

双峰分布颗粒物的声团聚实验研究

沈国清^{1,2}, 何春龙², 黄晓宇², 张世平^{1,2}, 安连锁²

(1. 华北电力大学国家火力发电工程技术研究中心, 北京 102206;
2. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

摘要: 从微观受力角度探索颗粒(Particulate Matter, PM)团聚和破碎效果, 声压级越大, 团聚体临界粒径越小。通过实验研究了 0~200 μm 的双峰分布颗粒物中可吸入颗粒在声场中的团聚效果。在 500~3 500 Hz、70~140 dB 声场条件下, 研究了声波频率和声场强度对声波团聚的影响。在 120 dB 的声场条件下, 双峰分布颗粒团聚存在的最佳频率范围为 1 800~2 300 Hz, 团聚效率达到 25%~30%。在 70~120 dB 实验范围, 团聚效率随声压级的增加先增后减。在 140 dB 时, 大颗粒明显破碎, 小颗粒增多。将声波团聚技术应用到燃煤电站烟气中的可吸入颗粒物处理中, 需要同时考虑声场的破碎作用, 建议将声波团聚室布置在电除尘器之后。

关键词: 双峰分布颗粒; 声波团聚; 受力分析; 声压级; 频率

中图分类号: X513

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2017)-06-0516-06

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2017.06.003

Experimental research on acoustic agglomeration of particles with bimodal distribution

SHEN Guo-qing^{1,2}, HE Chun-long², HUANG Xiao-yu², ZHANG Shi-ping^{1,2}, AN Lian-suo²

(1. National Thermal Power Engineering & Technology Research Center, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In this paper, the effects of particle agglomeration and fragmentation are explored from the microscopic stress. The bigger the sound pressure level, the smaller the critical particle size of aggregate will be. The acoustic agglomeration of inhalable particles in 0~200 μm bimodal particles is studied by experiments. The influence of sound intensity and acoustic frequency on the acoustic agglomeration are studied under the condition of 500~3 500 Hz and 70~140 dB. Under 120 dB, the best frequencies of 1 800~2 300 Hz exist for bimodal particles, and the agglomeration efficiency can reach 25%~30%. In the experimental range of 70~120 dB, the agglomeration efficiency increases first and then decreases. Large particles are broken and small particles increase in the particle size distribution under 140 dB. For the treatment of inhalable particles in flue gas of coal-fired power plant by using acoustic agglomeration technique, it is necessary to consider the crushing effect of the sound field, and recommended to arrange the acoustic chamber behind the electrostatic precipitator.

Key words: bimodal distribution particles; acoustic agglomeration; force analysis; sound pressure level; frequency

0 引言

可吸入颗粒物(PM₁₀)是指粒径小于 10 μm 的颗粒, 细颗粒物(PM_{2.5})是指粒径小于 2.5 μm 的颗粒, 超细颗粒物(PM₁)是指粒径小于 1 μm 的颗粒。有研究表明, 粒径小于 10 μm 的可吸入颗粒物不但污染环境而且危害人体健康。美国环保局等相关机构专门对细颗粒物(PM_{2.5})进行了研究, 研究发现 PM_{2.5} 是

危害人体健康最严重的主要污染物之一, 会损坏人体呼吸系统和心血管系统^[1]。

工业生产特别是燃烧过程会产生大量的颗粒物, 并排放到大气中。目前, 常规的除尘设备有静电除尘器、布袋除尘器和旋风分离器等。这些设备对于粒径大于 10 μm 的大颗粒物的脱除效率很高, 比如在电厂中应用最广泛的静电除尘器, 其对粒径大于 10 μm 的大颗粒脱除效率高达 99%, 但是对于 PM₁₀、PM_{2.5} 这些可吸入颗粒物的脱除效率却不高^[2-4]。排放到大气中的可吸入颗粒物质量虽少但数目巨大。为了解决此问题, 学者对常规除尘流程进行改进, 即对烟尘进行预处理, 使细颗粒物长大, 最后联合后续常规除尘器进行脱除^[5]。声波团聚就是这样一门技术, 烟尘中的细颗粒物在高强度的声

收稿日期: 2017-03-24; 修回日期: 2017-06-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(11674093)

作者简介: 沈国清(1980—), 男, 江苏海安人, 博士, 副教授, 研究方向为电站锅炉声学检测、燃烧污染物的声波团聚控制研究。

通讯作者: 何春龙, E-mail: hechunlong@ncepu.edu.cn

场作用下发生碰撞，团聚形成较大颗粒。因为声场的自身特性，在工程中运用声场有诸多优点，比如结构布置简单，不影响设备正常运行，适应各种恶劣条件等。因此利用声波团聚脱除细颗粒物被认为是最具发展潜力的除尘技术之一^[5]。本研究不仅适用于大型燃煤电站锅炉，而且对中小型燃煤工业锅炉和供暖锅炉具有同样重要的指导价值和工程应用意义。

自 19 世纪 30 年代以来，学者对声波团聚脱除细颗粒物做了大量的实验研究和数值模拟。目前在机理研究方面，主要有两个理论：正向动力团聚机理和流体力学作用机理。正向动力团聚机理提出声波挟带理论，指出不同粒径的颗粒，因其惯性作用，随声波振动幅度不同，使得大小颗粒碰撞而产生团聚效果^[6-7]。流体力学作用机理分为共辐射压作用、共散射作用和声波尾流效应^[8]。

在实验研究方面，学者研究了声场参数(频率、声压级)、颗粒停留时间和颗粒浓度等因素对声波团聚效果的影响^[9-13]。Tiwary^[9]等人采用 1~5 kHz 的声波对 0.1~20 μm 的燃煤飞灰进行声波团聚实验，研究发现其最佳频率为 2 kHz；Hoffman^[10]等人采用 44 Hz 和 10 kHz 的声波对 1~10 μm 的燃煤飞灰进行声波团聚实验，发现低频声波更有利于声波团聚；陈厚涛^[11]等人采用 1 000 Hz 的声波对柴油机尾气中的超细颗粒物进行声波团聚实验，系统研究了声场强度、停留时间和颗粒数目浓度对细颗粒脱除效率的影响；Zhou D^[12]等人将声波团聚与常规除尘器相结合，实验结果表明声波团聚能显著提高除尘器的除尘效率；张光学^[13]等人采用 500~3 000 Hz 的声波对 0~10 μm 的燃煤飞灰进行声波团聚实验，其最佳频率为 1 400~1 700 Hz。

虽然国内外学者对声波团聚课题做了大量的实验研究，但是实验对象多为 10 μm 以下，粒径分布呈现单峰特征的颗粒(单峰分布颗粒)。然而声波团聚作为一门烟气预处理技术，运用在常规除尘器前的烟尘环境中。据资料显示，在实际工程应用中，烟尘中的颗粒物多为大小颗粒物共存，比如燃煤电厂产生的烟尘，其中颗粒物粒径范围大多在 0~200 μm，且粒径分布呈现双峰特征(双峰分布颗粒)。因此，本文根据电厂实际情况，选择粒径范围在 0~200 μm 的大小颗粒共存的双峰分布颗粒物作为实验样品，搭建声波团聚实验台，研究声压级和频率对可吸入颗粒物脱除的影响，更具工程实用价值。同时本文从微观尺度上探究声波团聚中的团聚体受力情况，结合计算以及实验结果提出声波团聚技

术的适用环境：建议将声波团聚技术运用在颗粒粒径较小的环境，比如电厂电除尘器后的烟气中、发动机尾气处理等。

1 声波团聚中团聚体受力分析

在声波团聚中，学者认为在高强度的声场中，大小颗粒随声波的振动幅度不同而发生相对运动，从而发生碰撞。颗粒碰撞的结果有三种：团聚、分离、破碎。

对于微米级的颗粒而言，以范德华力为主的粘附力占据主导地位^[14]，所以微米级颗粒在声场中碰撞后团聚。但是本文研究对象是粒径分布较广的双峰分布颗粒物，有必要从微观层面对团聚体进行受力分析，判断其碰撞结果。

根据颗粒间在团聚过程中所起的不同作用，可分为两种力^[14]：促使团聚体破碎的力 F_f 和促使颗粒团聚的力 F_a 。声波作用力 F_{sou} 、表观重力 F_g 、碰撞力 F_c 、曳力 F_d 等是促使团聚体破碎的力；范德华力 F_{vw} 、静电力 F_e 、液体桥力 F_H 等是促使颗粒团聚的力。

1.1 团聚体受力计算方法

在本文实验中，以干燥空气作为流体介质，只考虑范德华力作为其促使颗粒团聚的力。团聚体考虑成球体。根据文献[14-17]，各力的计算方法如下：

声波作用力 F_{sou} ：

$$F_{sou} = \pi d^2 |\bar{P}_{(x)}| \quad (1)$$

式中： d 是团聚体直径(m)； $|\bar{P}_{(x)}|$ 是声压幅值的算术平均值(Pa)。

表观重力 F_g ：

$$F_g = \pi (\rho_a - \rho_f) d^3 g / 6 \quad (2)$$

式中： ρ_a 是团聚体密度(kg/m³)； ρ_f 是流体密度(kg/m³)； d 是团聚体直径(m)； g 是重力加速度(m/s²)。

曳力 F_d ：

$$F_d = 0.055 \pi \rho_f d^2 V^2 \varepsilon^{-4.8} \quad (3)$$

式中： ρ_f 是流体密度(kg/m³)； d 是团聚体直径(m)， V 是流速(m/s)； ε 是空隙率。

范德华力 F_{vw} ：

$$F_{vw} = \frac{A}{12\delta^2} \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2} \quad (4)$$

式中： A 是 Hamaker 常数(J)； δ 是范德华力发生距离[计算时一般取 $(1.65 \sim 4) \times 10^{-10}$ m]； d_1 和 d_2 是两颗粒直径(m)。

1.2 计 算

上述作用力受各方面的影响,其中包括颗粒特性(颗粒尺寸、粒径分布、密度、表面粗糙度等),气体介质参数(气体密度、温度、粘性等)以及环境温度、湿度等。其中颗粒尺寸是最显著的影响因素。

本文通过计算,研究不同粒径下的各作用力的变化规律,分析各力对团聚体破碎、颗粒团聚的作用以及最后形成的团聚体的粒径大小。

本文计算范围为 $0.1 \sim 10\,000 \mu\text{m}$ 的粒径各力相对大小,各计算参数根据文献[14-17]以及本文实验条件选择,具体参数见表 1。

表 1 计算参数
Table 1 Parameters for calculation

符号	参数	数值
SPL	声压级/dB	135
f	频率/Hz	1 300
ρ_a	团聚体密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2 500
ρ_f	流体密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1.205
g	重力加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	9.8
ε	空隙率	1
V	流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.33
A	Hamaker 常数/J	8.26×10^{-20}
δ	范德华力发生距离/m	3×10^{-10}

计算结果如图 1 所示,粒径在 $0 \sim 500 \mu\text{m}$ 变化时,声波作用力是导致团聚体破碎最主要的力,可忽略重力、曳力的影响。在本文计算中,范德华力是保持团聚体团聚的唯一的力。定义临界粒径为 d_c ,即团聚力与破碎力相等时的团聚体粒径,也是在各作用力共同作用下的团聚体最大粒径。

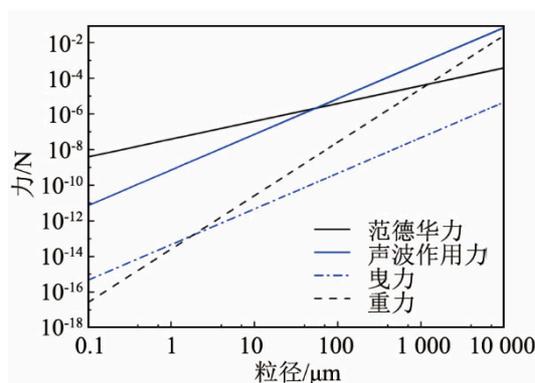


图 1 各作用力随团聚体粒径变化规律
Fig.1 Variations of different acting forces with aggregate size

在 135 dB 的声场条件下, d_c 为 $54 \mu\text{m}$ 。当团聚体粒径小于 $54 \mu\text{m}$ 时,范德华力大于声波作用力,团聚体碰撞后团聚形成更大的团聚体;当团聚体粒径大于 $54 \mu\text{m}$ 时,作用在团聚体上的声波作用力大于其范德华力,团聚体碰撞后破碎。

声波作用力受声压级的影响很大,表 2 计算了不同声压级下的临界粒径 d_c 。随着声压级的提高,声波团聚后形成的团聚体的临界粒径减小。

表 2 不同声压级下的临界粒径
Table 2 Critical particle sizes at different sound pressure levels

声压级 SPL /dB	120	130	140	150
临界粒径 d_c / μm	287	95.6	30.5	9.7

2 实 验

2.1 实验系统

实验系统如图 2 所示,主要包括 5 个部分:给料系统、声发射及测量系统、声波团聚室、采样测量系统、尾气处理系统。

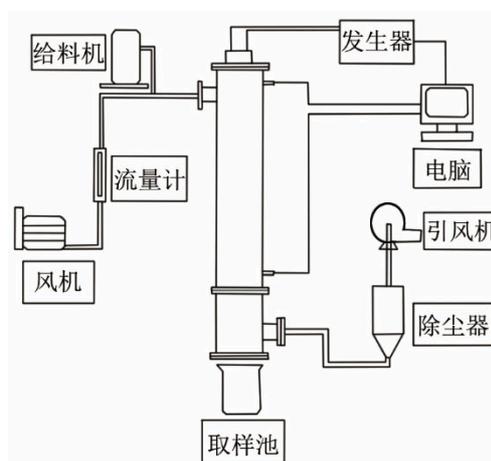


图 2 声波团聚实验系统图
Fig.2 Experimental system of acoustic agglomeration

给料系统主要由风机、流量计和微量给料机组组成。给料机采用东孚公司设计制造的 TWLP-15 型微量给料机,其特点是微量给料,给料稳定。实验中可以通过调节变频器控制给料速度,达到实验要求。

声源及测量系统主要由计算机、MTC-300 大功率音频发生器以及 TD-300 大功率音头组成。计算机端通过 SpectraLAB 控制音频发生器可以发出不同频率的声波,调节音频发生器的音量旋钮可以调整声压级。在声波团聚室上部 and 下部布置两个声信号测点,通过声传感器将信号传输到带有采集卡的计算机进行测量。

声波团聚室为圆柱形,尺寸:长为 1.5 m,直径为 0.1 m,壁厚为 10 mm。声波团聚室上端为声源,下端链接取样池并设有尾气处理系统。声源信号为正弦波,在团聚室内形成中高强度的稳定驻波场。经测量,在 $0 \sim 10\,000 \text{ Hz}$ 声波条件下,管内声压级

沿管长衰减不超过 1%，可以忽略不计。

采样测量系统由 Winner2000ZDE 型激光粒度分析仪和取样池组成。从取样池提取实验后的颗粒，通过激光粒度分析仪测量其粒径分布。

尾气处理系统由除尘器和引风机组成。实验后的气溶胶中的颗粒物通过除尘器进行处理。

2.2 实验过程及参数

整个声波团聚实验过程为：通过调节风机功率来控制空气流量，由流量计进行读数；在声波团聚室上方有声源发出声波，在声波团聚室内形成稳定的声场，通过计算机软件发出不同频率的声波；调节音频发生器来控制声压级；启动给料机，实验样品从微料给料机中均匀进入管道，与空气进行混合，随空气进入声波团聚室；大小颗粒在声场的作用下碰撞从而发生团聚，最后在取样池进行取样测量，尾气通过除尘器进行处理。

声波团聚实验的参数很多，比如声压级、频率、颗粒初始浓度、停留时间等。本实验只考察声波频率和声压级对团聚的影响。实验范围：声波频率范围为 500~3 500 Hz，声压级范围为 70~140 dB。通过控制变量法对其他参数进行控制，颗粒初始浓度为 20 g/m³，停留时间为 3 s。

3 实验结果与分析

3.1 颗粒的初始粒径分布

在声波团聚实验中，首先要测量颗粒的初始粒径分布，使用激光粒度分析仪进行测量。在不加声场的情况下，收集实验样品颗粒进行测量。测量结果如图 3 所示，实验所用颗粒粒径范围为 0~200 μm，呈双峰分布，两个峰值分别在 25 μm 和 80 μm，颗粒中位径为 28.903 μm，粒径小于 10 μm 的颗粒占比 24%，粒径小于 2.5 μm 的颗粒占比 10%。

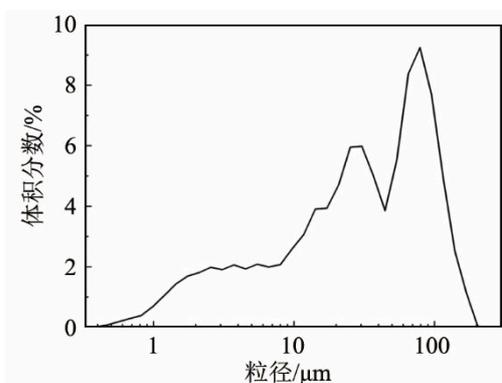


图 3 初始粒径分布

Fig.3 Initial particle size distribution

本实验中定义声波团聚效率 η 为

$$\eta = \frac{N_0 - N_1}{N_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中： N_0 为声波团聚前可吸入颗粒物的体积分数； N_1 为声波团聚后可吸入颗粒物的体积分数。

3.2 声波频率对声波团聚的影响

根据声波团聚的同向团聚理论，频率过低，大小颗粒都随声波完全震荡，没有相对运动，不发生碰撞；频率过高，大小颗粒在声场中静止，也不发生碰撞。所以对于某一固定粒径分布的颗粒群，理论上存在一个最佳频率。学者通过实验也发现了最佳频率的存在^[13]，但是最佳频率受颗粒的粒径分布影响很大，实验结果有所差异。学者多以 10 μm 以内的颗粒作为研究对象，不符合工程实际。本文以 0~200 μm 的大小颗粒共存的双峰颗粒物作为研究对象。

本文声波频率实验范围为 500~3 500 Hz，其余参数保持不变，其中声压级控制在 120 dB，颗粒初始浓度为 20 g/m³，停留时间为 3 s。

图 4 所示为不同频率下可吸入颗粒物的团聚效率。在实验范围 500~3 500 Hz 内，分析频率对团聚效率的影响：团聚效率随着频率增加先增后减，存在一个最佳频率，偏离最佳频率，团聚效果变差。在 1 800 Hz 时，PM₁₀ 的团聚效率最高达到 29.7%；在 2 300 Hz 时，PM_{2.5} 的团聚效率最高达到 27%。

在可吸入颗粒物范围(0~10 μm)考察声波团聚效果，PM_{2.5} 的最佳频率高于 PM₁₀ 的最佳频率。这种规律符合同向团聚机理，频率越大，对小颗粒的挟带作用越大，团聚效果越好。对于某一固定粒径分布的颗粒群，研究其中某一粒径段的团聚效果，粒径越小，最佳频率越大。

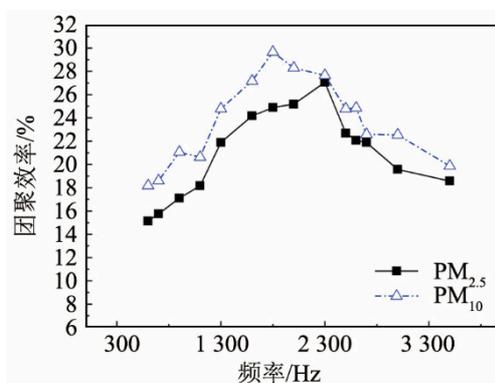


图 4 不同频率下的可吸入颗粒物团聚效率

Fig.4 Agglomeration efficiencies of inhalable particles at different frequencies

3.3 声场强度对声波团聚的影响

影响声波团聚效率的另一个很重要的参数是声场强度，一般用声压级来衡量。本文在 70~140 dB 的实验范围内，研究了声场强度对声波团聚的影响。声波频率固定在 1 300 Hz，颗粒初始浓度为 20 g/m³，停留时间为 3 s。

图 5 所示为不同声压级下可吸入颗粒物的团聚效率。PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的团聚效率随频率有着相同的变化趋势：随着声压级的升高，团聚效率一直增大，当达到 120 dB 时，PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的团聚效率达到最大，分别为 21.9% 和 24.8%；随着声压级的继续增大，团聚效率反而减小，当达到 135 dB 时，团聚效率出现负值。

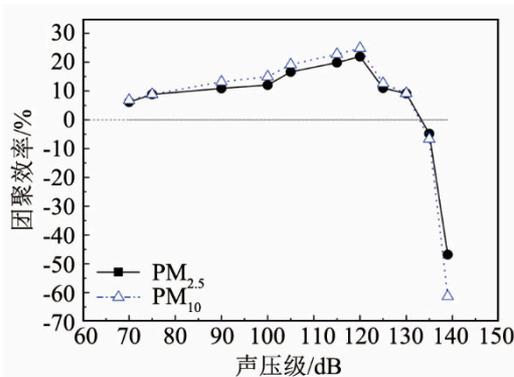


图 5 不同声压级下可吸入颗粒物的团聚效率
Fig.5 Agglomeration efficiencies of inhalable particles at different sound pressure levels

在声波团聚中，声场只是增强了颗粒间的相互运动，增大了颗粒间的碰撞概率，颗粒碰撞后靠颗粒间的范德华力等粘性力团聚。然而作用在团聚体上的声波作用力是使其破碎的力。以前的学者对于声波团聚实验采用的是 10 μm 以下的小颗粒，其颗粒间的范德华力等粘性力较大，一般不会发生破碎，并且声压级越大，团聚效果越好。但是当采用粒径分布较广的颗粒物进行声波团聚实验，随着声压级的升高，团聚效果并非一直变好。

在第 1 节的理论计算中，120 dB 时的团聚体临界粒径为 287 μm，本文实验所用颗粒粒径均小于 287 μm，颗粒碰撞后团聚；140 dB 时的团聚体临界粒径为 30.5 μm，本文实验所用颗粒部分是大于 30.5 μm 的大颗粒，在声场中碰撞发生破碎。

图 6 是在 1 300 Hz 下，120 dB 和 140 dB 实验后的颗粒粒径分布的对比图。120 dB 时，10 μm 以下的小颗粒相对于原始颗粒有明显减小，在原始颗粒第二峰值粒径 80 μm 附近，颗粒明显增多，粒径明显增大，这是因为大颗粒作为团聚核，小颗粒

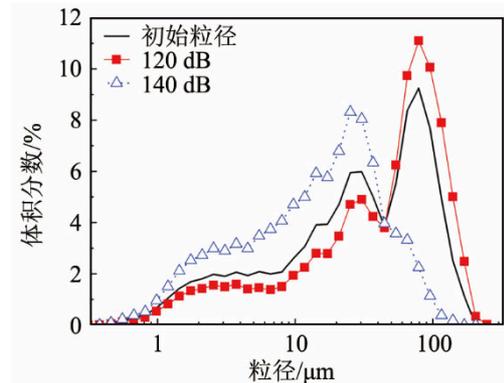


图 6 120 dB 与 140 dB 声压级下实验后的颗粒粒径分布对比
Fig.6 Experimental contrast between particle size distributions under the sound pressure levels of 120 dB and 140 dB

与其进行碰撞团聚，在减少了小颗粒的同时增多了大颗粒；但是在 140 dB 下，实验后的颗粒粒径分布变成了单峰分布，原始颗粒的第二峰值粒径附近的大颗粒明显减少，这是因为声压级过大，原始颗粒中的部分大颗粒自身结构等因素，在过大声压级下发生破碎，10 μm 以下的颗粒大量增加。

4 结 论

本文从微观层面对团聚体进行受力分析，研究了颗粒在声场条件下团聚体的临界粒径。同时结合实际工业生产中形成的颗粒物粒径分布情况，以双峰分布可吸入颗粒物作为实验对象，实验研究了频率和声压级对声波团聚的影响，结论如下：

(1) 通过理论计算，声压级越高，团聚体的临界粒径越小；

(2) 在 120 dB 下，实验研究了频率对声波团聚的影响。在实验范围 500~3 500 Hz 内，双峰分布可吸入颗粒物的声波团聚实验存在的最佳频率范围为 1 800~2 300 Hz，团聚效率达到 25%~30%；

(3) 在 1 300 Hz 下，实验研究了声压级对声波团聚的影响。在实验范围 70~140 dB 内，双峰分布可吸入颗粒物的团聚效率先增后减。120 dB 时 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的团聚效率达到最大，分别为 21.9% 和 24.8%。对于粒径较大的颗粒，由于自身结构等因素，在较大声压级下发生破碎。

由本文分析可知，将声波团聚技术应用到燃煤电站烟气中的可吸入颗粒物处理中，需要同时考虑声场的破碎作用，建议将声场布置在电除尘器尾部，在去除大颗粒后联合使用电除尘方法脱除细颗粒物，或者将声场布置在脱硫塔出口净烟道上，联合高效管式除雾器技术脱除细颗粒物。另外，建议

将声波团聚技术运用在颗粒粒径较小的环境，比如发动机尾气处理。为了将声波团聚技术运用于工程实际，在以后的工作中，还需要对大颗粒在声场中发生破碎的行为进行更深入的研究。

参 考 文 献

- [1] 杨新兴, 冯丽华, 尉鹏. 大气颗粒物 $PM_{2.5}$ 及其危害[J]. 前沿科学, 2012, 6(21): 22-31.
YANG Xinxing, FENG Lihua, WEI Peng. Atmospheric particulate $PM_{2.5}$ and its harm[J]. Frontier Science, 2012, 6(21): 22-31.
- [2] 徐鸿, 宋凯, 雷小云, 等. 200 MW 机组电除尘器可吸入颗粒物排放控制试验研究[J]. 热力发电, 2006, 35(10): 37-39.
XU Hong, SONG Kai, LEI Xiaoyun, et al. Experimental study on the control of inhalable particulate emissions from 200 MW unit electrostatic precipitator[J]. Thermal Power Generation, 2006, 35(10): 37-39.
- [3] 刘建忠, 范海燕, 周俊虎, 等. 煤粉炉 $PM_{10}/PM_{2.5}$ 排放规律的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 145-149.
LIU Jianzhong, FAN Haiyan, ZHOU Junhu, et al. Experimental studies on the emission of PM_{10} and $PM_{2.5}$ from coal-fired boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 145-149.
- [4] 孙超凡, 鄂思柯, 钱炜, 等. 大型电袋复合除尘器除尘效率的实验研究与优化[J]. 动力工程学报, 2014, 34(7): 534-540.
SUN Chaofan, WU Sike, QIAN Wei, et al. Experimental study and improvement on dust removal efficiency of electrostatic-fabric integrated precipitators[J]. Journal of Power Engineering, 2014, 34(7): 534-540.
- [5] 张光学, 刘建忠, 周俊虎, 等. 气溶胶微粒声波团聚技术的回顾与展望[J]. 热力发电, 2007, 36(11): 7-11.
ZHANG Guangxue, LIU Jianzhong, ZHOU Junhu, et al. Review and prospect of acoustic wave agglomeration technology for aerosol fine particles[J]. Thermal Power Generation, 2007, 36(11): 7-11.
- [6] Dong S, Lipkens B, Cameron T M. The effects of orthokinetic collision, acoustic wake, and gravity on acoustic agglomeration of poly-disperse aerosols[J]. Journal of Aerosol Science, 2006, 37(4): 540-553.
- [7] Markauskas D, Kačianauskas R, Maknickas A. Numerical particle-based analysis of the effects responsible for acoustic particle agglomeration[J]. Advanced Powder Technology, 2015, 26(3): 698-704.
- [8] 张光学, 刘建忠, 王洁, 等. 声波团聚中尾流效应的理论研究[J]. 高校化学工程学报, 2013, 27(2): 199-204.
ZHANG Guangxue, LIU Jianzhong, WANG Jie, et al. Theoretical study of acoustic wake effect in acoustic agglomeration[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2013, 27(2): 199-204.
- [9] Tiwary R. Acoustic agglomeration of micron and submicron fly-ash aerosols[D]. Pennsylvania: The Pennsylvania State University, 1989.
- [10] Hoffmann T L. Environmental implications of acoustic aerosol agglomeration[J]. Ultrasonics, 2000, 38(1): 353-357.
- [11] 陈厚涛, 章汝心, 曹金祥, 等. 声波团聚脱除柴油机尾气中超细颗粒物的试验研究[J]. 内燃机学报, 2009, 27(2): 160-165.
CHEN Houtao, ZHANG Ruxin, CAO Jinxiang, et al. Experimental study on acoustic agglomeration of ultrafine particles in diesel engine exhaust[J]. Transactions of CSICE, 2009, 27(2): 160-165.
- [12] ZHOU D, LUO Z, JIANG J, et al. Experimental study on improving the efficiency of dust removers by using acoustic agglomeration as pretreatment[J]. Powder Technology, 2016, 289: 52-59.
- [13] 张光学, 刘建忠, 周俊虎, 等. 燃煤飞灰低频下声波团聚的实验研究[J]. 化工学报, 2009, 60(4): 1001-1006.
ZHANG Guangxue, LIU Jianzhong, ZHOU Junhu, et al. Acoustic agglomeration of coal-fired fly ash particles in low frequency sound fields[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2009, 60(4): 1001-1006.
- [14] 苏吉, 朱庆山. 声场流化床中超细颗粒聚团受力与尺寸[J]. 过程工程学报, 2010, 10(3): 431-437.
SU Ji, ZHU Qingshan. Acting forces and agglomerate sizes of super fine particles in an acoustic fluidized bed[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2010, 10(3): 431-437.
- [15] Timoshenko S P, Goodier J N. Theory of Elasticity[M]. New York: McGraw-Hill, 1970, 75-77.
- [16] Khan A R, Richardson J F. Pressure gradient and friction factor for sedimentation and fluidisation of uniform spheres in liquids[J]. Chemical Engineering Science, 1990, 45(1): 255-265.
- [17] Israelachvili J N. Intermolecular and surface forces[M]. San Diego: Academic Press, 2011.