

频率对燃煤飞灰声波团聚影响的模型及实验验证

张光学, 刘建忠, 周俊虎, 王洁, 岑可法

(能源清洁利用国家重点实验室(浙江大学), 浙江省 杭州市 310027)

A Theoretical Model and Experimental Verification on the Influence of Frequency on Acoustic Agglomeration of Coal-fired Fly Ash

ZHANG Guang-xue, LIU Jian-zhong, ZHOU Jun-hu, WANG Jie, CEN Ke-fa

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization (Zhejiang University), Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: This paper presented model and experimental studies on the influence of frequency on acoustic agglomeration of coal-fired fly ash. Orthokinetic interaction mechanism corrected by collision efficiency was used in the numerical simulation, and the results agree with the experimental results well. Simulation results show that acoustic agglomeration process shifts the particle size distribution towards larger size and reduces the number of fine particles. Both experimental and numerical simulation results confirm that the effectiveness of agglomeration is sensitive to the frequency change and there exists an optimum frequency for a given particle size distribution of an aerosol. A considerable effectiveness of agglomeration could only be obtained in a narrow frequency range and it decreases significantly beyond the range. In addition, the simulation results show that with sound application the concentration of fly ash decreases exponentially with respect to time.

KEY WORDS: acoustic agglomeration; orthokinetic interaction mechanism; collision efficiency; fly ash; $PM_{2.5}$

摘要: 为研究声波团聚过程中频率的影响, 基于碰撞效率修正的同向作用机理, 提出一种声波团聚的新模型。通过实验对模型的计算结果进行了验证, 发现该模型能很好地描述声波团聚过程。计算所得的声波团聚中的粒径分布和浓度变化与实验值基本吻合。数值模拟再现了气溶胶在声波团聚中粒径分布的变化, 细颗粒逐渐团聚产生大颗粒, 气溶胶总浓度降低、平均粒径增大。计算结果和实验值均表明, 频率对团聚效果影响很大, 声波团聚中存在最佳频率, 高于或低于该最佳频率均使团聚效果迅速降低。计算结果还表明, 在声波作用下, 燃煤飞灰气溶胶总浓度随时间呈指数衰减规律降低。

关键词: 声波团聚; 同向碰撞机理; 碰撞效率; 燃煤飞灰; $PM_{2.5}$

0 引言

燃煤电站、水泥厂等工业排放的颗粒物是大气污染的主要组成部分。这些颗粒物, 尤其是 $PM_{2.5}$ (粒径小于 $2.5 \mu m$ 的颗粒), 比表面积大、可携带重金属和病毒等有害物质, 并能随呼吸进入人体肺泡, 具有极强的危害性。目前工业中广泛使用的除尘设备, 如旋风分离器、布袋除尘器和静电除尘器等, 能达到很高的总除尘效率, 但对超细颗粒($0.1 \sim 2 \mu m$)的脱除效率很低^[1], 而这部分颗粒恰恰对人体危害最大。

声波团聚是一种烟气预处理技术, 在烟气进入除尘器之前, 采用声波进行处理, 使其中的细颗粒发生碰撞、团聚, 形成大颗粒, 从而减少细颗粒数量, 增大气溶胶的平均粒径, 最终提高其在除尘器中的除尘效率。声波团聚现象在 1931 年被发现^[2], 但是直到 20 世纪 80 年代后, 随着国际社会对颗粒物污染的重视程度的增加, 各国对声波团聚的研究才开始重新升温。

目前已有不少声波团聚的实验研究^[3-7]和数值计算模型^[8-11], 但是其工业应用进展依然很缓慢。其主要原因是: 已有的声波团聚模型过于简化, 其中有些系数, 如碰撞效率等采用的是经验值, 不具有普遍意义; 目前声波频率对团聚的影响情况还没有完全掌握; 对是否存在最佳频率、如何确定最佳频率仍有争议。虽然研究者在实验中选取的频率范围很广, 从 44 Hz 到 21 kHz, 但这些实验大部分采用的是旋笛、超声波换能器等不可调节频率的声源, 只能在固定的频率下进行实验^[5,7-9], 这样就

基金项目: 国家自然科学基金项目(50576083); 新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-04-0533)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50576083).

难获得频率对团聚效果的影响。而不同的实验之间由于气溶胶类型、粒径分布、团聚室尺寸等差别,很难进行比较。国内也有相关针对燃煤飞灰的声波团聚实验研究^[10-11]及颗粒物在声场中运动受力的机理研究^[12-13],但由于声波团聚的复杂性,目前对频率在声波团聚中的作用的研究还不够。本文提出用碰撞效率修正改进声波团聚中的机理函数,建立声波团聚数值模型,并结合实验验证的方法,对声波团聚中频率的影响进行研究,为其工业应用提供依据。

1 声波团聚数值模型

颗粒团聚引起的粒径分布变化可用离散化的气溶胶动力学方程计算^[14]:

$$\frac{dn_k}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{i+j=k} K_{ij} n_i n_j - n_k \sum_i K_{ik} n_i \quad (1)$$

式中: n_i 、 n_j 、 n_k 分别为第*i*、*j*、*k*组的颗粒浓度; K_{ij} 为团聚核函数,其物理意义是单位浓度的颗粒*i*和*j*在单位时间内发生碰撞的次数。该式右边第1项是颗粒*i*和*j*碰撞产生颗粒*k*所引起的颗粒的增加,乘以1/2是为了消除重复计算,第2项是颗粒*k*与其他颗粒发生碰撞而引起的颗粒的减少。

声波团聚的原理是在高强声场作用下,颗粒之间发生相对运动,从而导致颗粒的碰撞。对于这些小颗粒而言,范德华力和静电引力起主要作用,碰撞后极易粘在一起,发生团聚。在声场中,气体介质随着声波作周期性振荡,其中的颗粒也不同程度的被带动,颗粒与气体介质振幅的比值称为挟带系数,可用式(2)计算^[15]:

$$\mu_p = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}} \quad (2)$$

式中: ω 为声波角频率; τ 为颗粒的弛豫时间。颗粒在不同频率下的挟带系数如图1所示,其中颗粒密度为 2400 kg/m^3 , 气体介质为空气,常温。在同一频率下,颗粒粒径越大,挟带系数越小,即不易被声波带动;而对于某一粒径,频率越高,挟带系数越小。

在声波团聚中,由于气溶胶包含不同大小的颗粒,它们在声波中的振动速度各不相同,产生相对运动,这是同向团聚机理的基础。该机理是声波团聚中的最重要的机理,许多研究者已证实其能定性符合实验结果^[4,16]。在求解同向团聚机理的核函数时,运用了“团聚体积”的概念:大颗粒与小颗粒存在相对运动,可将小颗粒视为静止,大颗粒视为

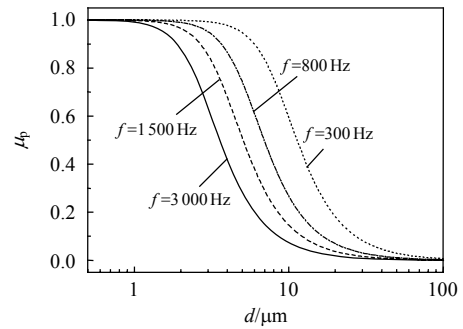


图1 颗粒在不同频率下的挟带系数
Fig. 1 Entrainment factors of particles at different frequencies

运动,一个声波周期内,大颗粒扫过的体积即为团聚体积,在团聚体积内小颗粒与大颗粒发生碰撞团聚。下一个周期,团聚体外部的小颗粒通过各种机理(如重力、扩散等)进入团聚体内部,使团聚持续发生。同向团聚机理的核函数可由式(3)计算^[17]:

$$K_{ij} = \frac{1}{4} E_{ij} (d_i + d_j)^2 u_g [\mu_{p1}^2 + \mu_{p2}^2 - 2\mu_{p1}\mu_{p1}(\mu_{p1}\mu_{p1} + \mu_{g1}\mu_{g1})]^{1/2} \quad (3)$$

式中: d 为颗粒直径; u_g 为气体介质中声波引起的振动速度的幅值; μ_g 为颗粒与介质运动之间的速度差与声振速 u_g 的比值, $\mu_g = \mu_g \omega \tau$, E_{ij} 为碰撞效率,定义为团聚体内能与大颗粒发生碰撞的小颗粒的比例。如图2所示,由于团聚体内流线在大颗粒周围发生扭曲,部分团聚体内的小颗粒靠近大颗粒时,有可能跟随流线运动而绕过大颗粒,无法发生碰撞,故碰撞效率总是小于1。

早期的理论模型为了简化计算,没有考虑碰撞效率。后来的研究者注意到了这个问题,1982年Cheng^[4]提到了碰撞效率,但没有深入计算。Temkin^[18]在1994年提出的模型中涉及到碰撞效率,但将其设为1。1999年Ezekoye^[19]在计算中考虑了碰撞效率,然而取了一个经验常数。Nakajima^[20]在2003年的研究中发现,对微米级颗粒,碰撞效率很低。Dong^[21]的模型中用斯托克斯数粗略地计算碰撞效率,但过于简化,没有考虑频率和声压级等影响。

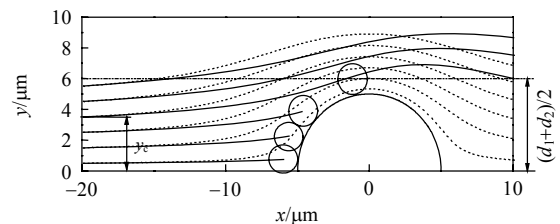


图2 团聚体内小颗粒运动轨迹
Fig. 2 Paths of small particles in an agglomeration volume

基于上述分析, 本文提出了新的碰撞效率计算方法, 改进团聚核函数的求解, 从而建立更加精确的声波团聚数值模型。碰撞效率用式(4)计算:

$$\varepsilon = \left(\frac{2y_c}{d_1 + d_2}\right)^2 \quad (4)$$

式中 y_c 为图 2 中的临界距离。由于整个流场声振动引起的速度很小, $Re < 1$, 小颗粒的运动由式(5)描述:

$$m \frac{du_p}{dt} = \frac{3\pi\eta d}{C}(u_p - u_g) + F \quad (5)$$

式中: m 和 u_p 分别为颗粒质量和速度; C 为滑移系数; η 为气体的粘性系数; F 为除阻力外的其他力, 包括受声波挟带引起的阻力、声辐射力、重力和范德华力等。 u_g 为大颗粒附近的气体速度, 在Stokes区域(r, θ)坐标系下的分布为^[22]:

$$\frac{u_r}{u} = -\frac{1}{2} \cos \theta \left[\left(\frac{d}{2r}\right)^3 - 3\left(\frac{d}{2r}\right) + 2 \right] \quad (6)$$

$$\frac{u_\theta}{u} = -\frac{1}{2} \sin \theta \left[-\left(\frac{d}{2r}\right)^3 - 3\left(\frac{d}{2r}\right) + 4 \right] \quad (7)$$

式中的 u 为来流速度。图 3 为不同频率下的碰撞效率和团聚核函数, 其中声压级为 150 dB, $d_1=10 \mu\text{m}$ 、 $d_2=1.5 \mu\text{m}$ 。计算结果表明, 碰撞效率在低频时随频率的变化较为缓和, 在高频时急剧降低。而团聚核函数为单峰曲线, 存在最佳值。

在声波团聚中, 除了同向团聚机理外, 还有流体力学机理^[15,23-24]。基于以下考虑, 本文的数值模型未包含流体力学机理: 1) 与同向团聚相比, 流体力学作用相对比较微弱, 主要用来解释单分散相气溶胶的声波团聚, 而本文中气溶胶包括各种粒径的颗粒, 此时同向团聚机理占主导地位; 2) 流体力学机理在高频时作用才比较明显^[25], 而本文实验部分使用的频率较低; 3) 流体力学机理尚未发展成熟, 未得到实验的证实, 且某些理论还相互矛盾^[1]。

式(4)~(7)构成了求解碰撞效率的计算模型, 结

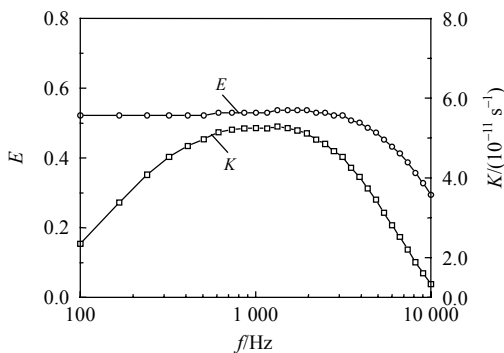


图 3 不同频率下的碰撞效率和团聚核函数
Fig. 3 Collision efficiencies and agglomeration kernels of particles

合(2)和(3)式可求解团聚核函数, 解出团聚核函数后就能通过离散的气溶胶动力学方程求解粒径分布随时间的变化。式(1)~(7)构成了本文的数值模型。

2 实验设备

声波团聚实验系统如图 4 所示, 其中团聚室竖直放置, 高 1.5 m, 内径为 108 mm。声源由信号发生器、功率放大器和驱动式压缩器组成, 通过号角与团聚室相连。声波频率和声压级均连续可调。实验用的气溶胶由某电厂静电除尘器采集的飞灰与空气混合形成, 气溶胶进入团聚室前, 经过切割直径为 $10 \mu\text{m}$ 的旋风分离器预处理, 除去过大的颗粒。团聚室包括 3 个声压级测点, 尾部接采样系统, 采用电称低压冲击器(electrical low pressure impactor, ELPI)测量气溶胶的粒径分布和数目浓度。ELPI的测量范围为 $0.07\sim 10 \mu\text{m}$, 能够实现在线测量。为防止超过量程, 测量前气溶胶稀释至原来的 1/64。

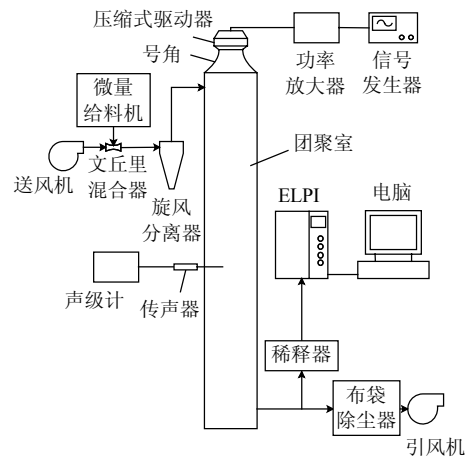


图 4 实验系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the experimental facilities

3 实验验证与理论预测

3.1 实验验证

图 5 为实验中燃煤飞灰的初始粒径分布, 基本符合对数正态分布, 几何平均直径和标准偏差分布为 $2.1 \mu\text{m}$ 和 1.9。在后续与实验数据对比的数值模拟中, 采用该对数正态分布作为初始的粒径分布。

图 6 为气溶胶在不同频率下, 经过 6 s 的团聚时间后粒径分布的计算结果与实验值的对比情况, 其中声压级均为 147 dB。由图中可以看出, 数值模拟结果与实验基本吻合, 平均偏差为 8.66%, 说明本文中的数值模型正确, 采用的机理能够反映声波团聚过程。在 1400 Hz 时, 气溶胶总浓度减少 60% 以上, 气溶胶粒径分布的峰值从 $2.1 \mu\text{m}$ 增大至 $3.3 \mu\text{m}$,

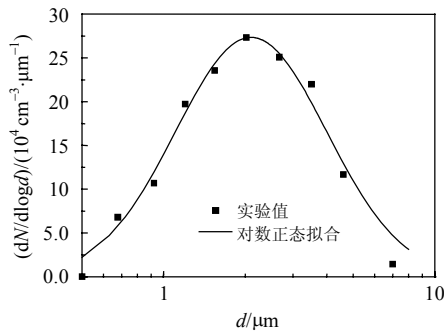


图5 燃煤飞灰气溶胶的初始粒径分布

Fig. 5 Initial particle size distribution of coal-fired fly ash

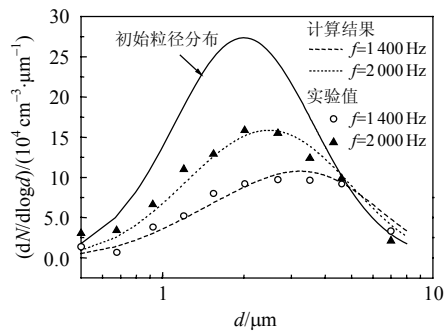


图6 频率对声波团聚中粒径分布的影响

Fig. 6 Effect of frequency on particle size distribution

达到很好的团聚效果。而同样条件下, 1 400 Hz时团聚效果较好。

图7为不同频率下气溶胶团聚效果的比较, 其中 N/N_0 为团聚后的气溶胶浓度与初始浓度的比值, 用以衡量团聚效果, 其中团聚时间为6s。由图可见, 计算结果与实验值基本符合, 尤其在低频时符合得更好, 平均偏差为6.30%, 最大偏差为13.91%。计算结果和实验值均表明, 声波团聚效果对频率很敏感, 对于给定的气溶胶, 存在特定的最佳频率, 高于或低于该最佳频率均导致团聚效果的急剧降低。本实验中的最佳频率在1 400~1 600 Hz范围内, 在此范围内团聚效果比较理想。在工业使用中, 需要处理高流量的烟气, 声源功率必须很高, 只有旋笛、大功率换能器等才能采用, 而这些设备调节频率的

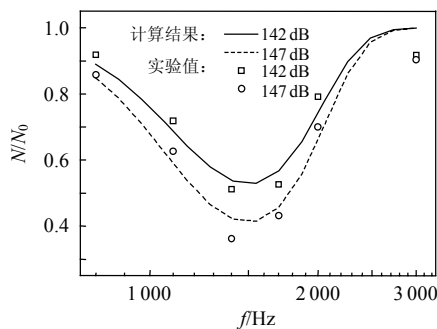


图7 频率对气溶胶团聚效果的影响

Fig. 7 Effect of frequency on agglomeration

能力不强, 故必须确保其工作在最佳频率范围内, 所以进行实验或数值模拟工作确定最佳团聚频率很有必要。

需要注意的是, 在3 000 Hz时, 计算结果与实验值偏差较大, 原因是高频高声强时, 团聚室内声场非线性化增强, 声致湍流和声流作用增大, 而本文采用的团聚机理没有考虑将这些作用, 因此低估了团聚率。但这些机理引起的团聚的比同向团聚机理低很多, 在低频时可忽略。

3.2 理论预测

实验与模型计算结果的对比表明, 该模型能够较好地描述声波团聚过程。为了更深地研究声波团聚过程, 采用该模型进行进一步的理论预测。

由于烟气中的飞灰大多呈对数正态分布^[26], 故本文数值模拟中的初始粒径分布采用对数正态分布。首先模拟了气溶胶在声波团聚中的粒径分布随团聚时间的变化情况, 其中初始几何平均粒径为3 μm, 几何标准偏差为1.4, 数目总浓度为 $1 \times 10^5/\text{cm}^3$, 声波频率为1 500 Hz, 声压级为147 dB, 燃煤飞灰的密度取2 400 kg/cm³, 温度为25 °C。模拟结果如图8所示。结果表明, 在声波作用下, 气溶胶的粒径分布逐渐发生变化, 细颗粒数目因团聚而减少, 形成粗颗粒。经过5 s的团聚后, 粒径分布发生很大变化, 峰值由初始的3 μm变成了3.56 μm, 增大了19%。而气溶胶总浓度和PM_{2.5}的浓度变化分别减少了55%和73%。可见在该条件下, 声波团聚达到了很好的效果。

对于某个粒径区间的颗粒而言, 一方面, 更小的颗粒之间的团聚使该区间颗粒数目增加, 另一方面, 与其他粒径颗粒的团聚, 又使该区间的颗粒数目减少。由图8可见, 小于5 μm的颗粒数目浓度减小; 大于5 μm的颗粒数目浓度增大, 表明了该频率的声波对5 μm以下的颗粒具有较好的团聚效果。

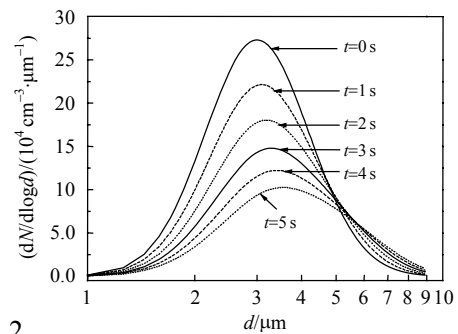


图8 声波团聚中气溶胶粒径分布的变化

Fig. 8 Change of aerosol particles size distribution with time

为研究频率在声波团聚中的作用,模拟了 800、1500 和 2000 Hz 3 个频率下声波团聚效果,气溶胶初始粒径分布同图 5,声压级为 147 dB。图 9(a)为在不同频率下,经过 5 s 的团聚时间后的粒径分布情况。可见在相同团聚时间下,气溶胶的团聚效果受频率的影响很大,1500 Hz 时效果好于其他两个频率。图 9(b)为气溶胶总浓度在不同的频率时随时间的变化情况。模拟结果表明,频率对声波团聚的效果影响很大,其原因是总团聚效果是微观各种粒径的颗粒之间速度差的整体体现,颗粒群之间的速度差取决于挟带系数之差,而挟带系数则是频率的函数。从图中还可以发现,团聚过程中气溶胶总浓度随时间的增加而逐渐减小,且减小的速度随团聚时间的增加而减慢。这是因为随着团聚过程的进行,气溶胶浓度逐渐降低,导致颗粒之间的距离增大,团聚核函数降低,团聚减慢。进一步的计算发现,在声波作用下,气溶胶浓度的降低基本符合指数衰减规律。

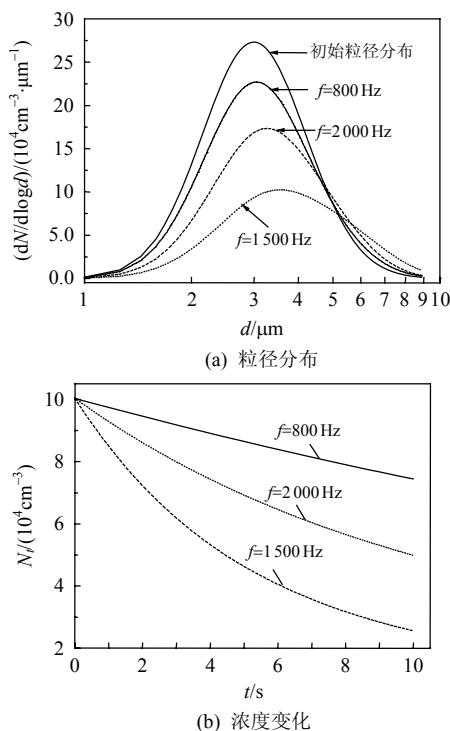


图 9 不同频率下的粒径分布和浓度变化

Fig. 9 Change of aerosol particle size distributions and concentrations at different frequencies

4 结论

本文建立了声波团聚数值模型,研究频率对团聚效率的影响。模型采用碰撞效率对传统的同向团聚机理进行修正,包含声波挟带、声波辐射力、重力和范德华力等因素。计算结果基本符合实验结

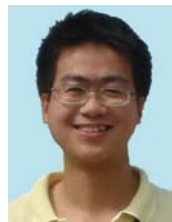
果,粒径分布与总浓度变化均与实验值较吻合。

数值模拟和实验结果均表明,频率对声波团聚的效果影响很大。对于某粒径分布的气溶胶,存在最佳频率,在很窄的范围内能达到很好的团聚效果,在最佳频率范围外,团聚效果急剧降低。在本文实验条件下,燃煤飞灰气溶胶的最佳团聚频率在 1400~1600 Hz 范围内。

参考文献

- [1] Hoffmann T L. Environmental implications of acoustic aerosol agglomeration[J]. *Ultrasonics*, 2000, 38(1-8): 353-357.
- [2] Patterson H, Cawood W. Phenomena in a sounding tube[J]. *Nature*, 1931(127): 667-667.
- [3] Chou K H, Lee P S, Shaw D T. Aerosol agglomeration in high-intensity acoustic fields[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1981, 83(2): 335-353.
- [4] Cheng M T, Lee P S, Berner A, et al. Orthokinetic agglomeration in an intense acoustic field[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1983, 91(1): 176-187.
- [5] Gallego-Juarez J A, De Sarabia E R F, Rodriguez-Corral G, et al. Application of acoustic agglomeration to reduce fine particle emissions from coal combustion plants[J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, 33(21): 3843-3849.
- [6] Shuster K, Fichman M, Goldshtein A, et al. Agglomeration of submicrometer particles in weak periodic shock waves[J]. *Physics of Fluids*, 2002, 14(5): 1802-1805.
- [7] de Sarabia E R F, Elvira-Segura L, Gonzalez-Gomez I, et al. Investigation of the influence of humidity on the ultrasonic agglomeration of submicron particles in diesel exhausts [J]. *Ultrasonics*, 2003, 41(4): 277-281.
- [8] Manoucheri M, A. Ezekoye O. Polystyrene soot agglomeration enhancement in an ultrasonic acoustic field[J]. *Hazardous Waste and Hazardous Materials*, 1996, 13(1): 121-130.
- [9] Rodríguez-Maroto J J, Gomez-Moreno F J, Martí n-Espigares M, et al. Acoustic agglomeration for electrostatic retention of fly-ashes at pilot scale: influence of intensity of sound field at different conditions [J]. *Journal of Aerosol Science*, 1996, 27(Supplement 1): S621-S622.
- [10] 陈厚涛, 赵兵, 徐进, 等. 燃煤飞灰超细颗粒物声波团聚清除的实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(35): 28-32. Chen Houtao, Zhao Bing, Xu Jin, et al. Experimental study on acoustic agglomeration of ultrafine fly ash particles[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(35): 28-32(in Chinese).
- [11] 徐鸿, 骆仲泱, 王鹏, 等. 声波团聚对燃煤电厂可吸入颗粒物的排放控制[J]. *浙江大学学报工学版*, 2007, 41(7): 1168-1171. Xu Hong, Luo Zhongyang, Wang Peng, et al. Acoustic agglomeration to control inhalable particulate emission from coal-fired power plants[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2007, 41(7): 1168-1171(in Chinese).
- [12] 袁竹林, 李伟力, 魏星, 等. 声波对悬浮 PM2.5 作用的数值研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(8): 121-125. Yuan Zhulin, Li Weili, Wei Xing, et al. Study of the sound wave effect on the PM2.5s suspended in the air by numerical method [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(8): 121-125(in Chinese).
- [13] 赵兵, 姚刚, 沈湘林. 燃煤可吸入颗粒物在驻波声场中动力学特

- 性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(26): 13-17.
- Zhao Bing, Yao Gang, Shen Xianglin. Study on the dynamical behavior of inhalable particle from coal combustion in a standing wave field[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(26): 13-17(in Chinese).
- [14] Sarabia E R-F d, Elvira-Segura L, Gonz ález-G ómez I, et al. Investigation of the influence of humidity on the ultrasonic agglomeration of submicron particles in diesel exhausts [J]. Ultrasonics, 2003, 41(4): 277-281.
- [15] Hoffmann T L, Koopmann G H. Visualization of acoustic particle interaction and agglomeration: Theory and experiments[J]. J. Acoust. Soc., 1996, 99(4): 2130-2141.
- [16] Haep S, Drosten U, Otto E, et al. Modeling the influence of acoustic agglomeration on particle size distribution by modal dynamic equation[J]. Journal of Aerosol Science, 1997, 28(Supplement 1): S331-S332.
- [17] Tiwary R, Reethof G. Numerical simulation of acoustic agglomeration and experimental verification[J]. Journal of vibration, acoustics, stress, and reliability in design, 1987, 109(2): 185-191.
- [18] Temkin S. Gasdynamic agglomeration of aerosols. 1. Acoustic waves[J]. Physics of Fluids, 1994, 6(7): 2294-2303.
- [19] Ezekoye O A, Wibowo Y W. Simulation of acoustic agglomeration processes using a sectional algorithm[J]. Journal of Aerosol Science, 1999, 30(9): 1117-1138.
- [20] Nakajima Y, Sato T. Electrostatic collection of submicron particles with the aid of electrostatic agglomeration promoted by particle vibration[J]. Powder Technology, 2003(135): 266-284.
- [21] Dong S, Lipkens B, Cameron T M. The effects of orthokinetic collision, acoustic wake, and gravity on acoustic agglomeration of polydisperse aerosols[J]. Journal of Aerosol Science, 2006, 37(4): 540-553.
- [22] Acheson D J. Elementary fluid dynamics[M]. Oxford University Press, 1990: 28-30.
- [23] Hoffmann T L. An extended kernel for acoustic agglomeration simulation based on the acoustic wake effect[J]. Journal of Aerosol Science, 1997, 28(6): 919-936.
- [24] Hoffmann T L, Koopmann G H. Visualization of acoustic particle interaction and agglomeration: Theory evaluation[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1997, 101(6): 3421-3429.
- [25] Shaw D T, Tu K W. Acoustic particle agglomeration due to hydrodynamic interaction between monodisperse aerosols[J]. Journal of Aerosol Science, 1979, 10(3): 317-328.
- [26] Hoffmann T L, W. Chen, G. H. Koopmann, et al. Experimental and numerical analysis of bimodal acoustic agglomeration[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1993, 115(3): 232-240.



张光学

收稿日期: 2008-11-26。

作者简介:

张光学(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事燃烧和颗粒物的研究, zhangguangxue@zju.edu.cn;

刘建忠(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事主要从事煤燃烧和污染物排放与控制技术;

周俊虎(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事热能工程、水煤浆燃烧理论与技术、煤的高效低污染燃烧、脱硫等方面的研究;

岑可法(1935—), 男, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 主要从事废弃物利用、洁净煤燃烧与气化、工程气固多相流动等方面研究。

(责任编辑 王庆霞)