

低频低强度超声场中玻璃微管机械作用研究

王婷婷, 丁孝宇, 张淙悦, 傅舒娴, 郑政

(上海理工大学 健康科学与工程学院, 上海 200093)

摘要: 玻璃微管电极是迄今为止记录神经元微弱电信号最精密的工具, 目前已有许多学者将其应用在超声神经刺激研究领域, 但其适用性却还未得到检验。通过粒子冲击试验研究了玻璃微管尖端的液体流动, 发现频率为 500 kHz 的低强度超声脉冲能在其尖端激发出强烈的尖锐边缘声流, 且声流的影响范围达到数百微米; 并利用光学显微图像研究了超声引起的玻璃微管尖端的横向振动, 发现尖玻璃微管尖端产生的横向振动幅度也可达到微米量级。试验结果表明, 使用传统的玻璃微电极作为超声神经刺激的记录工具可能会对被研究的神经组织带来额外的机械刺激, 从而严重干扰超声刺激的试验结果。

关键词: 超声神经刺激; 玻璃微管; 尖锐边缘声流; 横向振动

中图分类号: R 331 **文献标志码:** A

Mechanical effect of glass micropipettes in low-frequency low-intensity ultrasonic field

WANG Tingting, DING Xiaoyu, ZHANG Congyue, FU Shuxian, ZHENG Zheng

(School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The glass microelectrode is the most precise tool for recording the weak electrical signals of neurons by far. At present, it has been widely used in the field of ultrasound neuronal stimulation research, but the applicability of glass microelectrodes has not been tested. The particle impacting experiment was used to study the liquid flow at the glass micropipette tips. It was found that low-intensity ultrasound pulse with a frequency of 500 kHz can evoke a strong sharp-edge acoustic streaming at the glass micropipette tips, and the influence range of acoustic streaming reaches hundreds of microns. The transverse vibration of the glass micropipette tips caused by the ultrasound was studied by optical microscope image, and it was found that the amplitude of the transverse vibration of the sharp glass micropipette tips can also reach the order of micrometers. The experimental results indicate that if the traditional glass microelectrodes are used as a recording tool for ultrasound neuronal stimulation, it may bring additional mechanical stimulation to the nerve tissue under study, which will seriously interfere with the experimental results of ultrasound stimulation.

收稿日期: 2022-01-04

第一作者: 王婷婷 (1996-), 女, 硕士研究生. 研究方向: 生物医学超声. E-mail: wtt912@163.com

通信作者: 郑政 (1961-), 男, 研究员. 研究方向: 生物医学超声与生物电子学. E-mail: zhengzhengnew@icloud.com

Keywords: *ultrasound neuronal stimulation; glass micropipette; sharp-edge acoustic streaming; transverse vibration*

2008 年, Tyler 等^[1]使用荧光染料首次在小鼠海马 CA1 神经元胞体中记录到了由低频低强度超声脉冲(频率 440 kHz, 声强 2.9 W/cm²)激发出来的 TTX 敏感钠离子通道开放以及突触钙离子内流的信号^[1]。由于超声波是一种机械波, 具有和电流完全不同的物理性质, 其神经刺激作用无法用已有的理论解释, 因此成为一个十分重要的科学问题。

研究神经系统离不开对其离子通道活动及其由此带来的微弱电信号的测量和记录, 但由于超声波的特殊性, 传统的神经电生理记录工具是否仍然适用也需要重新检验。用硼硅酸盐玻璃管加热拉制的玻璃微管电极或称为玻璃微电极无疑是迄今为止研究神经元微弱电信号的最通用和最精密的工具, 近些年来也确实有不少学者在超声刺激研究中使用玻璃微电极来记录神经电信号^[2-7]。在使用玻璃微管(简称微管)记录时, 研究者们通常默认其仅仅是作为一个被动的传感器而存在, 其本身并不会对神经组织产生额外的刺激。然而在超声刺激领域, 这个假设却从未得到检验。

在超声场中的一切物质都受到超声波的作用, 如果对支配物质运动的微分方程作一阶近似, 可以看到超声的声学作用, 但是, 如果考虑到其非线性成分, 则机械作用就得以显现。超声最显著的非线性作用是声辐射力和声流^[8-12], 在玻璃和水这样存在巨大声阻抗差异的固液界面上, 这两种非线性效应都会很明显。如果超声激发了玻璃微管的机械作用, 那么, 这种作用的强度和作用范围就必须得到充分的研究, 从而为评估这

一研究工具的适用性提供基本信息。

本文研究了在频率为 500 kHz 的低强度超声脉冲下两种典型的玻璃微管(尖微管和粗微管)尖端上产生的机械效应, 试验的初步结果显示: 声压在 54~400 kPa 之间的超声波在两种微管尖端均能激发出明显的喷射样声流, 影响范围可达几百微米; 并且在尖玻璃微管尖端还能观察到幅度达微米量级的机械振动。

1 试 验

1.1 记录槽和超声换能器

试验中使用的记录槽需要将定量的超声能量传递到观察区域。本文设计并用 3D 打印工艺制作了一个记录槽, 如图 1(a) 所示, 记录槽的左侧侧壁固定了一个带有耦合锥的聚焦超声换能器, 右侧侧壁前方用吸声材料遮住。记录槽下半部浇铸 0.4% 的琼脂糖, 琼脂糖的上表面和换能器轴线齐平, 剩下的空间注入去离子水(需没过耦合锥开口, 水位保持在比换能器轴线高 4~5 mm 的位置)。记录槽底部中央嵌有一个 20×10 mm² 的玻璃窗, 透射式显微镜的光源从这里入射, 穿过透明的传声媒质照亮被观察的玻璃微管尖端。由于琼脂糖中的含水量达 99.6%, 其声学特性和水的声学特性非常接近^[13], 所以, 琼脂糖对记录槽中的声场影响几乎可以忽略不记。当聚焦超声换能器工作时, 在媒质中传播的是一个近似的平面行波。

如图 1(b) 所示, 聚焦超声换能器由压电晶

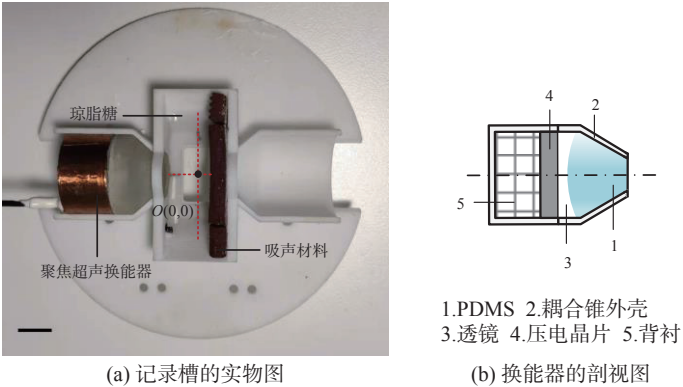


图 1 记录槽和聚焦换能器

Fig.1 Recording chamber and focus transducer

片、背衬和聚焦透镜组成。压电晶片是一个直径 20 mm、厚度 4 mm 的 PZT4 圆形振子，背衬使用 Epo-tek 301 树脂和钨粉按照一定比例混合而成^[14]，厚度为 10 mm。在匹配层前方用环氧树脂粘接一个 3D 打印制成的聚焦透镜，其中心厚度为 1/4 波长。耦合锥外壳也由 3D 打印制成，其内部灌注 PDMS(聚二甲基硅氧烷，Polydimethylsiloxane)，PDMS 固化后既用作超声传播媒质，也将耦合锥外壳和换能器前方的透镜粘接成一体。换能器制作完成后用水听器(型号 Onda HNR-0500)在一个消除了声反射的大水槽中进行声场测试。超声换能器由一个自制的正弦脉冲发生器驱动^[15]，该发生器的包络波形可在很大范围内调整。驱动电路的末级采用了高效小巧的 E 类功放^[16]，通过改变其电源电压，控制试验中玻璃微管尖端所在位置(图 1(a)中的 $O(0,0)$ 处，与换能器相距 10 mm)的超声峰值声压可在 54~400 kPa 间连续调节。声压标定也在声场测试过程中完成，换能器测试完成后与记录槽装配到一起。

1.2 玻璃微管

研究了 2 种玻璃微管，都用硼硅酸盐玻璃管(BF 120-69-10)在拉制仪 P-97(Sutter Instrument, Novato, USA)上拉制。一种按照 Sutter 推荐的胞内电极(尖微管)方案拉制，程序设定为 Heat=531, Pull=60, Velocity=80, Delay=70, Pressure=500。另一种按照膜片钳电极(粗微管)方案拉制，程序设定为 Heat=531, Pull=0, Velocity=20, Time=250, Pressure=500。其中：Heat 表示铂丝的电流值，此值由测试得到；Pull 为玻璃管软化之后引入的拉力；Velocity 为玻璃管第一次开始熔化时的分离速度；Time 为拉动玻璃时用于冷却铂丝和玻璃管的时间；Delay 表示另一种冷却模式，其冷却时间(300 ms)比 Time 模式(最长 127.5 ms)更长；Pressure 为冷却铂丝和玻璃管的压力。如图 2 所示，尖微管具有细长的颈部，锥度约 5°，其尖端直径在水

镜下难以分辨，可能在亚微米量级。粗微管颈部短粗，锥度约 20°，尖端直径 1~3 μm。试验时微管内充灌去离子水。

1.3 玻璃微管的机械效应观察

采用摄影法(摄像机型号 HT630BN，分辨率为 1536×1024)估计玻璃微管尖端的振动幅度，在对焦清楚的情况下，如果视频出现模糊必然是电极振动引起的。模糊尖端图像边缘之间的距离作为电极尖端振动的幅度。观察振动使用水浸式物镜，分辨能力约为 1 μm。

观察声流最常用的方法是粒子图像测速法(PIV)^[12,17-21]，该方法可以揭示一定范围内声流的全貌并进行流速分布的定量测量。但是，这一方法所要求的试验设备比较复杂，难以用于本试验所使用的特定的记录槽中。因此，设计了粒子冲击试验，虽然这个方法不能提供流速分布的定量数据，但却能直观地显示微流对电极尖端前方物质的冲击效果。

试验采用市售的沸石粉作为指示粒子观察声流。将 20 mg 沸石粉加入 3 mL 去离子水中，搅拌均匀并将其全部注入已浇筑琼脂糖的记录槽中。约 15 min 后沸石粉几乎完全沉积到琼脂糖表面形成一层薄的微粒层。将显微镜先对焦到粒子层表面，然后将物镜上调 50 μm，并使用微电极操纵器将微管尖端推进到显微镜焦面，使其尖端显示最清晰，此时电极尖端应在粒子层上方约 50 μm 处。如果有液流从微管尖端流向前方，就会干扰尖端下方的微粒并留下扰动痕迹。在记录槽上方盖上一片 1 mm 厚的载玻片，载玻片和记录槽中的水相接，用以消除由超声场边缘在水面上可能引起的涟漪。

观察微管机械效应时施加的超声脉冲宽度均为 500 ms。在观察声流时，需要在下一次施加超声脉冲前至少等待 1 min，以使受到干扰的粒子完全稳定。

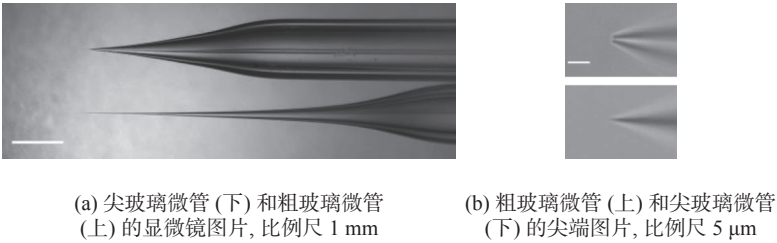
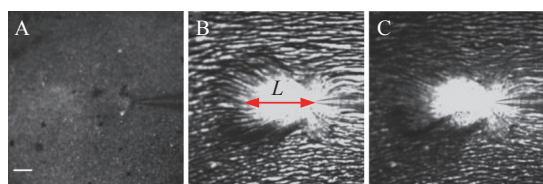


图2 玻璃微管的微观结构
Fig.2 Microstructure of glass micropipettes

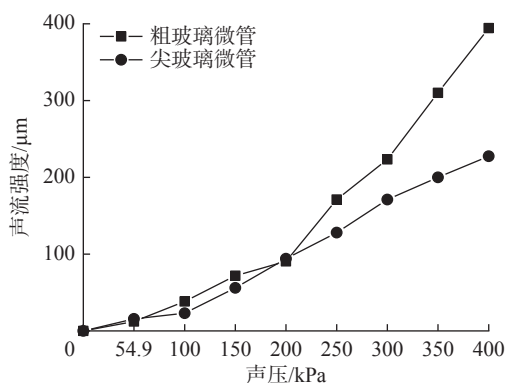
2 结果与讨论

2.1 玻璃微管尖端激发的声流

将显微镜聚焦到粒子层表面, 由于粒子层对光的阻挡, 未施加超声前视野里是基本均匀的暗色。用微操纵器将充灌好去离子水的微管尖端移到记录槽中央 (距离换能器 10 mm) 位置, 电极与超声换能器轴线垂直, 与液面成 35°。施加超声脉冲时玻璃微管尖端下方立刻出现一个亮度增加的区域, 并随着超声持续而扩大, 亮斑周边产生一圈灰度加深的区域, 并伴有黑色雾状物扩散。超声结束后黑色的雾状物迅速回落, 亮斑周边的黑圈减弱, 亮斑收缩变暗。图 3(a) 显示了 300 kPa 超声脉冲作用下粗玻璃电极尖端下方亮斑形成和回缩的过程。图 3(a) 中 A 图是未施加超声时的粗微管尖端和沸石粉, B 图是超声脉冲施加过程中的图像, C 图是超声结束后 100 ms 的图像。



(a) 粗玻璃电极尖端激发声流的过程



(b) 玻璃微管激发的声流强度与声压的关系

图 3 玻璃微管尖端激发的声流, 比例尺为 100 μm

Fig.3 Acoustic streaming excited at the glass micropipette tip, the scale bar is 100 μm

采用人工工作图法来估计玻璃微管尖端到尖端前方亮斑边缘之间的距离 L , 并以此表示电极激发的声流强度。将不同声压下尖玻璃微管和粗玻璃微管的距离 L 值进行统计并绘图, 如图 3(b) 所示。从图中能明显看出, 声流强度和声压强度成正相关。当声压小于等于 200 kPa 时尖玻璃微管和粗玻璃微管激发的声流强度没有明显区别。但声

压大于 200 kPa 后, 在相同声压下粗微管激发的声流强度明显大于尖微管, 而且声压越大, 差别也越大, 影响范围可达到数百微米左右。

由于沸石粉 (带有一定杂质) 是不透明的, 粒子层越厚, 摄像机像素越黑, 所以, 图像区域增亮或变暗必是微粒层减薄或增厚造成的。整个过程显示超声作用下有一个液流从微管尖端发出并快速作用到微粒层, 将其下方的微粒推向周边并堆积起来, 中间区域微粒减少从而形成亮斑, 周边粒子堆积形成黑圈, 粒子中最细小的粒子被液流带来的冲击力推离微粒层并漂浮在液体中形成了黑雾。此过程完全符合喷射状声流的特征, 看到的就像是俯瞰炸弹在地面爆炸, 亮斑及其周边黑圈像是弹坑, 亮斑边缘的放射状图像显示了液流的形状。无论是尖微管还是粗微管, 超声都会在其尖端激发出喷射样声流, 冲击其下方的沸石粉粒子。如果用亮斑宽度 L 表示声流强度, 将不同声压下的声流强度和声压的关系用曲线表示, 如图 3(b) 所示, 可以明显看到两者呈明显的正相关, 尖微管和粗微管尖端的声流对粒子层冲击的形式和过程基本一致, 但是, 声流强度有明显的区别。施加超声脉冲的过程中, 除微管尖端下方的亮斑以外还出现了微弱的鱼鳞状亮斑, 这种亮斑在整个显微镜视野中均匀存在, 且亮度与声压正相关。试验表明, 这种鱼鳞状亮斑即使无电极存在也会产生, 可能是超声辐射力直接作用于粒子层的结果。

近年来, 微流体领域的研究者们发现, 尖锐的结构在超声波作用下可以激发出强烈的声流, 称为尖锐边缘声流 (sharp-edge acoustic streaming)^[22-25]。结构越尖锐, 激发的声流流速越大, 最大可达到超声振动速度的数量级。以往的研究表明, 只要尖锐边缘的局部曲率小于或接近黏滞性界面厚度 δ , 尖端边缘便可以激发出声流。

$$\delta = \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}}$$

式中: ν 为溶液的运动黏度; ω 为角频率^[24, 26]。

玻璃微管在拉制时是被机械力强制拉开的, 在其尖端形成了垂直于其轴线的环形横截面。微管的外壁终止于环的外圆, 内壁终止于内圆。相交线处的局部曲率半径远小于尖端的外径, 形成锐度很小的锋利边缘。根据玻璃微管的电子显微镜照片^[27], 估计局部曲率半径可比外径小一个数量级。试验中使用的粗玻璃微管的尖端外径为

1~3 μm，尖玻璃微管外径小于 1 μm，因此，截面局部曲率半径可小至 0.1 μm 或更小。由于本文使用的超声频率为 500 kHz，计算得出 δ 值在 0.8 μm 左右，可以看出，尖端的锐度比这个值小得多，提示微管尖端下方粒子层的扰动是由其尖端激发的尖锐边缘声流引起的。

2.2 玻璃微管尖端振动

作者还在上述聚焦超声换能器所产生的声场中发现了尖玻璃微管尖端的横向振动。调整显微镜的焦距使电极尖端清晰成像，施加超声脉冲后电极尖端立刻变得模糊，超声停止后又恢复清

晰。很明显这种模糊是由于电极尖端的反复高速弯曲造成的。可以看到尖端模糊的区域基本上以电极轴线为中心，两侧对称，如图 4(a) 所示。取尖端模糊区两侧边缘间距作为其振动幅度(图 4(a) 黄色箭头表示的距离为振动幅度)，对 5 根以相同条件拉制的尖玻璃微管进行测量并取均值，发现在 54~400 kPa 声压范围内振动幅度和声压成正比，如图 5 所示，当声压为 54 kPa 时振动幅度约为 1 μm，400 kPa 时可高达约 6 μm。振动幅度和声压的关系可表示为 $A = 0.53 + 0.15P$ ，其中， A 为振动幅度， P 为超声声压。

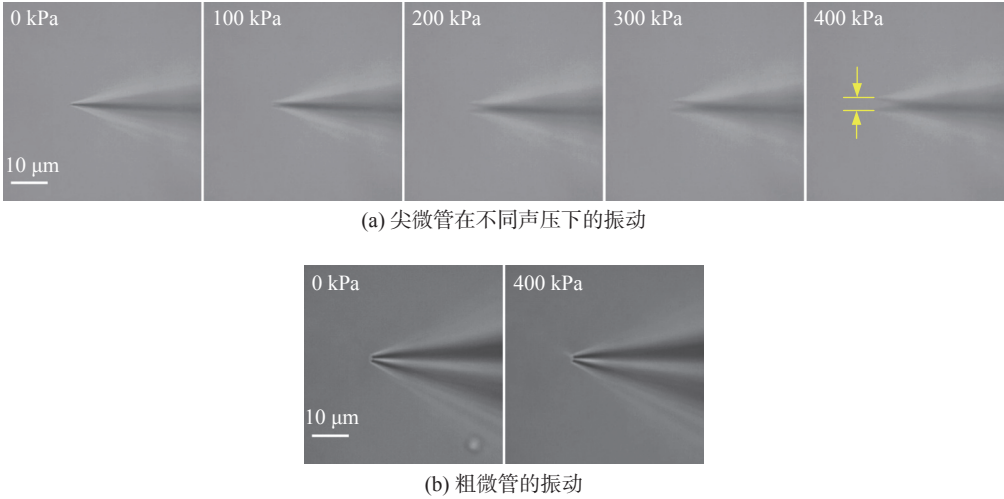


图 4 玻璃微管尖端的横向振动

Fig.4 Transverse vibration at the glass micropipette tips

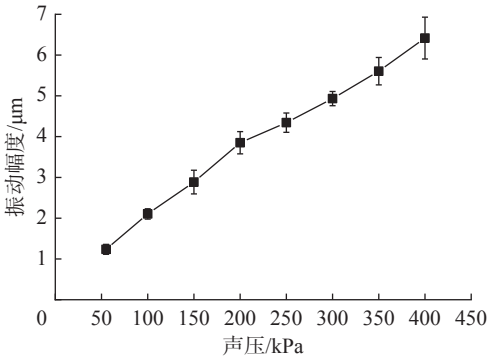


图 5 振动幅度与声压之间的关系

Fig.5 Relationship between vibration amplitude and acoustic pressure

在试验中，作用在微管上的声辐射力与电极相互垂直。玻璃微管的杆部通过电极支架固定，形成一个微型悬臂梁，微管尖端是悬臂梁的自由端，对横向作用力非常敏感。理论分析表明，悬臂梁可在连续分布的载荷作用下产生横向振动。

虽然可能同时存在多种振动模式，但自由端的振幅总是最大的^[28]。尖微管有一个细长的颈部，与粗微管相比更容易产生振动。

理论上，悬臂梁的振动幅值与受力成正比，因此，应该与声压呈平方律关系^[29]。然而，试验结果表明，尖玻璃电极的振动幅度与声压大致呈线性关系。这可能是由于液体中的黏性阻力造成的。当电极的振幅越大、振动速度越快时，电极受到的阻力越大，从而减小可能的振幅。与此相对的，在相同的试验条件下，粗玻璃微管的振动却难以观察到振动，如图 4(b) 所示，即使声压达到 400 kPa，微电极尖端的清晰度仍无明显变化，但这并不意味着它们是完全静止的，有可能是振动幅度过小而无法使用现有的观察设备观察到。

3 结 论

研究表明，低频低强度超声可以在玻璃微管

尖端激发出强烈的声流,这种声流的作用范围随声压增加而增加,在声压为400 kPa的条件下,尖微管激发的声流作用范围可达200 μm ,而粗微管的作用范围可高达400 μm 。即使在54 kPa这样的极小声压下,声流范围也在15 μm 左右。另外,微管振动试验还在尖微管的尖端发现了微米数量级的横向振动。

在神经电生理试验中,电极尖端需要精密接触细胞膜才能精确记录细胞电信号,尖电极更是可能刺穿细胞进行胞内记录。神经细胞的直径通常在10~40 μm ,电极尖端微米级的机械扰动都有可能使试验得不到稳定的记录。更加重要的是强烈的声流和振动有可能给被研究的神经组织带来额外的机械刺激,严重干扰超声刺激的试验结果。

本文仅在500 kHz这个频率点上观察了超声波在玻璃微管尖端引起的机械作用,就低强超声刺激的研究来说,其涉及的频率范围远不止于此,在MHz级甚至10 MHz级的频率范围里超声引起的机械作用仍然未知。研究表明,无论超声刺激研究所用的超声频率、强度为多大,如果拟使用玻璃微电极作为记录工具,那么,事先研究超声在其尖端引起的机械作用,评估这种机械作用对神经的刺激将是试验可靠性的先决条件。

参考文献:

- [1] TYLER W J, TUFAL Y, FINSTERWALD M, et al. Remote excitation of neuronal circuits using low-intensity, low-frequency ultrasound[J]. *PLoS One*, 2008, 3(10): e3511.
- [2] KUBANEK J, SHI J Y, MARSH J, et al. Ultrasound modulates ion channel currents[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 24170.
- [3] ASAN A S, KANG Q, ORALKAN Ö, et al. Entrainment of cerebellar Purkinje cell spiking activity using pulsed ultrasound stimulation[J]. *Brain Stimulation*, 2021, 14(3): 598–606.
- [4] DEDOLA F, SEVERINO F P U, MENEGHETTI N, et al. Ultrasound stimulations induce prolonged depolarization and fast action potentials in leech neurons[J]. *IEEE Open Journal of Engineering in Medicine and Biology*, 2020, 1: 23–32.
- [5] LIN Z R, ZHOU W, HUANG X W, et al. On-chip ultrasound modulation of pyramidal neuronal activity in hippocampal slices[J]. *Advanced Biosystems*, 2018, 2(8): 1800041.
- [6] PRIETO M L, FIROUZI K, KHURI-YAKUB B T, et al. Activation of Piezo1 but not NaV1.2 channels by ultrasound at 43 MHz[J]. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 2018, 44(6): 1217–1232.
- [7] PRIETO M L, FIROUZI K, KHURI-YAKUB B T, et al. Spike frequency-dependent inhibition and excitation of neural activity by high-frequency ultrasound[J]. *Journal of General Physiology*, 2020, 152(11): e202012672.
- [8] BRUUS H. Acoustofluidics 7: The acoustic radiation force on small particles[J]. *Lab on A Chip*, 2012, 12(6): 1014–1021.
- [9] CHU B T, APFEL R E. Acoustic radiation pressure produced by a beam of sound[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1982, 72(6): 1673–1687.
- [10] LIGHTHILL S J. Acoustic streaming[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1978, 61(3): 391–418.
- [11] RUDENKO O V, SARVAZYAN A P, EMELIANOV S Y. Acoustic radiation force and streaming induced by focused nonlinear ultrasound in a dissipative medium[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1996, 99(5): 2791–2798.
- [12] WU J R. Acoustic streaming and its applications[J]. *Fluids*, 2018, 3(4): 108.
- [13] BROWNE J E, RAMNARINE K V, WATSON A J, et al. Assessment of the acoustic properties of common tissue-mimicking test phantoms[J]. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 2003, 29(7): 1053–1060.
- [14] NGUYEN N T, LETHIECQ M, KARLSSON B, et al. Highly attenuative rubber modified epoxy for ultrasonic transducer backing applications[J]. *Ultrasonics*, 1996, 34(6): 669–675.
- [15] 丁孝宇,王婷婷,陆心怡,等.一种用于神经刺激研究的触屏控制小型超声发生器[J]. *中国医学物理学杂志*, 2021, 38(6): 764–769.
- [16] SOKAL N O, RAAB F H. Harmonic output of class-E RF power amplifiers and load coupling network design[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1977, 12(1): 86–88.
- [17] ADRIAN R J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1991, 23: 261–304.
- [18] KINNARD M A, MACLEAN P D. A platinum micro-electrode for intracerebral exploration with a chronically fixed stereotaxic device[J]. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1967, 22(2): 183–186.
- [19] MOUDJED B, BOTTON V, HENRY D, et al. Scaling and dimensional analysis of acoustic streaming jets[J]. *Physics of Fluids*, 2014, 26(9): 093602.

combined with acoustic field on fine particles removal[J].

Powder Technology, 2018, 340: 8–16.

- [8] ZHANG G X, ZHANG L L, WANG J, et al. Improving acoustic agglomeration efficiency by addition of sprayed liquid droplets[J]. *Powder Technology*, 2017, 317: 181–188.
- [9] YAN J P, CHEN L Q, LI Z. Removal of fine particles from coal combustion in the combined effect of acoustic agglomeration and seed droplets with wetting agent[J]. *Fuel*, 2016, 165: 316–323.
- [10] 屈广宁, 凡凤仙, 张斯宏, 等. 驻波声场中单分散细颗粒的相互作用特性 [J]. *物理学报*, 2020, 69(6): 064704.
- [11] ZHANG G X, LIU J Z, WANG J, et al. Numerical simulation of acoustic wake effect in acoustic agglomeration under Oseen flow condition[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(19): 2404–2412.
- [12] SONG L M. Modeling of acoustic agglomeration of fine aerosol particles[D]. State College: Pennsylvania State University, 1990.
- [13] SGROTT O L, SOMMERFELD M. Influence of inter-

particle collisions and agglomeration on cyclone performance and collection efficiency[J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2019, 97(2): 511–522.

- [14] CROWE C T, SCHWARZKOPF J D, SOMMERFELD M, et al. Multiphase flows with droplets and particles[M]. 2nd ed. New York: CRC Press, 2011.
- [15] MARSHALL J S, LI S Q. Adhesive particle flow: a discrete-element approach[M]. New York: Cambridge University Press, 2014.
- [16] SHENG C D, SHEN X L. Modelling of acoustic agglomeration processes using the direct simulation Monte Carlo method[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2006, 37(1): 16–36.
- [17] 蒋瑜, 贾楠, 苏明旭. 基于改进差分进化算法的超声衰减谱反演计算 [J]. *上海理工大学学报*, 2020, 42(4): 333–338.
- [18] 凡凤仙, 张斯宏, 白鹏博, 等. 基于声凝并的 PM_{2.5} 脱除技术研究进展 (II): 声凝并与其他机制联合作用 [J]. *能源研究与信息*, 2017, 33(4): 205–210.

(编辑: 石 瑛)

[上接第 49 页]

- [20] NOWICKI A, KOWALEWSKI T, SECOMSKI W, et al. Estimation of acoustical streaming: theoretical model, Doppler measurements and optical visualisation[J]. *European Journal of Ultrasound*, 1998, 7(1): 73–81.
- [21] ZHANG C Y, GUO X F, ROYON L, et al. Unveiling of the mechanisms of acoustic streaming induced by sharp edges[J]. *Physical Review E*, 2020, 102(4): 043110.
- [22] HUANG P H, XIE Y L, AHMED D, et al. An acoustofluidic micromixer based on oscillating sidewall sharp-edges[J]. *Lab on A Chip*, 2013, 13(19): 3847–3852.
- [23] NAMA N, HUANG P H, HUANG T J, et al. Investigation of acoustic streaming patterns around oscillating sharp edges[J]. *Lab on A Chip*, 2014, 14(15): 2824–2836.
- [24] OVCHINNIKOV M, ZHOU J B, YALAMANCHILI S. Acoustic streaming of a sharp edge[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2014, 136(1): 22–29.
- [25] ZHANG C Y, GUO X F, ROYON L, et al. Acoustic streaming generated by sharp edges: the coupled

influences of liquid viscosity and acoustic frequency[J]. *Micromachines*, 2020, 11(6): 607.

- [26] ZHANG C Y, GUO X F, BRUNET P, et al. Acoustic streaming near a sharp structure and its mixing performance characterization[J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2019, 23(9): 1–15.
- [27] MALBOUBI M, GU Y C, JIANG K. Surface properties of glass micropipettes and their effect on biological studies[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2011, 6(1): 401.
- [28] GRITSENKO D, XU J, PAOLI R. Transverse vibrations of cantilever beams: analytical solutions with general steady-state forcing[J]. *Applications in Engineering Science*, 2020, 3: 100017.
- [29] WESTERVELT P J. Scattering of sound by sound[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1957, 29(2): 199–203.

(编辑: 石 瑛)