

◇ 汪承灏院士八十生辰学术论文 ◇

超声波空气污染物颗粒采样器的新结构及其特性*

苏松飞 刘鹏展 胡俊辉[†]

(南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室 南京 210016)

摘要 超声波空气污染物颗粒采样器具有可采集低浓度颗粒污染物、采样速度快、重复性好、结构简单、易分析被采集物以及不破坏污染物成分等优点。为了进一步提高其采样效率,该文提出了一种超声波空气污染物颗粒采样器的新结构。该采样器由超声换能器、被粘接在换能器声辐射面上的圆形声辐射板以及与声辐射板平行的采样板组成。该采样器利用声辐射力和声学流场驱动空气中的污染物颗粒快速聚集到采样板上。样机测试表明,该结构在空气污染物颗粒初始浓度为 4 mg/L 以及辐射板中心位置的振动速度为 0.29 m/s 时,对烟雾中 PM_{2.5} 和 PM_{2.5-10} 颗粒的采样效率为 16.3 mg/m²·min·W。与不采用高阶弯曲振动圆形声辐射板的结构相比,其采样效率增加了 110%。

关键词 超声波, 采样器, 污染物颗粒, 声辐射力

中图法分类号: TB559

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2018)01-0114-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2018.01.017

New structure of the ultrasonic air pollutant particle sampler and its characteristics

SU Songfei LIU Pengzhan HU Junhui

(State Key Lab of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract Ultrasonic sampler for aerial pollution particles (USAPP) has the merits such as being capable of sampling low-concentration particulate pollutants, high sampling speed, good repeatability, simple structure, easiness to analyze the samples and little damage to the sampled particles. In this work, we propose a new structure to enhance its sampling efficiency. The sampler consists of an ultrasonic transducer, a circular radiation plate attached at the center of the radiation face of the ultrasonic transducer, and a circular sampling plate paralleled to the radiation plate. Aerial pollution particles are driven onto the sampling plate efficiently by the acoustic radiation force and acoustic streaming. Our experiments show that the ultrasonic sampler has a sampling capability of 16.3 mg/m²·min·W for PM_{2.5} and PM_{2.5-10} when the initial smog concentration is 4 mg/L, and the vibration velocity at the center of radiation plate is 0.29 m/s. Its sampling capability is 110% higher than that the sampler which does not use the circular radiation plate.

Key words Ultrasound, Sampler, Pollutant particles, Acoustic radiation force

2017-10-23 收稿; 2017-12-18 定稿

*国家重点基础研究发展计划项目(973 计划, 2015CB057501), 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYLX16_0331), 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX17_0237), 中央高校基本科研业务费专项资金资助

作者简介: 胡俊辉(1965-), 男, 浙江宁波人, 长江学者特聘教授, 研究方向: 超声工程。

[†]通讯作者 E-mail: ejhhu@nuaa.edu.cn

1 引言

近年来随着工业的发展,空气污染问题日益突出,已严重危害到人类身体健康^[1-2]。空气污染物的采样是空气环境检测与分析中的一项重要技术。空气中污染物包括气体污染物和颗粒污染物,目前国内外对于空气中污染物颗粒的采样方法主要有自然积聚法、撞击法和静电法等,这些方法有着各自的特点^[3]。

近年来有学者提出利用超声场来采集捕捉空气中的微细颗粒的方法^[4-5]。与传统的方法相比,这种方法同时具有可采集低浓度颗粒污染物、采样速度快、重复性好、结构简单、易分析被采集物以及不破坏污染物成分等优点。本文提出一种新型的超声波空气污染物颗粒采样器,该采样器采用了做高阶弯曲振动的圆形声辐射板激励超声场,以有效提高采样效率。

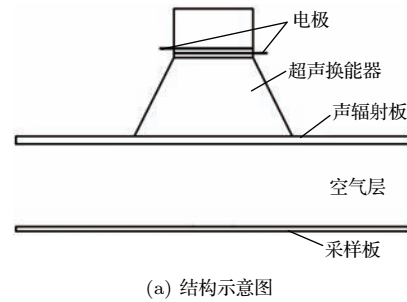
2 结构及实验装置

如图1(a)所示,超声波空气污染物颗粒采样器由兰杰文夹心式超声换能器、圆形声辐射板和采样板(同时用做反射板)构成。圆形声辐射板被粘接在超声换能器的声辐射面上,并和采样板相平行。超声换能器在圆形声辐射板中激励出高阶弯曲振动模式,圆形声辐射板中的高阶弯曲振动在采样板和圆形声辐射板之间激励出共振驻波超声场,利用该超声场驱动空气中的污染物颗粒快速聚集到采样板上。图1(b)为超声波空气污染物颗粒采样器实物图。

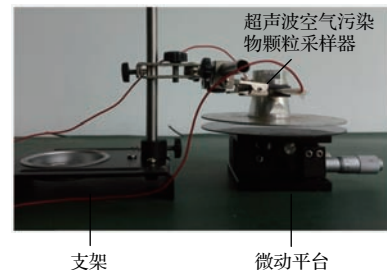
文中所使用的兰杰文夹心式超声换能器是一种广泛使用的声学元器件(HNC-4AH-2560,苏州海纳),具有工作稳定、工作频率多样、能量转化率高和价格便宜等优点^[6]。圆形声辐射板为1 mm厚度硬质铝板。反射板为0.5 mm厚的PVC板,PVC板直径与换能器声辐射板的直径相同,都为100 mm。PVC板表面光亮,方便观察颗粒物聚集。

实验中为便于计算超声空气污染物颗粒采样器的性能,搭建如图2所示实验平台。如图2所示,将采样器置于一个250 mm × 250 mm × 200 mm的有机玻璃罩内。实验过程中,在有机玻璃罩里加入一定浓度烟雾。超声换能器电源线连接至驱动系统,驱动系统包括信号发生器1台、示波器1台、功

率放大器1台和电流传感器1台。信号发生器可发出不同频率的正弦驱动信号,功率放大器接收驱动信号,输出电压驱动超声换能器工作,示波器用于实验中监测超声换能器工作的电压、电流及其相位差,通过电压电流相位差判断超声换能器工作状态是否为共振状态。使用一维微动平台调节声辐射板和采样板之间的声场厚度。



(a) 结构示意图



(b) 实物照片

图1 超声波空气污染物颗粒采样器

Fig. 1 Ultrasonic air pollutant particle sampler

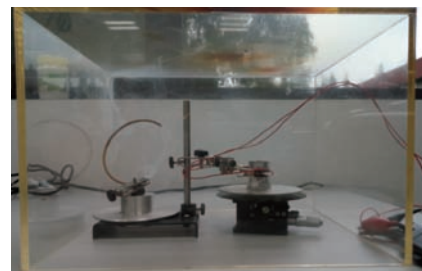


图2 实验平台

Fig. 2 Testing chamber

3 实验方法及数据分析

3.1 实验方法

在实验中用檀香阴燃时所产生的烟雾作为样品气体,每次点燃的檀香质量为1.5 g,产生污染物颗粒50 mg左右^[7]。烟雾中主要物质有:还原糖、烟碱(尼古丁)、淀粉、氨基酸、多酚和蛋白质,除此之外,烟雾中还含有铁氧化物、镁氧化物和钙氧化

物等固体小颗粒^[8],这些物质的混合物形成油性颗粒,粒径大致分布在 $0.5 \sim 10 \mu\text{m}$ 之间^[9]。采样板采集的颗粒物用电子分析天平(ME204E, METTLER TOLEDO)称重。实验中,换能器在共振状态工作,分别调整超声换能器驱动电压、采样板与声辐射板间距离和采样时间等参数,测量被采集样品的质量。

3.2 实验数据分析

图3是观察到的采样板采集的污染物颗粒的效果图,图4为光学显微镜下被采样板采集到的污染物颗粒的聚集情况。通过实验,我们发现以下几个参数会影响污染物颗粒的采样:声场厚度 L ;声处理时间 t ;工作电压 V_{p-p} (换能器在共振状态)。



图3 采样板采集烟雾颗粒的效果图

Fig. 3 Particle collected onto the sampling plate

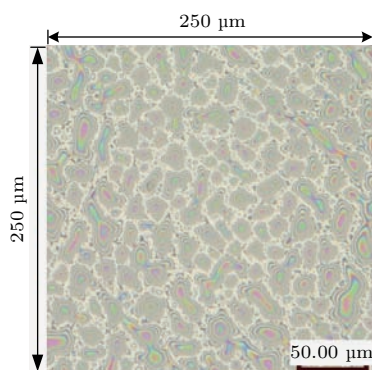


图4 被采集的烟雾微颗粒放大图

Fig. 4 Magnified image of collected particle on the sampling plate

图5示出的是固定工作电压 $V_{p-p} = 40 \text{ V}$ 时,采集到的污染物微颗粒质量随声场厚度的变化规律。可以看出,采样效果在声场厚度为 $2.5 \text{ mm} \sim 13 \text{ mm}$ 时较为明显,且被采样污染物颗粒的质量随声场厚度 L 的变化出现多个峰值。在 $L = 2.78 \text{ mm}$, $L = 5.59 \text{ mm}$, $L = 8.34 \text{ mm}$ 时,采集到的污染

物颗粒的质量要比其他声场厚度时采集到的污染物颗粒质量要大。在 $L = 5.59 \text{ mm}$ 时采集到的污染物颗粒质量最大。通过波长的计算公式 $\lambda = c/f$ ($c = 343 \text{ m/s}$ 为声音在空气层中传播速度, $f = 61.7 \text{ kHz}$ 为辐射板振动频率),可知声场波长 $\lambda = 5.56 \text{ mm}$ 。因此 $L = 2.78 \text{ mm}$, $L = 5.59 \text{ mm}$, $L = 8.34 \text{ mm}$ 约分别等于 $\lambda/2$, λ , $3\lambda/2$ 。另外我们还发现,在声场厚度 L 一定的情况下,该采样器的工作时间越长,采集到的污染物微颗粒的质量也越多。当共振状态的换能器的驱动电压 $V_{p-p} = 40 \text{ V}$,声场厚度 $L = 5.59 \text{ mm}$,工作时间 $t = 5 \text{ min}$ 时,采样效率(被定义为单位时间单位面积单位功率下被采集污染物颗粒的质量)为 $16.3 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{min} \cdot \text{W}$ 。直接用换能器声辐射面对声场进行励振时,采样效率为 $7.8 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{min} \cdot \text{W}$ ^[9],因此采用高阶弯曲振动声辐射板可将采样效率提高110%。

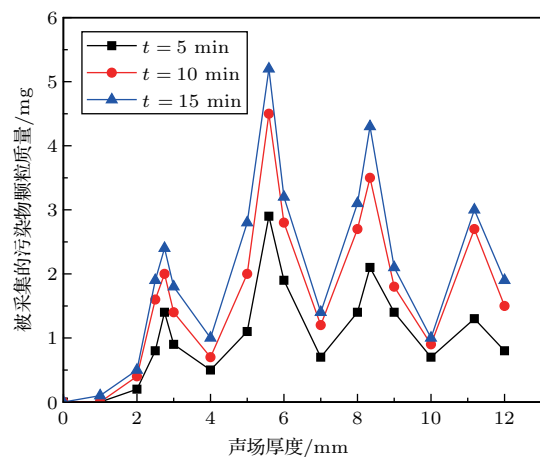


图5 实测的被采集的污染物颗粒质量随声场厚度的变化规律

Fig. 5 Measured collected particle mass versus the air gap thickness for a constant driven voltage and different working time

图6示出的是在固定的工作电压 $V_{p-p} = 40 \text{ V}$ 时,采集到的污染物颗粒的质量随工作时间的变化规律。可以看出,采样板采集到的污染物颗粒质量随着工作时间的增加先快速增加,然后缓慢增加,特别是在 $0 \sim 15 \text{ min}$ 内,质量增加速度较快。在时间为 15 min 时,不同声场厚度采样板采集到的污染物颗粒的质量接近峰值。这是由于随着工作时间的变化,测试箱体中直径较大的污染物颗粒会自然沉降,污染物颗粒的浓度会降低。在三个不同声场厚度中, $L = 5.59 \text{ mm}$ ($= \lambda$)处采集到的污染物颗粒的质量

最大, $L = 8.34 \text{ mm}$ ($= 1.5\lambda$) 处次之, $L = 2.78 \text{ mm}$ ($= 0.5\lambda$) 处最少。

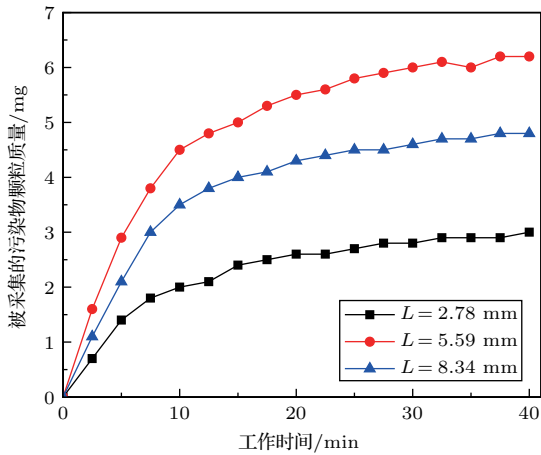


图6 实测的被采集的污染物颗粒质量随工作时间的变化规律

Fig. 6 Measured collected particle mass versus working time for a constant driven voltage and different air gap thickness

图7示出的是在固定的工作时间 $t = 10 \text{ min}$ 时, 采集到的污染物颗粒的质量随工作电压(共振状态)的变化规律。可以看出, 采样板采集到的污染物颗粒的质量随着工作电压的增大而增大, 并且在三个不同的声场厚度中, $L = 5.59 \text{ mm}$ 处采集到的烟雾微颗粒质量最大, $L = 8.34 \text{ mm}$ 处次之, $L = 2.78 \text{ mm}$ 处最少。实验中, 施加驱动电压最大值为 $V_{p-p} = 80 \text{ V}$ 。

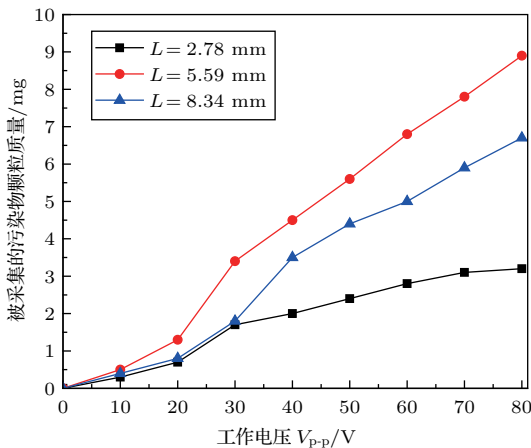


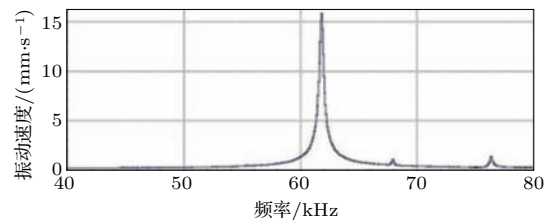
图7 实测的被采集的污染物颗粒质量随工作电压的变化规律

Fig. 7 Measured collected particle mass versus driven voltage for a constant working time and different air gap thickness

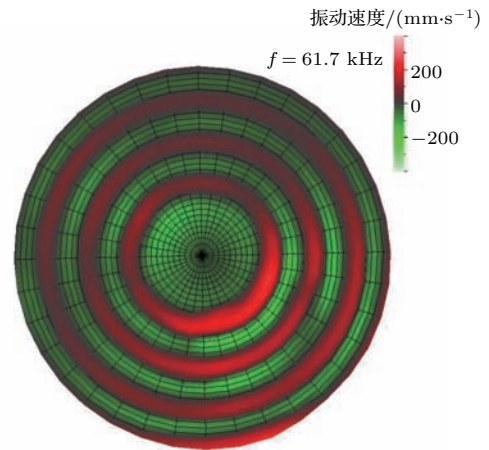
对本装置的采样性能与自然积集法的采样性能进行了比较。实验中, 测试箱体内颗粒污染物浓度均为 4 mg/L , 采样时间均为 10 min 。自然积集法中采样板上污染物颗粒质量为 0.2 mg ; 本方法中 (电压 $V_{p-p} = 40 \text{ V}$, $L = 5.59 \text{ mm}$), 采样板上污染物颗粒质量为 5.2 mg 。超声空气污染物颗粒采样器的采样速度是自然积集法的26倍。

4 原理分析

利用多普勒激光测振仪 (PSV-300F POLYTEC) 对超声波空气污染物颗粒采样器的声辐射板的振动特性进行了测量。图8(a)示出的是换能器的频率特性, 从该图可以得出系统的共振频率为 61.7 kHz 。图8(b)示出的是声辐射板在 61.7 kHz 的振动模式, 从该图可以看出声辐射板有7个振动节圆。



(a) 换能器的频率特性



(b) 声辐射板在61.7 kHz的振动模式

图8 超声波空气污染物颗粒采样器的振动特性测试结果

Fig. 8 Measured vibration characteristics of the ultrasonic sampler

为了研究该采样器采集空气污染物颗粒的机理, 利用有限元软件 COMSOL Multiphysics 4.3 对实验条件下的超声场进行了仿真计算^[10-11]。由于

超声空气污染物颗粒采样器的结构是轴对称的,在仿真中将器件模型简化为二维轴对称模型,如图9所示。计算中,设定换能器辐射面(声辐射板中心位置)以实测的振幅(7.6×10^{-7} m)进行振动,工作频率 f 为 61.7 kHz,空气声场的厚度 L 为 5.59 mm,模型下表面为 PVC 采样板以硬声场边界处理,采用自由三角形网格对计算域进行剖分,其中,空气层部分的最大单元尺寸为 0.129 mm (约等于 61.7 kHz 下空气声场波长的 2.32%),其余部分的最大单元尺寸为 3.35 mm,网格剖分如图 9 所示。COMSOL 有限元计算所用到的空气参数如表 1 所示。

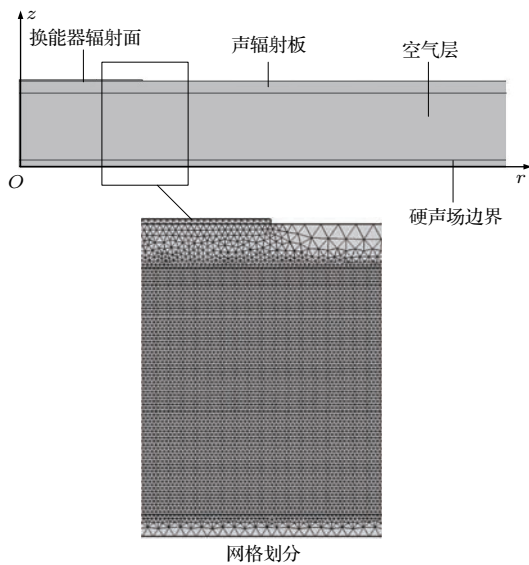


图9 COMSOL 有限元模型

Fig. 9 A finite element model for calculating the ultrasonic field in the air gap

表1 COMSOL 有限元计算所用到的空气参数表

Table 1 Property parameters of air

变量	数值
动粘度系数	1.812×10^{-5} kg/(m·s)
比热比	1.4
常温比热容	1005.6 J/(kg·K)
密度	1.204 kg/m ³
热导率	2.573×10^{-2} kg·m/(s ³ ·K)
声速	343.2 m/s
体积黏性系数	5.436×10^{-6} kg/(m·s)

利用声-固耦合模块求解声辐射板的振动分布与空气声场,其声辐射板的振动分布计算结果如图 10 所示。从该图可以看出,声辐射板工作模式为高阶弯振,与测振结果相吻合。空气声场的声压分布计算结果如图 11 所示。根据有限元计算及文

献 [9] 中的计算,超声换能器辐射面中心点振动速度相同时,高阶弯曲振动辐射板可将空气层中的最大声压值提高约 30%。这一计算结果可解释采用高阶弯曲振动辐射板可有效提高采样效率这一现象。

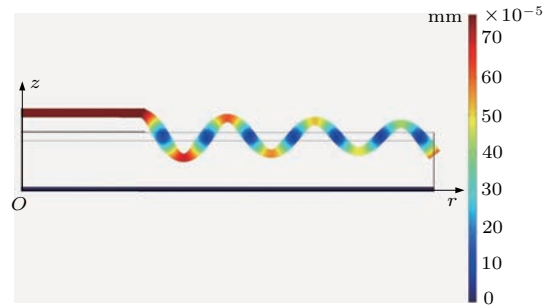


图 10 声辐射板在其径向的振动分布

Fig. 10 Calculated vibration distribution of the acoustic radiation plate

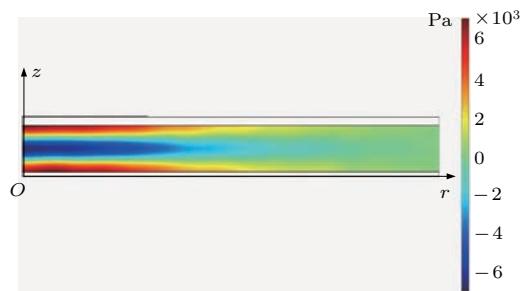


图 11 空气声场的声压分布

Fig. 11 Calculated sound pressure distribution in the air gap

根据 Gor'kov 理论 [12-14],对于声场中半径为 R 的球状微颗粒,当声场的波数 k 和 R 满足 $kR \ll 1$ 时,粒子在声场中受到的声辐射力为

$$\mathbf{F} = -\nabla P, \tag{1}$$

$$P = V[-D\langle K \rangle + (1 - \gamma)\langle U \rangle], \tag{2}$$

$$K = \frac{\rho_f v^2}{2}, \tag{3}$$

$$U = \frac{p^2}{2\rho_f c_f^2}, \tag{4}$$

$$D = \frac{3(\rho_s - \rho_f)}{2\rho_s + \rho_f}, \tag{5}$$

$$\gamma = \frac{\rho_f c_f^2}{\rho_s c_s^2}, \tag{6}$$

其中, P 定义为声场势, K 为该声场中的动能密度, U 为该声场中的势能密度, V ($= 4/3 \cdot \pi \cdot R^3$) 是微颗粒的体积, p 表示该声场中的声压大小, v 表示该

声场介质的振动速度， ρ_s 、 c_s 分别表示小球的密度和声音在小球内传播的速度， ρ_f 、 c_f 分别表示介质的密度和声音在介质内传播的速度。声场中微颗粒聚集的位置在声压节点或者是声压反节点上，具体的位置由公式(3)、公式(4)中的 D 与 γ 的关系决定：当 $D + 1 - \gamma > 0$ 时，微颗粒会被聚集到声压的节点处，反之， $D + 1 - \gamma < 0$ 时，微颗粒会被聚集到声压反节点处。实验中污染物颗粒粒径大部分小于 $10 \mu\text{m}$ ，声场的波长 $\lambda = 343.2/61.7 = 5.56 \text{ mm}$ ，波数 $k = 1/\lambda$ ， $kR \ll 1$ ，所以计算声辐射力时可以使用上述公式(1)~(6)。通过计算可知， $D \approx 1.5$ ， $\gamma \approx 0$ ，所以 $D + 1 - \gamma \approx 2.5 > 0$ ，所以微颗粒会被聚集到声压的节点位置。

图12(a) 示出的是在不同声场厚度下 $r-z$ 平面中声压的分布，可以看出空气层声压场中分布着很多声压的节平面。在声辐射力的作用下，污染物颗粒会不断地聚集到这些声压节平面上，在这些聚集位置，原先的微小颗粒会慢慢形成大的颗粒并在重力的作用下沉降到采样板的表面，同时声学微涡流场^[9] 使污染物颗粒形成图12(b) 中环状聚集物。

在理论计算模型中，声辐射板与采样板之间声场高度是均匀的，因此得到的声场是周向均匀的。但在图12(b) 的实验结果中却显示出有一些不均匀的聚集物斑块，猜测其原因可能是颗粒初始分布不

均匀或者实际声场具有一定的不对称性。而引起实际声场不对称性的可能原因有以下两点：声辐射板振动的不均匀性和声辐射板与采样板不平行。本工作设计了受控实验对这些可能原因进行排除或确认。

为了排除或确认颗粒初始浓度分布不均匀性的影响，我们进行了一组对比实验。在实验中，烟源分别在长方体测试箱中同一高度的相邻的两个角落，其他的实验条件完全一致，实验结果如图13所示。观察并比较两个实验中颗粒聚集物的分布图案，发现颗粒聚集物的分布图案基本一致。考虑到这两个实验中污染物颗粒浓度在空间分布不同，因此我们排除了颗粒初始浓度分布不均匀性的影响。

由于换能器和声辐射板之间的粘接是手工进行的，不可避免地存在着粘接层厚度的不均匀，这会导致声辐射板振动的不均匀性。图8(b) 示出的是实测的声辐射板振动模态，可以看到其右下角的振动确实比其他区域要强一些，这证明了我们的一个猜测。

对于声辐射板与采样板不平行导致声场厚度方向不均匀的影响，我们进行了另一组对比实验。实验中，将声辐射板和采样板之间的夹角分别设置为 5° 和 0° ，其他的实验条件完全相同。图14 示出的是对比实验中颗粒聚集物的分布图案。通过比较，

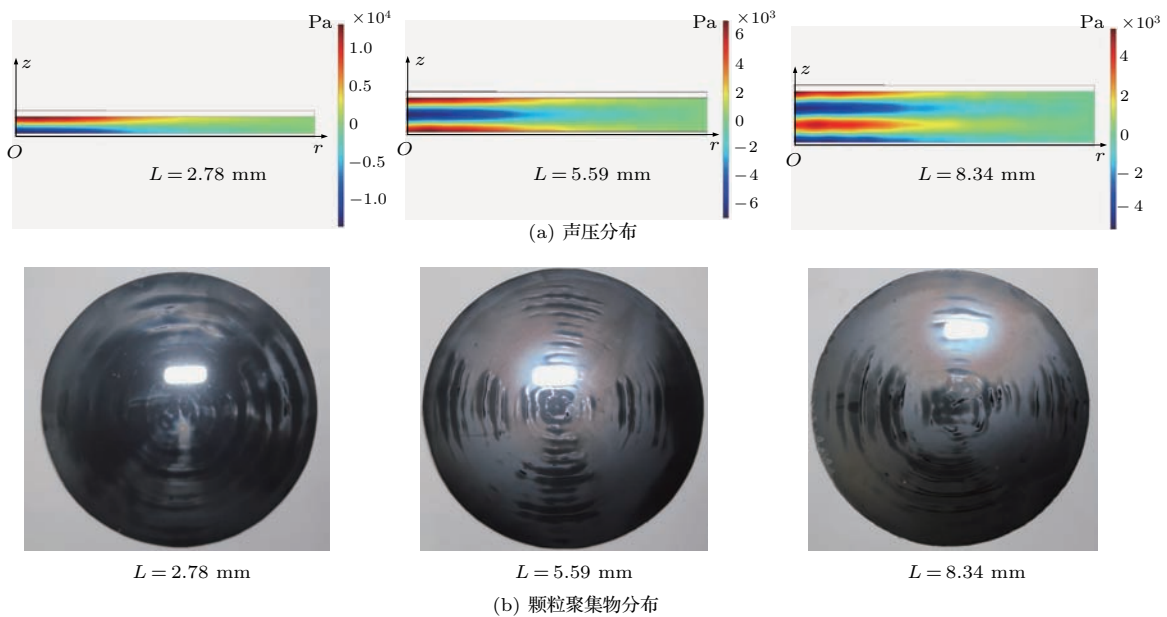
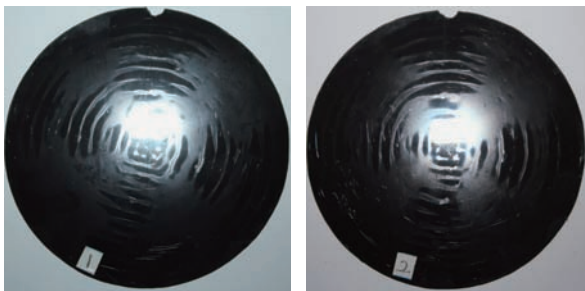


图12 空气声场中的声压分布及采样板上的颗粒聚集物分布

Fig. 12 Sound pressure distribution in the air gap and pollutant particle concentrations on the surface of the sampling plate at different air gap thicknesses

可以确认声场厚度方向的不均匀性会引起颗粒聚集物分布图案的不对称。由于在实验中很难调节声辐射板和采样板到完全平行的位置,因此声场厚度方向的不均匀性是颗粒聚集物分布不均匀的另一个原因。

综上所述,声辐射板振动的不均匀性以及声辐射板与采样板之间声场厚度方向的不均匀性导致了实验中采样板表面的颗粒聚集物的分布不均匀性。

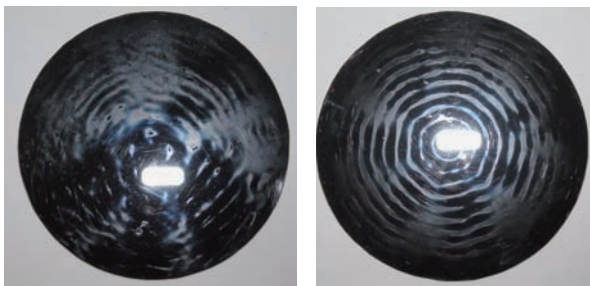


(a) 采样板上方45°角落

(b) 采样板上方-45°角落

图13 烟源在实验箱中同一高度相邻两个角落时采样板上的颗粒聚集物分布

Fig. 13 Pollutant particle concentrations on the surface of the sampling plate when the smog source is in the two different adjacent corners at the same height in the testing chamber



(a) 夹角5°

(b) 夹角0°

图14 声辐射板与采样板不同夹角条件下采样板上的颗粒聚集物分布

Fig. 14 Pollutant particle concentrations on the surface of the sampling plate at different angles between the acoustic radiation plate and sampling plate

5 结论

本工作提出了一种超声波空气污染物颗粒采样器的新结构并测试了它的采样性能。实验表明其采样速度是自然积集法的26倍。该结构通过利用声辐射板的高阶弯曲振动提高采样效率,在空气污染

物颗粒初始浓度为4 mg/L、辐射板中心位置的振动速度为0.29 m/s时,对烟雾中PM2.5和PM2.5-10颗粒的采样效率为16.3 mg/m²·min·W。与不采用高阶弯曲振动圆形声辐射板的结构相比,其采样效率增加了110%。该采样器可采集低浓度颗粒污染物、采样速度快、重复性好、结构简单、易分析被采集物以及不破坏污染物成分,并避免了滤膜和溶液等对采样对象的二次污染,在低浓度颗粒污染物与微生物等的高速采样中,具有良好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Raaschou-Nielsen O, Beelen R, Wang M, et al. Particulate matter air pollution components and risk for lung cancer[J]. *Environ. Int.*, 2016, 87(5): 66-73.
- [2] Lin H L, Tao J, Du Y D, et al. Particle size and chemical constituents of ambient particulate pollution associated with cardiovascular mortality in Guangzhou, China[J]. *Environ. Pollut.*, 2016, 208(B): 758-766.
- [3] 刘刚, 徐慧, 谢学俭, 等. 大气环境监测 [M]. 北京: 气象出版社, 2012.
- [4] Riera E, Gallego-Juarez J A, Mason T J. Airborne ultrasound for the precipitation of smokes and powders and the destruction of foams[J]. *Ultrason. Sonochem.*, 2006, 13(2): 107-116.
- [5] Ran W, Saylor, J R. A mechanistic explanation of the increase in particle scavenging in the ultrasonic scrubber[J]. *J. Aerosol Sci*, 2015, 87: 88-101.
- [6] 赵淳生. 超声电机技术与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [7] Lung S C C, Hu S C. Generation rates and emission factors of particulate matter and particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons of incense sticks[J]. *Chemosphere*, 2003, 50(5): 673-679.
- [8] 张金萍. 室内燃香烟空气污染特征研究 [J]. *建筑科学*, 2010, 26(6): 18-24.
Zhang Jinping. Study on indoor airborne pollution characteristics of smoke from incense burning[J]. *Chinese Journal of Building Science*, 2010, 26(6): 18-24.
- [9] Wang Y J, Hu J H. Ultrasonic removal of coarse and fine droplets in air[J]. *Sep. Purif. Technol.*, 2015, 153: 156-161.
- [10] 傅永华. 有限元分析基础 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- [11] 王勖成. 有限单元法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [12] Hu J H. Ultrasonic micro/nano manipulations: principles and examples[M]. Singapore: World Scientific, 2014.
- [13] Gor'kov L P. On the forces acting on a small particle in an acoustical field in an ideal fluid[J] *Sov. Phys. Dokl.*, 1962, 6(1): 773.
- [14] Barmatz M, Collas P J. Acoustic radiation potential on a sphere in plane, cylindrical, and spherical standing wave fields[J]. *Acoust. Soc. Amer.*, 1985, 77(3): 928-945.