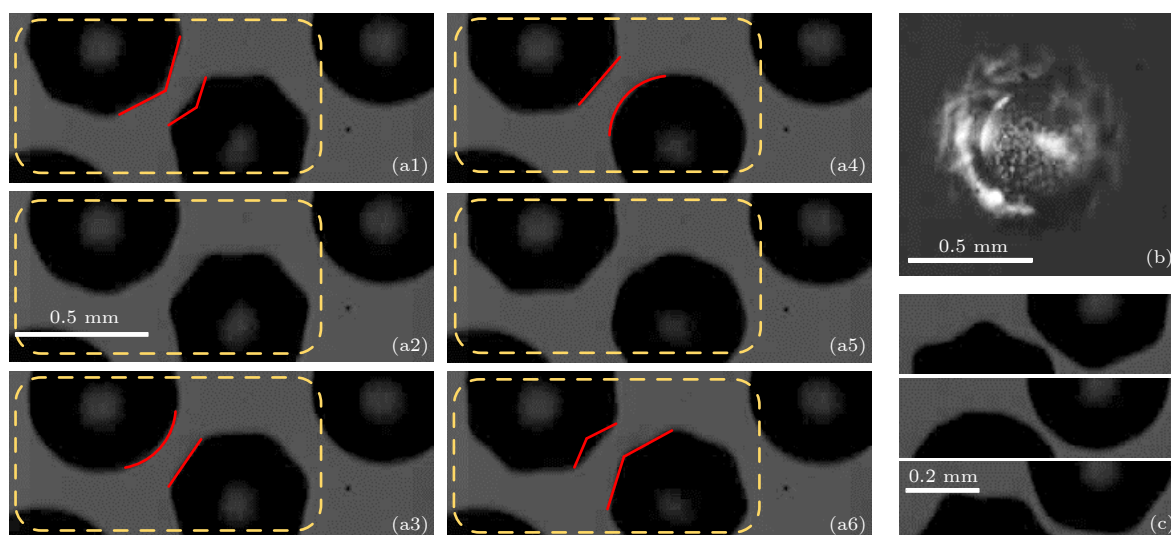


图6 附壁气泡的表面波动 (a) 附壁气泡阵列中相邻气泡半个周期内表面波动的耦合(拍摄速度为 100000 frame/s); (b) 反射光照射下附壁气泡的表面波动; (c) 相距极近的两个气泡的振动耦合

Fig. 6. Surface wave of gas bubble attached to the boundary: (a) Surface fluctuation of adjacent gas bubbles in a bubble array in half a period (Frame rate: 100000 frame/s); (b) surface fluctuation of a gas bubble attached to boundary under reflected light; (c) wave coupling of two gas bubbles quite close to each other.

反相的周期性的表面波动,使相邻气泡即使在相距很近时也不会发生合并,如图6(c)所示.

综上所述,在超声场中附壁气泡的绕圈运动与悬浮气泡的绕圈运动存在显著区别.首先,从运动形态上分析,附壁气泡的绕圈运动是贴着固体平面硬壁运动的,而悬浮气泡则是在溶液中,完全脱离容器壁运动的.其次,附壁气泡是围绕着规则排布的气泡阵列做绕圈运动,而悬浮气泡绕圈运动的轨迹内部不存在其他气泡.此外,因为附壁气泡贴附壁面,所以此时气泡近似半球形,在声场的作用下,游移气泡表面剧烈波动失稳,所受的声场力也因此不稳定,其运动轨迹极不光滑,这与球形悬浮气泡进行光滑轨迹的绕圈运动不同.最后,附壁游移气泡与阵列气泡存在很强的相互作用,超声场中的游移气泡和较小的阵列气泡都会向周围辐射声波,两者的相互作用,对附壁游移气泡的振动、绕圈运动的轨迹以及阵列气泡的生成都有很大影响,相比之下,悬浮气泡的绕圈运动并不存在这种复杂的影响.

## 4 结 论

借助高速摄影和图像分析技术对发现的附壁气泡的绕圈现象进行了实验研究.研究发现在壁面效应的二阶 Bjerknes 力的影响、气泡体积和形态变化使其所受的主 Bjerknes 力变化的影响,以及

阵列的形状、阵列气泡的振动对游移气泡的影响的共同作用下,使游移气泡的运动轨迹呈现出不稳定、不规则、不光滑的特点.图像叠加技术比长时间光学显影技术更适合对运动轨迹进行分析.阵列气泡源于游移气泡,而游移气泡变成阵列气泡的方式主要是通过合并增大体积,从而减小所受的 Bjerknes 力,降低活性的方式实现的.游移气泡源于 ALF 空化云中大量空泡的合并,使以径向振动为主的空泡逐渐过渡到以表面波动为主的气泡.阵列气泡在声场的作用下呈现出规则的表面波动,而体积更小受力更大的游移空泡的表面完全失稳,呈现极不规则的形貌,并对附近阵列气泡的表面波动产生影响.阵列气泡呈现出十分规则的排布,相邻阵列气泡之间的振动相位是相反的,表现为相互排斥.

## 参考文献

- [1] Shew W L, Pinton J F 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 144508
- [2] Bai L X, Xu W L, Zhang Y C, Li Y F, Huang D F 2008 *IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings* Beijing, China, November 2-5, 2008 p942
- [3] Young F R 1989 *Cavitation* (London: McGraw-Hill Book Company) p18
- [4] Paul T, Richard M, Andrew O 2007 *J. Fluid Mech.* **576** 191
- [5] Guo C, Zhu X J, Wang J Q, Ye L Z 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 044304 (in Chinese) [郭策, 祝锡晶, 王建青, 叶林征 2016 *物理学报* **65** 044304]
- [6] Tomita Y, Shima A 1986 *J. Fluid Mech.* **169** 535
- [7] Versluis M, Goertz D E, Palanchon P, Heitman I L, Van Der Meer S M, Dollet B, Jong N D, Lohse D 2010 *Phys. Rev. E*

82 026321

- [8] Kim T, Kim H 2014 *J. Fluid Mech.* **750** 355
- [9] Leighton T G, Walton A J, Pickworth M J W 1990 *Eur. J. Phys.* **11** 47
- [10] Parlitzs B U, Mettin R, Luther S, Akhativ I, Voss M, Lauterborn W 1999 *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A* **357** 313
- [11] Metti R 2005 *Bubble and Particle Dynamics in Acoustic Fields: Modern Trends and Applications* (Kerala: Research Signpost Publisher) pp1–36
- [12] Kodama T, Takayama K, Nagayasu N 1996 *J. Appl. Phys* **80** 5587
- [13] Miller D L 1977 *J. Acoust. Soc. Am.* **62** 12
- [14] Barbat T, Ashgritz N 2004 *Appl. Math. Comput.* **157** 775
- [15] Rensen J, Bosman D, Magnaudet J, Ohl C D, Prosperetti A, Togel R, Versluis M, Lohse D 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 4819
- [16] Shirota M, Yamashita K, Inamura T 2012 *American Institute of Physics Conference Proceedings* New Mexico, April 30–May 3, 2012 p155
- [17] Desjoux C, Labelle P, Gilles B, Bera J C, Inserra C 2013 *Phys. Rev. E* **88** 033006
- [18] Desjoux C, Labelle P, Gilles B, Bera JC, Inserra C 2013 *J. Acoust. Soc. Am.* **133** 3277
- [19] Bai L X, Xu W L, Deng J J, Li C, Xu D L, Gao Y D 2014 *Ultrason. Sonochem.* **21** 1696
- [20] Bai L X, Xu W L, Zhang F X, Li N W, Zhang Y C, Huang D F 2009 *Sci China Ser. E* **52** 1974

# High-speed photography and image analysis of orbital motion of gas bubbles in ultrasonic field\*

Bai Li-Chun   Sun Jin-Guang<sup>†</sup>   Gao Yan-Dong

(School of Electronic and Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

( Received 23 August 2020; revised manuscript received 27 October 2020 )

## Abstract

Bubbles in the fluid have a great influence on the macroscopic physical properties and flow state of the fluid. The study of bubble motion in fluid is of great significance to ultrasonic cleaning, sonochemistry, flood discharge and energy dissipation, aeration and cavitation reduction. Bubbles in the fluid may also exhibit a special translational motion in an ultrasonic field—orbital motion. The orbital motions of gas bubbles attached to a boundary in ultrasonic field are investigated experimentally by high-speed photography and image analysis. The present study focuses on the trajectories of wandering bubbles, the arrangement of gas bubble array, the source of gas bubbles and the surface fluctuation details of gas bubbles. It is found that the circular trajectory of the wandering gas bubble is unstable, irregular and unsmooth. The holding gas bubbles in the bubble array originate from wandering bubbles. The transformation of wandering bubbles into array bubbles is mainly realized by merging and increasing the volume, thereby reducing the Bjerknes force. The wandering bubbles are produced by the merging of a large number of cavitation bubbles in the ALF (acoustic lichtenberg figure) structure, which makes the radial vibration bubbles gradually transform into the surface fluctuating bubbles. Under the action of Bjerknes force, the array bubbles show regular surface fluctuations, while the smaller ones are completely unstable, showing extremely irregular morphology, and have an influence on the surface fluctuation of nearby array bubbles. The array bubbles show a very regular arrangement, and the adjacent array bubbles have opposite vibration phases and repel each other. The orbital motion of gas bubbles attached to a boundary is significantly different from that of the bubbles suspended in liquid. First of all, the attached bubbles move along the solid wall, while the suspended bubbles move completely away from the vessel wall in the liquid. Secondly, the attached bubbles move around a regular array of bubbles, while the suspended bubbles move orbitally alone. In addition, the attached bubble is nearly hemispherical, and its surface fluctuates violently, and its motion track is extremely unsmooth, which is different from the circular motion of spherical suspended bubble. Finally, there is a strong interaction between the attached wandering bubble and the array bubble, which has a great influence on the vibration and trajectory of the attached bubble. In contrast, the circular motion of the suspended bubble does not have such a complex effect.

**Keywords:** gas bubble, ultrasonic field, image processing, high-speed photography

**PACS:** 47.55.db, 42.30.Va, 42.79.-e

**DOI:** 10.7498/aps.70.20201381

\* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2018YFB1403303).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [sjg\\_lntu@163.com](mailto:sjg_lntu@163.com)