

变频声波团聚超细液滴气溶胶的实验研究

姚辉辉,张光学,吴林陶,庞颖钢

(中国计量大学能源工程研究所,浙江杭州310018)

摘要: 声波团聚技术是细颗粒物排放控制领域极具潜力的预处理方法。为提高团聚效率,提出了变频声波团聚的新方法。以热雾机产生的超细液滴气溶胶为研究对象,进行了定频与变频声波的团聚实验并比较两种条件下的团聚效率。此外,还实验研究了变频声波各种参数对团聚效率的影响。结果表明:在实验条件为10 W声功率、30 s团聚时间的情况下,6 kHz向1 kHz线性降低的变频声波处理30 s后,相对液滴含量较6 kHz定频声波条件下低8.12%,这表明变频声波符合液滴生长规律,对粒径不断变化的液滴团聚效率更高;当声功率较小时,提高声功率将使得团聚效率成比例地增加,直到相应的非线性声效应变得明显为止;较高的初始质量浓度意味着液滴间距更短,可显著提高声波引起的液滴间碰撞概率和团聚概率。

关键词: 声波团聚;PM_{2.5};团聚效率;声功率;初始质量浓度

中图分类号:X513 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.07.009

[引用本文格式]姚辉辉,张光学,吴林陶,等.变频声波团聚超细液滴气溶胶的实验研究[J].热能动力工程,2021,36(7):54-59. YAO Hui-hui, ZHANG Guang-xue, WU Lin-tao, et al. Experimental study on fine droplet aerosol removal by constantly-variable-frequency acoustic agglomeration[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(7): 54-59.

Experimental Study on Fine Droplet Aerosol Removal by Constantly-Variable-Frequency Acoustic Agglomeration

YAO Hui-hui, ZHANG Guang-xue, WU Lin-tao, PANG Ying-gang

(Institute of Energy Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, China, Post Code: 310018)

Abstract: Acoustic agglomeration is regarded as a promising pretreatment to control the emission of fine particles. In order to improve agglomeration effect, a new method of constantly-variable-frequency acoustic agglomeration was proposed. Taking the fine droplet aerosol produced by the aerosol generator as experimental object, the agglomeration experiments of acoustic waves with fixed-frequency and constantly-variable-frequency were performed, and a comparative analysis of agglomeration efficiency under the two conditions was conducted. Besides, the influences of various parameters of constantly-variable-frequency acoustic waves on agglomeration efficiency were investigated. The experimental results show that after the acoustic wave treatment of linear decrease from 6 kHz to 1 kHz, the relative droplet content with constantly-decreasing-frequency is 8.12% lower than that with fixed-frequency of 6 kHz, at acoustic power of 10 W and agglomeration time for 30 s. It indicates that the constantly-variable-frequency acoustic wave is more

收稿日期:2020-10-30; 修订日期:2020-12-09

基金项目:国家自然科学基金(51876197);浙江省属高校基本科研业务费专项资金;浙江省新苗人才计划(2020R409045);中国计量大学学生科技专项(2020YW44);中国计量大学第二十三届学生科研计划(2020X23054)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(51876197); The Fundamental Research Funds for the Provincial Universities of Zhejiang; The New-shoot Talents Program of Zhejiang Province(2020R409045); Student Science and Technology Project of China Jiliang University(2020YW44); The 23rd Student Scientific Research Project of China Jiliang University(2020X23054)

作者简介:姚辉辉(1995-),男,浙江湖州人,中国计量大学硕士研究生。

通讯作者:张光学(1982-),男,浙江湖州人,中国计量大学教授。

effective on agglomeration of droplet aerosol whose diameters change constantly. The agglomeration efficiency increases proportionally with acoustic power at a low intensity, until the corresponding nonlinear acoustic effects become significant. The higher initial concentration means shorter separation distances among them, which will obviously improve the collision probability and agglomeration rate between droplets caused by acoustic waves.

Key words: acoustic agglomeration, $PM_{2.5}$, agglomeration efficiency, acoustic power, initial mass concentration

引言

在一些工业生产活动中会产生大量超细液滴气溶胶,而其液滴细颗粒往往带有其他杂质,若不经过有效的捕集处理而排放入空气将会对人体和环境造成极大危害^[1]。湿法烟气脱硫系统使用石灰石浆料作为吸收剂在脱硫塔中进行喷雾,雾化液滴与燃煤烟气逆流接触并反应以吸收 SO_2 ^[2]。然而,由于液滴粒径较小,相当一部分雾化液滴难以被后续的设备捕获而排放入大气。液滴内水分蒸发后,残留的细小固体颗粒形成主要的空气污染物 $PM_{2.5}$ ^[3-4]。根据《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014-2020年)》要求,东部地区新建燃煤电厂烟尘排放标准不得超过 10 mg/m^3 的质量浓度^[5]。因此,快速有效去除超细液滴是一项艰巨的任务。

声波团聚是一种气溶胶预处理技术,利用高强声场促进粒子间的相对运动和快速团聚,平均粒径的增加提高了沉降速率及后续脱除效率^[6]。近年来,声波团聚技术已成为潜在的超细液滴及细颗粒物的减排手段^[7]。

程等人^[8]以 $600\sim 3\,000\text{ Hz}$ 的频率对 NH_4Cl 气溶胶进行声波团聚实验研究,结果表明声波团聚效率与频率密切相关,该实验中最佳团聚频率为 3 kHz 。Volk 等人^[9]将粒径范围为 $0.1\sim 1\ \mu\text{m}$ 的炭黑固体颗粒作为测试气溶胶,研究声压级、频率、颗粒浓度以及停留时间对声波团聚效率的影响,发现其最佳频率为 3 kHz 。张等人^[10]研究了一种声场结合液体黏合剂提高团聚效率的新方法,发现其促进作用非常显著。声功率为 17 W 时,团聚效率为 63% ;而声场中添加液体粘合剂后,当声功率仅为 2.5 W 时,团聚效率就已达到 $75\%\sim 85\%$ 。另外,用于模仿火灾烟雾的聚苯乙烯浓烟,在单一声场条

件下的最佳频率为 1.5 kHz ^[11]。刘等人^[12]实验研究了燃煤飞灰颗粒在声波团聚下的影响。当声波频率为 1.4 kHz 时,燃煤飞灰颗粒的浓度降低了 68.4% 。为了进一步提高团聚效率,近年来出现了声波团聚与其他方法相结合的实验研究,如添加种子颗粒、液滴^[13]及化学团聚剂^[14]。

尽管研究人员实验中使用的声波频率范围很广,但每组实验中的频率仍是固定的,一直以同一频率的声波作用于气溶胶研究其团聚效率,并且着重探究其最佳团聚频率。实际上,由于液滴团聚粒径不断变化,而最佳团聚频率由颗粒粒径分布决定,因此在整个团聚过程中,最佳团聚频率并非单一恒定值,而是持续变化的。基于粒径与声波团聚最佳频率之间的关系,理论上,变频声波应更适于声波团聚超细颗粒物。

本文提出了一种利用变频声波进行液滴气溶胶团聚的新模式。以超细液滴为对象,实验研究了多个因素对声波团聚效率的影响,包括频率变化方式、声功率和液滴气溶胶初始质量浓度等。以提供一种效率更高、能耗更低的气溶胶声波团聚方法。

1 实验设备及方法

实验系统如图 1 所示,超细液滴气溶胶由热雾机(AG 1000 W)产生。团聚室由高度 200 mm 、内径 100 mm 的有机玻璃圆管制成。声波信号由信号发生器(型号 SFG-1013)输出,经由功率放大器(RMX 2450)放大后输入压缩式驱动器(SH 7531- $8\ \Omega$),经号角将声音放大处理后,变频声波进入团聚室内。经过大量实验后,变频声波频率范围选取为 $6\sim 1\text{ kHz}$,频率呈线性降低。

实验所用气溶胶原料是以甘油基烟油与纯净水进行 $1:1$ 混合而成,经恒温热雾机加热均匀产生液滴气溶胶,且该成分气溶胶可有效减小水分在壁面

冷凝带来的测量影响。通过 PDA (Phase Doppler Anemometry) 测量系统测量超细液滴气溶胶粒径分布,其结果如图 4 中“初始状态”曲线,呈现双峰分布,且粒径分布集中在 $5 \sim 20 \mu\text{m}$ 之间。

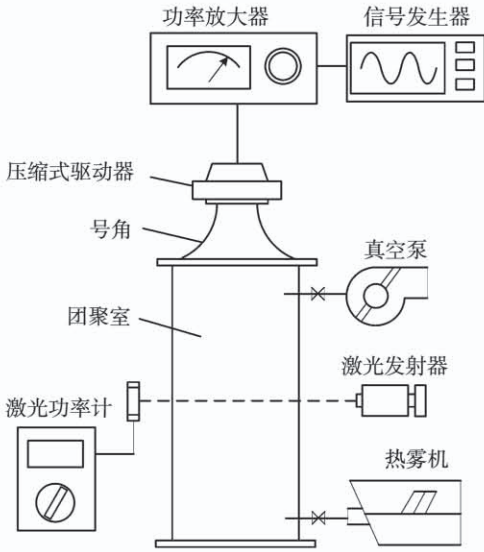


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Experimental set-up

根据 Lambert-Beer 定律,由于散射和吸收,穿过气溶胶的激光强度会降低,透射光强计算式为^[11]:

$$I_t = I_\lambda \exp(-KL) \quad (1)$$

式中: I_t —声波作用时间为 t 时透过团聚室内液滴气溶胶的激光强度; I_λ —入射光强度; K —气溶胶消光系数; L —气溶胶中的光程。

通过实时计算测量透射的激光强度来推算液滴气溶胶浓度的变化,壁面因素已经纳入计算,透射率可由激光强度的衰减数值来计算,其表达式为:

$$T_t = \frac{I_t}{I^*} \times 100\% \quad (2)$$

式中: T_t —声波作用时间为 t 时团聚室内液滴气溶胶颗粒的透光率; I^* —团聚室内无液滴气溶胶时的透射激光强度。

Manoucheri^[15] 提出了气溶胶体积分数、质量浓度与透光率之间的计算关系式:

$$\frac{V_t}{V_0} = \frac{\ln(T_t)}{\ln(T_0)} \quad (3)$$

式中: V_t —声波作用时间为 t 时团聚室中液滴气溶胶的体积分数; V_0 —液滴气溶胶的初始体积分数;

T_0 —初始气溶胶透光率。透光率对数的比值准确地反映了气溶胶体积分数比值的变化。

为了定量地比较团聚效率,将声波作用时间为 t 时的液滴气溶胶质量浓度百分比定义为相对液滴含量 η :

$$\eta = \frac{M_t}{M_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中: M_t —声波作用时间为 t 时团聚室内液滴气溶胶的质量浓度; M_0 —团聚室内液滴气溶胶的初始质量浓度。

2 超细液滴在变频声场中的团聚机理

液滴在声场中发生团聚的过程较为复杂,而关于声波团聚的研究发展至今,被广泛认可的液滴团聚机理主要包括同向团聚机理、声波尾流效应和声致湍流作用^[16-17]。

同向团聚机理作为气溶胶声波团聚最重要的机理之一,在微观尺度对液滴团聚做出了合理的解释:粒径大小不同的液滴被振荡的流体介质所挟带的程度不同,这将导致其发生相对运动而产生碰撞并团聚融合^[11]。图 2 显示的是同向团聚机理。在一个声波周期中,液滴颗粒物在团聚体积内发生相对运动并碰撞融合,大液滴将周围小液滴进行收集,有效降低了液滴气溶胶的质量浓度。

频率的变化将会引起整体团聚效率的改变。对于某一给定粒径分布的气溶胶,存在一个最佳团聚频率使得团聚效率最高。事实上,在团聚进行的同时,气溶胶液滴之间发生碰撞团聚而导致粒径随之增大,理论上,其对应的最佳团聚频率也将发生偏移。根据 Brand 等人^[18] 的研究,粒径与最佳团聚频率 f_{op} 的计算式为:

$$f_{op} = \frac{9\sqrt{3}v}{\pi\rho_p d^2} \quad (5)$$

式中: ρ_p —液滴密度; v —气体的切变粘滞系数; d —液滴直径。

声波使得液滴团聚体粒径增大,惯性也随之增大,最佳团聚频率向低频滑移,固定频率声波无法满足实时变化的液滴粒径,而变频声波可以较为吻合粒径变化趋势,保持较强的挟带作用,团聚效率将高于定频声波。

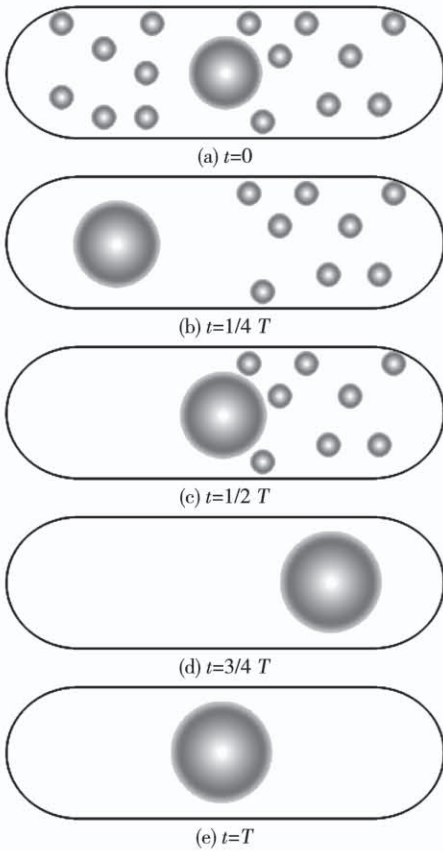


图2 同向团聚机理示意图

Fig.2 Schematic diagram of orthokinetic interaction

3 实验结果与分析

3.1 定频与变频声波团聚效率对比

团聚室内液滴气溶胶初始透光率几乎为0%，在声功率为10 W的条件下，变频和定频声波对液滴气溶胶相对液滴含量的影响如图3所示。4 kHz对液滴的团聚效率最低，30 s后团聚室内仍存57.36%相对液滴含量。6 kHz声波取得了定频声波中较好的团聚效率，10 s时团聚室内相对液滴含量为20.72%，声波作用30 s后，相对液滴含量仅为12.90%。5与7 kHz声波团聚效率均次于6 kHz，即6 kHz在本实验液滴气溶胶的最佳团聚率范围内。而变频声波(6 kHz向1 kHz线性降低)在10 s时间内，将团聚室内相对液滴含量降至15.76%，团聚进行至30 s后，液滴几乎被消除干净，其相对液滴含量仅为4.78%。

比较各个定频声波，6 kHz频率团聚效率较为突出，优于5与7 kHz声波，这是由于6 kHz频率声

波对该粒径分布的液滴气溶胶挟带作用较强，液滴间相对运动程度剧烈，团聚效率较高。当频率开始下降，团聚效率逐渐降低，而频率降至2 kHz以下时，声波对空气的扰动程度加剧，声波尾流和声致湍流占主导作用，团聚效率呈现一定程度的提高。变频声波以实时变化的频率适应液滴粒径生长规律，使得声波在团聚过程中保持较强的挟带作用，进而提高了总体的团聚效率水平。这是因为由声波引起的空气振动会对液滴产生挟带作用，各定频的声波对相同粒径的液滴挟带效果不同，频率较高的声波往往容易挟带粒径较小的液滴，而低频声波则与之相反，适时调整频率可获得较定频声波更高的团聚效率^[19]。

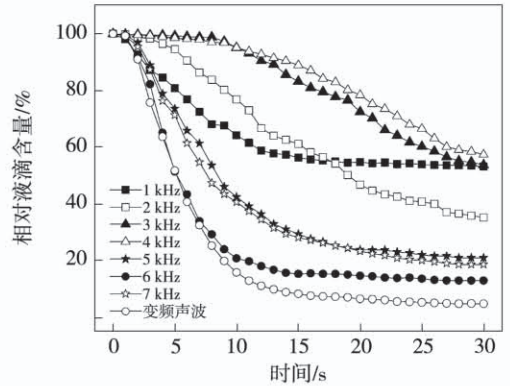


图3 变频与定频声波对气溶胶相对液滴含量的影响

Fig.3 The influence of constantly-variable-frequency and fixed-frequency acoustic waves on relative droplet content of aerosol

图4为超细液滴气溶胶在声波处理前后的粒径分布图。向超细液滴气溶胶中施加声功率为10 W、频率为6 kHz的定频声波后，各粒径范围的液滴数量均呈现一定程度的下降，5~15 μm之间的超细液滴减少明显，总体仍为双峰分布。以声功率为10 W的变频声波作用于团聚室内超细液滴，几乎所有粒径分布下的液滴颗粒数量均大幅下降，并且其液滴消除量大于6 kHz定频声波处理效果。

3.2 声功率的影响

通过向气溶胶施加声场使得整个气体介质产生振荡，从而导致颗粒间发生相对运动而碰撞并团聚。图5为变频声波声功率对液滴气溶胶相对液滴含量的影响。当声功率为3 W时，直至10 s才可将相对

液滴含量降至 40% 以下,并且 30 s 后团聚室内相对液滴含量仍为 16.91%。将声功率提高至 8 W,变频声波团聚效率明显提升,将相对液滴含量降低至 40% 只需 4 s,且声波处理 30 s 后团聚室内相对液滴含量已降至 6.87%。继续提升声功率至 13 W,变频声波团聚效率进一步提高,但提升程度较为局限,并且 30 s 后存留于团聚室内的相对液滴含量较 8 W 声功率仅减少 4.67%。当声功率达到一定阈值后,继续提高功耗其团聚效率提升程度有限,该现象是由于团聚室内声场趋于饱和,继续提高声功率将致使二次谐波效应明显增强^[20]。因此,在工业应用中,应兼顾能耗与团聚效率,合理选择声功率,使经济效益最大化。

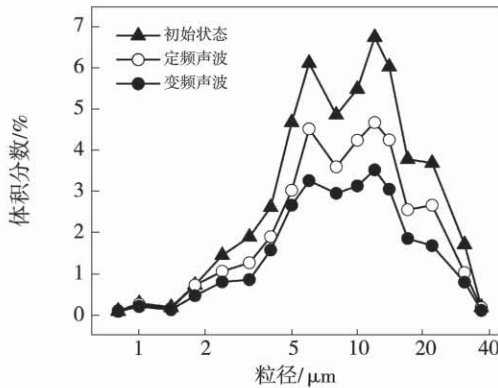


图 4 声波团聚前、后液滴气溶胶粒径分布

Fig. 4 Particle size distribution of droplet aerosol before and after acoustic agglomeration

3.3 初始质量浓度的影响

图 6 是声功率 10 W、团聚时间 30 s 条件下,变频声波对不同初始质量浓度液滴气溶胶的相对液滴含量随时间变化的示意图。由图可得,气溶胶初始质量浓度越大,变频声波对其团聚效率越高,并且最终的相对液滴含量较为接近。初始质量浓度为 $3.5 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$ 的液滴气溶胶在 6 s 内已将相对液滴含量降至 10% 以下,其 30 s 后相对液滴含量仅为 0.73%。而初始质量浓度为 $1.5 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$ 的液滴气溶胶也具有较为可观的团聚效率,10 s 时将相对液滴含量降低至 18.63%,在 30 s 团聚时间后,相对液滴含量也仅为 5.49%。初始质量浓度为 $2.5 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$ 的液滴气溶胶团聚效率处于两者之间。

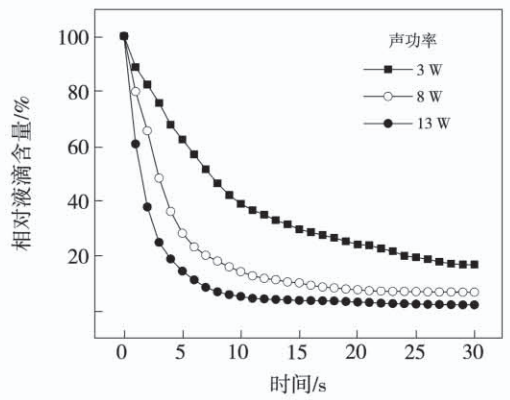


图 5 变频声波声功率对气溶胶相对液滴含量的影响
Fig. 5 The influence of sound power on relative droplet content of aerosol

由实验结果可知,初始质量浓度越大,液滴颗粒数目密度也越大,液滴颗粒之间的间距更小,液滴颗粒之间发生相对运动而碰撞的概率也越大,这使得团聚更容易进行。在团聚进行至最后,3 种浓度下的液滴含量非常接近。这是由于液滴粒径增长一个数量级需要团聚大量的小液滴,在团聚后期,团聚室内颗粒浓度将趋向于相近的水平。因此,声波团聚技术更适用于浓度较大的液滴气溶胶以降低其浓度,而非完全团聚消除气溶胶。

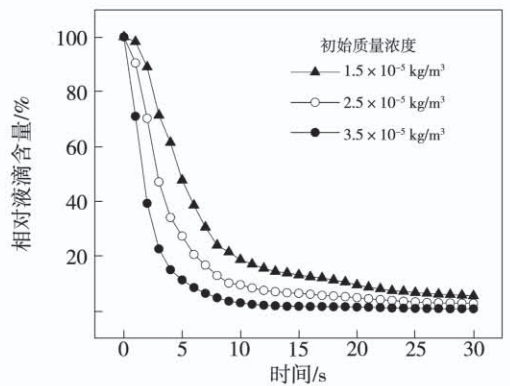


图 6 初始质量浓度对变频声波团聚效果的影响
Fig. 6 The influence of initial mass concentration on constantly-increasing-frequency acoustic wave agglomeration

4 结 论

提出变频声波团聚模式,并对超细液滴气溶胶进行了试验研究,深入探究了频率变化方式、声功率

和气溶胶初始质量浓度等因素对变频声波团聚超细液滴气溶胶效果的影响,得到以下结论:

(1) 对比于定频声波,变频声波对超细液滴气溶胶的团聚更为有效。同功率下 6 kHz 向 1 kHz 线性降低的变频声波处理 30 s 后,相对液滴含量较 6 kHz 定频声波低 8.12%。由于气溶胶受到声波团聚影响,液滴粒径增大,最佳团聚频率向低频滑移,而变频声波能很好吻合此规律,使得气体介质随着频率变化过程中对液滴颗粒的挟带作用一直保持较高的水平,液滴颗粒之间更易碰撞和团聚,提高了整体的团聚效率。

(2) 声功率越大,液滴气溶胶团聚越快,但当声功率达到一定程度时,团聚效率提升速率减缓,工业应用中应衡量功耗与团聚效率的关系。

(3) 初始质量浓度越高,声波团聚速率越快,而最终的团聚处理效果较为接近。由此可见,声波团聚可用于短时间内迅速减少高浓度气溶胶的颗粒数目,但无法完全消除气溶胶,当单位体积内颗粒数目减少至某一阈值时,声波团聚作用也将达到其极限。

参考文献:

[1] ZHEN Li,JIANG Jing-kun,MA Zi-zhen,et al. Influence of flue gas desulfurization (FGD) installations on emission characteristics of PM_{2.5} from coal-fired power plants equipped with selective catalytic reduction (SCR)[J]. Environmental Pollution,2017,230: 655 - 662.

[2] DOU Bin-lin,PAN Wei-guo,JIN Qiang,et al. Prediction of SO₂ removal efficiency for wet flue gas desulfurization[J]. Energy Conversion and Management,2009,50(10):2547 - 2553.

[3] MA Shuang-chen,CHAI Jin,JIAO Kun-ling,et al. Environmental influence and countermeasures for high humidity flue gas discharging from power plants[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2017,73: 225 - 235.

[4] WILHELM H,LAMINGER T. PM_{2.5} or respirable dust measurement and their use for assessment of dust separators[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers,2019,94: 53 - 61.

[5] 吴瑞鹏,谌文澜,安连锁,等. 多峰分布颗粒物 PM_{2.5} 的化学团聚实验研究[J]. 热能动力工程,2018,33(5): 113 - 118.

WU Rui-peng,SHEN Wen-lan,AN Lian-suo,et al. Experimental study on chemical agglomeration of PM_{2.5} with multi-peak distribution[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018,33(5): 113 - 118.

[6] JIA L,TAN Y,EDWARD A. Emissions of SO₂ and NO_x during oxy-fuel CFB combustion tests in a mini-circulating fluidized bed

combustion reactor[J]. Energy & Fuels,2010,24(2):910 - 915.

[7] YAN Jin-pei,CHEN Li-qi,QI Lin. Removal of fine particles in WFGD system using the simultaneous acoustic agglomeration and supersaturated vapor condensation[J]. Powder Technology,2017,315: 106 - 113.

[8] CHENG M T,LEE P S,Berner A,et al. Orthokinetic agglomeration in an intense acoustic field[J]. Journal of Colloid & Interface Science,1983,91(1): 176 - 187.

[9] VOLK M,MOROZ W J. Sonic agglomeration of aerosol particles [J]. Water Air & Soil Pollution,1976,5(3):319 - 334.

[10] ZHANG Guang-xue,ZHANG Li-li,WANG Jie,et al. Improving acoustic agglomeration efficiency by addition of sprayed liquid droplets[J]. Powder Technology,2017,317: 181 - 188.

[11] ZHANG Guang-xue,MA Zhen-fang,SHEN Jian,et al. Experimental study on eliminating fire smokes using acoustic agglomeration technology[J]. Journal of Hazardous Materials,2020,382:121089.

[12] LIU Jian-zhong,ZHANG Guang-xue,ZHOU Jun-hu,et al. Experimental study of acoustic agglomeration of coal-fired fly ash particles at low frequencies [J]. Powder Technology,2009,193(1): 20 - 25.

[13] ZHANG Guang-xue,WANG Jin-qing,CHI Zuo-he,et al. Acoustic agglomeration with addition of sprayed liquid droplets: Three-dimensional discrete element modeling and experimental verification [J]. Chemical Engineering Science,2018,187:342 - 353.

[14] 吴瑞鹏,谢昱卓,刘凯,等. 化学联合声波团聚的正交实验优化和单因素分析[J]. 热能动力工程,2020,35(10): 103 - 109.

WU Rui-peng,XIE Yu-zhuo,LIU Kai,et al. Orthogonal experiment and univariate analysis in chemical and acoustic co-agglomeration[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2020,35(10):103 - 109.

[15] MANOUCHERI M,EZEKOYE O A. Polystyrene soot agglomeration enhancement in an ultrasonic acoustic field [J]. Hazardous Waste & Hazardous Materials,1996,13(1):121 - 130.

[16] LEE P S,CHENG M T,SHAW D T. The influence of hydrodynamic turbulence on acoustic turbulent agglomeration[J]. Aerosol Science and Technology,1982,1(1): 47 - 58.

[17] DONG Shao-zeng,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, 2005,37(4):540 - 553.

[18] BRANDT O,FREUND H,HIEDEMANN E. Zur theorie der akustischen Koagulation [J]. Kolloid-Zeitschrift, 1936, 77 (1): 103 - 115.

[19] YAN Jin-pei,LIN Qi,ZHAO Shu-hui,et al. Effect of seed nuclei combined with acoustic field on fine particles removal [J]. Powder Technology,2018,340: 8 - 16.

[20] ILINSKIY A,LIPKENS B,LUCAS T S,et al. Nonlinear standing waves in an acoustical resonator[J]. Journal of the Acoustical Society of America,1998,104(5):2664 - 2674.