

声波与其他方法联合作用脱除细颗粒物的研究进展

胡惠敏¹, 李瑞阳^{2,1}, 蔡萌¹, 董智广¹, 赵芳¹

(1. 上海应用技术学院 机械工程学院, 上海 201418; 2. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 声波团聚可作为一种有效降低可吸入颗粒物污染的预处理措施. 针对现有声源条件下, 单一的声波团聚作用对细颗粒物的清除效率较低且能耗较大的缺点, 分析采用声波团聚联合其他方法共同作用来高效脱除细颗粒物. 分别阐述种子颗粒、喷雾、蒸汽相变联合声波团聚作用的团聚机理及实验装置, 具体分析了3种联合作用提高声波团聚效率的理论依据及影响因素, 对比了3种联合作用的优缺点及适用范围, 丰富了声波团聚理论, 并彰显了联合声波团聚的优势. 此外, 提出联合声波团聚的研究方向, 为高效脱除细颗粒物、降低环境污染提供了更好的途径.

关键词: 声波团聚; 细颗粒物; 种子颗粒; 喷雾; 蒸汽相变

中图分类号: X 513 **文献标志码:** A

Review of the Technique of Removing Fine Particles by the Combination of Acoustic and Other Methods

HU Huimin¹, LI Ruiyang^{2,1}, CAI Meng¹, DONG Zhiguang¹, ZHAO Fang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China;

2. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Acoustic agglomeration is an effective pretreatment method to reduce inhalable particulate pollution. But the single acoustic agglomeration costs more energy and the efficiency of fine particles removal is relatively low under the existing sound source condition. It is common to combine the acoustic agglomeration with other methods to effectively remove the fine particles. The agglomeration mechanism and experimental sets for the technique of seed particles, spray and vapor condensation combined with acoustic agglomeration were introduced respectively. The theoretical basis of improving the efficiency and the influencing factors of the three combined methods were analyzed in detail. The advantages and disadvantages and the application area of the three combined methods were compared. The agglomeration theory is enhanced and the advantages of the combined processes stand out which proposes the research direction for the combination agglomeration. The method presented provides a better way to remove fine particles and reduce environmental pollution efficiently.

Keywords: acoustic agglomeration; fine particles; seed particles; spray; vapor condensation

收稿日期: 2015-01-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61071203, 60772149); 上海市“绿色能源与动力工程”科研团队资助项目(1020K121001)

第一作者: 胡惠敏(1988-), 女, 硕士研究生. 研究方向: 声波团聚. E-mail: huhuimin1988@163.com

通信作者: 李瑞阳(1957-), 男, 教授. 研究方向: 声波团聚、强化传热. E-mail: liruiyang@usst.edu.cn

存在于大自然的细颗粒物有 PM100, PM10, PM2.5 等. 由于细颗粒物(PM2.5)污染不仅大幅降低大气能见度, 高频引发交通事故, 影响人们正常工作、生活, 且严重危害人体健康, 致使呼吸道感染, 致癌、致畸、致突变机率提高, 故细颗粒物(PM2.5)污染已成为目前人类所面临的最严重的大气污染问题^[1-4]. PM2.5 主要来源于煤、石油等化石燃料燃烧所排放的残留物, 并且大多附带重金属等有毒、有害物质. 我国煤矿资源丰富, 煤是主要的能源供应方式, 因此, 降低燃烧细颗粒物的排放对我们的生活环境具有非常重要的现实意义^[5-6]. 目前, 我国常规除尘设备对 PM2.5 的捕集效率很低, 大量 PM2.5 逃逸, 进入大气, 加剧了大气污染, 故需在除尘设备前设置预处理设施, 使细颗粒物在物理或化学作用下团聚长大, 生成大颗粒, 再用传统除尘设备加以清除, 从而减少细颗粒物的排放, 提高除尘效率. 针对细颗粒物的物理和化学特征, 常见的预处理技术主要有声波团聚、化学团聚、热团聚、磁团聚、电凝并等^[7-8]. 其中, 声波团聚技术不仅有较理想的除尘效率, 同时不受高温高压条件的限制, 而且团聚设备简单, 是广大学者研究的重点^[9-11].

1 声波团聚及联合作用概述

声波团聚作为一种有效的预处理技术, 指粒径不同的细颗粒物在高强度声场作用下发生相对运动, 进而提高它们的碰撞团聚效率, 从而减少细颗粒物的浓度. 大量实验研究表明^[12-14], 在现有声源条件下, 采用单一的声波团聚技术对细颗粒物的清除效率较低, 且能耗较大. 因此, 有必要进一步探索开发高效、节能、环保型细颗粒脱除技术. 目前, 国内外学者进行了大量的实验研究, 结果表明, 声波团聚联合其他除尘技术的细颗粒团聚效果显著高于单一声波团聚效果. 声波团聚联合其他除尘技术中较常见的技术主要包括种子颗粒联合声波团聚技术、喷雾联合声波团聚技术、相变联合声波团聚技术. 为此, 本文将重点论述三种联合团聚技术提高团聚效率的理论依据及联合团聚过程中的影响因素, 为后期实验研究及工业应用提供理论基础及研究方向.

2 种子颗粒联合声波团聚

1993 年, Hoffmann 等^[15]在频率为 44 Hz、声压级为 160 dB 的声场中, 添加粒径为 88 μm 的大颗粒

石灰石, 观察燃煤飞灰的团聚效果, 结果表明, 添加大颗粒石灰石后的声波团聚效率比单独声场作用时显著提高. 赵兵等^[16]采用单一分布的直径为 15 μm 聚甲基丙烯酸甲酯颗粒作为种子颗粒, 进行燃烧源细颗粒声波团聚实验研究, 结果表明, 当声压级超过 160 dB 时, 颗粒数浓度脱除效率高达 82%, 比单一声波团聚效率提高了 12%.

2.1 种子颗粒提高声波团聚效率的理论依据

声波团聚的机理非常复杂, 主要包括同向团聚机理和流体力学作用力, 其中同向团聚被认为是最重要的机理, 也被广大学者普遍认可^[17-19]. 它主要描述了声波对颗粒的夹带作用, 由于不同粒径的颗粒所受的夹带作用不同, 使得不同粒径的颗粒产生相对运动, 相互靠近并产生碰撞. 当颗粒粒径大于 2 μm 时, 夹带作用基本为零, 可定义为大颗粒; 而当粒径小于 2 μm 时, 夹带系数接近 1, 定义为小颗粒. 大、小颗粒的相对夹带系数差距较大, 大颗粒充当收集核, 小颗粒粘附在其表面, 团聚效率明显增加. 所以加入粒径较大的种子颗粒, 增大了大、小颗粒的相对夹带系数, 促进了颗粒之间的相对运动, 并且种子颗粒增加了团聚体积, 使小颗粒团聚效率明显增加^[15]. 另外, 声波团聚室体积一定, 颗粒总数增加, 即团聚室内颗粒数目浓度增加, 则声波团聚效率提高. 所以引入石灰石种子颗粒, 团聚室内的颗粒数目浓度增加, 也会改善声波团聚效果.

2.2 种子颗粒联合声波团聚过程中的影响因素

种子颗粒联合的声波团聚过程受多种参数影响, 包括声波频率、声压级、停留时间、种子颗粒添加量、种子颗粒大小等因素. 王洁等^[20]通过一套完整的声波团聚实验设备, 如图 1 所示, 其中 ELPI 为静电低压撞击器. 联合作用下, 各操作参数对声波团聚的影响情况为:

a. 频率会影响联合声波团聚过程, 并且存在最佳频率, 只有在最佳频率时, 团聚效率最高. 在其他频率时, 添加种子颗粒后团聚效率较之前大幅提高, 表明种子颗粒能在较宽频率范围内改善声波团聚作用性能.

b. 声压级越大, 种子颗粒联合声波团聚效率越大. 并且在较低声强时, 添加种子颗粒后团聚效率上升幅度变大, 说明添加种子颗粒能促进较低声强的团聚效果, 从而使声波能耗降低.

c. 停留时间过长或过短均不利于联合过程团聚效率的提高, 通常以 4 s 最佳. 但当停留时间较短时, 添加种子颗粒后团聚效率明显提高, 说明添加种

子颗粒能降低设备要求,从而降低投资费用。

d. 种子颗粒联合声波团聚过程中,种子颗粒的添加量需适中,添加量过多,单个种子颗粒团聚的平均细颗粒数目降低,声波团聚效率增幅反而降低。

e. 种子颗粒联合声波团聚过程中,种子颗粒的粒径需适中。若粒径过大,颗粒受到的重力也会增大,种子颗粒会很快沉降,缩短了与细颗粒作用的时间,不利于团聚。若粒径过小,种子颗粒起不到收集核的作用,相对运动不够明显,降低细颗粒碰撞效率。

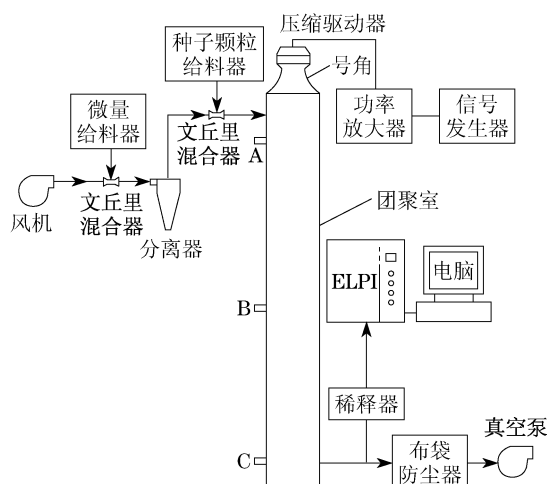


图1 种子颗粒联合声波团聚示意图^[20]

Fig.1 Schematic diagram of acoustic agglomeration combined with seed particles^[20]

3 喷雾联合声波团聚

20 世纪 50 年代就有人提出通过增加燃煤飞灰气溶胶的湿度来增强声波团聚的效果^[21-22],但相关的实验研究较少。直到 2000 年, Riera-Franco 等^[23]通过在频率为 20 kHz 的声源中,给柴油发动机尾气的细颗粒喷入体积分数为 6% 的水蒸气,发现细颗粒数目减少量增至 56%,比单一声波提高了 31%,明显提高了团聚效率。

3.1 喷雾提高声波团聚效率的理论依据

声波团聚过程中,颗粒受到多种作用力,包括范德华力、毛细管力和静电力等^[24]。静电力为两个静止带电体之间的相互作用力,在喷雾联合声波团聚过程中无电场作用,静电力可忽略。范德华力是分子间作用力,普遍存在于颗粒之间,颗粒彼此靠近并粘附在其表面,是颗粒物团聚的主要原因。毛细管力是液体分子的作用力,湿度较低时,颗粒间的含水量不

足以形成液桥,范德华力起主要作用,促进颗粒在声场下相互碰撞,但此时的范德华力数量级较低,难以使颗粒高效地粘附成大团聚体。当喷入水雾后,随着颗粒物湿度的增加,液体分子间会形成液桥,此时的液桥力数量级远大于范德华力。由于雾滴对颗粒物的润湿性较好,液滴在颗粒物表面铺展开并具有一定的液桥力作用,促进颗粒物团聚,并通过液桥力的相互架桥形成更大的团聚体积^[25]。因此,喷雾联合声波团聚可明显提高团聚效率。

由于纯水雾滴对燃煤飞灰颗粒的润湿性较好,可明显改善声波团聚效果,实验证明喷雾联合声波团聚效率增幅可达 40% 以上^[26]。另外,在燃煤电厂中,水蒸气是副产品,很容易获得,成本也不高。因此,研究喷雾联合声波团聚燃煤飞灰细颗粒对工业应用有重要指导意义。

3.2 喷雾联合声波团聚过程中的影响因素

喷雾联合声波团聚是在声波团聚的基础上加一套雾化装置,如图 2 所示。目前已有一些实验验证喷雾联合声波团聚可增强团聚效果,并且团聚过程受多种参数影响^[23,26-30]。喷雾联合声波团聚过程中,频率会直接影响团聚效率,频率过高或过低都会使团聚效率下降,只有在最佳频率时团聚效率最高。但相比声波单独作用时,喷雾联合作用可使声波团聚在较宽频率范围内有较好的团聚效果。声压级增大,颗粒振幅增大,相对运动加剧,喷雾联合声波团聚效率上升。但当声压级较低时,喷雾联合声波团聚作用明显,说明喷雾联合作用可使声波团聚在较低声强下有较好的团聚效果,降低声波团聚能耗。

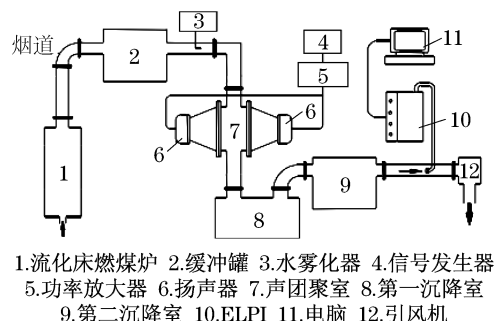


图2 喷雾联合声波团聚示意图^[30]

Fig.2 Schematic diagram of acoustic agglomeration combined with spray^[30]

此外,与声波单独作用相比,喷雾增湿是影响联合过程的关键因素。而从增湿团聚理论中可见,改善雾滴与粉煤灰颗粒物表面的接触特性,可明显提高颗粒团聚效率。王洁^[31]通过在纯水雾滴中加入表面活

性剂,使雾滴的表面张力降低,亲水、亲油性增强,从而使雾滴对粉煤灰颗粒物有更好的润湿性.实验比较了阴离子型表面活性 SDS 和非离子型表面活性剂 TX100,实验结果表明,在雾化溶液中加入两种表面活性剂后团聚效果均得到改善.当浓度合适时,与纯水雾相比,团聚效率提高了 10%~20%;与声波单独作用相比,团聚效率明显上升,上升幅度接近 70%.其中,阴离子表面活性剂 SDS 的效果略优于非离子表面活性剂 TX100,而且在工业应用中 SDS 对环境影响较小,且使用成本更低,因此选择 SDS 更有利.

4 相变联合声波团聚

蒸汽相变促进细颗粒物团聚,是指在过饱和蒸汽环境中,水蒸气会在细颗粒表面凝结,并同时产生热泳和扩散作用,促使细颗粒迁移并相互碰撞,从而促进细颗粒团聚长大.1951年, Schauer 等^[32]利用实验证实了蒸汽可促进细颗粒在其表面凝结长大; Yoshida 等^[33]通过实验研究了 4 种不同亚微米级颗粒在过饱和蒸汽中的团聚情况;颜金培等^[34-37]应用蒸汽相变原理促进燃煤细颗粒物在过饱和蒸汽中凝结长大,使细颗粒的平均粒径增大,再用传统除尘设备加以清除,从而提高细颗粒的脱除效率.

4.1 相变提高声波团聚效率的理论依据

相变联合声波团聚是指细颗粒在过饱和蒸汽环境中加入声场,此时声波团聚和相变团聚两种作用同时发生.声波在使细颗粒团聚长大的同时,会促进过饱和蒸汽与细颗粒发生异质核化^[38],形成胚胎滴,然后凝结成大粒度的含尘液滴,并从另一方面减少壁面凝结的损耗;过饱和蒸汽在细颗粒表面凝结长大,长大后的液滴与原烟气中的细颗粒,由于粒径差异,在声场中产生“双模态团聚”效应,又促进了细颗粒的碰撞团聚.因此,声波和蒸汽相变在细颗粒长大过程中相互促进,强化细颗粒的长大效果,提高团聚效率.

4.2 蒸汽相变联合声波团聚的影响因素

声波与相变联合作用下,细颗粒的脱除效率除了受声场参数的影响,还受蒸汽过饱和度的影响.蒸汽相变中,胚胎滴的凝结长大主要受水汽凝结和凝并两种机制的作用,因此,研究胚胎滴凝结长大需同时考虑水汽扩散和热传导的作用.此外,在凝结的同时还会发生液滴的蒸发过程,只有当凝结达到平衡时,效率才最高^[39-40].颜金培等^[41-42]通过将声波团聚室改造为声相变室(见图 3),使颗粒物受到声波与相变的耦合作用,实现细颗粒的高效脱除.实验结

果表明,细颗粒的团聚效率随蒸汽过饱和度的增大而提高,但只有当过饱和度超过一定限值时,脱除效率才会有显著提高.因为在低过饱和度时,细颗粒主要作用力虽然从范德华力变为毛细管力,但蒸汽无法凝结,不能明显提高团聚效率.当过饱和度从 1.0 增大到 1.2 时,蒸汽在细颗粒表面凝结长大形成液滴,并在声波场中充当收集核,促进细颗粒的团聚,脱除效率从 40%左右提高到 80%.

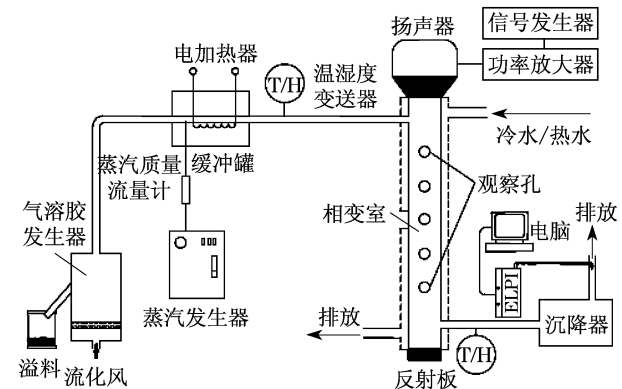


图 3 相变联合声波团聚示意图^[42]

Fig.3 Schematic diagram of acoustic agglomeration combined with vapor condensation^[42]

5 三种联合作用对比

介绍了种子颗粒联合声波团聚、喷雾联合声波团聚、相变联合声波团聚 3 种联合作用提高声波团聚效率的理论依据及影响因素,其各自的优缺点及适用范围如表 1 所示.

表 1 3 种联合作用对比

Tab.1 Comparison of the three combined processes

联合作用方式	优点	缺点	适用范围
种子颗粒	系统简单,操作方便	种子颗粒粒径需适中,提高效率不明显	一般含尘烟气
喷雾	实现水资源的重复利用,节约成本	喷雾需均匀	一般含尘烟气
相变	团聚效率大提高	团聚设备较复杂,相变室壁面易腐蚀,需与湿式除尘设备配套	含湿量较高的烟气

6 结 论

通过对 3 种联合作用的阐述、对比及分析,得出

如下结论:

a. 种子颗粒联合声波团聚、喷雾联合声波团聚、相变联合声波团聚对细颗粒的脱除效果均优于声波单独作用时的脱除效果,且3种联合声波团聚技术较易实现.特别地,在喷雾联合声波团聚过程中,水蒸气直接是燃煤电厂的副产品,既能节约成本,又能实现资源重复利用,故喷雾联合声波团聚是未来工业除尘技术的研究重点.

b. 对比3种联合作用,声波与相变联合的脱除效果要明显优于其他两种,但烟气与蒸汽在相变室内的混合过程中,热质交换的宏观与微观机制及过饱和和水汽环境的形成规律尚未明确,需进一步深入研究;相变作用适合含湿量较高的烟气,但蒸汽与细颗粒凝结于相变室壁面,可能增强壁面腐蚀;并且相变联合声波团聚需与可脱除水滴的除尘设备配套,不适宜与干式除尘器配套.

c. 3种联合作用的实验研究虽然有了很大进展,但是对其联合作用下的数学模型很少涉及,不能够很好地预测其实验结果,需进一步加强机理和理论研究,采用数值模拟的方法研究其联合团聚过程.

参考文献:

- [1] 徐旭常,姚强,刘惠永,等.燃烧生成的可吸入颗粒物[C]//燃烧源可吸入颗粒物的环境问题.北京:21世纪工程科技论坛,2001.
- [2] 董雪玲.大气可吸入颗粒物对环境和人体健康的危害[J].资源与产业,2004,6(5):50-53.
- [3] Moolgavkar S H. A review and critique of the EPA's rationale for a fine particle standard[J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2005, 42: 123-144.
- [4] García-Nieto P J. Study of the evolution of aerosol emissions from coal-fired power plants due to coagulation, condensation, and gravitational settling and health impact [J]. Journal of Environmental Management, 2006, 79(4): 372-382.
- [5] 隋建才,徐明厚,丘纪华,等.燃煤过程中可吸入颗粒物污染与我国能源发展[J].科技导报,2004(5):42-44.
- [6] Gene Tucker W. An overview of PM_{2.5} sources and control strategies[J]. Fuel Processing Technology, 2000, 65/66: 379-392.
- [7] 隋建才,徐明厚,丘纪华,等.煤燃烧中可吸入颗粒物的形成及其控制研究现状[J].热力发电,2004(12): 9-12.
- [8] 魏风,张军营,王春梅,等.煤燃烧超细颗粒物团聚促进技术的研究进展[J].煤炭转化,2003, 26(7): 27-31.
- [9] Caperan P, Somers J, Richter K. Acoustic agglomeration of sub-micron particles[J]. Journal of Aerosol Science, 1993, 24(S1): 593-594.
- [10] Komarov S V, Yamamoto T, Uda T, et al. Acoustically controlled behavior of dust particles in high temperature gas atmosphere [J]. ISIJ International, 2004, 44(2): 275-284.
- [11] Gallego-Juárez J A, Riera-Franco de Sarabia E, Rodriguez-Gorral G. Multifrequency acoustic chamber for the agglomeration and separation of particles suspended in gaseous effluents; 5769913[P]. 1998-06-23.
- [12] Gallego-Juárez J A, Riera-Franco de Sarabia E, Rodriguez-Corral G, et al. Application of acoustic agglomeration to reduce fine particle emissions from coal combustion plants[J]. Environmental Science and Technology, 1999, 33(21): 3843-3849.
- [13] 姚刚,赵兵,沈湘林.燃煤可吸入颗粒物声波团聚效果的实验研究和数值分析[J].热能动力工程,2006, 21(2): 175-178.
- [14] Rajesh B N. Effects of high intensity acoustic fields on sulfur dioxide capture and particle agglomeration in pulverized coal combustors [D]. Pennsylvania: Pennsylvania State University, 1996.
- [15] Hoffmann T L, Chen W, Koopmann G H, et al. Experimental and numerical analysis of bimodal acoustic agglomeration[J]. Journal of Vibration and Acoustics-Transactions of the ASME, 1993, 115(3): 232-240.
- [16] 赵兵,陈厚涛,徐进,等.声波与种子颗粒联合作用下细颗粒脱除的实验研究[J].动力工程,2007, 27(5): 785-788.
- [17] 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.
- [18] Tiwary R. Acoustic agglomeration of micron and submicron fly-ash aerosols [D]. Pennsylvania: The Pennsylvania State University, 1989.
- [19] 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.
- [20] 王洁,张光学,刘建忠,等.种子颗粒对声波团聚效率的影响[J].化工学报,2011, 62(2): 355-361.
- [21] Fahnoe F, Lindroos A E, Abelson R J. Aerosol build-up techniques[J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1951, 43(6): 1336-1346.
- [22] Denner H W, Neumann E. Industrial sonic

- agglomeration and collection systems[J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1949, 41(11): 2439 – 2442.
- [23] Riera-Franco de Sarabia E, Elvira-Segura L, González-Gómez 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.
- [24] Gonzalez T, Hoffmann T L, gallego J A. Visualization of hydrodynamic particle interactions; validation of a numerical model [J]. *Acta Acustica United with Acustica*, 2002, 88(1): 19 – 26.
- [25] 杨振楠, 郭庆杰, 李金惠. 气氛与湿度对燃煤飞灰颗粒声波团聚的影响[J]. *化工学报*, 2011, 62(4): 1055 – 1061.
- [26] Goldszal A, Bousquet J. Wet agglomeration of powders: from physics toward process optimization [J]. *Powder Technology*, 2001, 117(3): 221 – 231.
- [27] Capéran P, Somers J, Richter K, et al. Acoustic agglomeration of a glycol fog aerosol: influence of particle concentration and intensity of the sound field at two frequencies[J]. *Journal of Aerosol Science*, 1995, 26(4): 595 – 612.
- [28] 陈俊, 张军营, 魏凤, 等. 燃煤超细颗粒物喷雾团聚的模型[J]. *煤炭学报*, 2005, 30(5): 623 – 636.
- [29] 李德文. 利用声凝聚机理提高喷雾除尘效果的研究[J]. *中国安全科学学报*, 1993, 3(2): 32 – 37.
- [30] 陈厚涛, 赵兵, 章汝心, 等. 声波与雾化水滴联合作用增强燃煤 PM_{2.5} 脱除的实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(2): 35 – 40.
- [31] 王洁. 声波团聚及联合其他方法脱除燃煤飞灰细颗粒的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [32] Schauer P J. Removal of submicron aerosol particles from moving gas stream[J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1951, 43(7): 1532 – 1538.
- [33] Yoshida T, Kousaka Y, Okuyama K. Growth of aerosol particles by condensation[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1976, 15(1): 37 – 41.
- [34] 颜金培, 杨林军, 张霞, 等. 应用蒸汽相变机理脱除燃煤可吸入颗粒物实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(35): 12 – 16.
- [35] 杨林军, 颜金培, 沈湘林. 蒸汽相变促进燃烧源 PM_{2.5} 凝并长大的研究现状及展望[J]. *现代化工*, 2005, 25(11): 22 – 24.
- [36] Fan F X, Yang L J, Yan J P, et al. Experimental investigation on removal of coal-fired fine particles by a condensation scrubber[J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2009, 48(8): 1353 – 1360.
- [37] Yan J P, Bao J J, Yang L J, et al. The formation and removal characteristics of aerosols in ammonia-based wet flue gas desulfurization[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2011, 42(9): 604 – 614.
- [38] Smorodin V Y, Hopke P K. Condensation activation and nucleation on heterogeneous aerosol nanoparticles [J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2004, 108(26): 9147 – 9157.
- [39] Zapadinsky E, lauri A, Kulmala M. The molecular approach to heterogeneous nucleation[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2005, 122(11): 114709.
- [40] Yang L J, Bao J J, Yan J P, et al. Removal of fine particles in wet flue gas desulfurization system by heterogeneous condensation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, 156(1): 25 – 32.
- [41] 颜金培, 陈立奇, 杨林军. 燃煤细颗粒在过饱和氛围下声波团聚脱除的实验研究[J]. *化工学报*, 2014, 65(8): 3243 – 3249.
- [42] 颜金培, 陈立奇, 杨林军, 等. 声波与相变联合作用下细颗粒脱除的实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(20): 3282 – 3288.

(编辑: 董 伟)