

DOI: 10.7652/xjtuxb201811016

凹球面双发射极超声阵列悬浮能力研究

李新波¹, 王英伟¹, 王宇昆², 刘国君³, 吴越³, 石要武¹

(1. 吉林大学通信工程学院, 130022, 长春; 2. 天津七一二通信广播股份有限公司, 301899, 天津;
3. 吉林大学机械科学与工程学院, 130022, 长春)

摘要: 为了克服传统一维单轴声悬浮装置的悬浮能力较弱的问题,设计了凹球面双发射极超声阵列。首先,分析了驻波悬浮机理,采用 COMSOL 有限元分析软件对不同阵列凹球面半径进行仿真得到声压分布和最大声压值,确定出最优阵列凹球面半径值,并根据优化结果制作了凹球面双发射极超声阵列装置。然后,建立超声阵列与空气介质中声场的声固耦合模型,仿真分析激励电压区间递增的驻波声场声压分布情况。最后,搭建超声阵列驻波悬浮实验平台对仿真结果进行验证。实验结果表明:当激励电压分别为 8、12、16 和 20 V 时,悬浮能力分别为 27.8、36.2、48.2 和 65.4 mg。与传统一维单轴超声驻波声悬浮装置的悬浮能力对比,在激励电压分别为 12、16 和 20 V 时,悬浮能力分别增加了 30.2%、73.4%和 135.3%。凹球面双发射极超声阵列装置能够有效地提高驻波的悬浮能力。

关键词: 激励电压;超声阵列;仿真;声压分布;悬浮能力

中图分类号: TK323;TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)11-0106-06

Study on the Suspension Capacity of Concave Spherical Double Emitter Ultrasonic Array

LI Xinbo¹, WANG Yingwei¹, WANG Yukun², LIU Guojun³, WU Yue³, SHI Yaowu¹

(1. College of Communications Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;
2. Tianjin 712 Communication Broadcasting Co. Ltd., Tianjin 301899, China;
3. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: To improve the suspension ability of ultrasonic standing waves, a concave spherical double emitter ultrasonic array was designed. Firstly, the mechanism of ultrasonic standing wave suspension is analyzed, and the sound pressure distribution and maximum sound pressure value are obtained by using COMSOL finite element analysis, and the optimum array concave spherical radius is determined. The concave spherical double emitter ultrasonic array device was fabricated according to the optimized results. Then, the acoustic coupling model of ultrasonic array and sound field in air media is established, and the sound pressure distribution of standing wave field with increased excitation voltage is simulated and analyzed. Finally, the ultrasonic array standing wave suspension simulation experiment platform is built. The experimental results were compared with the traditional standing wave suspension ability. The experimental results showed that when the excitation voltage is 8, 12, 16, and 20 V, the suspension capacity is 27.8, 36.2,

收稿日期: 2018-04-27。 作者简介: 李新波(1980—),男,副教授;王英伟(通信作者),男,硕士生。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51475198);中国博士后科学基金资助项目(2015M570270);吉林省自然科学基金资助项目(20170101207JC)。

网络出版时间: 2018-08-01 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20180801.1711.006.html>

48.2, and 65.4 mg, respectively. Compared with the traditional one-dimensional single-axis ultrasonic standing wave suspension system, the suspension capacity is increased by at least 30.2%, 73.4%, and 135.3% at the excitation voltages of 12, 16, and 20 V, respectively. The concave spherical double emitter ultrasonic array device can effectively improve the standing wave suspension ability

Keywords: excitation voltage; ultrasonic array; simulation; sound pressure distribution; suspension capacity

超声驻波悬浮技术利用超声振动产生的辐射声压使悬浮体^[1]在没有任何附加效应的声场中悬浮或移动,具有非接触、无容器悬浮的特点。空气介质中的超声驻波悬浮是无容器运输的有效方法^[2],广泛应用于医药制剂提纯^[3]、纳米组件^[4]和生物样品悬浮等领域。液体介质中的超声驻波悬浮广泛应用于流体动力学、表面张力测量^[5]、溶液表面活性剂的流变性质研究^[6]、熔融金属的共晶生长^[7]、二元液体的蒸发^[8]、快速结晶或电离^[9]等研究。此外,超声驻波悬浮技术无需容器便可对微藻类、血细胞或液滴聚集提供准确的质谱和拉曼光谱^[10]。在生物、材料和化学等领域的研究中,超声驻波悬浮技术提供了一种有效理想的实验手段,得到了广泛应用。

超声驻波悬浮装置最常见的结构是一维单轴式超声悬浮装置,由超声换能器和反射器组成,工作原理是在超声换能器端施加高频和电压激励,换能器产生振动向外辐射声压,并由反射器将声波反射叠加,在谐振腔内形成驻波^[11]。郭木铎研究发现:当谐振腔长度为 9 mm 时,悬浮质量为 27.8 mg 的 $\Phi 2$ mm 泡沫球(发泡聚苯乙烯)所需最小激励电压为 20 V;当谐振长度为 17.5 mm 时,悬浮该小球所需最小激励电压为 30 V^[12]。传统的一维单轴式超声悬浮装置生成的驻波声场较弱,悬浮能力较小限制了其使用和推广。

目前,超声阵列装置及其驻波悬浮技术已成为国内外学者争相研究的热点。Hoshi 等研制了平面超声阵列,实现了直径为 0.6 mm 的聚苯乙烯泡沫球在驻波节点中悬浮^[13];Marzo 等利用 3D 全息技术对超声阵列驻波悬浮的声场构成进行了深入的理论分析^[14];林玲等利用 FPGA(现场可编程门阵列)实现了对平面超声阵列的控制,并验证了颗粒悬浮的稳定性^[15]。

本文结合超声驻波悬浮机理和凹曲面效应,设计凹球面双发射极超声阵列,采用 COMSOL 有限元分析软件对不同阵列凹球面半径进行仿真得到声压分布和最大声压值,确定出最优阵列凹球面半径

值,并根据优化结果制作了凹球面双发射极超声阵列装置。接着,建立耦合声场模型,分析低激励电压区间递增的悬浮能力特性。最后,搭建了超声驻波悬浮实验平台,对不同质量的悬浮颗粒进行了实验。

1 超声阵列结构设计和悬浮机理

1.1 超声阵列结构设计

凹球面双发射极超声阵列结构如图 1 所示,主要包括振动单元、固定单元和支撑单元。振动单元是超声换能器阵列,在激励信号作用下产生振动,将机械能转化为声能,发出超声波;固定单元由上下凹球面壳体组成,将超声换能器振子按照环形排列固定在凹球面壳体内表面;支撑单元是支撑架,支撑上下凹球面壳体,使上下凹球面壳体在俯视平面上的投影重叠。

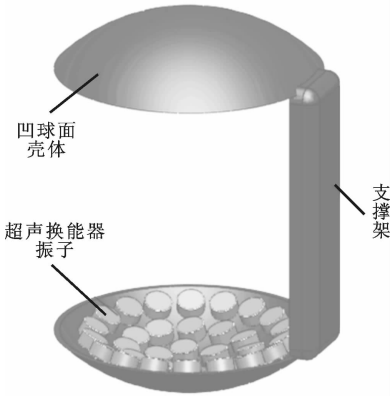


图 1 凹球面双发射极超声阵列结构图

1.2 悬浮机理

图 2 为凹球面双发射极超声阵列装置的驻波声场图。向超声阵列施加频率(通常为 40 kHz)和幅值相同的激励信号,信号波形通常为方波、正弦波和三角波。下凹球面的超声换能器阵列产生超声波束,两组波束相遇并叠加形成驻波声场。驻波声场的辐射声压远高于平面声场,是由波腹和波节构成,图 2 中波腹是绝对声压幅值最大的点,波节是声压幅值为 0 的点。由于辐射声压的作用,在波节附近形成一个指向节点的回弹力,因而可使小颗粒克服

重力作用悬浮在波点附近。驻波声场的声压越大，回复力就越强，悬浮粒子的能力就越强。

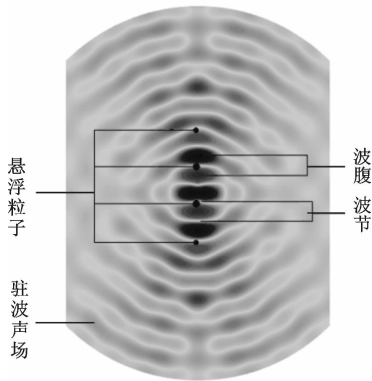


图 2 驻波声场图

2 凹球面超声阵列结构优化

2.1 阵列结构的声压理论分析

当超声波进入媒介后，会使不规则运动的微粒约束为规则运动，使得媒质变的稠密或稀疏，所以声波的扩散及传播主要是媒介内部的变化过程，而体积元在受到声波扰动后其压强会发生变化，这种由于声扰动而引起压强变化的现象叫做声压。如果一个声学换能器发出恒定频率和振幅的超声波，则第 n 个换能器在 r 点产生的复杂声压 p_n 可描述为

$$p_n(r) = P_0 A \frac{D_f(\theta)}{d_n} e^{i(\varphi + kd_n)} \tag{1}$$

式中： P_0 为换能器输出功率的振幅常数； A 为激励信号幅值； k 为波数， $k = 2\pi/\lambda$ ， λ 为波长； d_n 为换能器到 r 点的距离； φ 为发射源相位； D_f 是关于角度 θ 的远场指向性函数

$$D_f = 2J_1(ka \sin\theta)/ka \sin\theta \tag{2}$$

其中 J_1 是一阶贝塞尔函数， a 为超声换能器振子半径。该指向性函数可简化为

$$D_f = \text{sinc}(ka \sin\theta) \tag{3}$$

则通过 N 个超声换能器阵元生成的声压相互叠加生成的复合声场声压为

$$p = \sum_{n=1}^N p_n \tag{4}$$

为了计算复合声场声压作用在球体上的力，根据 Gor'kov 声辐射力理论，可得到声势能

$$U = K_1(|p|^2) - K_2(|p_x|^2 + |p_y|^2 + |p_z|^2) \tag{5}$$

$$K_1 = \frac{1}{4}V\left(\frac{1}{c_0^2\rho_0} - \frac{1}{c_P^2\rho_P}\right) \tag{6}$$

$$K_2 = \frac{3}{4}V\left(\frac{\rho_0 - \rho_P}{\omega^2\rho_0(\rho_0 + 2\rho_P)}\right) \tag{7}$$

式中： V 是悬浮微粒的体积； ω 是发射信号频率； ρ_0 是介质的密度； ρ_P 是微粒的密度； c_0 为空气中的声速； c_P 为微粒中的声速。声悬浮力可表示为声势能的负梯度

$$F = -\nabla U \tag{8}$$

则 z 轴上的声悬浮力为

$$F_z = -\left.\frac{\partial U}{\partial z}\right|_{(x,y)=(0,0)} \tag{9}$$

可以看出， z 轴上的声悬浮力与 z 轴上的声场声压呈正相关。

2.2 最优半径值确定

根据上述的声压分析，本文采用 COMSOL 软件仿真了不同凹球面半径下的轴向(z 轴)和径向(x 轴)的最大声压值，其中轴向声压起到主要悬浮作用，所以只要保证凹球面超声阵列在轴向上的声压最大，悬浮粒子的能力就越强，则该半径即为最优。本文将边界条件中超声换能器振子的响应频率设为 40 kHz，将凹球面阵列的高度设为 100 mm，激励电压设为 12 V，温度为常温(20 ℃)。由于超声换能器振子半径为 5 mm，所以凹球面阵列半径 R 以 5 mm 递增，分别设为 45、50、55 和 60 mm。然后，采用 COMSOL 软件进行仿真，得到了轴向和径向最大声压值如表 1 所示，可以看出凹球面阵列半径为 50 mm 时轴向声压最大为 24 kPa，即为阵列的最优半径值。

表 1 不同阵列半径下的最大声压值

R/mm	45	50	55	60
z 轴最大声压/kPa	16	24	14	12
x 轴最大声压/kPa	19	4	2.6	1.5

图 3 给出了凹球面阵列半径为 50 mm 时的驻波声场声压分布，从图中可以找到驻波声场的最大声压值。为了更加明显地观察轴向声压随距离的变化，绘制了轴向声压幅值变化如图 4 所示，可以清楚

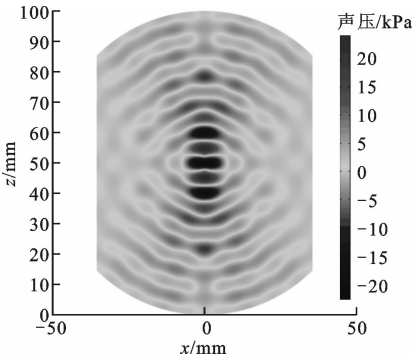


图 3 驻波声场声压分布($R=50\text{ mm}$)

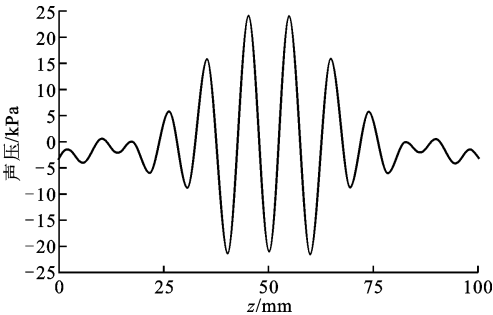


图 4 轴向驻波声压分布 ($R=50\text{ mm}$)

地观察到沿着轴向分布的驻波声压中间高、两边低，即中间的悬浮能力最强，并向两边逐渐递减。

2.3 凹球面双发射极超声阵列装置

根据仿真得到的最优半径值，制作凹球面双发射极超声阵列装置如图 5 所示，它是由 72 个超声换能器振子分别固定在上下凹球面壳体上，并用导线将振子相互连接形成通路。由于该装置的高度为 100 mm，凹球面半径为 50 mm，为了保证该阵列装置能形成凹曲面的效应，则必需使其的聚焦深度大于最优半径值，即能够使凹球面壳体上每一个振子产生的超声波主瓣相互重叠且聚集形成一个区域，产生驻波声场。本文所描述的聚焦深度为 55 mm，能很好地满足该阵列的需求。

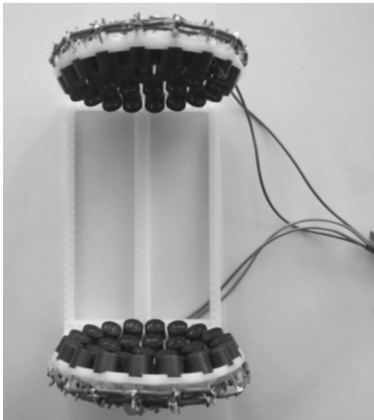


图 5 超声阵列装置

本文采用的超声换能器振子型号为 nicera T4010A1，具体参数如表 2 所示。

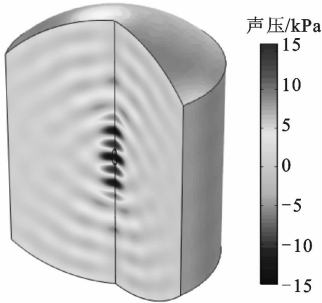
表 2 换能器振子参数

响应频率 /kHz	谐振阻抗 / Ω	声压级 /dB	输入峰值电压 /V
40	690	121.5	20

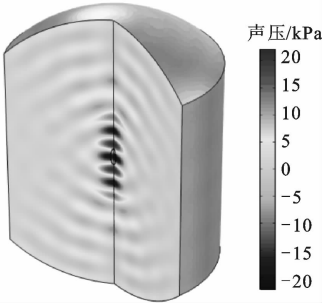
2.4 不同激励电压仿真

根据优化后凹球面阵列的具体参数，利用 COMSOL 软件建立了简化的超声阵列与空气介质

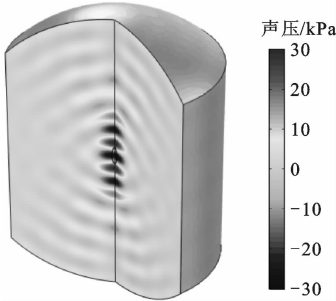
中声场的声-固耦合模型，针对激励电压区间递增时产生的驻波声场进行仿真，分别将耦合场边界条件下的激励电压设置为 8、12、16、20 V，其他的边界参数保持恒定，得到的驻波声压结果如图 6 所示。



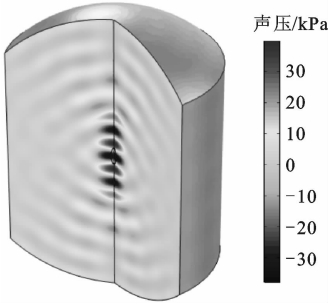
(a)激励电压为 8 V



(b)激励电压为 12 V



(c)激励电压为 16 V



(d)激励电压为 20 V

图 6 不同激励电压下的驻波声压分布

对仿真数据进行整理，得到激励电压区间递增的最大声压值如表 3 所示，可见随着激励电压的增

加,最大声压值也在增加。

表 3 不同电压下的最大声压和声悬浮力值

激励电压/V	8	12	16	20
最大声压/kPa	16.5	24	30.1	39.8
最大声悬浮力/ μN	273.4	355.7	473.4	641.9

为了量化激励电压变化对最大声压值影响的程度,将每个激励电压下的最大声压值与激励电压 8 V 下的最大声压值进行对比,得到各激励电压下的最大声压值增幅:当激励电压增加为 12 V 时最大声压值增加了 38.8%;当激励电压增加到 16 V 时最大声压值增加了 82.5%;当激励电压增加到 20 V 时最大声压值增加了 141.2%。由此可见,在电压递增范围内激励电压越大,驻波悬浮能力越强。

3 实验与结果

3.1 实验平台

本文搭建了凹球面双发射极超声阵列驻波悬浮的实验平台如图 7 所示。实验平台的控制模块(ATMEGA328P)产生和输出频率为 40 kHz 的 PWM 波,来控制驱动模块(L298)的 2 对逻辑输入通道,在实验过程中必须保持驱动电机模块的使能端为高电平。可调稳压电源(HSPY-200-02)为驱动模块提供放大电源,使两个输出端口产生与可调稳压电源电压幅值相同的 PWM 波,输入上下凹球面超声阵列,从而使超声阵列振动,产生驻波声场,实现颗粒悬浮。

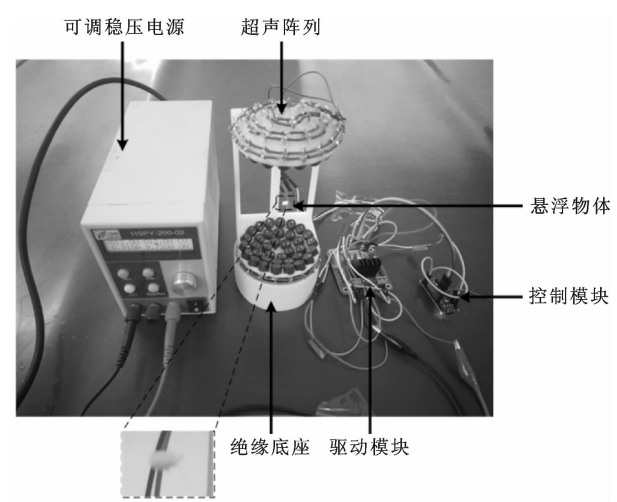


图 7 驻波悬浮实验平台

3.2 激励电压递增悬浮实验

为了研究激励电压递增的悬浮能力,选取多种密度和重力都不相同的样品,分别在声压最强的点

(阵列的 50 mm 处)进行测试。实验步骤为:首先,将可调稳压电源的电压调到 20 V,这是为了产生一个峰值为 20 V 的激励电压,输出给超声阵列形成声场;然后,将样品放入悬浮装置中进行悬浮,待悬浮稳定后,通过降低可调稳压电源的电压值,使声场的声悬浮力逐渐减弱,直到悬浮样品无法悬浮而掉落;最后,记录此时可调稳压电源上所显示的电压值。该电压值为声悬浮力支撑悬浮样品的最小电压值,此时的声悬浮力与悬浮样品的重力大致相等。接着,选择另一种样品,重复进行上述的实验步骤。通过大量重复性实验,得到多组可靠数据,分别选取 8、12、16 和 20 V 激励电压能悬浮的颗粒进行统计,同时计算悬浮颗粒的质量。图 8 给出了悬浮能力随激励电压变化的曲线,其中:激励电压为 8 V 时,悬浮颗粒是 EPS(发泡聚苯乙烯),直径为 2 mm,质量为 27.8 mg;激励电压为 12 V 时,悬浮颗粒为黑色 TPR(热塑性弹性体颗粒),质量为 36.2 mg;激励电压为 16 V 时,悬浮颗粒是植物油滴,质量为 48.2 mg;激励电压为 20 V 时,悬浮颗粒是液态水滴,质量为 65.4 mg。从图 8 中可以观察到,随着电压的增加,凹球面双发射极超声阵列的悬浮能力呈非线性增长变化。这是由于在结构上形成凹曲面后,超声波到达上下凹球面之后会反射回来,形成声能集聚反射点,从而使悬浮位置的声场声压增强,并且随着电压的增大,集聚反射点对凹球面阵列悬浮能力的非线性效果的影响会越来越明显。

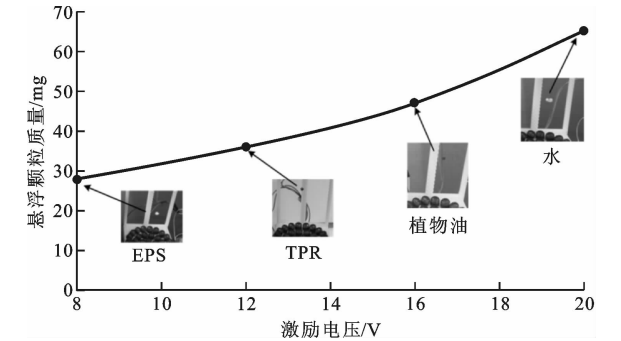


图 8 悬浮能力随激励电压变化的曲线

根据实验数据可知:凹球面双发射极超声阵列在 8 V 的悬浮能力相当于文献[12]中搭建的超声驻波声悬浮实验装置在 20 V 的悬浮能力。把每个激励电压的悬浮颗粒质量与激励电压为 8 V 时能悬浮的颗粒质量进行对比,得到悬浮能力增幅:激励电压为 12 V 时,悬浮能力增加 30.2%;激励电压为 16 V 时,悬浮能力增加 73.4%;激励电压为 20 V 时,悬浮能力增加 135.3%。

4 结 论

为了提高超声驻波的悬浮能力,本文设计了一种凹球面双发射极超声阵列。通过仿真软件优化设计,确定了凹球面双发射极超声阵列的最优半径值,并制作了阵列悬浮装置。通过仿真分析发现,激励电压增大,最大声压值也随之增加。然后,搭建了驻波悬浮实验平台,分别对不同激励电压下的悬浮能力进行实验,测量得到 8、12、16 和 20 V 的悬浮能力分别为 27.8、36.2、48.2 和 65.4 mg,并与传统的一维单轴超声驻波声悬浮装置的悬浮能力对比,得到激励电压为 12 V 时悬浮能力增加 30.2%,激励电压为 16 V 时悬浮能力增加 73.4%,激励电压为 20 V 时悬浮能力增加 135.3%,证明该装置具有很好的悬浮能力。实验结果表明,凹球面双发射极超声阵列装置能够有效地提高驻波的悬浮能力。

参考文献:

- [1] 李东明,崔爽,丛琳皓,等. 超声波轴承用挤压式压电换能器的共振频率 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(9): 2423-2430.
- LI Dongming, CUI Shuang, CONG Linhao, et al. Resonance frequency of squeeze piezoelectric transducer for ultrasonic bearings [J]. Opt Precision Eng, 2014, 22(9): 2423-2430.
- [2] JIAO X Y, LIU G J, LIU J F, et al. Research on levitation coupled with standing wave levitation and electromagnetic levitation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 59(12): 763-771.
- [3] FORESTI D, NABAVI M, KLINGAUF M, et al. Acoustophoretic contactless transport and handling of matter in air [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2013, 110(31): 12549-12554.
- [4] SEDDON A M, RICHARDSON S J, RASTOGI K, et al. Control of nanomaterial self-assembly in ultrasonically levitated droplets [J]. Journal of Physical Chemistry Letters, 2016, 7(7): 1341.
- [5] TRINH E, WANG T G. Large-amplitude free and driven drop-shape oscillations: experimental observations [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1982, 122:

315-338.

- [6] TIAN Y, HOIT R G, APFEL R E. A new method for measuring liquid surface tension with acoustic levitation [J]. Review of Scientific Instruments, 1995, 66(5): 3349-3354.
- [7] XIE W J, CAO C D, LU Y J, et al. Eutectic growth under acoustic levitation conditions [J]. Physical Review: E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2002, 66(6): 061601.
- [8] YAEIN A L, BRENN G, RENSINK D. Evaporation of acoustically levitated droplets of binary liquid mixtures [J]. International Journal of Heat & Fluid Flow, 2002, 23(4): 471-486.
- [9] STINDT A, ALBRICHT M, PANNE U, et al. CO₂ laser ionization of acoustically levitated droplets [J]. Analytical & Bioanalytical Chemistry, 2013, 405(22): 7005-7010.
- [10] SANTESSON S, JOHANSSON J, TAYLOR L S, et al. Airborne chemistry coupled to Raman spectroscopy [J]. Analytical Chemistry, 2003, 75(9): 2177-2180.
- [11] WHYMARK R R. Acoustic field positioning for containerless processing [J]. Ultrasonics, 1975, 13(6): 251-261.
- [12] 郭木铎. 超声驻波声悬浮能力及其稳定性仿真与实验 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 51-52.
- [13] HOSHI T, OSHIAI Y, REKIMOTO J. Three-dimensional noncontact manipulation by opposite ultrasonic phased arrays [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2014, 53(7S): 07KE07.
- [14] MARZO A, SEACH S A, DRINKWATER B W, et al. Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects [J]. Nature Communications, 2015, 6: 8661.
- [15] 林玲, 陈以, 周娟, 等. 基于超声驻波的径向悬浮移动系统研究 [J]. 压电与声光, 2016, 38(2): 345-348.
- LIN Ling, CHEN Yi, ZHOU Juan, et al. Research on radial suspension moving system based on ultrasonic standing wave [J]. Piezoelectric and Acousto-Optic, 2016, 38: 345-348.

(编辑 荆树蓉)