逆反射超构表面的驻波声悬浮研究

阮永都, 梁旭*

浙江大学海洋学院, 舟山 316021

* E-mail: liangxu@zju.edu.cn

收稿日期: 2019-11-11; 接受日期: 2019-12-30; 网络版发表日期: 2020-04-24

国家自然科学基金(批准号: 51338009, 51879231, 51679214)资助项目

摘要 声悬浮是一种非常重要的无接触式微粒悬浮技术, 这种技术是利用声辐射力将微粒悬浮在空气中并可以用来控制微粒的运动状态. 微粒在声场中的运动与声场的分布形式密切相关, 由于声学超构表面的发展, 声场更容易被人为调控, 所以将声学超构表面引入到声悬浮技术的开发中可以将其在更多的环境中运用. 本文就根据逆反射超构表面的基本理论和微粒在声场中的受力特点, 数值模拟了不同入射角度下的驻波声悬浮, 获得了超构表面作用下的逆反射声场和该声场中微粒随时间变化的运动状态. 研究结果表明: 超构表面可以用于斜入射形式下的驻波声悬浮, 并且微粒在模拟中体现出了较好的声悬浮效果. 从而有机会将超构表面应用到声悬浮技术中来实现特殊情况下的微粒操控, 进而在医疗、化学分析和空间技术等领域发挥有益作用.

关键词 超构表面, 逆反射, 驻波, 声悬浮

1 引言

声波在空气中传播时会影响周围分子的疏密程度, 如果使空气的压力场呈现特定的分布, 可以利用压力差克服重力实现微粒的悬浮和操纵. 声悬浮的研究已有100多年的历史, 自从1886年德国科学家August Kundt在声波谐振管中发现了声悬浮现象并观察到微粒悬浮在驻波的波节处以来, 有大批的科学家投入到此项研究中. 声悬浮的原理研究在20世纪基本完成, 在下半叶因为美国NASA太空探索的需要开始向物理、材料和生物实验发展, 在21世纪逐渐拓展到其他

领域的应用研究中^[1,2]. 因为声悬浮技术对悬浮物的材料几乎没有要求, 可以是固体^[3,4], 也可以是液体^[5]甚至是昆虫^[6], 所以声悬浮技术在诸多领域发挥着重要作用, 例如细胞操控^[7,8]、化学分析^[9]等. 声悬浮技术发展到现在, 已经从小于波长的悬浮物发展到可以悬浮大于波长好几倍的物体^[4,10], 从简单的稳定悬浮^[11,12]发展到可以使微粒旋转的涡旋声悬浮^[13,14]和控制微粒运动的声镊^[15,16], 从固体反射端发展到液体^[17]和弹性反射端^[18], 以及从使用单个换能器^[19]发展到组装换能器阵列^[20]对悬浮物进行操控等. 这些研究表明: 控制物体悬浮的状态重点在于改变声场的分布, 所以调控声

引用格式: 阮永都, 梁旭. 逆反射超构表面的驻波声悬浮研究. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 1226–1234

Ruan Y D, Liang X. Standing wave acoustic levitation performed using retroreflection metasurface (in Chinese). Sci Sin Tech, 2020, 50: 1226–1234, doi: 10.1360/SST-2019-0397

场的分布形式有利于实现多种微粒悬浮的操作。

近几年,声场调控的研究当属于声学超材料,声学超材料是一种人工设计结构并且通常具有一定的周期性^[21],它可以在亚波长尺度下有效地改变声场的分布形式,如改变声波聚焦的位置^[22]、折射^[23]和反射的方向^[24-27]等。其中声学超构表面又是声学超材料一个重要的分支,它的主要作用是对声波的相位进行重构。研究者通过改变元胞的物理参数可以使声波的相位在 $0\sim 2\pi$ 之间发生变化,然后利用不同子元胞造成的相位差来调控声波的折射和反射等^[28]。超构表面的种类一般分为3种^[29,30]:反射型、透射型和吸收型。2017年英国萨塞克斯大学Memoli等人^[31]利用超构表面形成的聚焦声场实现了声悬浮,他们利用的是透射型超构表面。然而许多声悬浮操作是通过声波反射来实现的,所以反射型声学超构表面的研究同样有机会促进声悬浮技术的发展。反射型超构表面的发展较透射型超构表面晚些,2017年南京航空航天大学Fu等人^[32]用一种具有渐变折射率的螺旋型超材料研究了声波的逆反射。美国杜克大学Shen等人^[26]在2018年发表了关于逆反射超构表面的研究并表明超构表面可以实现接近100%的逆反射效率。2019年Fu等人^[24]又在此基础上使用二元重构型元胞实现了超构表面逆反射。逆反射超构表面的出现使得不同入射角度的声波可以在不改变反射面位置的情况下形成驻波,驻波声场又是研究声悬浮的一种常用手段,但迄今为止关于逆反射超构表面的声悬浮技术尚未出现过相关的报道,所以本文将根据Fu等人^[24]和Shen等人^[26]的结果研究逆反射超构表面形成的驻波声悬浮现象。

本文利用逆反射超构表面并根据微粒在声场中的受力特点研究了一种新的声悬浮方法,该方法是利用入射波与反射波叠加形成的驻波使微粒悬浮在空气中。传统声悬浮方法是使声波换能器的辐射面与反射面朝向相对^[33],即辐射面和反射面的法线方向在同一轴线上或相互平行,但本文与之不同的是:辐射面与反射面的法线方向并不在同一轴向上甚至存在较大的夹角,这得益于逆反射超构表面的发展。为了体现该方法的特点,本文研究了声波入射角为 45° 和 60° 两种情况,计算了辐射面至反射面的最佳距离,然后数值模拟了声波频率为30 kHz时的逆反射声压场,最后展示了微粒在声辐射力作用下随时间的运动情况。此文的目的是希望为新型声悬浮技术的研究提供一种新的方法。

2 超声驻波与逆反射超构表面

2.1 超声驻波的形成

从文献可知大多声悬浮装置是利用驻波实现对微粒的操控,它可以使小于波长的微粒稳定在波节处^[1,34]。驻波可以通过两列相同频率和振幅的声波做相向运动合成,形成这两列相向运动的声波一般有两种方式:一种是用位于不同侧的换能器(或换能器阵列)发出相向传播的声波后叠加形成驻波;另一种是用换能器(或换能器阵列)和一块正对着的反射面,利用入射波与反射波的叠加形成驻波。本文研究的是由逆反射超构表面形成的驻波声悬浮,需要一件换能器和一块逆反射超构表面,所以从一般意义来讲这属于第二种形式。如果入射波和反射波可以分别表示为

$$p_i = p_{ia} e^{j(\omega t - kx)}, \quad (1)$$

$$p_r = p_{ra} e^{j(\omega t + kx + \varphi)}, \quad (2)$$

其中, p_{ia} 和 p_{ra} 分别为入射波和反射波的声压值, ω , t 和 k 分别是圆频率、时间和波数, j 是虚部, φ 是声波反射后增加或减少的相位,则入射波和反射波叠加后为

$$\begin{aligned} p &= p_i + p_r \\ &= 2p_{ra} \cos(kx + \varphi/2) e^{j\varphi/2} e^{j\omega t} \\ &\quad + (p_{ia} - p_{ra}) e^{j(\omega t - kx)}. \end{aligned} \quad (3)$$

可以把式(3)看作是由两部分组成:第一部分是驻波声场,第二部分是沿 x 方向传播的行波。所以当入射波和反射波的声压值相等或相差较小时,行波可以忽略,且从该式可见在自由空间中相位的改变不影响驻波的形成。

2.2 逆反射超构表面

如果使用一件换能器和一块反射平面,传统的声悬浮装置通常需要使换能器辐射面和反射面的法线方向在同一条轴线上或平行,所以大部分研究通过优化反射面的形状来获得想要的声场,近几年超构表面的发展,为声悬浮的研究提供了新的可能。当声波碰到壁面后会向壁面法线方向的另一侧反射,如图1(a)所示,点虚线箭头是入射波,实线箭头是反射波。但在逆反射超构表面的作用下,反射波会沿原路径反射回去,如图1(b)所示,右侧的竖直结构是逆反射超构表面。本文逆反射超构表面的设计方法和原理参考的是南京航

图 1 (网络版彩图) (a) 正常壁面反射; (b) 逆反射; (c) 超构表面的元胞^[24]; (d) 声悬浮装置示意图

Figure 1 (Color online) (a) Ordinary reflection on the wall; (b) retroreflection realized by acoustic metasurface; (c) unit cell of metasurface [24]; (d) sketch of the acoustic levitator.

空航天大学Fu等人^[24]的研究, 当声波以最佳入射角入射时这种结构的逆反射效率可以接近100%, 这给驻波的形成提供了良好的条件, 见式(3). 图1(c)是图1(b)中逆反射超构表面的元胞示意图, 逆反射超构表面是由该元胞按晶格常数 l 周期性排列组成的, l 与波长 λ 的关系为 $\lambda=2\sin(\theta)l$, θ 是入射角, 元胞的高度 $h=\lambda/2$. 元胞又分为两个部分或称为子元胞, 分别是左侧的零空间和右侧的折叠空间, 每个部分的宽度 $a=l/2$, 折叠空间中的横梁长为 b , 横梁长度是影响声波相位改变最为敏感的参数, 其长度与入射角的大小密切相关. 在本文中, 当入射角为 45° 时, $b=0.65a$; 当入射角为 60° 时, $b=0.74a$, 入射角是波矢与壁面法线方向的夹角, 其他入射角的逆反射声场请参考补充材料1. 横梁之间的间距 $d=0.1\lambda$, 元胞内部所有的梁结构的厚度为 r , 后面两种工况中 r 的大小分别取的是 $l/40$ 和 $l/30$.

2.3 声悬浮装置的设计

本文就是根据上述的超构表面设计了一种单轴式声悬浮装置, 该声悬浮装置包括换能器和逆反射超构表面, 如图1(d)所示. 图中的左侧区域是微粒悬浮区域, 声波传播的介质为空气, 其密度为 1.205 kg/m^3 , 声速为 343 m/s . 右侧竖直的灰色区域是逆反射超构表面, 左下角是换能器. 与传统声悬浮装置不同的是, 该换能器的朝向与壁面的法线方向始终保持较大的倾角, 其与水平线的夹角为 θ 即入射角大小, 换能器辐射面中心到逆反射面底部的水平距离为 L , 调节辐射面离逆

反射面的距离可以得到合适的声压场.

3 逆反射声悬浮

3.1 流体中的微粒受力

为了研究该声悬浮装置的具体特点, 可以在悬浮区域中释放一些微粒, 先分析微粒在声场中的受力情况. 假设这些微粒在稳定的流场中不会相互影响, 即不考虑粒子之间的碰撞以及其自身的旋转, 那么粒子在层流中主要受到曳力、重力、浮力和声辐射力的作用, 根据牛顿第二定律有

$$m_p \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_{\text{aco}}, \quad (4)$$

其中, m_p 是微粒的重量, $\mathbf{v}$ 是微粒的运动速度, $\mathbf{F}_D$ 是微粒受到流体作用的曳力, $\mathbf{F}_g$ 是重力与浮力的合力, $\mathbf{F}_{\text{aco}}$ 是声辐射力, 文中均使用的是国际制单位. 曳力可以通过下式得到:

$$\mathbf{F}_D = \left(\frac{1}{\tau_p} \right) m_p (\mathbf{u} - \mathbf{v}), \quad (5)$$

其中, $\mathbf{u}$ 是流体的运动速度, τ_p 的大小需要根据相对雷诺数来判定, 相对雷诺数为

$$Re_r = \frac{\rho |\mathbf{u} - \mathbf{v}| d_p}{\mu}, \quad (6)$$

其中, ρ 是流体的密度, d_p 是微粒的直径, μ 是流体的动力黏度. 因为流体的速度和粒子释放的初始速度均为 0 m/s , 所以相对雷诺数小于1. 此时粒子所受到的曳力

是蠕动流中的斯托克斯阻力^[35], 于是式(5)中的 τ_p 为

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu}, \quad (7)$$

其中, ρ_p 是微粒的密度, 微粒的体积是按球体积计算的, 所以曳力化简后为

$$\mathbf{F}_D = 3\pi\mu d_p(\mathbf{u} - \mathbf{v}). \quad (8)$$

微粒所受到的重力和浮力的合力大小为

$$F_g = (m_p - m_f)g = m_p g \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p}, \quad (9)$$

其中, m_f 是微粒所占据的流体质量, g 是重力加速度. 最重要的是微粒会受到声辐射力的作用, 关于声辐射力的计算已经有大量的研究^[1,34,36-38], 其计算方法大多依据的是俄罗斯科学家Gorkov的经典理论. 当粒子的直径远小于波长时, 粒子所受到的声辐射力为

$$\mathbf{F}_{\text{aco}} = -\nabla U^{\text{rad}}, \quad (10)$$

其中, U^{rad} 是辐射势, 为^[1]

$$U^{\text{rad}} = V_p \left[f_1 \frac{1}{2\rho c^2} \langle p_{\text{in}}^2 \rangle - f_2 \frac{3}{4} \rho \langle \mathbf{v}_{\text{in}} \cdot \mathbf{v}_{\text{in}} \rangle \right], \quad (11)$$

$$f_1 = 1 - \frac{\rho c^2}{\rho_p c_p^2} = 1 - \frac{\beta_p}{\beta} = 1 - \frac{K}{K_p}, \quad (12)$$

$$f_2 = \frac{2(\rho_p - \rho)}{2\rho_p + \rho}, \quad (13)$$

其中, V_p 是微粒的体积, p_{in} 和 $\mathbf{v}_{\text{in}}$ 分别是微粒在悬浮位置处的声压和速度, c 和 c_p 分别是流体和微粒中的纵波声速, β 和 β_p 分别是流体体积模量 K 和微粒体积模量 K_p 的倒数. 因为微粒在声压场中的时间响应问题非常复杂, 所以通常会对 p_{in} 和 $\mathbf{v}_{\text{in}}$ 做一个周期的时间平均处理, $\langle \rangle$ 是时间平均算符, 时间平均表达式通常又被简化为

$$\langle p_{\text{in}}^2 \rangle = \frac{1}{2} (p_{\text{in}} p_{\text{in}}^*), \quad (14)$$

$$\langle \mathbf{v}_{\text{in}} \cdot \mathbf{v}_{\text{in}} \rangle = \frac{1}{2} (\mathbf{v}_{\text{in}} \cdot \mathbf{v}_{\text{in}}^*), \quad (15)$$

其中, $*$ 是复共轭算符. 对于压力声学:

$$\mathbf{v}_{\text{in}} = -\frac{1}{i\omega\rho} \nabla p, \quad (16)$$

所以从上式可知, 声压场的调节是本文的关键, 既要利用超构表面形成驻波也要获得足够大的声辐射力克服重力.

3.2 数值模拟方法

基于上面的受力分析, 为了呈现逆反射超构表面的声悬浮特征, 本文利用COMSOL Multiphysics模拟了逆反射声场的分布和微粒的运动, 主要用到了压力声学模块和流体粒子追踪模块. 因为微粒的体积较小, 不会对声场产生太大的影响, 所以这里使用的是单向耦合分析. 即先用压力声学模块计算出声场的分布, 然后将计算得到的声压值导入粒子追踪模块中进行时域分析. 在声场计算中超构表面的内部壁面均为硬反射边界条件, 计算域最大的网格尺寸小于1/10波长. 根据上述公式, 依次在粒子追踪模块中添加斯托克斯阻力、重力、浮力和声辐射力, 该模块中粒子所受到的声辐射力又被称为声泳力, 其粒子运动的计算是基于拉格朗日方法. 此外为了防止微粒遇到界面反弹而影响对微粒位置的观察, 计算域的所有边界均被定义为消除边界, 即粒子碰到边界时会被移除.

3.3 模拟结果与分析

因为声波斜入射的情况更具有代表性, 所以这里以入射角45°和60°为例研究了微粒在空气中的声悬浮, 正入射的结果可以参考补充材料1. 在算例中换能器辐射面的振动幅度为0.015 mm, 振动的频率为30 kHz, 即声波的频率为30 kHz. 微粒的密度为1000 kg/m³, 所以浮力可以忽略. 微粒的直径为1/10波长, 体积模量为2.2×10⁹ Pa. 重力沿y轴负方向垂直向下. 初始时刻微粒布置的间隔为0.4 mm, 模拟的总时间为2 s, 时间步长为2.5 ms.

(1) 超声波的入射角为45°时

驻波声悬浮对辐射面到逆反射面的距离有严格的要求, 所以为了得到合适的距离, 本文计算了 $\theta=45^\circ$, $L=28.8\sim68.8$ mm的声压场, L 扫描的步长为1 mm, 然后一一得到了每个距离所对应的最大绝对声压值. 如图2所示, 实线是悬浮区域最大绝对声压值随水平距离 L 增大的变化情况, 可以看到在这段距离中一共有5组声压值较大的区域, 这5组峰值是辐射面至逆反射面的最佳距离. 但辐射面至反射面太近, 粒子容易碰到边界而被移除, 这不利于微粒运动的观察, 所以本文选取 $L=45.7$ mm处的绝对声压场进行研究.

图3中的云图是 $L=45.7$ mm时的绝对声压场, 这里分别列出了时间为0, 0.05, 0.08, 0.1, 0.15, 0.2和1 s时的

图 2 $\theta=45^\circ$ 最大绝对声压值随距离 L 的变化情况

Figure 2 Maximum absolute pressure measured between reflector and driver via varying distance L when $\theta=45^\circ$.

微粒悬浮情况. 在 $t=0$ s时, 微粒被均匀布置在辐射面与逆反射面之间, 如图中的白色颗粒所示. 在0.05 s时, 大部分微粒在重力的作用下开始自由下落并有了初始速度, 然后在声辐射力和曳力的作用下变得混乱, 位置较高的微粒由于速度较大直接穿过驻波声场, 而在水平方向受力不平衡的微粒则会碰在到边界后被移除. 在0.08~0.1 s时, 可以看到驻波声场内的微粒数量

已经明显多于周围的散射声场区域, 此时仍有一部分微粒继续下落. 到0.1~0.2 s时, 微粒的运动开始稳定下来并聚集在波节处, 其中有少部分的微粒在波节处做较大幅度的晃动, 但没过多久后这些微粒由于惯性作用而脱离了声场的束缚. 从0.2 s过后, 悬浮在空气中的微粒数量几乎不再发生变化, 微粒在波节处做小幅度的晃动并始终稳定在波节处, 这与前人的研究结果一致^[1]. 更直观的微粒运动可参考补充材料2中的视频.

(2) 超声波的入射角为 60° 时

同样地, 本文研究了 θ 为 60° 时的情况, 我们以1 mm的扫描步长得到了 $L=27.3\sim 67.3$ mm时的最大绝对声压值. 图4是悬浮区域最大绝对声压值随 L 增大的变化情况, 这里一共有4组峰值, 本文选取了 $L=41.0$ mm时的绝对声压场来模拟微粒的运动.

图5中的云图是 $L=41.0$ mm时的绝对声压场, 这里展示了时间为0, 0.05, 0.08, 0.11, 0.15, 0.40和1 s时的微粒分布, 这几幅图贯穿了微粒从释放到稳定悬浮的整个过程. 与图3类似, 第一幅图是微粒的初始位置, 直到0.08 s都是微粒无序运动的阶段, 在此阶段中重力的作用比较明显. 在0.11 s时, 声辐射力的作用已经凸显出来, 因为此时驻波声场内部的微粒数量已经明显多

图 3 (网络版彩图) $\theta=45^\circ$ 微粒位置随时间的变化情况

Figure 3 (Color online) Particles' positions in the time domain when $\theta=45^\circ$.

图 4 $\theta=60^\circ$ 最大声压值随距离 L 的变化情况

Figure 4 Maximum absolute pressure measured between reflector and driver via varying distance L when $\theta=60^\circ$.

于周围的区域。到 0.15 s 时, 部分速度较大的微粒离开了计算域, 剩下的微粒聚集在波节处运动, 有少量的微粒会在驻波声场内晃动后摆脱声辐射力的作用。从 0.4 s 过后, 微粒在空气中的位置基本稳定下来并在波节处做微幅的运动。微粒从均匀分布到混乱再到稳定

分布只需要零点几秒钟, 整个过程非常的短。这些模拟结果有助于我们确定合适的声悬浮位置。

4 结论

本文基于逆反射超构表面和声悬浮原理研究了一种新的声悬浮方法并对微粒在空气中的悬浮状态做了仔细分析。该声悬浮方法与常规的单轴声悬浮装置不同, 这里实现了辐射面与反射面不在同一轴向下的声悬浮, 即不再是以辐射面和反射面相对的形式形成驻波, 这有别于传统的单轴式声悬浮装置的设计理念。本文通过借鉴最新的逆反射结构设计方法, 得到了不同距离 L 下的逆反射声压场和合适的反射距离; 通过对微粒在流体中的受力分析, 数值模拟了微粒在曳力、重力和声辐射力作用下的运动状态。研究结果表明: 当声波入射角为 45° 和 60° 时, 逆反射超构表面均能实现良好的悬浮效果, 逆反射声压场可以使微粒稳定地悬浮在波节处并作微幅的运动。因为声悬浮在诸多领域有重要应用, 所以有必要拓展超构表面在声悬浮

图 5 (网络版彩图) $\theta=60^\circ$ 微粒位置随时间的变化情况

Figure 5 (Color online) Particles' positions in the time domain when $\theta=60^\circ$.

领域的研究. 本文旨在为超构表面在声悬浮技术上的应用做一颗坚定的铺路石, 希望未来可以发展出更为

成熟的超构表面声悬浮技术, 为声波操控粒子的运动提供更多的途径.

致谢 感谢厦门大学胡传捷同学的讨论.

补充材料

本文的补充材料见网络版techcn.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

参考文献

- 1 Andrade M A B, Pérez N, Adamowski J C. Review of progress in acoustic levitation. *Braz J Phys*, 2018, 48: 190–213
- 2 Meng L, Cai F, Li F, et al. Acoustic tweezers. *J Phys D-Appl Phys*, 2019, 52: 273001
- 3 Andrade M A B, Pérez N, Adamowski J C. Particle manipulation by a non-resonant acoustic levitator. *Appl Phys Lett*, 2015, 106: 014101
- 4 Andrade M A B, Bernassau A L, Adamowski J C. Acoustic levitation of a large solid sphere. *Appl Phys Lett*, 2016, 109: 044101
- 5 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
- 6 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
- 7 Ozcelik A, Rufo J, Guo F, et al. Acoustic tweezers for the life sciences. *Nat Methods*, 2018, 15: 1021–1028
- 8 Wang K, Zhou W, Lin Z, et al. Sorting of tumour cells in a microfluidic device by multi-stage surface acoustic waves. *Sens Actuat B-Chem*, 2018, 258: 1174–1183
- 9 Tuckermann R, Puskar L, Zavabeti M, et al. Chemical analysis of acoustically levitated drops by Raman spectroscopy. *Anal Bioanal Chem*, 2009, 394: 1433–1441
- 10 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
- 11 Hanson A R, Domich E G, Adams H S. Acoustical liquid drop holder. *Rev Sci Instrum*, 1964, 35: 1031–1034
- 12 Yu Z. Research on ultrasonic standing wave acoustic field characteristics using LDV measurement method (in Chinese). Dissertation Master's Degree. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017 [于震. 基于LDV测量方法的超声驻波声场特性的研究. 硕士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017]
- 13 Marzo A, Calep M, Drinkwater B W. Acoustic virtual vortices with tunable orbital angular momentum for trapping of mie particles. *Phys Rev Lett*, 2018, 120: 044301
- 14 Li Y Z, Wang Q D, Zheng H X, et al. Optimization and manipulation of acoustical vortices generated by annularly distributed sparse sources (in Chinese). *Acta Acust*, 2016, 41: 704–712 [李禹志, 王青东, 郑海祥, 等. 环形稀疏声源阵列声涡旋的优化与操控. 声学学报, 2016, 41: 704–712]
- 15 Wu M, Ozcelik A, Rufo J, et al. Acoustofluidic separation of cells and particles. *Microsyst Nanoeng*, 2019, 5: 32
- 16 Li F, Xiao Y, Lei J, et al. Rapid acoustophoretic motion of microparticles manipulated by phononic crystals. *Appl Phys Lett*, 2018, 113: 173503
- 17 Hong Z Y, Xie W J, Wei B. Acoustic levitation with self-adaptive flexible reflectors. *Rev Sci Instrum*, 2011, 82: 074904
- 18 Foresti D, Sambatakakis G, Botton S, et al. Morphing surfaces enable acoustophoretic contactless transport of ultrahigh-density matter in air. *Sci Rep*, 2013, 3: 1–6
- 19 Vandaale V, Delchambre A, Lambert P. Acoustic wave levitation: Handling of components. *J Appl Phys*, 2011, 109: 124901
- 20 Marzo A, Seah S A, Drinkwater B W, et al. Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects. *Nat Commun*, 2015, 6: 8661
- 21 Xu Y, Fu Y, Chen H. Planar gradient metamaterials. *Nat Rev Mater*, 2016, 1: 16067
- 22 Shen C, Xu J, Fang N X, et al. Anisotropic complementary acoustic metamaterial for canceling out aberrating layers. *Phys Rev X*, 2014, 4:

041033

- 23 Xie Y, Wang W, Chen H, et al. Wavefront modulation and subwavelength diffractive acoustics with an acoustic metasurface. *Nat Commun*, 2014, 5: 5553
- 24 Fu Y, Cao Y, Xu Y. Multifunctional reflection in acoustic metagratings with simplified design. *Appl Phys Lett*, 2019, 114: 053502
- 25 Song X, Tianning C, Zhu J. Acoustic reprogrammable metasurface for the multi-frequency tri-channel retroreflector. *Appl Phys A*, 2019, 125: 679
- 26 Shen C, Díaz-Rubio A, Li J, et al. A surface impedance-based three-channel acoustic metasurface retroreflector. *Appl Phys Lett*, 2018, 112: 183503
- 27 Song G Y, Cheng Q, Cui T J, et al. Acoustic planar surface retroreflector. *Phys Rev Mater*, 2018, 2: 065201
- 28 Fu Y, Shen C, Cao Y, et al. Reversal of transmission and reflection based on acoustic metagratings with integer parity design. *Nat Commun*, 2019, 10: 2326
- 29 Tian Y, Ge H, Lu M H, et al. Research advances in acoustic metamaterials (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2019, 68: 7–18 [田源, 葛浩, 卢明辉, 等. 声学超构材料及其物理效应的研究进展. *物理学报*, 2019, 68: 7–18]
- 30 Assouar B, Liang B, Wu Y, et al. Acoustic metasurfaces. *Nat Rev Mater*, 2018, 3: 460–472
- 31 Memoli G, Caleap M, Asakawa M, et al. Metamaterial bricks and quantization of meta-surfaces. *Nat Commun*, 2017, 8: 1–8
- 32 Fu Y, Li J, Xie Y, et al. Compact acoustic retroreflector based on a mirrored Luneburg lens. *Phys Rev Mater*, 2018, 2: 105202
- 33 Oran W A, Berge L H, Parker H W. Parametric study of an acoustic levitation system. *Rev Sci Instrum*, 1980, 51: 626–631
- 34 Cai F Y, Meng L, Li F, et al. Recent advances and future perspectives on acoustic manipulation of microparticles (in Chinese). *J Appl Acoust*, 2018, 37: 655–663 [蔡飞燕, 孟龙, 李飞, 等. 声操控微粒研究进展. *应用声学*, 2018, 37: 655–663]
- 35 Horwitz J A K, Mani A. Accurate calculation of Stokes drag for point-particle tracking in two-way coupled flows. *J Comput Phys*, 2016, 318: 85–109
- 36 Wu R, Cheng K, Liu X, et al. Study of axial acoustic radiation force on a sphere in a Gaussian quasi-standing field. *Wave Motion*, 2016, 62: 63–74
- 37 Barmatz M, Collas P. Acoustic radiation potential on a sphere in plane, cylindrical, and spherical standing wave fields. *J Acoust Soc Am*, 1985, 77: 928–945
- 38 Sapozhnikov O A, Bailey M R. Radiation force of an arbitrary acoustic beam on an elastic sphere in a fluid. *J Acoust Soc Am*, 2013, 133: 661–676

Standing wave acoustic levitation performed using retroreflection metasurface

RUAN YongDu & LIANG Xu

Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China

Acoustic levitation is a significant non-contact technology for suspending particles in air. This technology can suspend particles and control their motion based on the acoustic radiation force. The particle motion is closely related to the distribution of a sound field. Owing to the development of an acoustic metasurface, the sound field can be easily manipulated such that acoustic levitation can be utilized in different conditions. Based on the acoustic metasurface retroreflector theory and force on objects in the sound field, we simulate acoustic levitation with different incident angles of acoustic waves. We study the retroreflective sound field generated by a metasurface and the motion of the particles in the sound field. Our results show that the retroreflection metasurface forms a standing wave and realizes particle suspension at oblique incident angles. The application of an acoustic metasurface to acoustic levitation allows particle manipulation to be used in special conditions, which will have benefits in medical research, chemical analysis, and space technology in the future.

metasurface, retroreflection, standing wave, acoustic levitation

doi: [10.1360/SST-2019-0397](https://doi.org/10.1360/SST-2019-0397)