基于超声悬浮的液滴非接触操控及其动力学

张泽辉^{1,2}, 刘康祺¹, 邱文丽¹, 陈阵¹, 臧渡洋^{1*}

1. 西北工业大学物理科学与技术学院, 超常条件材料物理与化学教育部重点实验室, 西安 710129;

2. 西北工业大学力学与土木建筑学院, 西安 710129

*联系人, E-mail: dyzang@nwpu.edu.cn

收稿日期: 2020-04-17; 接受日期: 2020-06-01; 网络出版日期: 2020-09-11

国家自然科学基金(编号: 11972303, U1732129)、中央高校基本科研业务费(编号: 310201911py009)和非线性力学国家重点实验室开放基金资助项目

摘要 超声悬浮是利用超声波的非线性效应产生声辐射力实现物体悬浮的独特技术. 由于避免了与固体表面的接触, 声悬浮技术特别适用于对液体样品的无容器操纵, 被广泛应用于液滴动力学研究以及基于液滴的微生化反应与分析. 本文简要介绍了声悬浮的基本原理和主要技术, 综述了声悬浮液滴动力学的研究现状, 包括液滴的平衡形状、振荡、失稳以及内外部流动, 讨论了利用声悬浮技术对液滴进行操纵的若干方法. 本文还总结了声悬浮技术的主要应用, 提出了声悬浮的若干未来研究方向.

关键词 声悬浮, 液滴动力学, 液滴, 气泡, 微流控

PACS: 47.55.Dz, 47.85.Np, 47.80.+v, 62.10.+s

1 引言

声悬浮是一种重要的无容器处理技术^[1], 其基本原理是利用高强/高频声波的非线性效应产生声辐射力, 从而克服悬浮物的自身重力, 使得物体处于悬浮状态. 声悬浮具有以下几点显著优势.

(1) 与电磁悬浮^[2]、静电悬浮^[3]等其他悬浮技术相比较, 声悬浮不依赖于样品的电磁性质, 因而可以对更多种类的物质进行悬浮和无容器处理. 除了固体和液体外, 声悬浮甚至可以对气体进行悬浮(图1^[4]).

(2) 声悬浮的悬浮能力很强, 悬浮样品的尺寸可达到与波长相同的数量级^[5].

(3) 通过对超声换能器的主动调控可以实现声场的精确控制. 这种独特的优势使得声悬浮技术特别适合于对较大尺寸样品进行无容器处理, 包括大体积金属液体的凝固^[6]、液滴动力学研究^[7]、胶体液滴的蒸发^[8]以及生化分析^[9]等.

人们对声悬浮现象的研究始于1866年, Kundt^[10]通过谐振管实验, 报道了受声波扰动的灰尘颗粒可以在某一位置长时间停留. 1933年, Bücks和Müller^[11]利用声悬浮技术成功地悬浮起了多个直径为1–2 mm的小水滴, 从而开辟了液滴动力学研究的新方向. 1934年, King^[12]揭示了声悬浮现象是高声强条件下由传播媒质物性引起的一种非线性效应, 并从理论上推出了

引用格式: 张泽辉, 刘康祺, 邱文丽, 等. 基于超声悬浮的液滴非接触操控及其动力学. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 104711
Zhang Z H, Liu K Q, Di W L, et al. Non-contact droplet manipulation and its dynamics based on acoustic levitation (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 104711, doi: [10.1360/SSPMA-2020-0134](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0134)

图1 (网络版彩图)溴气的超声悬浮. (a) 稳定声场中低温气体竖直方向的悬浮; (b) 声场中低温气体的温度场; (c) 低温溴气在水平方向悬浮. 图片来源文献[4], 已获得使用授权

Figure 1 (Color online) Acoustic levitation of bromine gas. (a) The low temperature gas is vertically levitated in stable sound field; (b) the temperature field of gas in the sound field; (c) low temperature bromine gas is suspended horizontally. Reproduced from ref. [4] with permission of Elsevier.

声辐射力的计算公式. 1964年, Hanson等人^[13]研制了第一台用于研究液滴动力学的声悬浮装置. 1975年, 美国科学家Whymark^[14]利用声悬浮装置的空间定位能力开展了多项空间实验. 2000年以来, 魏炳波院士团队^[15]对声悬浮装置进行了优化设计, 极大提高了单轴式声悬浮装置的悬浮能力以及稳定性, 并实现了地球上最大密度固体铱和液体汞的稳定悬浮.

超声悬浮技术在科学研究中发挥着日益重要的作用. 由于悬浮本身提供的无容器环境, 金属材料的熔体可以获得深过冷并实现快速凝固, 有望制备一系列亚稳相以及相应的超常材料^[16]. 液滴在悬浮过程中表现出丰富的动态行为, 如表面波^[17]、振荡^[18]和失稳^[19]. 研究者可根据液滴对声场的响应研究其动力学规律和液滴的物理化学性质. 更进一步, 声悬浮技术可与其他先进分析手段相结合, 如光谱技术^[20], 成为材料研究^[21]和生化分析^[22]的有力手段.

为推动声悬浮技术在液滴动力学、流体物理及软物质力学方面的应用, 本文将系统地总结声悬浮的基本原理以及声悬浮技术的发展历程, 对声悬浮液滴的动力学以及操纵进行综述, 并对声悬浮技术的发展及其在软物质及复杂流体力学领域的潜在研究方向进行展望.

2 声悬浮理论

2.1 声压与声辐射压

声波是气、液、固等介质中传播的疏密波. 如果

介质是流体, 声波将造成流体压强的变化. 声压是声场中实际压强与环境背景压强的差值, 因而其值可正可负, 且随时间周期性变化. 在线性声学范围内, 假定流体是无黏性的, 且认为声波在流体中的传播是一个绝热过程^[23], 则声波在媒介中传播的运动方程可表示为

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla p, \quad (1)$$

式中, ρ 为媒质密度, v 为媒质速度, t 为时间, p 为媒介压强. 媒质的连续性方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0. \quad (2)$$

假设声波场为无旋场, 则有

$$v = -\nabla \Phi, \quad (3)$$

式中, Φ 是速度势. 且在此绝热过程中, 声波媒质的物态方程为

$$dp = c^2 d\rho, \quad (4)$$

式中, c 表示媒质的声速, 联立式(1)–(4)得到声波波动方程

$$\nabla^2 \Phi = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}. \quad (5)$$

声压 p 与速度势 Φ 的关系为

$$p = \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t}. \quad (6)$$

由于声压随时间周期性变化, 式(6)进行时间平均后, 其结果为零.

但是, 当声波的频率很高或声波的振幅很大时, 声波物态方程和动量方程的二次非线性项起重要作用, 因而声波的非线性效应突显出来. King^[12]对声波传播媒质的物态方程进行了二级近似, 得到声压与速度势的关系:

$$p - p_0 = \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\rho}{c^2} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} \right)^2 - \frac{1}{2} \rho v^2. \quad (7)$$

值得注意的是, 在King的理论中速度势 Φ 依然满足波动方程式(5). 在流体媒质中传播的声波入射到一个障碍物时, 表面上产生的平均压力便是声辐射压. 声辐射压与声压不同, 它是由流体媒质的非线性引起的. 当声压与速度势的关系精确到二阶项时, 式(7)在一个周期内的时间平均后可得声辐射压

$$\langle p - p_0 \rangle = \frac{1}{2\rho c^2} \langle p^2 \rangle - \frac{1}{2} \rho \langle v^2 \rangle, \quad (8)$$

式中, $\langle \rangle$ 表示时间平均. 从式(8)可以看出, 在高声强声场中, 声辐射压在一个周期内的时间平均值不为零.

2.2 声辐射力

声辐射力是声波的一种二阶效应, 它是由声场中小球与声场之间的时间平均压力和惯性相互作用共同作用产生的. King^[12]根据声辐射压公式, 并考虑小球在声场中的运动, 求解了平面波中小球的运动方程. 若以小球的质心作为坐标系的原点, 则小球在平面波作用下的运动方程为

$$2\pi R_s^2 \int_0^\pi (p - p_0) \cos\theta \sin\theta d\theta = -M \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2}, \quad (9)$$

式中, R_s 为小球半径, M 为小球质量, ζ 为小球在重力方向上的位移, θ 为小球上任意一点与竖直轴的夹角. 根据式(5), (7)和(9)可得到小球在声场中所受声辐射压的表达式. 将声辐射压在小球表面进行积分后可得到小球所受的总声辐射力. 小球($kR_s \leq 1$, k 为声波波数)在平面行波场中所受的声辐射力为

$$F = 2\pi\rho |A|^2 (kR_s)^3 \frac{9 + 2(1 - \lambda_\rho)^2}{9(2 + \lambda_\rho)^2}. \quad (10)$$

小球在平面驻波场中所受的声辐射压力为

$$F = \frac{1}{3}\pi\rho |A|^2 (kR_s)^3 \sin(2kh) \frac{5 - 2\lambda_\rho}{6 + 3\lambda_\rho}, \quad (11)$$

其中, $\lambda_\rho = \rho_0/\rho_s$, ρ_s 为小球密度. 比较式(10)和(11)可以发现, 小球在平面驻波场中受到的声辐射力要明显高于行波场中受到的声辐射力, 因此, 我们一般选用驻波来悬浮样品. 此外, 平面行波中小球所受的声辐射力始终是一个正值, 因而小球会不断向前运动. 而在驻波场中, 小球所受到的声辐射力则是位置的正弦函数(图2^[24]), 且在空间中按周期正负变化. 因此, 小球最终稳定悬浮于某一平衡位置.

1962年Gor'kov^[25]从能量角度出发, 研究了样品与声场的相互作用. Gor'kov认为声场施加在物体表面上的声压是物体散射声波的结果, 因而物体表面的声辐射压可以表示为物体表面动量通量的时间平均值. 他考虑了小球的可压缩性运动, 通过分析声波与小球的相互作用, 导出了小球在任意声场中的势能, 即Gor'kov势

$$U = 2\pi R_s^3 \left[\frac{\langle p_{in}^2 \rangle}{3\rho c^2} \frac{1 - \rho c^2}{\rho_s c_s^2} - \frac{\langle v_{in}^2 \rangle}{2} \frac{2(\rho_s - \rho)}{2\rho_s + \rho} \right], \quad (12)$$

式中, U 为时间平均势, p_{in} 为入射波声压, v_{in} 为入射波媒质速度, c_s 为小球中声速传输速度.

从式(12)可以看出, 采用Gor'kov方法通过计算声场分布便可确定小球的声势能, 这为求解任意声场与小球的相互作用提供了便利. 在平面驻波情况下, Gor'kov得到小球所受的声辐射力为

$$F = \frac{1}{3}\pi\rho_0 |A|^2 (\kappa R_s)^3 \sin\left(2\kappa h\right) \left(\frac{5 - 2\lambda_\rho}{2 + \lambda_\rho} - \lambda_\rho \frac{c^2}{c_s^2} \right). \quad (13)$$

图2 (网络版彩图)声悬浮驻波场声压与声辐射力. 图片来源文献[24], 已获得使用授权

Figure 2 (Color online) Sound pressure and radiation force in acoustic levitation standing wave field. Reproduced from ref. [24] with permission of Elsevier.

将悬浮小球近似刚性球处理时, 式(13)与King得到的式(11)完全等价.

King和Gor'kov关于声辐射力的推导合理地解释了悬浮力的来源, 为声悬浮技术的发展奠定了理论基础. 在此后几十年里, 研究者在他们二人的理论模型基础上对声辐射力理论做了进一步的修正和补充. Yosioka等人^[26]将King的声辐射力理论进行推广, 使其对具有有限压缩性的样品也适用; 而Embleton^[27,28]则将King的声辐射力计算方法拓展到球面波和柱面波中刚性小球的情况. Löfstedt和Putterman^[29]对Gor'kov势进行了延伸, 理论推导出了在长波条件下声辐射压的通用表达式. Hasegawa^[30-32]根据平面行波和驻波在样品表面上散射情况不同, 综合考虑了样品的尺寸、弹性、声波的吸收和媒质的黏滞作用, 推导出了行波和驻波混合声场中的声辐射力公式. Doinikov^[33-35]系统地计算了悬浮于导热黏性流体媒介中的刚性小球、液滴和气泡的声辐射压, 研究发现流体黏度会显著影响声辐射力. Collas等人^[36]推导了存在温度梯度情况下, 小球在驻波场中声辐射力的通用表达式, 讨论了样品从任意起始位置到最终平衡位置的轨迹变化^[37], 这为声悬浮在复杂温度环境中的应用提供了理论基础.

基于上述声悬浮理论, 研究者开始将声悬浮理论与实验结合起来研究液滴动力学. 声悬浮液滴的形状、悬浮位置、声压级和声辐射压之间是相互耦合的, Yarin等人^[38]提出了一种基于边界元法(Boundary Element Method, BEM)的声辐射压计算方法, 此方法主要应用于计算声悬浮中液滴的形状和动态变形. 他们将此边界元法与已知刚性球的精确结果进行了比较, 并证明了此方法的正确性. 同时, Yarin等人的研究结果还揭示了在声悬浮中液滴的长短轴比(液滴长短轴之比)与声压级(Sound Pressure Level, SPL)之间的关系(如图3所示), 发现液滴尺寸越小, 此方法计算得出的声压级误差越小.

Andrade和Adamowski^[39]用有限元方法计算了声辐射压, 并分别与直接计算和Gov'kov势法计算的声辐射压结果相比较, 得出当悬浮小球的半径达到声波长的10%时, 用Gor'kov势法计算的声辐射压值结果明显偏离实际值. 因此, Gor'kov势法只适用于悬浮物的尺寸远小于声波长的情况. 另外, 以往的研究多是针对声场中的球形物体, 尤其是Gor'kov的理论中得到的Gor'kov势只适用于声场中的球形物体. 近些年, 研究

图3 声悬浮液滴长短轴比与声压级(SPL)的关系^[38]. 图片来源于文献^[38], 已获得使用授权

Figure 3 The relation between aspect ratio of droplet and sound pressure level (SPL). Reproduced from ref. ^[38] with permission of Cambridge University Press.

者对其他形状物体所受的声辐射力进行了深入研究, Mitri^[40]利用有限波列展开法研究了声驻波场中椭圆柱体所受的声辐射力与其尺寸的关系, 理论计算表明, 椭圆柱体所受的声辐射力随着其尺寸的增大而增大.

2.3 声场的计算与测量

2.3.1 声压和声辐射力计算

声悬浮谐振腔中的声压分布是对悬浮样品动力学行为进行分析的前提. Xie等人^[41,42]利用边界元法对声场进行了数值模拟, 对声悬浮装置进行了优化^[41], 并实现了小动物活体的声悬浮^[42]. 由于声悬浮液滴与周围媒介两相界面处的阻抗不匹配, Jia等人^[43]通过引入阻抗匹配层来解决界面处阻抗的梯度变化. 随着商业化计算能力的提高, 一些功能强大的商业化软件得到广泛应用, 其中有限元软件COMSOL的声学模块经常被用于计算声场. 在声悬浮的声场计算时, 计算域可根据声悬浮谐振腔的实际几何参数设定. 对单轴声悬浮, 发射端与反射端一般采用刚性边界条件, 而计算域与环境的边界可定义为平面波辐射边界^[44]. 边界声压满足Helmholtz方程

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_0} \nabla p \right) - \frac{\omega^2 p}{\rho_0 c_0^2} = 0. \quad (14)$$

计算时的初始条件通过发射端的振幅获得

$$n \cdot \left(\frac{1}{\rho_0} (\nabla p) \right) = a_0, \quad (15)$$

式中, a_0 为超声发射端的法向加速度.

在求得声场的声压分布之后, 依据King理论(式(8)), 可以获得悬浮样品表面处的介质粒子速度以及声辐射压 P_A 的分布. P_A 在样品表面的面积分即悬浮样品的重力.

2.3.2 声场的测量

(1) 麦克风阵列

麦克风阵列是一种对声场进行直接接触式测量的方法. 该方法通过由一定数目的声学传感器(麦克风)组成的阵列, 对声场的空间分布特性进行采样^[45]. 这种方法可以获取声场的空间分布信息^[46], 甚至可以实现声场的可视化. 但是, 麦克风的引入, 会影响声波的传播, 因而不可避免对测量结果产生干扰, 不适用于测量声场的微区分布.

(2) 纹影法(Schlieren方法)

纹影法也是测量声场中的一种常用方法. 该方法是基于光在被测流场中的折射率依赖于流体介质的密度这一事实, 从而可将流场中的密度梯度变化转化为记录平面上相对光强的变化. 纹影法特别适用于强声场和冲击波的可视化模拟. 若利用高速摄像机记录光学信息, 则可观察声场的动态模拟和声场的瞬态成像^[47]. Möller等人^[48]通过比较纹影图像与声场有限元云纹图, 发现两者结果基本一致, 这表明纹影法可视化技术的有效性及其在声流场测量方面的应用前景.

(3) 激光多普勒测速法(Laser Doppler Vibrometer, LDV)

激光多普勒测速是利用激光多普勒效应测量物体实时运动速度的技术, 通过测量激光探头处示踪粒子的多普勒信号, 再根据多普勒频率便得到速度. 该技术利用激光测量, 对流场没有干扰, 并且不受该点的温度和压力的影响. LDV既可以获得声场中的声压分布^[49], 也可以测量悬浮样品的运动特性^[50].

2.3.3 声辐射力的测量

数值计算虽然具有一定的优势, 但计算结果的准确性往往需要实验验证. Li等人^[51]设计了两端连有相同小球的杠杆结构: 将小球的一端放置于声场中, 另一端与精密天平相连, 用于测量小球所受到的声辐射

力(详见文献^[51]中图1). 声场中小球受到的作用力通过杠杆传递给天平, 如此可以方便测量小球在声场中任意处所受的声辐射力. 尤为重要, 这种测量方法的优势在于, 只需将伸入声场的小球替换为其他任意形状的物体, 即可直接测量出任意形状物体所受的声辐射力, 这为直接研究声波与物体的相互作用提供了便利.

2.4 声流

声波的非线性效应除了产生声辐射力以外, 大振幅或高频声波还可造成介质的定向运动, 即声流(Acoustic Streaming). 在线性声学范围内, 介质质点受声波的扰动做简谐振动, 因而其速度的时间平均值为零. 而流体黏度的存在使得质点在运动过程中能量不断被耗散, 在此过程中内部流体的动量通量梯度差迫使媒介产生运动, 导致媒介质点的速度在一个周期内的平均值不为零, 从而使得介质质点产生了一定的位移.

1831年, Faraday^[52]最早发现了声波会引起媒介的定向流动, 即声流. 1884年, Eckart^[53]第一个从声能耗散的角度出发, 用数学分析的方法研究了由高频振荡能量耗散形成的声流, 后来这种声流称为厄卡特声流(Eckart Acoustic Streaming).

根据声流产生的不同机制^[54], 声流可以分为四大类: 边界层声流、喷射声流、格德翁(Gedeon)声流及厄卡特声流. 边界层声流是由于黏性应力在界面上的拖拽作用产生的, 主要包括Rayleigh声流和Schlichting声流. 1884年, Rayleigh^[55]从数学理论出发, 分析了平行板驻波场中的声流是由靠近固体边界的流体受剪切黏度的黏滞作用引起的, 被称为Rayleigh声流. Rayleigh声流描述了边界层之外的流体净流动, 因而也被称为外部声流. Schlichting^[56]在研究不可压缩边界层内的流动时, 从理论上分析了边界层内声流的特征, 这种声流也被称为Schlichting声流. 喷射声流^[57]是在孔口周期性地吸入或是排出黏性流体而产生分离剪切层(详见文献^[57]中图4). 在吸入时, 流体从各个方向流向孔口, 在排出时, 在孔口方向会产生一个平均流. 如此反复, 在圆孔附近的喷射剪切层中形成旋涡. 当提高声功率时, 外部声流由旋涡变为紊乱流动. 格德翁声流是行波中声速和密度的相位差引起的净流动. 在边界层和喷射声流流体介质中, 没有净质量运输, 但是由

图4 (网络版彩图)微流管道中尖角附近的声流. 图片来源文献[61], 已获得使用授权

Figure 4 (Color online) Acoustic streaming near a sharp angle in a microchannel. Reproduced from ref. [61] with permission of RSC.

于声速和密度差的存在, 导致非零的净流量产生, 格德翁声流在斯特林热声发动机(Stirling Thermoacoustic Engine)和冰箱中很常见^[58].

声流速度场通常具有成对的旋涡结构. Tang和Hu^[59]用COMSOL软件模拟了矩形腔中行波场的声流模式. 当发射端所发射的声波频率增大时, 声流场中的旋涡结构越来越明显, 旋涡对的数目也随之增多. 当两个发射端之间的相位差改变时, 旋涡的位置将随之移动. 在特定的相位差下, 旋涡对还可以合并成一个大旋涡. 实验中, 可以将示踪粒子分散在媒介中(图4), 利用粒子图像测速技术(Particle Image Velocimetry, PIV)实现声流的可视化^[60–63]. 该技术的关键是选用“合适”的示踪粒子来保证流场跟踪的可靠性, 微/纳米级粒子在流场中受黏性拖曳力的作用跟随流体微元流动. 利用声流对不同尺寸颗粒的作用不同, 可以实现同一尺寸颗粒的富集和不同尺寸颗粒的分离^[64]. 除此之外, 利用脉冲多普勒超声技术也可以测量流体中的速度场^[65].

影响声流的因素很多, 主要包括: 黏滞系数、弛豫过程、可压系数、异物、边界层效应及声场特性^[66]. Zhang等人^[67]研究了黏滞系数对声流的影响, 并将其应用于声流作用下的血液流动. 此外, Chen和Ren^[68]用格子玻尔兹曼法来研究黏性流体中的声流, 表明了黏性拖曳与穿透深度成线性关系. Kapustina等人^[69]通过实验证明了胆固醇液体的弛豫时间参数与声流旋涡的关系. Qi^[70]研究揭示了可压缩系数对硬边界周围声流的影响, 研究结果表明在边界层处可压缩媒介具有较大的流速.

声流在微流控领域有着重要的应用. 在微流控芯片中, 不同流体之间相互混合常常是必不可少的步骤, 然而由于管道的尺寸很小, 流体流动时的黏性阻力很大, 传统的压力差驱动流体混合的方法往往不适用. 在管道旁放置压电陶瓷, 以管道边角作为声源, 激发出流体中的声流^[60,61], 流体中的声流可以将不同流体在几毫秒内混合均匀. 此外, 声流还可以驱动管道中的样品进行定向移动^[71,72].

2.5 与声悬浮有关的无量纲数

液滴的声悬浮过程, 既涉及液滴与声场的相互作用, 也伴随着液滴与声波介质的相互作用. 液滴与声场的耦合, 表现为声辐射力与液滴表面张力的竞争. 在声场的影响下, 液滴与周围环境的热交换、传质和流动耦合均变得更加复杂. 为更清楚地描述液滴声悬浮这一复杂的热力学和动力学过程, 研究者提出一些无量纲数(表1^[73–79]), 相关参数定义如表2所示.

3 声悬浮技术

声悬浮装置一般由声源与反射端构成谐振腔, 并在谐振腔内形成驻波场. 1964年Hanson等人^[13]搭建了第一台可用于研究液滴动力学的声悬浮装置, 为声悬浮技术的应用奠定了基础. 扬声器^[64]、磁致伸缩式换能器^[80]和压电式换能器^[71]均可作为声悬浮装置中的声源. 扬声器具有比较宽的频带, 但其功率相对较小; 换能器所产生的超声波功率大, 因而被广泛采用. 换能器是利用一定频率的交流电信号激励磁致伸缩材料或压电材料, 使其产生机械振动. 磁致伸缩式换能器的功率可达数千瓦, 但是电声转换效率较低, 散热要求高且结构复杂. 相比于磁致式换能器, 压电式换能器的效率高且结构简单, 因而在声悬浮装置中得到广泛的应用.

在高频电压的激励下, 压电材料产生的振幅为几微米到几十微米. 压电材料与变幅杆相连, 并通过变幅杆将振幅进一步放大, 从而提高输出声波的强度. 为减小声波传播过程中的能量损耗, 变幅杆的长度一般为声波波长的1/4. 常见变幅杆的类型有圆锥型^[81]、阶梯型^[82]、悬链型和指数型^[83].

轴式声悬浮装置主要分为单轴式和多轴式两种类型. 多轴式声悬浮包括三轴式声悬浮、六轴式声悬浮及阵列式声悬浮. 多轴式声悬浮比单轴式提供更多的

表1 声悬浮相关的无量纲数

Table1 Dimensionless numbers related to acoustic levitation

名称	表达式	物理意义	适用条件
舍伍德数 (Sherwood Number)	$Sh_0 = 2 + 0.552Re^{\frac{1}{2}}Sc_0^{\frac{1}{3}}$	对流扩散传质比 ^[73]	声场中液滴的蒸发
努塞尔数 (Nusselt Number)	$Nu_0 = 2 + 0.552Re^{\frac{1}{2}}Pr^{\frac{1}{3}}$	边界对流换热与传导换热之比 ^[73]	声场中液滴的蒸发
路易斯数 (Lewis Number)	$Le = \frac{D}{\alpha_g}$	扩散系数与导温系数之比 ^[74]	声场中液滴的蒸发
声普朗特数 (Acoustic Prandtl Number)	$Pr = \frac{\mu_g C_p}{\lambda_g}$	运动黏度与热扩散系数之比 ^[74]	用来计算努塞尔数
声雷诺数 (Acoustic Reynolds Number)	$Re = \frac{p}{b\omega}, b = \frac{4}{3}\eta' + \eta''$	可用来描述黏滞作用	黏滞媒质中有限振幅波的传播
声邦德数 (Acoustic Bond Number)	$B_a = \frac{A^2 R_s}{\rho c_0^2 \sigma}$	邦德数将声场与毛细效应相联系, 临界声邦德数是判断液滴能否稳定悬浮的重要因素 ^[75,76]	声悬浮中液滴稳定性
声韦伯数 (Acoustic Weber Number)	$We = \frac{\rho_a a_0 k^2 \Phi_0^2}{2\sigma}$	入射波的声动能密度, 对液滴的迎面凝并, 不同的凝聚、反弹和分离状态有影响 ^[77-79]	声悬浮中液滴稳定性

表2 参数定义表

Table 2 Parameter definition table

参数	定义	参数	定义
α_g	导温系数	R_s	液滴球形半径
D	扩散系数	ρ	空气密度
C_p	比热容	σ	液滴表面张力
μ_g	动力黏度	c_0	空气中的声速
λ_g	导热系数	a_0	液滴半径
η'	切变黏滞系数	k	波数
η''	容变黏滞系数	Φ_0	声速度势
A	入射压力场的振幅	—	—

约束,使得样品悬浮更加稳定,更有利于悬浮样品的操纵.不同于轴式驻波悬浮,近场超声悬浮(Near-Field Acoustic Levitation)利用声波畸变的强非线性效应实现悬浮^[84-86],一般用于物体的传输^[87-89]和轴承的减阻^[90,91].本文主要关注驻波声悬浮.

3.1 单轴式声悬浮

单轴式声悬浮装置^[12,92]由声发射端和反射端组成,发射端和反射端一般是圆平面,其轴线一般与重力方向一致. Li等人^[93]将发射端的顶端加工成直径很大的圆盘,将悬浮力提高到了0.1 N. Ilssar等人^[94]通过优

化圆盘状发射端的结构,提高了悬浮物体跟随声场变化的响应速度.但是,为了使声场具有更高的声辐射压, Xie等人^[95,96]将反射端加工成凹球面,通过优化反射端几何参数,提高了声悬浮的悬浮能力,最终成功地悬浮起了地球上密度最大的固体铋和液体汞.发射端与反射端之间的声驻波场是动态场,悬浮的样品在水平方向和垂直方向均会做小幅振荡. Baer等人^[97]研究发现,当发射端和反射端均加工成凹球面时,声场中的声辐射压会进一步提高.与此同时,悬浮样品在声场中也会稳定很多. Jiao等人^[98,99]使用有限元法和优化算法同时对发射端和反射端进行优化设计,当二者的距离为34.9 mm时,声场中可以同时稳定悬浮3个直径为3 mm的钢球. Yan等人^[100]研究了两个凹面发射端产生的相对超声波束,成功悬浮起厘米尺寸的铝制圆盘并使用COMSOL有限元模拟软件计算了圆盘悬浮物的悬浮能力. Hong等人^[101-103]引入弹性自适应反射端和柔性反射端设计方法,极大地提高了声悬浮稳定性能,成功悬浮了熔点接近2000°C的液态金属材料样品. Tanaka等人^[104]计算了反射端直径与作用在声悬浮液滴上声辐射力之间的关系. Li等人^[105]理论分析了发射端顶部是圆柱状与倒圆台状时物体的悬浮稳定性.研究发现,倒圆台状发射端表面各处的振幅基本一致,发射端与反射端之间形成的声场更加均匀,因而物体悬浮更加稳定.

一般的固体和液体均可以在声悬浮装置中悬浮起来, 而Tuckermann等人^[4]采用4 kHz的单轴式声悬浮器实现了二氧化碳、氩气和氮气等密度较大气体的悬浮(图1), 文中也从悬浮小尺寸液滴的理论出发, 成功解释了反射端受力状况和悬浮较高密度气体的机制。

发射端-反射端轴线与重力方向也可以存在一定的角度^[98,106]。Wang和Tsai^[106]将两个工作频率均为27.6 kHz的发射端水平放置, 但轴线之间存在 10° 的夹角, 实现了多个聚合物小球的稳定悬浮。通过调节两个发射端之间夹角和距离, 小球受声场的作用会定向移动。Andrade等人^[107]通过改变轴线与重力方向的夹角(图5), 实验中实现了两个小球的同时悬浮, 并实现了特定的声操纵。

3.2 多轴式声悬浮

将多个发射端以非共轴的方式进行装配, 即可构

成多轴式声悬浮装置。最常见的是将三个单轴式声悬浮装置在空间中以相互正交式、三脚架式和对称式等不同的排列方式组合起来。将三组发射端-反射端以相互正交方式组合在一起, 其悬浮力比单轴式大, 且可以在空间三个正交方向对物体产生约束力, 从而有更好的悬浮稳定性, 这为声悬浮技术在工业上的应用提供了可能。

Stephens等人^[108]设计了由三个发射端及其对应的凹面反射端构成的三轴式声悬浮装置。Andrade等人^[109]将三个工作频率均为25 kHz的发射端以三角架状放置, 发射端平面与悬浮物表面之间形成驻波场, 该装置可以悬浮直径达50 mm的聚苯乙烯小球。该声悬浮装置相比于传统的声悬浮装置, 可突破悬浮尺寸与声波长的限制, 而且有望实现悬浮不规则形状的大尺寸物体。除此之外, Hong等人^[110]使用三轴式声悬浮装置产生了声旋涡并悬浮了硅油液滴, 发现声涡旋不但

图5 (网络版彩图)非轴对称单轴式声悬浮装置。(a) 几何参数示意图; (b) 悬浮实景图, 图中标尺代表10 mm; (c) $d=50$ mm, $L=10$ mm, $\theta=20^\circ$; (d) $d=50$ mm, $L=0$, $\theta=10^\circ$ 。图片来源文献^[107], 已获得授权

Figure 5 (Color online) Non-axisymmetric uniaxial acoustic levitation device. (a) Schematic diagram of geometric parameters; (b) actual levitation diagram, the scale represents 10 mm; (c) $d=50$ mm, $L=10$ mm, $\theta=20^\circ$; (d) $d=50$ mm, $L=0$, $\theta=10^\circ$. Reproduced from ref. [107] with permission of Elsevier.

驱动液体旋转, 还可以操控液滴形态(图6).

3.3 阵列式声悬浮

阵列式声悬浮是由多个声源以阵列形式组合而成, 每个发射端的相位差可以调整, 同时, 其振幅和频率也成为调节声场的重要参数^[111, 112].

Kashima等人^[113]将4个相同的发射端分别连接在17 cm×17 cm的平板上, 并在其上放置玻璃平板. 4个发射端之间的相位差在0–720°之间调节, 悬浮的小球可以在二维平面内受控移动, 其最大位移可达40 mm. Seah等人^[114]将8个发射端以八边形位置对称放置于一平面内, 调节相互之间的相位可以悬浮9个小球, 移动小球的精度可达0.09 mm. Marzo等人^[115]将60个40 kHz的发射端组合实现了毫米级颗粒的悬浮, 通过适当控制发射端相位以操纵颗粒在三维空间中平移和旋转. Yano等人^[116]通过调节声源阵列中各发射端的振幅实现了悬浮物体的定向移动, 当阵列倾斜一定角度时, 悬浮物体可以改变移动方向.

Omirou等人^[117]用多个声源组合成梅花状实现了多个彩色小球的悬浮(图7), 通过控制单元之间的振幅, 可以变换多个小球在空间中的位置, 从而将图案以立体形式展示出来. Ochiai等人^[118]搭建上百个发射端组成的大型声悬浮阵列装置, 不仅可以悬浮大量的小球, 而且可以使小球在三维空间中排列成复杂的图像, 甚至根据电脑输入的图像控制小球的空间位置.

Telle等人^[119]将发射端两两相对排列成阵列式声悬浮器, 通过激光加热实现了ZrO₃-SiO₂体系在无容器环境下的熔化. Hoshi等人^[120]也采用相对的两个声源

图6 (网络版彩图)三轴式声悬浮. (a) 硅油液滴; (b) 硅油气泡. 图片来源文献^[110], 已获得授权

Figure 6 (Color online) Triaxial acoustic levitation. (a) Silicone droplets; (b) silicones bubbles. Reproduced from ref. [110] with permission of Springer Nature.

图7 (网络版彩图)基于声悬浮的三维展示. 小球直径为2 mm. 图片来源文献^[117], 已获得授权

Figure 7 (Color online) 3D display based on acoustic levitation, particles are 2 mm in diameter. Reproduced from ref. [117] with permission of IEEE Proceedings.

阵列, 采用相控阵的方法实现颗粒群在水平和垂直方向上的大范围移动, 其移动速度可达25 mm/s.

4 液滴的形貌及其动态行为

适用于多种不同液体样品的悬浮是声悬浮技术的优势. 在悬浮过程中, 液滴在重力、表面张力和声辐射力的共同作用下呈现出特定的平衡形状. 同时, 由于超声本身的波动性、非线性效应以及液滴自身的流动性, 稳定悬浮的液滴往往表现出一系列动态行为, 如液滴的振荡、旋转和失稳等.

4.1 液滴的平衡形状

对于小尺寸液滴(直径小于毛细长度), 在表面张力的作用下自由液滴形状倾向于保持球形. 但当液滴悬浮于声场中时, 液滴的平衡形状由声辐射压 P_A 、表面张力 σ 和液滴内部压力共同决定^[121](式(16)).

$$P_i - P_A = \sigma \nabla \cdot \mathbf{n}. \quad (16)$$

为更直接地描述液滴平衡形状, 在极坐标下, 液滴的形状函数可写为^[122–124]

$$R_s(\theta) = R_E \left[1 - \frac{3R_E P_A^2}{64\sigma\rho c_0^2} \cdot \left(1 + \frac{7}{5}(k_0 R_E)^2 \right) (3\cos^2\theta - 1) \right], \quad (17)$$

式中, $R_s(\theta)$ 为液滴轮廓的极坐标, R_E 为液滴赤道半径, ρ 为液滴的密度.

液滴表面声辐射压分布不均匀, 使得悬浮于声场中的液滴不再是球形. Trinh和Hsu^[125]选用水、甘油、硅油等液体进行实验, 得到液滴长短轴比与声场强度的关系, 并与Marston^[126]的理论预测进行了对比. 研究发现, 当声悬浮液滴形状轻微偏离球形且液滴尺寸小于声波长时, Marston的理论计算结果与实验符合得很好; 但当液滴完全为非球形时(长短轴比 $a/b > 1.2$), 该理论并不能很好地预测液滴平衡形状.

Tian等人^[122]考虑了非球形液滴对声场的散射作用和重力场对液滴悬浮位置的影响, 通过对液滴位置与液滴所受平衡力的迭代计算, 得到了悬浮液滴的平衡形状及其悬浮位置(图8). 其理论在小尺寸液滴和近球形时可退化为Marston理论. Tian等人^[122]的理论还可以计算高压压缩率的扁形液滴平衡形状, 且理论值与实验结果基本符合. 在此基础上, Shi和Apfel^[77]对控制散射波的Helmholtz方程进行Fourier变换, 提出了一种新的计算声场中液滴平衡形状的方法, 该方法将计算声悬浮液滴平衡形状的适用范围扩展到液滴被压成液膜的情形.

声场强度(声压)是决定声悬浮液滴形状的主要因素, 重力水平只改变液滴的悬浮位置, 对其形状几乎没

图8 声悬浮液滴平衡形状轮廓. 图片来源文献[122], 已获得授权

Figure 8 Equilibrium shape contour of sound suspension droplet. Reproduced from ref. [122] with permission of AIP.

有影响(图9^[127]). 为了获得不同声压级下液滴的平衡形状, 将数值阻尼引入到液滴形状演变的模拟过程中,

图9 不同声压条件下声悬浮液滴的平衡形状. (a)–(d) 微重力情况: SPL=161, 163, 165, 166 dB; (e)–(h) 重力情况: SPL=161, 163, 165, 166 dB. 图片来源文献[127], 已获得授权

Figure 9 Equilibrium shapes of acoustic suspension droplets under different sound pressures. (a)–(d) Microgravity conditions: SPL=161, 163, 165, 166 dB; (e)–(h) gravity conditions: SPL=161, 163, 165, 166 dB. Reproduced from ref. [127] with permission of APS.

随着声压的增加, 液滴赤道半径 a 和极半径 b 的比值 a/b 增大, 呈现出盘状形状. 在较高的声压下, 其顶部和底部表面的中心部分甚至由凸形转变为凹形(图9(c)和(g)). 液滴形状随声压的变化规律不依赖于重力水平, 但是重力显著影响液滴的悬浮位置. 在重力条件基下, 液滴的悬浮位置随着声压升高而呈上升趋势(图9(d)和(h)), 而在微重力条件下, 液滴的质心总是位于声压节点的平面内.

一般情况下, 声悬浮样品的尺寸受限于声波的半波长($\lambda/2$)^[121]. 但当两个气泡垂直堆叠形成葫芦形状时(图10), 其竖直高度可达 $5\lambda/6$, 显著突破了声波半波长的限制^[128]. 这是因为在“葫芦”的腰部形成了环形高压区, 极大增强了声势阱对气泡的捕获能力.

4.2 液滴的振荡

在声场中的悬浮液滴通常表现出两种不同形式的振荡行为: (1) 关于悬浮位置的竖直振荡, 这种振荡往往同时伴随着液滴形状的整体振荡; (2) 扇谐振荡, 即液滴在振荡过程中其形状始终保持为绕 Z 轴的 n 次旋转对称体.

当声悬浮液滴在竖直方向上偏离平衡位置时, 即产生竖直振荡. 液滴振荡的恢复力是声辐射力和重力所提供的^[129]. 液滴整体振荡频率是竖直振动频率的2倍, 这是力和液滴平衡位置决定的. 这种振荡行为可通过空气阻力以及液滴黏性而耗散衰减^[130]. 图11(a)表示油滴在平衡位置上的不同形状, 图11(b)表明不同

黏度溶液膜振荡阻尼明显不同, 可根据其振荡衰减规律对黏度进行研究. 在小振幅条件下, 液滴的振荡频率与其振幅无关. 但是, Becker等人^[131]研究发现, 当液滴的振荡幅度超过液滴半径的10%时, 液滴悬浮位置振荡的频率将与振幅有关. 振幅越大, 液滴的振荡频率越小.

对于自由液滴的小振幅振荡, Rayleigh^[132]在1879年提出了液滴振荡的本征频率理论公式:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_L R_s^3} l(l-1)(l+2)}, \quad (18)$$

式中, f 为本征频率, l 为振荡阶数, R_s 为液滴的球形半径.

从Rayleigh公式中可以看出, 当给定液滴的尺寸与表面张力时, 液滴对应着固定的振荡频率. Lamb^[133]从液滴振荡过程中能量耗散的角度出发, 得到了振荡过程中的能量耗散率, 发现液滴的振荡幅度随时间呈指数衰减.

声悬浮液滴的扇谐振荡可通过声场调制实现. 在声悬浮基础工作电压上加载一定的调制电压时, 发射端就会发出一定频率的调制声波, 此调制声波并不影响液滴的悬浮稳定性, 但是在此影响下液滴会被激发出一定模式的扇谐振荡.

声悬浮液滴的扇谐振荡通常受平衡半径、黏度、声场频率和液滴表面颗粒层的影响. 鄢振麟等人^[134]使用单轴式声悬浮装置激励出了水滴的高阶扇谐振荡, 其阶数最高达到九阶^[96,134-137]. 研究发现, 对于液滴某

图10 (网络版彩图)两个垂直堆叠的气泡的声悬浮. (a) 显示气泡垂直长度的图像为 $5\lambda/6$; (b) 悬浮气泡的声场. 箭头表示环形高压区域. 图片来源文献^[128], 已获得授权

Figure 10 (Color online) Acoustic levitation of two vertically-stacked bubbles. (a) Image showing the vertical length of the bubbles is $5\lambda/6$; (b) sound field with the levitated bubbles. The arrow indicates the toroidal high-pressure region. Reproduced from ref. ^[128] with permission of AIP.

图11 (网络版彩图)不同溶液液滴的垂直阻尼振荡: 水、SDS溶液和蓖麻油, 虚线表示振荡幅度的衰减. (a) 不同的表面积蓖麻油液滴的振荡阻尼行为(20 μL); (b) 具有相同表面积的水、SDS溶液和蓖麻油液滴(20 μL)的振荡阻尼行为. 图片来源文献[130], 已获得授权

Figure 11 (Color online) The vertical damping oscillation of drops of different liquids: water, SDS solution, and castor oil. The fitted dashed lines show the decay of oscillation amplitude. (a) The oscillation damping behavior for castor oil drops (20 μL) of varied surface areas; (b) the oscillation damping behavior for drops (20 μL) with the same surface area of different liquids: water, SDS solution, and castor oil. Reproduced from ref. [130] with permission of AIP.

一阶数的扇谐振荡, 其频率均随扁形液滴赤道平衡半径的增大而减小. Shen等人^[137]提出将原Rayleigh公式中球形液滴半径 R_s 替换为液滴赤道的平衡半径 a' , 得到修正的Rayleigh公式

$$f = \frac{\psi}{2\pi} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho a'^3} l(l-1)(l+2)}, \quad (19)$$

式中, ψ 是和液滴变形程度相关的修正系数. 采用修正的Rayleigh公式计算得到的声悬浮液滴的扇谐振荡频率与实验观测得到的结果十分吻合.

当液滴的黏度增大时, 液滴做扇谐振荡时的黏性耗散就会增加. Shao和Xie^[138]选用不同浓度的甘油-水溶液进行实验, 研究发现, 要激励声悬浮液滴做某一阶数的扇谐振荡, 液滴的黏度必须小于临界黏度值, 且临界黏度随振荡阶数的增大而呈指数减小. 因此, 高黏度液滴很难被激发出高阶扇谐振荡.

Shi和Apfel^[139]采用边界元积分法模拟变形液滴在声场中的振荡时发现, 液滴的扇谐振荡频率随液滴长轴与短轴比的增大先增大后减小. 当给定液滴的初始变形程度时, 液滴的振荡频率随声场频率的降低而减小. 其理论结果与实验结果一致性较好.

液滴表面的纳米颗粒层会改变液滴的振荡幅度和频率. Zang等人^[140]提出将纳米颗粒的压缩模量引入到液滴的扇谐振荡动力学模型, 建立了压缩模量与振荡频率的理论关系(图12). 该模型的计算结果与Wilhelmy平板法得到的结果一致, 从而开辟了利用声悬浮液滴扇谐振荡研究流体界面力学/流变性质的新途径.

4.3 液滴的失稳

4.3.1 Plateau-Rayleigh失稳

Plateau-Rayleigh失稳(P-R失稳)一般是指流体界面张力驱动的一种不稳定性, 声悬浮液滴的P-R失稳主要是由表面毛细波和表面张力的变化引起的.

毛细波是诱发液滴Plateau-Rayleigh不稳定性的关键因素. 当声场强度足够大时, 悬浮液滴会被压扁成薄片状液膜. Lee等人^[141]通过实验发现, 毛细波首先在悬浮薄膜的中心附近出现^[134]. 当增大声强时, 液膜表面的毛细波振幅开始增大, 当毛细波的振幅增大到与液膜厚度相当时, 液膜开始失稳雾化. 液膜雾化前, 其表面毛细波的频率与声波频率一致, 因而是共振机制使得液滴雾化. Yao等人^[142]利用同轴全息粒子追踪技术研究了声悬浮液滴的失稳现象, 得到雾化射出的子液滴在空间的分布及其速度(详见文献[142]中图7). 由表面毛细波失稳引起的液膜雾化得到的子液滴尺寸范围为10–140 μm , 且尺寸在50 μm 左右的子液滴的数量最多. 声悬浮液滴雾化的临界条件与声Bond数和液滴临界半径有关^[123].

悬浮液滴表面张力随温度的变化会导致液滴的P-R失稳. 当用激光照射声悬浮液滴时, 液滴表面温度急剧增大, 导致表面张力发生变化, 这是液滴可能会发生振荡和失稳的原因^[143]. 当液滴是柴油、煤油等液体时, 液滴未被压扁前其周围便会雾化产生子液滴, 而当液滴是乙醇等液体时, 并不会发生雾化失稳现象^[144]. Basu等人^[145]发现受热液滴的雾化失稳与液滴

图12 (网络版彩图)表面覆有不同纳米颗粒的液滴三阶扇谐振荡. (a) 28.0 mg/m²; (b) 70.0 mg/m²; (c) 122.6 mg/m²; (a)–(c) 标尺代表2 mm; (d) 液滴的扇形振荡幅度 u_0 ; (e) 振荡频率 f . 垂直虚线表示发生屈曲. 其中 Γ 代表液滴表面的颗粒浓度(单位面积颗粒的质量). 图片来源文献[140], 已获得授权

Figure 12 (Color online) Third-order sectorial oscillation of droplets coated with different micro/nano particle densities. (a) 28.0 mg/m²; (b) 70.0 mg/m²; (c) 122.6 mg/m². (a)–(c) Scale=2 mm. Sectorial oscillation amplitude u_0 (d) and frequency f (e) for droplets with different surface particle concentrations (Γ , mg/m²). The vertical dashed line indicates the occurrence of buckling. Reproduced from ref. [140] with permission of AIP.

的韦伯数有关.

4.3.2 Kelvin-Helmholtz失稳

Kelvin-Helmholtz不稳定性(K-H失稳)是由两种相对运动的流体在剪切作用下产生的界面不稳定性. 声悬浮液滴的K-H失稳主要发生在悬浮液滴与周围媒介的接触区域内. 在界面处由于速度梯度的存在会形成剪切层, 受到声波干扰, 一旦流体速度达到临界速度 v_{crit} , 就会发生K-H失稳^[145]. v_{crit} 可以写为

$$v_{\text{crit}} = \sqrt{\frac{2(\rho_1 + \rho_0)}{\rho_1 \rho_0} \sqrt{\sigma(\rho_1 - \rho_0)g}}, \quad (20)$$

其中, ρ_1 代表液体的密度, ρ_0 代表空气的密度, σ 是表面张力, g 是重力加速度. Danilov等人^[146]系统研究了受热情况下悬浮液滴的K-H失稳, 发现悬浮液滴在赤道位置处最容易发生失稳, 主要是声流引起的(图13).

4.3.3 屈曲失稳与声腔共振

Pathak和Basu^[147]研究了在声悬浮条件下用激光加热双组分流滴的失稳现象, 发现了两种不同的失稳类型: 雾化型(图14(a))和屈曲失稳型(图14(b)). 雾化型指的是液滴在没有形成弯曲液膜就发生了直接雾化, 主要发生在低苯浓度(<70%体积)的液滴中. 屈曲失稳型包括动态行为: 液膜弯曲(B1)、出现射流带(B2)、射流带生长(B3)、射流带(B4)向内断裂形成气泡, 主要发生在高苯浓度的液滴中(>70%按体积计算), 其特

图13 高强度声场中液滴的演化. (a) 最初呈球形; (b) 发生K-H失稳; (c) 扁平液滴上生成毛细波. 图片来源文献[146], 已获得授权

Figure 13 Evolution of a droplet in high intensity sound field. (a) Initially spherical shape; (b) Kelvin-Helmholtz instability; (c) growing capillary waves on a flattened droplet. Reproduced from ref. [146] with permission of AIP.

征是形成屈曲膜. 由加热引起的表面张力降低及其与声场的耦合是造成上述失稳现象的主要原因.

Lee等人^[141]最早报道了声悬浮液膜的屈曲失稳. Zang等人^[148]通过系统的实验研究和深入的数值模拟, 发现屈曲失稳可以发生在不同的液体中, 如硅油、表面活性剂溶液, 甚至纯水. 这个过程一般可以分为5个阶段: 轻微形变、快速压扁、减速压扁、屈曲和急速膨胀闭合(图15). 液膜的屈曲是实现液滴-气泡转变的关键.

Zang等人^[148]提出了一种声学共振机制来解释这种屈曲失稳和液滴到气泡的转变. 当空腔达到临界体

图14 (网络版彩图)声悬浮条件下不同类型液滴的变形与失稳. (a) A型: 扁平液膜雾化; (b) B型: 屈曲失稳(弯曲液膜(B1)、出现射流带(B2)、射流带生长(B3)、射流带(B4)向内断裂形成气泡). 图片来源文献[147], 已获得授权

Figure 14 (Color online) Deformation and instability of different types of droplet under acoustic levitation. (a) A: the atomization of flat liquid film; (b) B: buckling instability (liquid film bending (B1), jetting occurs (B2), jet zone grows (B3), bubble formation and collapse (B4)). Reproduced from ref. [147] with permission of APS.

积时, 声场诱发气泡的体积急剧增大. 实验发现, 该临界体积与液体种类和液滴的初始尺寸无关, 而显著依赖于声场的频率. 这是因为, 扁平液膜弯曲形成的空腔, 实际上构成了一个亥姆霍兹谐振腔. 当弯曲的液膜腔体体积合适时, 会与超声场发生共振, 从而导致腔体剧烈膨胀并迅速闭合形成气泡. 这种声悬浮条件下的液膜屈曲失稳提供了一种制备气泡的新技术, 还可能用于制备壳核型软材料.

4.3.4 Rayleigh-Taylor失稳

当两种密度不同的介质放置于同一个容器中, 且密度大的介质位于密度小的介质上方时, 在重力作用下, 两相界面会发生不稳定现象, 称之为Rayleigh-Taylor

不稳定现象^[149]. Plesset^[150]分析了在不同压力分布条件下气泡在振荡、膨胀和破裂过程中的界面演化过程, 当增长函数急剧增加时, 界面在扰动下变得不稳定, 从而建立了球面的Rayleigh-Taylor不稳定性理论. Gonzalez-Avila等人^[151]用激光诱导的方式研究了声悬浮液滴声空化过程中的Rayleigh-Taylor失稳动力学. 实验观测到气泡破裂过程中, 在瞬间压力释放的驱动下, 气泡南北两极出现射流. 随着射流带喷射到足够长时(图16, $t=166.0$ ms), 可以证明该现象是Rayleigh-Taylor不稳定性. Zeng等人^[152]进一步研究了声悬浮液滴声空化射流失稳现象, 通过实验和数值计算, 揭示了液滴空化的不同失稳模式, 且理论计算结果与实验结果吻合得较好.

5 液滴的操纵

5.1 液滴的空间移动

声悬浮液滴通常被束缚在某一势阱中, 通过改变声场的几何参数、换能器电压、发射端相位和振幅, 可以实现势阱的调整^[153], 进而实现悬浮液滴的空间移动. Bjelobrk等人^[154]通过改变声场尺寸实现了多个势阱的合并与劈裂. Min等人^[155]用3个发射端形成声驻波场, 同时改变腔室的长度可以实现声场模式的切换. 在此过程中, 悬浮于其中的液滴因势阱的移动而运动. 腔室声场模式切换过程中, 液滴会下落一定距离, 待声场稳定后, 液滴又会上升到新的平衡位置. Foresti等人^[79]逐渐增加相邻两个换能器的电压来运输声悬浮液滴. Feng等人^[156]通过调节电压将悬浮力提高到3 mN. Thomas等人^[157]通过改变发射端振幅移动了悬浮小球, 除此之外, Marzo等人^[115]使用60个频率为40 kHz声源阵列驱动了物体的平移或旋转. Thomas和Marzo的方法不仅适用于固体样品的操纵^[158], 也可以用来同时操纵液滴与固体^[159], 如采用声悬浮操纵钠和水发生反应^[160].

5.2 液滴表面颗粒层开合

液体弹珠是指表面覆有疏水微/纳米颗粒的液滴. 正因为这层不润湿的微/纳米颗粒, 使得液体弹珠的内部形成独特的物理/化学微环境, 非常适合于用作微型的生物/化学反应器. 液体弹珠表面颗粒层的开合控制对微反应器功能的实现起着至关重要的作用. Zang等

图15 (网络版彩图)声悬浮下增强声场强度时SDS液滴(十二烷基硫酸钠)水溶液-气泡转变过程. (a) 液滴-液膜-气泡转变过程; (b), (c) 液滴表面积、位置和时间关系. 图片来源文献[148], 已获得授权

Figure 15 (Color online) Change of sodium dodecyl sulfate droplets to bubbles under acoustic suspension with enhanced sound field intensity. (a) Droplet-liquid film-bubble transition process; (b), (c) droplet surface area, position and time relationship. Reproduced from ref. [148] with permission of Springer Nature.

图16 (网络版彩图)声悬浮气泡破裂的Rayleigh-Taylor不稳定性, 图中标尺代表1 mm. 图片来源文献[151], 已获得授权

Figure 16 (Color online) Rayleigh-Taylor instability of bubble rupture under acoustic levitation, the scale represents 1 mm. Reproduced from ref. [151] with permission of Cambridge University Press.

人^[161]利用声悬浮实现了液体弹珠颗粒壳层的开合操纵. 通过增强声场强度, 可以使得液滴从近球形变形为扁椭球体. 在此过程中, 颗粒在液滴表面重新排布, 在液滴极区内形成颗粒空白区(图17(a)), 即颗粒层处于打开状态. 当声场强度降低时, 赤道位置的颗粒会向空白区域运动, 形成一个完全闭合的颗粒外壳(图17(b)). 液体弹珠表面颗粒层的“开合”转换完全由声场强度控制, 并且开合可逆. 声悬浮对液滴表面颗粒层操纵的优势主要体现在对粒子的导电性和导磁性等没有要求, 所以, 此方法为非铁磁性颗粒包覆的液体弹珠的操纵提供了参考.

5.3 液滴的凝并和混合

操纵液滴的凝并和混合对实现液滴的微生物/化反

应器功能极其重要. 先悬浮一个液滴, 然后利用机械装置将液滴从一个流动通道喷出, 可以实现液滴的融合和分离^[89,162](图18). 喷射液滴的体积取决于喷嘴的尺寸、电压脉冲的形状以及液体物理参数, 如表面张力、黏度和密度. 通过调节换能器与反射端的距离, 可以操纵悬浮两相液滴实现融合; 通过声场的调节, 实现两相悬浮液滴的融合与分离操纵. 这种基于声悬浮的液滴融合和分离技术可以用于开发高灵敏度的生化分析仪器, 结合荧光粒子标记, 可以实现动态测量.

用注射器向单轴式声悬浮装置中喷射微米级小液滴, 小液滴会被声势阱捕获, 从而在波节点附近形成规则的小液滴阵列^[163]. Nakamura等人^[164]通过调节声场强度的大小, 实现了两个液滴沿环向方向的凝并, 反复操作可以得到一个大体积液滴^[165], 引入含有不同反

图17 (网络版彩图)悬浮液滴表面颗粒层的开合操控. (a)–(c) 减小发射端与反射端的距离, 即声强增大, 液滴表面颗粒向赤道方向移动, 最终在极区几乎没有颗粒: (a) $d_0=3.0$ cm, (b) $d_0=2.98$ cm, (c) $d_0=2.96$ cm; (d)–(f) 增大发射端与反射端距离, 即声场减弱, 液滴赤道表面颗粒向中心区域移动, 逐渐复原形成闭合的颗粒层: (d) $d_0=2.95$ cm, (e) $d_0=2.97$ cm, (f) $d_0=3.67$ cm. 图片来源文献[161], 已获得授权

Figure 17 (Color online) Levitated droplet surface manipulation of opening and closing. (a)–(c) Reduce the transmitting terminal and reflection distance, sound intensity increases, the droplet surface particles move to the equator, in the end almost no particles in the polar region; (a) $d_0=3.0$ cm; (b) $d_0=2.98$ cm; (c) $d_0=2.96$ cm; (d)–(f) Weaken the sound intensity via increasing the distance between emitter and reflector droplet particles on the surface of the equator move toward the center area, gradually form a closed granular layer: (d) $d_0=2.95$ cm; (e) $d_0=2.97$ cm; (f) $d_0=3.67$ cm. Reproduced from ref. [161] with permission of ACS.

图18 两相液滴分离和融合操作. a, 悬浮液滴; b, 超声换能器; c, 超声反射器; d, 分配器液滴轨迹; e, 流通液滴分配器; f, 冷光源; g, 显微镜; h, CCD照相机; i, 计算机. 图片来源文献[162], 已获得授权

Figure 18 Two-phase droplet separation and fusion operation. a, suspension droplet; b, ultrasonic transducer; c, ultrasonic reflector; d, distributor droplet trajectory; e, circulating droplet distributor; f, cold light source; g, microscope; h, CCD camera; and i, computer. Reproduced from ref. [162] with permission of ACS.

应物的液滴可以实现特定的化学反应. 除此之外, 也可以用注射器直接向波节点依次注入反应物, 通过液滴凝并实现化学反应^[166].

超声悬浮还可以让两个或多个液体弹珠发生凝并, 即融合聚并变成一个. 当两个液滴相互靠近时, 液滴中间有液桥形成, 且液桥在几毫秒内迅速扩展, 最终导致液滴凝并(图19)^[167]. 整个过程不借助任何外力,

只需把液体弹珠放在声悬浮装置中, 声辐射力的作用会将液体弹珠“拉”到一起并使之发生凝并. 在液体弹珠内装载不同的反应物质, 利用声悬浮使之凝并, 从而提供一种崭新的诱发化学反应的控制方法.

Watanabe等人^[168]设计了一种基于超声相控阵操控液滴凝并和混合的技术. 该技术通过改变换能器的相位来控制声势阱位置, 使得悬浮的液滴逐渐向同一位置移动, 并最终发生凝并.

6 声悬浮相关流动

6.1 悬浮样品外部流动

雷诺应力以及媒介吸收声能转换为动能的作用是悬浮样品外部产生声流的主要原因, 并且这种外部流动显著依赖于声场强度和声场频率. Trinh和Robey^[169]研究了声场强度对悬浮液滴外部声流的影响, 发现在声压较低时, 外部流动主要是对称的层流; 当声压增强时, 流场开始出现紊流, 悬浮液滴出现振荡. 声场频率会影响声场的波节点和悬浮液滴周围流场的旋涡^[170].

除了声场特性, 声传播媒介的特性也会影响外部流动, 比如, 媒介黏度、饱和蒸气压等均会对外部流

图19 (网络版彩图)声悬浮条件下两个覆有微/纳米颗粒的液体弹珠(10 μ L)凝并过程. (a) 二氧化硅纳米颗粒(14% SiOH); (b) 聚四氟乙烯颗粒(5 μ m). 标尺代表2 mm, 箭头指示的是脱离颗粒. 图片来源文献[167], 已获得授权

Figure 19 (Color online) Coalescence process of two liquid marbles (10 μ L) coated with micro/nano particles under acoustic suspension. (a) Silica nanoparticles (14% SiOH); (b) PTFE particles (5 μ m). Scale bar: 2 mm. Reproduced from ref. [167] with permission of ACS.

动产生影响. Alassar^[171]通过求解Navier-Stokes方程的数值解来研究外部流动, 揭示了影响流动结构的主要参数是雷诺数和斯特鲁哈尔数. 在雷诺数固定时, 随着斯特鲁哈尔数(Strouhal Number)的增加, 内部的再循环区域变得越来越薄, 并依附于球体表面. 在斯特鲁哈尔数 $S=0.2$, 随着雷诺数的增大, 内部稳态流动层变薄, 特别是在竖直方向上比较明显. Hasegawa等人^[172]研究了饱和蒸气压对流场和蒸发过程的影响, 并系统地研究了乙醇和水混合液滴蒸发过程中内外流场, 发现悬浮液滴的内部和外部流场的结构与挥发性流体的浓度有关. 当乙醇初始含量为50 wt%–70 wt%时, 在液滴界面附近会生成微层环形涡流. 图20中白色部分是在0.1 s曝光时得到的示踪粒子轨迹图, 红色部分表示液滴的界面轮廓. 50 wt%和75 wt%乙醇水溶液、纯乙醇和己烷组成的液滴附近会观察到微层状涡流; 纯水, 25 wt%水/乙醇液滴没有涡流. 该实验证实了液滴外流流场的涡状厚度与液滴的挥发性有关, 液滴挥发性越高, 涡状厚度越大.

液滴、固体小球和气泡等不同悬浮样品对声波的激励具有不同的响应, 导致其外部流场也有所不同. Hasegawa等人^[172–174]研究了两种不同黏度悬浮液滴的外部声流, 发现悬浮液滴的黏度会显著影响外部声流结构. 研究表明, 在相同的声压级条件下, 水滴只有液

图20 (网络版彩图)声悬浮条件下液滴的外部流场. (a) 纯水; (b) 25 wt%乙醇水溶液; (c) 50 wt%乙醇水溶液; (d) 70 wt%乙醇水溶液; (e) 乙醇; (f) 己烷. 图片来源文献[172], 已获得授权

Figure 20 (Color online) External flow field of droplet under acoustic suspension condition. (a) Pure water; (b) 25 wt% ethanol aqueous solution; (c) 50 wt% ethanol aqueous solution; (d) 70 wt% ethanol aqueous solution; (e) ethanol; (f) hexane. Reproduced from ref. [172] with permission of Springer Nature.

滴下部分布有环向涡流(图21(a)和(b)), 但是甘油液滴上下表面都分布有环向涡流, 且与水滴相比, 其环向涡流的位置均偏离液滴表面. 这是由于液滴内部的流动作用和液滴表面的斯托克斯层的差异引起的^[175]. Bansch和Götz^[176]通过求解声悬浮液滴的外部流场(图

图21 (网络版彩图)声悬浮液滴的外部平均流场. (a) 超纯水PIV流场(声压级为163 dB); (b) 甘油PIV流场(声压级为163 dB); (c) 数值计算流场. 图片来源文献[173,174,176], 已获得授权

Figure 21 (Color online) External average flow field of acoustic suspension droplets. (a) PIV flow field of ultra-pure water (the sound pressure level is 163 dB); (b) PIV flow field of glycerol (the sound pressure level is 163 dB); (c) numerical calculation of the flow field. Reproduced from refs. [173,174,176] with permission of AIP and Springer Nature.

图22 不同浓度甘油液滴(12.5 μL)的内部流动. (a) 纯水; (b) 30 wt%甘油; (c) 40 wt%甘油; (d) 60 wt%甘油; (e) 80 wt%甘油; (f) 90 wt%甘油. 图片来源文献[186], 已获得授权

Figure 22 Internal flow of glycerol droplets at different concentration. (a) Pure water; (b) 30 wt% glycerin; (c) 40 wt% glycerin; (d) 60 wt% glycerin; (e) 80 wt% glycerin; (f) 90 wt% glycerin. Reproduced from ref. [186] with permission of Cambridge University Press.

21(c)), 揭示了外部流动对蛋白质液滴的蒸发速率的影响, 提出了导致蛋白质失活的热损伤模型。

Fabre等人^[177]研究了两个固体球周围的外部流场。实验结果表明, 在高频条件下, 两个小球会相互吸引; 而在低频条件下则相互排斥。但是在中间频率下, 两小球距离较远时吸引, 该方法可用于研究声场中气泡的运动和相互作用。但是, 对于两个小球是否有一个作用力为零的平衡态问题没有进行详细的研究。Clifford^[178]研究得出外部流动的漩涡是由于黏性力和固

体边界层外声切应力的作用。Lighthill^[179]提出了基于声波和固体边界作用的外部声流模型, 修正了外部声流在边界层“滑动”的Rayleigh理论, 并进一步研究了声场中的湍流和喷射。Hu等人^[180]考虑边界效应, 提出了计算圆盘周围声流的计算模型, 且获得了悬浮圆盘的稳定性系数。

由于悬浮气泡内部空腔的存在, 悬浮气泡外部流场结构与液滴外部流场不同^[44]。Kolb和Nyborg^[181]研究了在悬浮气泡边界处的涡流速度场, 发现了共振气

泡周围会出现紊流.

6.2 悬浮液滴的内部流动

Zhao等人^[175,182]用微扰法求解了声场中液滴的非线性波动方程, 从理论上揭示了液滴内部环向流动的根本原因. 预测了液滴内部出现环状流动的临界条件: $i\omega R_s^2 \rho / \mu > 5\sqrt{2} [2 + 5(\bar{\mu} / \mu)] / 2$, 式中 μ 是气相黏度, $\bar{\mu}$ 为液相黏度, 但是Zhao等人^[175,182]没有完美的实验来验证此理论的正确性. Yan等人^[183]实验发现声悬浮液滴内部的流场为旋涡场, 靠近液滴中心的旋涡呈同心圆状. 越靠近液滴赤道边缘其流速越快, 流速最大值为80 mm/s. Yamamoto等人^[184]通过三维PIV技术测得了纯水和甘油液滴的内部流动图像, 且验证了Zhao等人^[175,182]提出的环向流动临界条件的准确性. Chung和Trinh^[185], Riaud等人^[186]详细研究了在半球形腔内厄卡特(Eckart)声流现象. 研究结果表明, 随着甘油黏度的升高, 甘油内部的流动模式从四极子过渡到二极子流动状态(图22), 提出了液滴声场和水动力场的测量方法, 还采用了PIV技术验证了其数值模拟结果的准确性.

液滴内部的颗粒密度会影响液滴的内部流动. Hyers^[187]运用数学建模的方法, 分析了悬浮液滴内部的层流和湍流. Saha等人^[188]研究了声悬浮液滴中颗粒密度对内部流动的作用, 液滴表面纳米颗粒运动会形成不同的密度层, 其位置取决于初始纳米颗粒的密度,

密度分层的时间尺度类似于颗粒絮凝作用. 用激光对悬浮液滴加热, 随着液滴温度的升高, 液滴内部的环流速度会逐渐加快, 出现颗粒的积累, 形成密度梯度. 这种颗粒密度梯度的存在, 导致液滴的顶部和底部之间的力不平衡, 使得液滴的顶部坍塌, 从而形成碗状结构(图23(a)). 随着声悬浮中液滴的蒸发, 体积减小, 液滴悬浮高度会变高. 同时通过实验证实了颗粒密度对液滴内部的环向流动具有抑制作用(图23(b)^[189]), 分析了粒径、浓度、内部环流和流体黏度对蒸发的作用, 揭示了碗状结构的形成机理.

声悬浮液滴在蒸发过程中由于温度差的存在, 液滴也会出现内部流动. 杜人君和解文军^[190]研究了在声悬浮条件下环己烷液滴的蒸发凝固与内部流动的关系, 球形液滴表面边界层中的平均 Sh 数和平均 Nu 数与声压的关系为 $Sh = 1.89P_e / (c_0 \rho_0 \sqrt{\omega_0 D})$, $Nu = 1.89P_e / (c_0 \rho_0 \sqrt{\omega_0 D})$, 其中, P_e 为有效声压, α_0 是空气热扩散率, c_0 是空气的声速, ρ_0 是空气密度, 其研究结果表明声悬浮条件下液滴的 Sh/Nu 值是自然对流条件下的1.3倍, 揭示了声流能够有效地提高液滴的蒸发速率, 表明声悬浮条件下声流作用是环己烷液滴的蒸发凝固的重要原因.

声悬浮扇谐振荡液滴内部也存在流动. 在液滴中添加一定量的示踪粒子, 用片激光照射液滴即可实时观察液滴振荡过程中内部流场的变化^[191]. 实验观察到液滴作扇谐振荡时(详见文献^[191]中图2), 内部流场也

图23 (网络版彩图) (a) 声悬浮条件下NaCl和Ce(NO₃)₃液滴的蒸发; (b) 不同黏性时声悬浮液滴内部环流. 图片来源文献^[189], 已获得授权

Figure 23 (Color online) (a) Evaporation of NaCl and Ce(NO₃)₃ droplets under acoustic levitation; (b) internal circulation of acoustic suspension droplets at different viscosities. Reproduced from ref. ^[189] with permission of Cambridge University Press.

呈周期性变化, 流速随着液滴与中心距离的增加而增大. 流场中流速最大可达160 mm/s, 雷诺数最大为367, 因而液滴内部为层流. Watanabe等人^[168]用PIV实验测出了扇谐振荡液滴的内部流动, 揭示了内部流动速度、频率和黏度的关系.

7 声悬浮技术的主要应用

无容器环境是溶液和金属溶体获得深过冷的重要条件. 声悬浮技术可将样品束缚于势阱内, 实现对样品的空间定位^[192], 并提供稳定的无容器环境^[193], 从而被广泛应用于研究亚稳态液体的相变^[194]. 声悬浮的另一主要应用是通过液滴操控进行生化分析^[195–198]. 近年来, 人们开始利用声悬浮技术对细胞进行操纵^[199], 如细胞的3D打印^[200,201].

7.1 表面张力及黏度测量

7.1.1 表面张力测量

目前有两种利用声悬浮液滴测量表面张力的方法. 一种是根据液滴的平衡形状^[202], 另一种是根据液滴的振荡规律^[203,204]. 与圆环法或吊片法相比, 利用声悬浮测量时, 样品与固体表面无直接接触, 从而避免了对样品的污染, 因此其测量结果更可靠.

在理论计算声悬浮液滴平衡形状时, 液滴的表面张力均是作为已知参数, 然后通过Laplace方程得到液滴的平衡形状. 反过来, 通过液滴的平衡形状亦可得到液滴的表面张力. Tian等人^[205]在实验中拍摄声悬浮液滴的轮廓, 将其输入计算方程中, 以液滴的表面张力为待定参量, 发展出计算液滴表面张力的理论方法. 该方法得到的液滴表面张力值与实际值的偏差小于2 mN/m, 其精度与传统测量表面张力的方法相当.

近球形自由液滴的小幅振荡频率与其表面张力满足Rayleigh方程, 即式(20), 但是声悬浮液滴的平衡形状往往偏离球形, 因此, 式(20)不再适用. 针对扇形振荡的液滴, Shen等人^[137]提出将原Rayleigh公式中球形液滴半径替换为液滴赤道的平衡半径, 并添加线性修正系数 β 得到修正的Rayleigh公式, 即式(19). Shen等人^[206]通过拍摄液滴的扇谐振荡得到其振荡频率和阶数, 利用修正的Rayleigh公式进一步得到悬浮液滴的表面张力, 对不同浓度乙醇-水溶液液滴进行了测量, 与前人的实验结果基本一致^[207–209].

7.1.2 黏度测量

黏度是表征流体内部分子尺度内摩擦作用的重要参数^[210], 黏度的测量在石油、化工、医学等行业发挥着极为重要的作用. 目前常用的黏度测量方法有恩格勒(Engler)黏度法、赛波特(Sagbolt)黏度法和雷德伍德(Redwood)黏度法, 除此之外, 转桶法、落球法、毛细管法等黏度测量中也有广泛的应用^[211].

在声悬浮条件下, 由于变形液滴的弛豫与黏度有关, 可以通过记录液滴的弛豫时间和形状参数得出液体的黏度. Ohsaka等人^[212]提出了用声悬浮测量液体黏度的方法, 成功测出了蔗糖液滴的黏度值. Kremer等人^[213]使用声悬浮液滴振荡测量了流体表面张力和黏度, 测出了在313, 333和353 K三个温度下异十三烷液滴的动态黏度, 平均偏差为6%–10%, 其黏度值相比于采用毛细管和旋转黏度计测量值更加可靠, Kremer等人^[214]根据不同种类液滴(硅油、角鲨烷、丙醇、丁醇、戊醇、己醇、庚醇和辛醇)的衰减规律测出了液体的黏度.

7.1.3 软物质力学性质

声悬浮技术提供了一种独特的非接触加载方式, 非常适合对软物质体系进行研究, 比如泡沫^[215–219]、气泡^[128,220–223]、凝胶^[224]乃至细胞^[225–227]等.

2000年, McDaniel和Holt^[215]利用声悬浮研究了液态泡沫的流变性质, 根据悬浮泡沫团的共振(图24), 估算出了泡沫的剪切模量为9563 Pa, 这是利用声悬浮技术对复杂流体进行研究的成功尝试. Zang等人^[140]利用声悬浮耦合低频调制的方法研究了被纳米颗粒覆盖液滴的动力学规律, 并获得了液滴表面纳米颗粒层的力学性质.

7.2 液滴蒸发研究

液滴蒸发是一种极其常见的液-气相变, 在喷涂、制冷、农药喷洒和医学检测等领域都有重要的应用^[228,229]. 从基础科学角度看, 液滴蒸发涉及大量悬而未解的热力学-力学耦合和非线性物理问题, 因而备受不同学科领域学者的共同关注.

人们已对固体基底上的液滴蒸发开展过大量研究. 基底的导热系数、表面拓扑结构对蒸发过程具有重要影响^[230]. 特别是, 液滴与固体基底的三相接触线具有特殊的热力学和力学性质^[231], 在液滴蒸发过程中的流动、传热传质和图案形成等方面都发挥着极其重要的作用.

图24 声场中的泡沫. (a) 原始图片; (b) 模糊区域代表泡沫表面的振动. 图片来源文献[215], 已获得授权

Figure 24 The foam in the sound field. (a) Original image; (b) the fuzzy region represents the vibration of the foam surface. Reproduced from ref. [215] with permission of APS.

超声悬浮为液滴蒸发研究提供了无容器非接触环境, 同时声辐射力、声场驱动的液滴内部流动以及悬浮液滴外部声流场均会赋予液滴蒸发以新的特点^[24,73,169,190,232–236]. 研究发现, 由于避免了容器壁的异质形核作用, 声悬浮液滴中的 CaCO_3 溶液出现了无定型结晶前驱体^[237]. 另外, 无机盐 NaCl 和 NH_4Cl 在声悬浮条件下的结晶速率与在容器中相比也显著提高^[238]. 由于特殊的声流边界层条件, 超声悬浮可导致环己烷液滴的蒸发凝固^[190]. 最近研究发现, 声悬浮液滴可避免蒸发中常见的“咖啡环效应”, 为纳米材料的自组装提供了理想的环境^[239]. 液滴蒸发过程中的形貌(纵横比)、尺寸变化有可能利用液滴彩虹条纹特征进行精确测量和实时跟踪^[240,241], 除此之外, 声悬浮结合红外成像技术也可以实时监测蒸发过程中液滴表面的温度分布^[242].

7.3 生物研究

Weiser和Apfel^[243]利用声悬浮测量了红细胞在几种不同宿主环境中的可压缩性. Bazou等人^[244]验证了长时间的超声悬浮所形成的势阱不影响细胞的行为与相关特性的表达, 并利用小鼠胚胎干细胞^[245]研究发现了超声悬浮环境在60 min内并不会改变细胞的基因表达与胚胎细胞的全能性. Wood等人^[225]通过声悬浮技术研究了活细胞的光谱, 获得了4种类型的高质量光谱, 测出了细胞内不同比例的胡萝卜素和叶绿素的比例. Sundvik等人^[246]采用声悬浮技术研究了斑马鱼胚胎的生存活力, 并发现该技术对其发育没有显著影响, 这对表征和操纵椎骨胚胎具有重要意义. Jonnalagadda等人^[247]设计了一种基于声辐射力的生物反应器平台, 可长期悬浮人体关节软骨细胞, 通过改变声学参数振幅、频率等, 研究了声学诱导的机械刺激和生长因子

对人类软骨发育的影响. 适当的声压振幅可促使声场中不同密度和压缩性的混合物进行分离, Coakley等人^[248]利用单轴式声悬浮对液体中的细胞进行了提纯. Ochiai等人^[249]研究了三维阵列悬浮技术, 使用超声相控阵在空间内任意位置形成可控的超声驻波场, 实现对多个聚苯乙烯小球的非接触移动和特定形状排列, 这对多细胞的操纵具有重要参考价值. Saito等人^[250]使用正交的两对换能器, 将微粒捕获在节点的交叉点处, 通过改变超声波的频率, 微粒可被临近位置新产生的波节点捕获, 从而实现对实验对象的移动. 通过这种频率的循环变化, 可对微小的生物组织和微生物实现非接触式的移动. Xie等人^[42]利用单轴式声悬浮开展了小动物的悬浮实验(详见文献[42]中图1), 为探索声场对小动物生理的影响提供了新思路.

Versozza等人^[251]利用不同频率的超声换能器捕捉了H14 HEPA (High Efficiency Particulate Air Filter)过滤器上的噬菌体病毒, 提供了一种新的病毒灭活的方法. Gutiérrez-Ramos等人^[252]使用声悬浮装置将大肠杆菌成功地悬浮于波节点位置, 实验发现它们可以在微重力条件下聚集. Hosseinzadeh等人^[253]在声悬浮条件下运用液滴流变学测量了血滴的黏度和羟基脲处理引起的黏度变化. 此外, Carugo等人^[254]将超声悬浮与微流体结合, 使细菌通过初级声辐射力移向流体中波节点, 完成声学聚焦, 以提高细菌的浓度. Trampler等人^[255]也使用类似的方法提高细胞代谢抗体的浓度.

声悬浮的稳定悬浮的特点也被用来搭建3D神经网络模型^[256]. Bouyer等人^[256]将纤维蛋白原溶液放置在组装悬浮室中, 然后加入凝血酶, 利用超声悬浮将胚胎干细胞分化得到的神经干细胞悬浮于3D多层结构中, 经诱导分化得到神经网络. 声悬浮除了可以诱导细胞分化, 还可以应用在细胞旋转方面^[257,258]. 通过激发悬臂梁的高频振动产生超声波束, 该超声波可以将磁性微型机器人悬浮起来(详见文献[259]中图19), 控制悬浮的机器人来实现对细胞的定向移动和旋转^[259]. 利用该技术可以在微重力环境下很方便地对细胞进行操纵和研究.

8 总结与展望

8.1 总结

本文综述了声悬浮的基本原理和声悬浮技术的发

展历程, 重点讨论了在声悬浮条件下的液滴动力学现象及其运动规律, 总结了利用声悬浮对液滴进行非接触操纵的研究进展及其主要应用.

(1) 作用于样品表面的声辐射压是悬浮力的来源, 而声辐射压则是由超声的非线性效应造成的. 对于液滴的声悬浮, 声流对悬浮样品的稳定性具有一定影响. 液滴在声场中的平衡形状是声辐射力、表面张力和重力相互竞争的结果, 而前两者对其平衡形状起着决定性作用.

(2) 单轴式声悬浮的悬浮能力及其稳定性与反射端的几何形状有重要的依赖关系. 目前, 超声悬浮已经实现了地球上密度最大的固体铋和液体汞的稳定悬浮. 另外, 利用弹性/柔性反射端, 可进一步提高声悬浮的自适应性以及稳定性.

(3) 在声驻波场的作用下, 悬浮液滴表现出丰富的动态行为, 包括振荡、旋转、表面波、变形和雾化等. 在稳定悬浮过程中, 液滴内部往往具有特定的流场结构.

(4) 液滴表面的声辐射压是对液滴进行操控的力学根源. 声辐射压的分布, 受声场强度以及界面(声辐射或反射界面)几何参数的影响.

(5) 利用多轴式或阵列式声悬浮可以产生复杂的声场, 通过声场(发射端强度/相位)的调节, 不但可实现悬浮液滴形状的控制, 也可实现液滴在三维空间的迁移. 同时, 声悬浮技术在提供无容器超洁净环境的同时, 还方便同其他的分析手段相结合, 成为开展材料、生化分析研究的理想平台.

当然, 作为一项具有广泛研究前景的无容器处理手段, 声悬浮研究仍面临不少挑战. 比如, 声悬浮装置内声场的精确测量仍存在问题, 悬浮液滴内部的流动机理以及控制尚不确定, 悬浮样品的尺寸受限于超声波长 λ . 因此, 仍需要开展大量的实验和理论工作.

8.2 展望

(1) 发展新型微流控技术: 声悬浮流控

声悬浮技术不仅能使样品处于稳定的悬浮状态, 更重要的是, 它为流体的非接触操控提供了便捷途径. 这种方式的巨大优势是不会对流体造成污染和残留, 完全避免了固体表面对流体的负面影响, 是一种“超洁净”的无容器操控手段. 这与传统的基于微管道或芯片的微流控技术形成鲜明对比^[260,261], 具有极大的互补

性, 从而满足在超洁净环境下对液滴进行操控的特殊需求. 可以预见, 以声势阱充当无形容器或管道、以悬浮和非接触为主要特征的声悬浮流控技术将是一种新的液滴操控技术. 为推动声悬浮流控的发展, 目前声悬浮技术需要一系列的改进和优化.

1) 面向开展空间科学实验的需求, 有必要对目前的声悬浮装置进行小型化、轻量化改进, 较大幅度地降低其重量和体积.

2) 科学研究中往往需要构建复杂的声场, 以达到对悬浮样品的操纵, 因而也需要对换能器进行优化设计, 甚至结合使用夹芯式、阵列式等不同形式的换能器.

3) 需进一步发展不同工作介质的声悬浮技术(比如液相、低压气体等), 从而拓宽声悬浮的应用.

4) 应加强同其他技术的集成, 如成像技术、力学测量、光谱分析, 甚至人工智能(AI), 从而开发基于声悬浮的液滴智能化操控的新技术.

(2) 拓展基于声悬浮流控的基础研究

1) 空间流体物理研究. 声悬浮流控技术将为在空间站开展流体实验提供理想的流体操控手段, 为研究微重力和无容器条件下的液滴燃烧、蒸发、流动稳定性等流体物理问题提供技术支撑.

2) 复杂流体物理与力学. 复杂流体的非牛顿效应使得声悬浮液滴表现出丰富的动力学行为. 声场提供的激励是一种非接触加载. 液滴的响应既依赖于声场激励, 也受液滴自身性质的影响, 三者之间的内在关联值得深入研究. 通过声悬浮声场的精确控制, 可对软物质样品施加可变的应变速率, 从而可以根据其响应得出其力学性质.

3) 软物质力学研究. 声悬浮的非接触加载方式为研究胶体、凝胶、细胞等软物质的力学性质创造了得天独厚的条件, 有望发展出软物质力学研究的新方法和新技术.

4) 无容器条件下的生物组织工程. 声悬浮提供的无容器及声场条件, 为细胞培养、分化等组织工程提供了崭新环境, 有可能催生生命科学研究的新技术.

5) 无容器新材料科学. 声悬浮液滴/气泡可作为新型的反应器, 实现无容器条件下材料的合成、晶体生长、纳米材料自组装, 为研究新材料提供超洁净环境和研究平台.

参考文献

- 1 Schemmann G S, Everbach E C. Acoustic levitation positioning of objects in water. *J Acoust Soc Am*, 1991, 89: 1925
- 2 Mann B P, Sims N D. Energy harvesting from the nonlinear oscillations of magnetic levitation. *J Sound Vib*, 2009, 319: 515–530
- 3 Jones T B. Basic theory of dielectrophoresis and electrorotation. *IEEE Eng Med Biol Mag*, 2003, 22: 33–42
- 4 Tuckermann R, Neidhart B, Lierke E G, et al. Trapping of heavy gases in stationary ultrasonic fields. *Chem Phys Lett*, 2002, 363: 349–354
- 5 Andrade M A B, Okina F T A, Bernassau A L, et al. Acoustic levitation of an object larger than the acoustic wavelength. *J Acoust Soc Am*, 2017, 141: 4148–4154
- 6 Ohsaka K, Trinh E H. Melting and solidification of acoustically levitated drops. *J Cryst Growth*, 1989, 96: 973–978
- 7 Arturo F. Dynamics of Deformed Droplets: Thermophysical Property Measurement Using Acoustic Levitation. Dissertation for Doctoral Degree. Rice: Rice University, 2000
- 8 Yarin A L, Brenn G, Kastner O, et al. Evaporation of acoustically levitated droplets. *J Fluid Mech*, 1999, 399: 151–204
- 9 Santesson S, Nilsson S. Airborne chemistry: Acoustic levitation in chemical analysis. *Anal Bioanal Chem*, 2004, 378: 1704–1709
- 10 Kundt A. Ueber eine neue art akustischer staubfiguren und über die anwendung derselben zur bestimmung der schallgeschwindigkeit in festen körpern und gasen. *Ann Phys Chem*, 1866, 203: 497–523
- 11 Bücks K, Müller H. Über einige beobachtungen an schwingenden piezoquarzen und ihrem schallfeld. *Z Phys*, 1933, 84: 75–86
- 12 King L V. On the acoustic radiation pressure on spheres. *Proc R Soc Lond A*, 1934, 147: 212–240
- 13 Hanson A R, Domich E G, Adams H S. Acoustical liquid drop holder. *Rev Sci Instrum*, 1964, 35: 1031–1034
- 14 Whymark R R. Acoustic field positioning for containerless processing. *Ultrasonics*, 1975, 13: 251–261
- 15 Xie W J, Cao C D, Lü Y J, et al. Levitation of iridium and liquid mercury by ultrasound. *Phys Rev Lett*, 2002, 89: 104304
- 16 Yan N, Hu L, Ruan Y, et al. Liquid state undercoolability and crystal growth kinetics of ternary Ni-Cu-Sn alloys. *Chin Phys Lett*, 2016, 33: 108103
- 17 Hong Z Y, Yan N, Geng D L, et al. Surface wave patterns on acoustically levitated viscous liquid alloys. *Appl Phys Lett*, 2014, 104: 154102
- 18 Santillan A. Analysis of oscillational instabilities in acoustic levitation using the finitedifference time-domain method. In: Proceedings of the IEEE International Ultrasonics Symposium. Orlando, 2011. 1552–1555
- 19 Barmatz M B, Garrett S L. Stable and oscillating acoustic levitation. *Appl Opt*, 1988, 28: 1950
- 20 Iqbal J, Castellano M J, Parkin T B. Evaluation of photoacoustic infrared spectroscopy for simultaneous measurement of N₂O and CO₂ gas concentrations and fluxes at the soil surface. *Glob Change Biol*, 2013, 19: 327–336
- 21 Trinh E H. Compact acoustic levitation device for studies in fluid dynamics and material science in the laboratory and microgravity. *Rev Sci Instrum*, 1985, 56: 2059–2065
- 22 Contreras V, Valencia R, Peralta J, et al. Chemical elemental analysis of single acoustic-levitated water droplets by laser-induced breakdown spectroscopy. *Opt Lett*, 2018, 43: 2260
- 23 Ma D Y. Theoretical Foundation of Modern Acoustics (in Chinese). 3rd ed. Beijing: Scientific Press, 2005 [马大猷. 现代声学理论基础. 第3版. 北京: 科学出版社, 2005]
- 24 Zang D Y, Yu Y K, Chen Z, et al. Acoustic levitation of liquid drops: Dynamics, manipulation and phase transitions. *Adv Colloid Interface Sci*, 2017, 243: 77–85
- 25 Gor'kov L P. On the forces acting on a small particle in an acoustical field in an ideal fluid. *Sov Phys Doklady*, 1962, 6: 773–775
- 26 Yosioka K, Kawasima Y, Hirano H. Acoustic radiation pressure on bubbles and their logarithmic decrement. *Acta Acust united Acust*, 1955, 5: 173–178
- 27 Embleton T F W. Mean force on a sphere in a spherical sound field. I. (Theoretical). *J Acoust Soc Am*, 1954, 26: 40–45
- 28 Embleton T F W. The radiation force on a spherical obstacle in a cylindrical sound field. *Can J Phys*, 1956, 34: 276–287
- 29 Löfstedt R, Putterman S. Theory of long wavelength acoustic radiation pressure. *J Acoust Soc Am*, 1991, 90: 2027–2033
- 30 Hasegawa T. Comparison of two solutions for acoustic radiation pressure on a sphere. *J Acoust Soc Am*, 1977, 61: 1445–1448
- 31 Hasegawa T. Acoustic radiation force on a sphere in a quasistationary wave field—Experiment. *J Acoust Soc Am*, 1979, 65: 41–44
- 32 Hasegawa T. Acoustic radiation force on a sphere in a quasistationary wave field—Theory. *J Acoust Soc Am*, 1979, 65: 32–40
- 33 Doinikov A A. Influence of neighboring bubbles on the primary Bjerknes force acting on a small cavitation bubble in a strong acoustic field.

- [Phys Rev E](#), 2000, 62: 7516–7519
- 34 Doinikov A A. Acoustic radiation force on a spherical particle in a viscous heat-conducting fluid. I. General formula. [J Acoust Soc Am](#), 1997, 101: 713–721
 - 35 Doinikov A A. Acoustic radiation pressure on a rigid sphere in a viscous-fluid. *Proc Roy Soc-Math Phys Sci*, 1994, 447: 447–466
 - 36 Collas P, Barmatz M, Shipley C. Acoustic levitation in the presence of gravity. [J Acoust Soc Am](#), 1989, 86: 777–787
 - 37 Collas P, Barmatz M. Acoustic radiation force on a particle in a temperature gradient. [J Acoust Soc Am](#), 1987, 81: 1327–1330
 - 38 Yarin A L, Pfaffenlehner M, Tropea C. On the acoustic levitation of droplets. [J Fluid Mech](#), 1998, 356: 65–91
 - 39 Andrade M A B, Adamowski J C. Acoustic radiation force on a sphere in an acoustic levitation device. In: *Proceedings of the IEEE International Ultrasonics Symposium. Tours, 2016*. 1–4
 - 40 Mitri F G. Acoustic radiation force on a rigid elliptical cylinder in plane (quasi)standing waves. [J Appl Phys](#), 2015, 118: 214903
 - 41 Xie W J, Wei B. Parametric study of single-axis acoustic levitation. [Appl Phys Lett](#), 2001, 79: 881–883
 - 42 Xie W J, Cao C D, Lü Y J, et al. Acoustic method for levitation of small living animals. [Appl Phys Lett](#), 2006, 89: 214102
 - 43 Jia X, Li Y, Zhou Y, et al. Wide bandwidth acoustic transmission via coiled-up metamaterial with impedance matching layers. [Sci China-Phys Mech Astron](#), 2019, 62: 964311
 - 44 Di W L, Zhang Z H, Li L, et al. Shape evolution and bubble formation of acoustically levitated drops. [Phys Rev Fluids](#), 2018, 3: 103606
 - 45 Park M, Rafaely B. Sound-field analysis by plane-wave decomposition using spherical microphone array. [J Acoust Soc Am](#), 2005, 118: 3094–3103
 - 46 Chang P S. Acoustic source location using a microphone array. [J Acoust Soc Am](#), 2003, 113: 2957
 - 47 Kudo N, Ouchi H, Yamamoto K, et al. A simple Schlieren system for visualizing a sound field of pulsed ultrasound. [J Phys-Conf Ser](#), 2004, 1: 146–149
 - 48 Möller D, Degen N, Dual J. Schlieren visualization of ultrasonic standing waves in mm-sized chambers for ultrasonic particle manipulation. [J Nanobiotech](#), 2013, 11: 21
 - 49 Andrade M A B, Ramos T S, Okina F T A, et al. Nonlinear characterization of a single-axis acoustic levitator. [Rev Sci Instrum](#), 2014, 85: 045125
 - 50 Snow J T, Lund D E. Considerations in exploring laboratory tornadolike vortices with a laser Doppler velocimeter. [J Atmos Ocean Technol](#), 1997, 14: 412–426
 - 51 Li X, Jiang H, Jiao X, et al. Theoretical research and experimental study for a new measurement method of standing wave levitation force. [J Mech Sci Technol](#), 2015, 29: 2169–2175
 - 52 Faraday M. XVII. On a peculiar class of acoustical figures and on certain forms assumed by groups of particles upon vibrating elastic surfaces. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society. London: Richard Taylor for The Royal Society*, 1831. 121: 299–340
 - 53 Eckart C. Vortices and streams caused by sound waves. [Phys Rev](#), 1948, 73: 68–76
 - 54 Swift G W, Garrett S L. Thermoacoustics: A unifying perspective for some engines and refrigerators. [J Acoust Soc Am](#), 2003, 113: 2379–2381
 - 55 Rayleigh L. On the circulation of air observed in Kundt's tubes, and on some allied acoustical problems. *Philosop Trans R Soc London*, 1884, 175: 1–21
 - 56 Schlichting H. Berechnung ebener periodischer Grenzschichtströmungen. *Phys Z*, 1932, 33: 327–335
 - 57 Boluriaan S, Morris P J. Acoustic streaming: From Rayleigh to today. [Int J Aeroacoust](#), 2003, 2: 255–292
 - 58 Penelet G, Gusev V, Lotton P, et al. Nontrivial influence of acoustic streaming on the efficiency of annular thermoacoustic prime movers. [Phys Lett A](#), 2006, 351: 268–273
 - 59 Tang Q, Hu J. Diversity of acoustic streaming in a rectangular acoustofluidic field. [Ultrasonics](#), 2015, 58: 27–34
 - 60 Ovchinnikov M, Zhou J, Yalamanchili S. Acoustic streaming of a sharp edge. [J Acoust Soc Am](#), 2014, 136: 22–29
 - 61 Nama N, Huang P H, Huang T J, et al. Investigation of acoustic streaming patterns around oscillating sharp edges. [Lab Chip](#), 2014, 14: 2824–2836
 - 62 Frenkel V, Gurka R, Liberzon A, et al. Preliminary investigations of ultrasound induced acoustic streaming using particle image velocimetry. [Ultrasonics](#), 2001, 39: 153–156
 - 63 Fand R M, Kaye J. Acoustic streaming near a heated cylinder. [J Acoust Soc Am](#), 1960, 32: 579–584
 - 64 Devendran C, Gralinski I, Neild A. Separation of particles using acoustic streaming and radiation forces in an open microfluidic channel.

- [Microfluid Nanofluid](#), 2014, 17: 879–890
- 65 Kumar A, Gogate P R, Pandit A B. Mapping of acoustic streaming in sonochemical reactors. [Ind Eng Chem Res](#), 2007, 46: 4368–4373
- 66 Qian S Y, Wang H Z. Acoustic streaming and its applications (in Chinese). *Appl Acoust*, 1997, 16: 38–42 [钱盛友, 王鸿樟. 声流现象的研究及其应用. *应用声学*, 1997, 16: 38–42]
- 67 Zhang Y, Liu X, Gong X. Numerical calculations of acoustic streaming near two rigid planes. *J Nanjing Univ (Nat Sci)*, 2012, 4: 565–571
- 68 Chen X P, Ren H. Acoustic flows in viscous fluid: A lattice Boltzmann study. [Int J Numer Meth Fluids](#), 2015, 79: 183–198
- 69 Kapustina O A, Kolesnikova N A, Romanova O V. Estimation of the relaxation parameters of a cholesteric liquid by the parameters of acoustic streaming. [Acoust Phys](#), 2002, 48: 448–452
- 70 Qi Q. The effect of compressibility on acoustic streaming near a rigid boundary for a plane traveling wave. [J Acoust Soc Am](#), 1993, 94: 1090–1098
- 71 Cheung Y N, Nguyen N T, Wong T N. Droplet manipulation in a microfluidic chamber with acoustic radiation pressure and acoustic streaming. [Soft Matter](#), 2014, 10: 8122–8132
- 72 Reichert P, Deshmukh D, Lebovitz L, et al. Thin film piezoelectrics for bulk acoustic wave (BAW) acoustophoresis. [Lab Chip](#), 2018, 18: 3655–3667
- 73 Brenn G, Deviprasath L J, Durst F, et al. Evaporation of acoustically levitated multi-component liquid droplets. [Int J Heat Mass Transfer](#), 2007, 50: 5073–5086
- 74 Zaitone B A A, Tropea C. Evaporation of pure liquid droplets: Comparison of droplet evaporation in an acoustic field versus glass-filament. [Chem Eng Sci](#), 2011, 66: 3914–3921
- 75 Marzo A, Barnes A, Drinkwater B W. TinyLev: A multi-emitter single-axis acoustic levitator. [Rev Sci Instrum](#), 2017, 88: 085105
- 76 Lee C P, Anilkumar A V, Wang T G. Static shape of an acoustically levitated drop with wave-drop interaction. [Phys Fluids](#), 1994, 6: 3554–3566
- 77 Shi W T, Apfel R E. Deformation and position of acoustically levitated liquid drops. [J Acoust Soc Am](#), 1996, 99: 1977–1984
- 78 Feng Z C, Su Y H. Numerical simulations of the translational and shape oscillations of a liquid drop in an acoustic field. [Phys Fluids](#), 1997, 9: 519–529
- 79 Foresti D, Nabavi M, Klingauf M, et al. Acoustophoretic contactless transport and handling of matter in air. [Proc Natl Acad Sci](#), 2013, 110: 12549–12554
- 80 Ahmed D, Mao X, Shi J, et al. A millisecond micromixer via single-bubble-based acoustic streaming. [Lab Chip](#), 2009, 9: 2738–2741
- 81 Mitri F G, Fellah Z E A. Theory of the acoustic radiation force exerted on a sphere by standing and quasistanding zero-order Bessel beam tweezers of variable half-cone angles. [IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Contr](#), 2008, 55: 2469–2478
- 82 Zeng F F, Wang S Y, Lv M. Dynamics analysis for ladder type ultrasonic transformers arc transition (in Chinese). *Mach Design*, 2012, 10: 210–212 [曾凡凡, 王时英, 吕明. 阶梯型变幅杆圆弧过渡动力学分析. *机械设计与制造*, 2012, 10: 210–212]
- 83 Ide T, Friend J, Nakamura K, et al. A non-contact linear bearing and actuator via ultrasonic levitation. [Sens Actuat A-Phys](#), 2007, 135: 740–747
- 84 Nomura H, Kamakura T, Matsuda K. Theoretical and experimental examination of near-field acoustic levitation. [J Acoust Soc Am](#), 2002, 111: 1578–1583
- 85 Ueha S, Hashimoto Y, Koike Y. Non-contact transportation using near-field acoustic levitation. [Ultrasonics](#), 2000, 38: 26–32
- 86 Reinhart G, Hoeppe J. Non-contact handling using high-intensity ultrasonics. [CIRP Ann](#), 2000, 49: 5–8
- 87 Kim C H, Ih J G. On the horizontal wobbling of an object levitated by near-field acoustic levitation. [Ultrasonics](#), 2007, 46: 331–335
- 88 Ramos T S, Adamowski J C, Andrade M A B. Influence of nonlinear effects on the acoustic levitation of small spheres. In: *Proceedings of the IEEE International Ultrasonics Symposium*. Chicago, 2014. 1432–1435
- 89 Li W, Zhu Y, Feng K, et al. Effect of Surface grooves on the characteristics of noncontact transportation using near-field acoustic levitation. [Tribol Trans](#), 2018, 61: 960–971
- 90 Li H, Quan Q, Deng Z, et al. A novel noncontact ultrasonic levitating bearing excited by piezoelectric ceramics. [Appl Sci](#), 2016, 6: 280–292
- 91 Hong Z Y, Lü P, Geng D L, et al. The near-field acoustic levitation of high-mass rotors. [Rev Sci Instrum](#), 2014, 85: 104904
- 92 Eberhardt R, Neidhardt B. Acoustic levitation device for sample pretreatment in microanalysis and trace analysis. [Fresenius J Anal Chem](#), 1999, 365: 475–479
- 93 Li J, Liu P, Ding H. Dynamic coupling and experimental study on flexural transducer used in near field acoustic levitation. [J Adv Mech Design Syst Manufact](#), 2014, 8: JAMDSM0038

- 94 Ilsar D, Bucher I, Cohen N. Structural optimization for one dimensional acoustic levitation devices—Numerical and experimental study. In: Proceedings of the International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA2014) and International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics (USD2014). Leuven, 2014
- 95 Xie W J, Wei B. Dependence of acoustic levitation capabilities on geometric parameters. *Phys Rev E*, 2002, 66: 026605
- 96 Shen C L, Xie W J, Wei B. Parametrically excited sectorial oscillation of liquid drops floating in ultrasound. *Phys Rev E*, 2010, 81: 046305
- 97 Baer S, Andrade M A B, Esen C, et al. Analysis of the particle stability in a new designed ultrasonic levitation device. *Rev Sci Instrum*, 2011, 82: 105111
- 98 Jiao X Y, Liu G J, Liu J F, et al. Performance study of standing wave levitation with emitting and reflecting surface of concave sphere structure. *Proc Inst Mech Eng Part C-J Mech Eng Sci*, 2013, 227: 2504–2516
- 99 Jiao X Y, Liu G J, Liu J F, et al. Research on levitation coupled with standing wave levitation and electromagnetic levitation. *SV-JME*, 2013, 59: 763–771
- 100 Yan N, Di W L, Hong Z Y, et al. Dynamic superposition and levitation capability of two confronting ultrasonic waves. *Chin Phys Lett*, 2019, 36: 034303
- 101 Hong Z Y, Xie W J, Wei B. Acoustic levitation with self-adaptive flexible reflectors. *Rev Sci Instruments*, 2011, 82: 074904
- 102 Hong Z Y, Xie W J, Wei B. Interaction of acoustic levitation field with liquid reflecting surface. *J Appl Phys*, 2010, 107: 014901
- 103 Hong Z Y, Xie W J, Wei B. Vibration characteristics of acoustically levitated object with rigid and elastic reflectors. *Chin Phys Lett*, 2010, 27: 014301
- 104 Tanaka H, Wada Y, Mizuno Y, et al. Effect of holed reflector on acoustic radiation force in noncontact ultrasonic dispensing of small droplets. *Jpn J Appl Phys*, 2016, 55: 067302
- 105 Li J, Liu P, Ding H, et al. Nonlinear restoring forces and geometry influence on stability in near-field acoustic levitation. *J Appl Phys*, 2011, 109: 084518
- 106 Wang S H, Tsai M C. Implementation and analysis of noncontact acoustic tweezers using quasi-standing waves. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 2013, 18: 1019–1026
- 107 Andrade M A B, Pérez N, Adamowski J C. Analysis of a non-resonant ultrasonic levitation device. *Phys Procedia*, 2015, 70: 68–71
- 108 Stephens T L, Budwig R S. Three-axis acoustic device for levitation of droplets in an open gas stream and its application to examine sulfur dioxide absorption by water droplets. *Rev Sci Instrum*, 2007, 78: 014901
- 109 Andrade M A B, Bernassau A L, Adamowski J C. Acoustic levitation of a large solid sphere. *Appl Phys Lett*, 2016, 109: 044101
- 110 Hong Z Y, Yin J F, Zhai W, et al. Dynamics of levitated objects in acoustic vortex fields. *Sci Rep*, 2017, 7: 7093
- 111 Puranen T, Helander P, Meriläinen A, et al. Multifrequency acoustic levitation. In: Proceedings of the IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). Glasgow, 2019
- 112 Polychronopoulos S, Memoli G. Acoustic levitation with optimized reflective metamaterials. *Sci Rep*, 2020, 10: 4254
- 113 Kashima R, Koyama D, Matsukawa M. Two-dimensional noncontact transportation of small objects in air using flexural vibration of a plate. *IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Contr*, 2015, 62: 2161–2168
- 114 Seah S A, Drinkwater B W, Carter T, et al. Correspondence: Dexterous ultrasonic levitation of millimeter-sized objects in air. *IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Contr*, 2014, 61: 1233–1236
- 115 Marzo A, Seah S A, Drinkwater B W, et al. Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects. *Nat Commun*, 2015, 6: 8861
- 116 Yano R, Aoyagi M, Tamura H, et al. Novel transfer method using near-field acoustic levitation and its application. *Jpn J Appl Phys*, 2011, 50: 07HE29
- 117 Omirou T, Perez A M, Subramanian S, et al. Floating charts: Data plotting using free-floating acoustically levitated representations. In: Proceedings of the IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI). Greenville, 2016. 187–190
- 118 Ochiai Y, Hoshi T, Rekimoto J. Pixie dust. *ACM Trans Graph*, 2014, 33: 1–13
- 119 Telle R, Greffrath F, Prieler R. Direct observation of the liquid miscibility gap in the zirconia-silica system. *J Eur Ceramic Soc*, 2015, 35: 3995–4004
- 120 Hoshi T, Ochiai Y, Rekimoto J. Three-dimensional noncontact manipulation by opposite ultrasonic phased arrays. *Jpn J Appl Phys*, 2014, 53: 07KE07
- 121 Hasegawa K, Watanabe A, Abe Y. Acoustic manipulation of droplets under reduced gravity. *Sci Rep*, 2019, 9: 16603

- 122 Tian Y R, Holt R G, Apfel R E. Deformation and location of an acoustically levitated liquid drop. *J Acoust Soc Am*, 1993, 93: 3096–3104
- 123 Anilkumar A V, Lee C P, Wang T G. Stability of an acoustically levitated and flattened drop: An experimental study. *Phys Fluids A-Fluid Dyn*, 1993, 5: 2763–2774
- 124 Barmatz M, Jacobi N. Equilibrium shapes of acoustically levitated liquid-drops. *IEEE Trans Sonics Ultras*, 1980, 27: 175
- 125 Trinh E H, Hsu C J. Equilibrium shapes of acoustically levitated drops. *J Acoust Soc Am*, 1986, 79: 1335–1338
- 126 Marston P L. Shape oscillation and static deformation of drops and bubbles driven by modulated radiation stresses—Theory. *J Acoust Soc Am*, 1980, 67: 15–26
- 127 Xie W J, Wei B. Dynamics of acoustically levitated disk samples. *Phys Rev E*, 2004, 70: 046611
- 128 Zang D, Lin K, Li L, et al. Acoustic levitation of soap bubbles in air: Beyond the half-wavelength limit of sound. *Appl Phys Lett*, 2017, 110: 121602
- 129 Geng D L, Xie W J, Yan N, et al. Vertical vibration and shape oscillation of acoustically levitated water drops. *Appl Phys Lett*, 2014, 105: 104101
- 130 Zang D, Zhai Z, Li L, et al. Vertical vibration dynamics of acoustically levitated drop containing two immiscible liquids. *Appl Phys Lett*, 2016, 109: 101602
- 131 Becker E, Hiller W J, Kowalewski T A. Experimental and theoretical investigation of large-amplitude oscillations of liquid droplets. *J Fluid Mech*, 1991, 231: 189–210
- 132 Rayleigh L. On the capillary phenomena of jets. *Proc Royal Soci London*, 1879, 29: 71–97
- 133 Lamb H. *Hydrodynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1924. 448
- 134 Yan Z L, Xie W J, Shen C L, et al. Surface capillary wave and the eighth mode sectorial oscillation of acoustically levitated drop (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2011, 60: 064302 [鄢振麟, 解文军, 沈昌乐, 等. 声悬浮液滴的表面毛细波及八阶扇谐振荡. *物理学报*, 2011, 60: 064302]
- 135 Yan Z L, Xie W J, Geng D L, et al. The ninth-mode sectorial oscillation of acoustically levitated drops. *Chin Sci Bull*, 2011, 56: 3284–3288
- 136 Shen C H, Xie W J, Wei B. Non-axisymmetric oscillation of acoustically levitated water drops at specific frequencies. *Chin Phys Lett*, 2010, 27: 076801
- 137 Shen C L, Xie W J, Wei B. Parametric resonance in acoustically levitated water drops. *Phys Lett A*, 2010, 374: 2301–2304
- 138 Shao X P, Xie W J. Sectorial oscillation of acoustically levitated viscous drops. *Acta Phys Sin*, 2012, 61: 134302
- 139 Shi T, Apfel R E. Oscillations of a deformed liquid drop in an acoustic field. *Phys Fluids*, 1995, 7: 1545–1552
- 140 Zang D, Chen Z, Geng X. Sectorial oscillation of acoustically levitated nanoparticle-coated droplet. *Appl Phys Lett*, 2016, 108: 031603
- 141 Lee C P, Anilkumar A V, Wang T G. Static shape and instability of an acoustically levitated liquid drop. *Phys Fluids A-Fluid Dyn*, 1991, 3: 2497–2515
- 142 Yao L, Wu X, Wu Y, et al. Characterization of atomization and breakup of acoustically levitated drops with digital holography. *Appl Opt*, 2015, 54: A23
- 143 Kawakami M, Abe Y, Kaneko A, et al. Effect of laser heating on nonlinear surface deformation of acoustically levitated droplet. *Microgr Sci Technol*, 2010, 22: 353–359
- 144 Pathak B, Basu S. Phenomenology of break-up modes in contact free externally heated nanoparticle laden fuel droplets. *Phys Fluids*, 2016, 28: 123302
- 145 Basu S, Saha A, Kumar R. Thermally induced secondary atomization of droplet in an acoustic field. *Appl Phys Lett*, 2012, 100: 054101
- 146 Danilov S D, Mironov M A. Breakup of a droplet in a high-intensity sound field. *J Acoust Soc Am*, 1992, 92: 2747–2755
- 147 Pathak B, Basu S. Deformation pathways and breakup modes in acoustically levitated bicomponent droplets under external heating. *Phys Rev E*, 2016, 93: 033103
- 148 Zang D, Li L, Di W, et al. Inducing drop to bubble transformation via resonance in ultrasound. *Nat Commun*, 2018, 9: 3546
- 149 Sharp D H. An overview of Rayleigh-Taylor instability. *Phys D*, 1984, 12: 3–18
- 150 Plesset M S. On the stability of fluid flows with spherical symmetry. *J Appl Phys*, 1954, 25: 96–98
- 151 Gonzalez-Avila S R, Ohl C D. Fragmentation of acoustically levitating droplets by laser-induced cavitation bubbles. *J Fluid Mech*, 2016, 805: 551–576
- 152 Zeng Q, Gonzalez-Avila S R, Voorde S T, et al. Jetting of viscous droplets from cavitation-induced Rayleigh-Taylor instability. *J Fluid Mech*, 2018, 846: 916–943

- 153 Lim M X, Souslov A, Vitelli V, et al. Cluster formation by acoustic forces and active fluctuations in levitated granular matter. *Nat Phys*, 2019, 15: 460–464
- 154 Bjelobrk N, Nabavi M, Poulikakos D. Acoustic levitator for contactless motion and merging of large droplets in air. *J Appl Phys*, 2012, 112: 053510
- 155 Min S L, Holt R G, Apfel R E. Simulation of drop dynamics in an acoustic positioning chamber. *J Acoust Soc Am*, 1992, 91: 3157–3165
- 156 Feng K, Liu Y, Cheng M. Numerical analysis of the transportation characteristics of a self-running sliding stage based on near-field acoustic levitation. *J Acoust Soc Am*, 2015, 138: 3723–3732
- 157 Thomas G P L, Andrade M A B, Adamowski J C, et al. Acoustic levitation transportation of small objects using a ring-type vibrator. *Phys Procedia*, 2015, 70: 59–62
- 158 Foresti D, Sambatakakis G, Bottan S, et al. Morphing surfaces enable acoustophoretic contactless transport of ultrahigh-density matter in air. *Sci Rep*, 2013, 3: 3176
- 159 Morris R H, Dye E R, Docker P, et al. Beyond the Langevin horn: Transducer arrays for the acoustic levitation of liquid drops. *Phys Fluids*, 2019, 31: 101301
- 160 Foresti D, Poulikakos D. Acoustophoretic Waltz: A contactless exothermal reaction. *Phys Fluids*, 2014, 26: 091111
- 161 Zang D, Li J, Chen Z, et al. Switchable opening and closing of a liquid marble via ultrasonic levitation. *Langmuir*, 2015, 31: 11502–11507
- 162 Santesson S, Barinaga-Rementeria Ramírez I, Viberg P, et al. Affinity two-phase partitioning in acoustically levitated drops. *Anal Chem*, 2004, 76: 303–308
- 163 Apfel R E, Zheng Y, Tian Y. Studies of acousto-electrically levitated drop and particle clusters and arrays. *J Acoust Soc Am*, 1999, 105: L1–L6
- 164 Nakamura R, Mizuno Y, Nakamura K. Demonstration of noncontact ultrasonic mixing of droplets. *Jpn J Appl Phys*, 2013, 52: 07HE02
- 165 Chainani E T, Choi W H, Ngo K T, et al. Mixing in colliding, ultrasonically levitated drops. *Anal Chem*, 2014, 86: 2229–2237
- 166 Pierre Z N, Field C R, Scheeline A. Sample handling and chemical kinetics in an acoustically levitated drop microreactor. *Anal Chem*, 2009, 81: 8496–8502
- 167 Chen Z, Zang D, Zhao L, et al. Liquid marble coalescence and triggered microreaction driven by acoustic levitation. *Langmuir*, 2017, 33: 6232–6239
- 168 Watanabe A, Hasegawa K, Abe Y. Contactless fluid manipulation in air: Droplet coalescence and active mixing by acoustic levitation. *Sci Rep*, 2018, 8: 10221
- 169 Trinh E H, Robey J L. Experimental study of streaming flows associated with ultrasonic levitators. *Phys Fluids*, 1994, 6: 3567–3579
- 170 Seaver M, Galloway A, Manuccia T J. Acoustic levitation in a free-jet wind tunnel. *Rev Sci Instrum*, 1989, 60: 3452–3459
- 171 Alassar R S. Acoustic streaming on spheres. *Int J Non-Linear Mech*, 2008, 43: 892–897
- 172 Hasegawa K, Abe Y, Goda A. Microlayered flow structure around an acoustically levitated droplet under a phase-change process. *npj Microgravity*, 2016, 2: 16004
- 173 Hasegawa K, Abe Y, Fujiwara A, et al. External flow of an acoustically levitated droplet. *Microgr Sci Technol*, 2008, 20: 261–264
- 174 Hasegawa K, Abe Y, Kaneko A, et al. Visualization measurement of streaming flows associated with a single-acoustic levitator. *Microgravity Sci Technol*, 2009, 21: 9–14
- 175 Zhao H, Sadhal S S, Trinh E H. Internal circulation in a drop in an acoustic field. *J Acoust Soc Am*, 1999, 106: 3289–3295
- 176 Bansch E, Götz M. Numerical study of droplet evaporation in an acoustic levitator. *Phys Fluids*, 2018, 30: 037103
- 177 Fabre D, Jalal J, Leontini J S, et al. Acoustic streaming and the induced forces between two spheres. *J Fluid Mech*, 2016, 810: 378–391
- 178 Clifford C. Inconsistencies in the notions of acoustic stress and streaming. arXiv: 1409.2797
- 179 Lighthill S J. Acoustic streaming. *J Sound Vib*, 1978, 61: 391–418
- 180 Hu J, Nakamura K, Ueha S. Stability analysis of an acoustically levitated disk. *IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Contr*, 2003, 50: 117–127
- 181 Kolb J, Nyborg W L. Small-scale acoustic streaming in liquids. *J Acoust Soc Am*, 1956, 28: 1237–1242
- 182 Zhao H, Sadhal S S, Trinh E H. Singular perturbation analysis of an acoustically levitated sphere: Flow about the velocity node. *J Acoust Soc Am*, 1999, 106: 589–595
- 183 Yan Z L, Xie W J, Wei B. Vortex flow in acoustically levitated drops. *Phys Lett A*, 2011, 375: 3306–3309
- 184 Yamamoto Y, Abe Y, Fujiwara A, et al. Internal flow of acoustically levitated droplet. *Microgravity Sci Technol*, 2008, 20: 277–280
- 185 Chung S K, Trinh E H. Containerless protein crystal growth in rotating levitated drops. *J Cryst Growth*, 1998, 194: 384–397

- 186 Riaud A, Baudoin M, Bou Matar O, et al. On the influence of viscosity and caustics on acoustic streaming in sessile droplets: An experimental and a numerical study with a cost-effective method. *J Fluid Mech*, 2017, 821: 384–420
- 187 Hyers R W. Fluid flow effects in levitated droplets. *Meas Sci Technol*, 2005, 16: 394–401
- 188 Saha A, Basu S, Suryanarayana C, et al. Experimental analysis of thermo-physical processes in acoustically levitated heated droplets. *Int J Heat Mass Transfer*, 2010, 53: 5663–5674
- 189 Saha A, Basu S, Kumar R. Effects of acoustic-streaming-induced flow in evaporating nanofluid droplets. *J Fluid Mech*, 2011, 692: 207–219
- 190 Du R J, Xie W J. Evaporation induced solidification of cyclohexane drops under acoustic levitation condition (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2011, 60: 114302 [杜人君, 解文军. 声悬浮条件下环己烷液滴的蒸发凝固. *物理学报*, 2011, 60: 114302]
- 191 Shen C L, Xie W J, Yan Z L, et al. Internal flow of acoustically levitated drops undergoing sectorial oscillations. *Phys Lett A*, 2010, 374: 4045–4048
- 192 Baudoin M, Gerbedoen J C, Riaud A, et al. Folding a focalized acoustical vortex on a flat holographic transducer: Miniaturized selective acoustical tweezers. *Sci Adv*, 2019, 5: eaav1967
- 193 Gammell P M, Croonquist A, Wang T G. Stabilized Acoustic Levitation of Dense Materials Using a High-powered Siren. Technical Report, NASA, 1982. NASA-CR-170124
- 194 Hong Z Y, Lü Y J, Xie W J, et al. The liquid phase separation of Bi-Ga hypermonotectic alloy under acoustic levitation condition. *Chin Sci Bull*, 2007, 52: 1446–1450
- 195 Gardner E A, Apfel R E. An investigation of cavitation activity produced in a standing wave field. *J Acoust Soc Am*, 1991, 90: 2318
- 196 Chen X, Lam K H, Chen R, et al. Acoustic levitation and manipulation by a high-frequency focused ring ultrasonic transducer. *Appl Phys Lett*, 2019, 114: 054103
- 197 Thomas V. Studies of Droplet Behavior in Emerging Technologies: Elasticity Effects on Surface Superhydrophobicity and Contactless Acoustophoretic DNA Transfection. Dissertation for Doctoral Degree. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2017. 1–155
- 198 Vasileiou T, Foresti D, Bayram A, et al. Toward contactless biology: Acoustophoretic DNA transfection. *Sci Rep*, 2016, 6: 20023
- 199 Nadim A, Sterling J D. Transport of Droplets by Acoustics. In: Li D, ed. *Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics*. New York: Springer, 2015. 3355–3365
- 200 Arslan-Yildiz A, El Assal R, Chen P, et al. Towards artificial tissue models: Past, present, and future of 3D bioprinting. *Biofabrication*, 2016, 8: 014103
- 201 Foresti D, Kroll K T, Amissah R, et al. A coustophoretic printing. *Sci Adv*, 2018, 4: 1–9
- 202 Tian Y R. Acoustic Levitation and Its Applications in the Study of Liquid Surface Rheology. Dissertation for Doctoral Degree. New Haven: Yale University, 1994
- 203 Trinh E H, Marston P L, Robey J L. Acoustic measurement of the surface tension of levitated drops. *J Colloid Interface Sci*, 1988, 124: 95–103
- 204 Marston P L, Apfel R E. Acoustically forced shape oscillation of hydrocarbon drops levitated in water. *J Colloid Interface Sci*, 1979, 68: 280–286
- 205 Tian Y, Holt R G, Apfel R E. A new method for measuring liquid surface tension with acoustic levitation. *Rev Sci Instrum*, 1995, 66: 3349–3354
- 206 Shen C L, Xie W J, Wei B B. Digital image processing of sectorial oscillations for acoustically levitated drops and surface tension measurement. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2010, 53: 2260–2265
- 207 Gliński J, Chavepeyer G, Platten J K, et al. Surface properties of diluted aqueous solutions of normal short-chained alcohols. *J Chem Phys*, 1998, 109: 5050–5053
- 208 Sung J, Park K, Kim D. Surfaces of alcohol-water mixtures studied by sum-frequency generation vibrational spectroscopy. *J Phys Chem B*, 2005, 109: 18507–18514
- 209 Li C, Wang W, Wang Z. A surface tension model for liquid mixtures based on the Wilson equation. *Fluid Phase Equilib*, 2000, 175: 185–196
- 210 Herring C. Diffusional viscosity of a polycrystalline solid. *J Appl Phys*, 2004, 21: 437–445
- 211 Germano M, Piomelli U, Moin P, et al. A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model. *Phys Fluids A-Fluid Dyn*, 1991, 3: 1760–1765
- 212 Ohsaka K, Rednikov A, Sadhal S S, et al. Noncontact technique for determining viscosity from the shape relaxation of ultrasonically levitated and initially elongated drops. *Rev Sci Instrum*, 2002, 73: 2091–2096
- 213 Kremer J, Bürk V, Pollak S, et al. Viscosity of squalane under carbon dioxide pressure—Comparison of acoustic levitation with conventional

- methods. *J Supercr Fluids*, 2018, 141: 252–259
- 214 Kremer J, Kilzer A, Petermann M. Simultaneous measurement of surface tension and viscosity using freely decaying oscillations of acoustically levitated droplets. *Rev Sci Instrum*, 2018, 89: 015109
- 215 McDaniel J G, Holt R G. Measurement of aqueous foam rheology by acoustic levitation. *Phys Rev E*, 2000, 61: R2204–R2207
- 216 Liu L. Development of an acoustic levitation technique to obtain foam material properties. *J Acoust Soc Am*, 2003, 114: 1704
- 217 Riera E, Gallegojuarez J, Mason T. Airborne ultrasound for the precipitation of smokes and powders and the destruction of foams. *Ultrasons SonoChem*, 2003, 13: 107–116
- 218 Holt R G, McDaniel J G, Akhatov I S. Modeling the response of acoustically levitated foam drops. *J Acoust Soc Am*, 1999, 106: 2291
- 219 Liu L, McDaniel J G, Holt R G. Static and oscillatory response measurements of acoustically levitated foam drops. *J Acoust Soc Am*, 2002, 112: 2242
- 220 Young D A, Crum L A. An acoustic levitation technique for the study of nonlinear oscillations of gas bubbles in liquids. *J Acoust Soc Am*, 1984, 76: 1269
- 221 Hitt D L, Prosperetti A. Viscous effects in the acoustic levitation of gas bubbles. *J Acoust Soc Am*, 1993, 93: 2383
- 222 Chow R, Mettin R, Lindinger B, et al. The importance of acoustic cavitation in the sonocrystallisation of ice-high speed observations of a single acoustic bubble. In: Proceedings of the IEEE Symposium on Ultrasonics, 2003. Honolulu, 2003. 1447–1450
- 223 Gou J, Chen W Z. Mass exchange on the wall of static acoustic cavitation bubble (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2012, 42: 217–223 [苟杰, 陈伟中. 静态声空化泡内外的质量交换. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2012, 42: 217–223]
- 224 Gruver N, Holt R G. Acoustic levitation of gels: A proof-of-concept for thromboelastography. *J Acoust Soc Am*, 2014, 135: 2371
- 225 Wood B R, Heraud P, Stojkovic S, et al. A portable Raman acoustic levitation spectroscopic system for the identification and environmental monitoring of algal cells. *Anal Chem*, 2005, 77: 4955–4961
- 226 Puskar L, Tuckermann R, Frosch T, et al. Raman acoustic levitation spectroscopy of red blood cells and *Plasmodium falciparum* trophozoites. *Lab Chip*, 2007, 7: 1125–1131
- 227 Patchett B D, Sullivan N C, Doyle T E. Acoustic levitation device for probing biological cells with high-frequency ultrasound. *J Acoust Soc Am*, 2015, 138: 1846
- 228 Brutin D, Starov V. Recent advances in droplet wetting and evaporation. *Chem Soc Rev*, 2018, 47: 558–585
- 229 Giorgiutti-Dauphiné F, Pauchard L. Drying drops. *Eur Phys J E*, 2018, 41: 32
- 230 Zang D, Tarafdar S, Tarasevich Y Y, et al. Evaporation of a droplet: From physics to applications. *Phys Rep*, 2019, 804: 1–56
- 231 Yuan Q Z, Shen W H, Zhao Y P. Physical mechanics investigations of moving contact lines (in Chinese). *Adv Mech*, 2016, 46: 201608 [袁泉子, 沈文豪, 赵亚溥. 移动接触线的物理力学研究. *力学进展*, 2016, 46: 201608]
- 232 Wulsten E, Kiekens F, van Dycke F, et al. Levitated single-droplet drying: Case study with itraconazole dried in binary organic solvent mixtures. *Int J Pharm*, 2009, 378: 116–121
- 233 Mondragon R, Hernandez L, Enrique Julia J, et al. Study of the drying behavior of high load multiphase droplets in an acoustic levitator at high temperature conditions. *Chem Eng Sci*, 2011, 66: 2734–2744
- 234 Wulsten E, Lee G. Surface temperature of acoustically levitated water microdroplets measured using infra-red thermography. *Chem Eng Sci*, 2008, 63: 5420–5424
- 235 Yarin A L, Brenn G, Rensink D. Evaporation of acoustically levitated droplets of binary liquid mixtures. *Int J Heat Fluid Flow*, 2002, 23: 471–486
- 236 Basu S, Tijerino E, Kumar R. Insight into morphology changes of nanoparticle laden droplets in acoustic field. *Appl Phys Lett*, 2013, 102: 141602
- 237 Wolf S E, Leiterer J, Kappl M, et al. Early homogenous amorphous precursor stages of calcium carbonate and subsequent crystal growth in levitated droplets. *J Am Chem Soc*, 2008, 130: 12342–12347
- 238 Cao H L, Yin D C, Guo Y Z, et al. Rapid crystallization from acoustically levitated droplets. *J Acoust Soc Am*, 2012, 131: 3164–3172
- 239 Shi Q, Di W, Dong D, et al. A general approach to free-standing nanoassemblies *via* acoustic levitation self-assembly. *ACS Nano*, 2019, 13: 5243–5250
- 240 Yu H, Xu F, Tropea C. Spheroidal droplet measurements based on generalized rainbow patterns. *J Quantitat Spectr Radiat Transfer*, 2013, 126: 105–112

- 241 Yu H, Xu F, Tropea C. Optical caustics associated with the primary rainbow of oblate droplets: Simulation and application in non-sphericity measurement. [Opt Express](#), 2013, 21: 25761–25771
- 242 Duranty E R, McCardle H, Reichert W M, et al. Acoustic levitation and infrared thermography: A sound approach to studying droplet evaporation. [Chem Commun](#), 2020, 56: 4224–4227
- 243 Weiser M A H, Apfel R E. Extension of acoustic levitation to include the study of micron-size particles in a more compressible host liquid. [J Acoust Soc Am](#), 1982, 71: 1261–1268
- 244 Bazou D, Kuznetsova L A, Coakley W T. Physical environment of 2-D animal cell aggregates formed in a short pathlength ultrasound standing wave trap. [Ultrasound Med Biol](#), 2005, 31: 423–430
- 245 Bazou D, Kearney R, Mansergh F, et al. Gene expression analysis of mouse embryonic stem cells following levitation in an ultrasound standing wave trap. [Ultrasound Med Biol](#), 2011, 37: 321–330
- 246 Sundvik M, Nieminen H J, Salmi A, et al. Effects of acoustic levitation on the development of zebrafish, *Danio rerio*, embryos. [Sci Rep](#), 2015, 5: 1
- 247 Jonnalagadda U S, Hill M, Messaoudi W, et al. Acoustically modulated biomechanical stimulation for human cartilage tissue engineering. [Lab Chip](#), 2018, 18: 473–485
- 248 Coakley W T, Bardsley D W, Grundy M A, et al. Cell manipulation in ultrasonic standing wave fields. [J Chem Technol Biotechnol](#), 2007, 44: 43–62
- 249 Ochiai Y, Hoshi T, Rekimoto J. Three-dimensional mid-air acoustic manipulation by ultrasonic phased arrays. [PLoS ONE](#), 2014, 9: e97590
- 250 Saito M, Kitamura N, Terauchi M. Microorganism manipulation and microparticle arrangement by the use of ultrasonic standing waves. In: Proceedings of the International Symposium on Microelectronics and MEMS. Adelaide, 2001. 26–37
- 251 Versoza M, Jung W, Barabad M L, et al. Inactivation of filter bound aerosolized MS2 bacteriophages using a non-conductive ultrasound transducer. [J Virolog Methods](#), 2018, 255: 76–81
- 252 Gutiérrez-Ramos S, Hoyos M, Ruiz-Suárez J C. Induced clustering of *Escherichia coli* by acoustic fields. [Sci Rep](#), 2018, 8: 4668
- 253 Hosseinzadeh V A, Brugnara C, Holt R G. Shape oscillations of single blood drops: Applications to human blood and sickle cell disease. [Sci Rep](#), 2018, 8: 16794
- 254 Carugo D, Ocón T, Messaoudi W, et al. A thin-reflector microfluidic resonator for continuous-flow concentration of microorganisms: A new approach to water quality analysis using acoustofluidics. [Lab Chip](#), 2014, 14: 3830–3842
- 255 Trampler F, Sonderhoff S A, Pui P W S, et al. Acoustic cell filter for high density perfusion culture of hybridoma cells. [Bio/Technology](#), 1994, 12: 281–284
- 256 Bouyer C, Chen P, Güven S, et al. A bio-acoustic levitational (BAL) assembly method for engineering of multilayered, 3D brain-like constructs, using human embryonic stem cell derived neuro-progenitors. [Adv Mater](#), 2016, 28: 161–167
- 257 Li S, Guo F, Chen Y, et al. Standing surface acoustic wave based cell coculture. [Anal Chem](#), 2014, 86: 9853–9859
- 258 Benhal P, Chase J G, Gaynor P, et al. AC electric field induced dipole-based on-chip 3D cell rotation. [Lab Chip](#), 2014, 14: 2717–2727
- 259 Feng L, Di P, Arai F. High-precision motion of magnetic microrobot with ultrasonic levitation for 3-D rotation of single oocyte. [Int J Robot Res](#), 2016, 35: 1445–1458
- 260 Chen X D, Hu G Q. Multiphase flow in microfluidic devices (in Chinese). [Adv Mech](#), 2015, 45: 201503 [陈晓东, 胡国庆. 微流控器件中的多相流动. [力学进展](#), 2015, 45: 201503]
- 261 Mu K, Si T, Ding H. Nonlinear dynamics and manipulation of dripping in capillary flow focusing. [Sci China-Phys Mech Astron](#), 2019, 62: 124713

Non-contact droplet manipulation and its dynamics based on acoustic levitation

ZHANG ZeHui^{1,2}, LIU KangQi¹, DI WenLi¹, CHEN Zhen¹ & ZANG DuYang^{1*}

¹ MOE Key Laboratory of Material Physics and Chemistry under Extraordinary Conditions, School of Physical Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;

² School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China

Acoustic levitation is a unique technique which can accomplish levitation of small objects via acoustic radiation force caused by the nonlinear effect of ultrasound. Because of the avoidance of solid surface, the technique is extremely suitable for the container-free manipulation of liquid samples, therefore it could be widely used in droplet dynamic study and droplet-based microreactions and analysis. In this paper, we introduce briefly the principles and technical details of acoustic levitation, and review the state of the art of acoustically levitated droplet dynamics including its equilibrium shape, oscillation, instability and associate flows. We also discuss the droplet manipulation approaches via acoustic levitation. Finally, we propose several potential directions for future research in this area.

acoustic levitation, dynamics of droplets, droplet, bubble, microfluidics

PACS: 47.55.Dz, 47.85.Np, 47.80.+v, 62.10.+s

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0134](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0134)