

肖辉,舒未希,付丹红,等. 声波对气溶胶和云雾粒子聚并影响研究进展. 应用气象学报, 2021, 32(3): 257-271.
DOI: 10.11898/1001-7313.20210301

声波对气溶胶和云雾粒子聚并影响研究进展

肖 辉^{1)2)*} 舒未希¹⁾²⁾ 付丹红¹⁾²⁾ 冯 强³⁾ 孙 跃¹⁾ 杨慧玲¹⁾

¹⁾(中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴重点实验室, 北京 100029)

²⁾(中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049)

³⁾(中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094)

摘 要

声波对气溶胶和云雾粒子聚并的作用和影响是当今云雾物理和人工影响天气领域研究的前沿科学问题。已有研究表明:声聚并机制主要包括同向团聚机制、流体力学机制(包括共辐射压效应、共散射效应和声波尾流效应)和声致湍流机制等;气溶胶粒子在声场中的聚并现象是在多种声聚并机制共同作用下出现的;低频强声波在声聚并机制作用下会增加云雾滴粒子之间的相对运动,促进粒子间的碰并过程,对云雾滴生长和降水过程有显著的影响。但由于声波聚并过程的复杂性、实验条件的多样性和理论的局限性,使声聚并效率最高的最佳实验条件和参数配置依然具有很大的不确定性,需要进行大量实验与数值模拟的综合研究。今后应加强声聚并对云雾滴作用的云室和数值模拟研究,并开展声波对云雾过程和降水影响的野外综合观测试验评估,这对发展人工影响天气(如人工消雾、增雨等)新技术有重要的科学意义。

关键词: 声聚并; 气溶胶; 云雾粒子; 人工消雾和增雨

引 言

工业生产带来的粉尘和 PM_{2.5} 等大气颗粒物造成的污染问题日益严峻^[1-3], 因此, 迫切需要发展清除技术, 以应对工业生产过程中排放的各种气溶胶, 减少对大气的污染。研究发现, 气溶胶粒子在声波作用下, 其运动状态会受到影响, 粒子间会发生碰撞和合并^[4]。早在 20 世纪 20 年代, Wood 等^[5] 通过实验发现, 高强度超声振动产生的能量会对液体和其中的粒子产生压力, 迫使其运动。1931 年 Patterson 等^[6] 在实验中发现, 驻波管内的悬浮烟粒子在驻波节点处产生聚集现象。Brandt 等^[7] 在气体实验时发现, 在声波和超声波场作用下, 悬浮在气体中的微粒趋向于聚集, 形成聚合体。这些研究为气溶胶清除技术的发展提供了新的研究方向, 并为声聚并概念的提出以及实验研究奠定了重要基础。

声聚并 (acoustic agglomeration/coalescence) 指在外加声场作用下, 促进气溶胶粒子之间发生相对运动和相互作用, 通过碰撞、并合过程, 形成更大粒子加速沉降的现象, 进而达到降低空气中气溶胶浓度的目的^[4]。然而, 早期的声聚并技术能耗大且很难达到所需的声强度, 随着科学技术的发展, 这些难题逐渐被攻克, 且声聚并过程的实现因具有所需实验装置相对简单、适应性强且作用时间短等优点而备受研究人员关注。这些优势使气溶胶声聚并技术脱颖而出, 成为极具潜力的新技术, 并与电聚并^[8]、磁聚并^[9-10]、热聚并^[11-12] 和化学聚并^[13] 等气溶胶聚并技术配合使用, 可进一步提高粉尘和污染物的清除效率。20 世纪 60 年代以来, 同向团聚机制^[4]、流体力学作用机制(包括共辐射压效应^[14]、共散射效应^[15] 和声波尾流效应^[16]) 和声致湍流机制^[17] 等气溶胶声聚并理论模型陆续被提出, 随着计算机技术的快速发展和实验技术条件的不断完善,

2021-02-03 收到, 2021-04-29 收到再改稿。

资助项目: 国家重点研发计划课题(2019YFC1510304, 2016YFE0201900-02), 国家自然科学基金项目(41575037)

* 邮箱: hxiao@mail.iap.ac.cn

数值模拟方法和实验方法成为气溶胶粒子声聚并过程研究的重要手段,促进声聚并机制的研究越来越深入。但由于声波聚并的复杂性(影响声波聚并效果的因素众多)、实验条件的多样性和理论的局限性,一些关键问题尚无一致结论。共辐射压效应、共散射效应和声致湍流效应对声聚并作用仍无统一认识,存在争议,缺少能够解释声聚并机制的统一理论;共辐射压效应和共散射效应虽然发展出各自的理论,并进行了数值仿真实验,但在真实实验中很少被直接观测到。另外,各种理论均具有局限性,还需要深入研究。以上问题严重阻碍了声聚并技术的发展。

气溶胶粒子作为云凝结核,对云的形成和发展有重要作用^[18-21]。根据云滴凝结核化理论^[22-25],在一定的过饱和水汽条件下,微小的气溶胶粒子要增长成为云雾滴,需经历异质核化、凝结增长和碰并增长过程,首要条件是粒子增长超过活化尺度,这可以通过水汽分子与气溶胶的聚并过程实现^[22]。在某种外力(如重力、湍流等)作用下,可以促进粒子的聚并过程,使得处于稳定状态的小霾滴粒子通过粒子与水汽分子聚合或粒子间碰并的物理过程而越过活化半径,触发云雾滴的凝结增长和碰并增长过程^[26-27]。声波作为一种外力,同样会对粒子增长过程产生影响。Foster 等^[28]数值模拟表明:低频(频率低于 300 Hz)且高强度(声压级超过 140 dB)的声波可以显著加速云雾粒子和液滴群中的碰并过程,有效促进云雾过程的发展和演变,导致降水的快速发展。因此,近年声波在云雾粒子聚并中的影响及在人工影响天气中的应用逐渐受到关注,国内外学者针对声波聚并对云雾和降水等方面影响的科学问题进行了探讨^[29]。然而,针对声波对云雾滴这种特定粒子聚并作用的研究还不够深入,对与普通气溶胶聚并作用之间的异同点不够清晰。另外,仍然缺乏声波对云雾粒子聚并作用的外场试验,对其影响效果的准确评估依然是一个难题。

综上所述,对气溶胶和云雾粒子声聚并的研究将在云微物理、人工影响天气以及大气环境保护等方面具有重要意义。本文重点总结国内外在声波对气溶胶和云雾粒子的聚并机制以及相关实验和数值模拟等方面取得的研究成果,并讨论声聚并在云和降水微物理及人工影响天气(如人工消雾和增雨)等

领域的应用前景。

1 气溶胶粒子声聚并机制

气溶胶尺度小,在声场中会受到多种外力和多种聚并机制的影响,其过程极为复杂,因此,实验和模拟研究存在诸多困难。深入了解声波的聚并效应,在进行数值模拟和宏观声聚并实验前,研究气溶胶的微观聚并基础理论非常必要。目前,气溶胶声聚并机制主要包括同向团聚机制、流体力学机制(包括共辐射压效应、共散射效应和声波尾流效应)、声致湍流机制以及布朗聚并机制等。

1.1 同向团聚机制

为了解释实验中出现的声聚并现象,1965 年 Mednikov^[4]在 Brandt 等^[7]的研究基础上提出同向团聚机制(orthokinetic interaction),他认为气溶胶粒子在声场作用下,由于气体的振荡运动被携带,惯性不同使粒子受到的携带程度也不同,导致大小颗粒之间产生相对运动,经过一定时间后,粒子间因发生碰撞而有机会聚集,图 1 为同向团聚机制示意图。Hoffmann^[30-31]和 Cheng 等^[32]在该机制的基础上,提出携带系数(entrainment factor)的概念,认为大的气溶胶粒子惯性较大,不易被携带,携带系数相对较小,能保持其相对静止状态;而小的粒子由于惯性小,易被运动气体携带,携带系数相对较大,易随气流运动。因此,在不同的携带系数作用下,不同大小的粒子发生同向团聚。

空气中气溶胶粒子的携带系数主要由声波频率和粒子尺寸决定。Zhou 等^[33]研究发现,粒子之间的相互作用对粒子大小、声频、声压级和初始位置的变化很敏感,粒子尺寸相差越大、声压级越高,聚并效果越好。同向团聚机制的理论较简洁,可解释声场中不同粒径气溶胶粒子(即多分散相气溶胶)的聚并问题。但根据同向团聚机制,声场中气溶胶粒子间的相对运动只存在于粒径不同的粒子间,对单分散相气溶胶粒子,由于携带系数相同没有相对运动,无法产生聚并。但在声聚并实验中发现,单分散相气溶胶粒子在驻波声场中可产生聚并现象^[34]。Gonzalez 等^[35]和 Hoffmann 等^[36]使用高速摄影仪,在气溶胶聚并实验过程中也拍摄到相同粒径气溶胶粒子产生聚并现象的照片。另外,根据该同向团聚

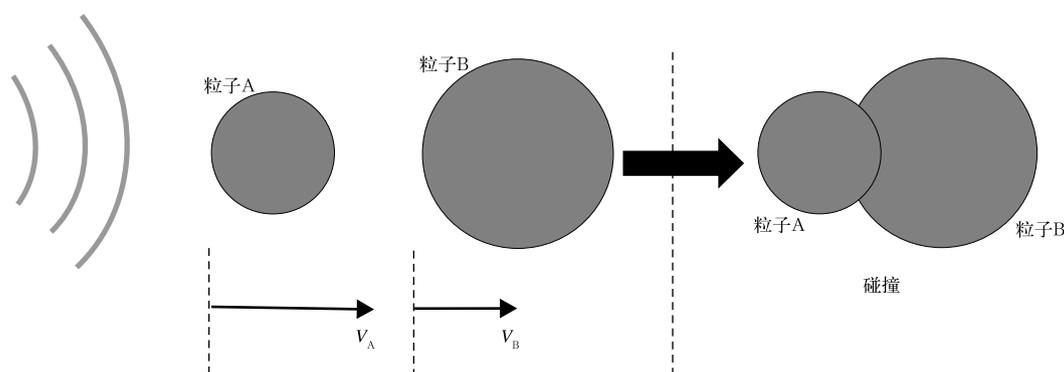


图1 气溶胶粒子的同向团聚机制示意图
(V_A 和 V_B 分别表示粒子 A 和粒子 B 的振动速度)

Fig. 1 Schematic diagram of the orthokinetic interaction of aerosol particles
(V_A and V_B represent the vibrational velocities of particle A and particle B, respectively)

理论可以推测,如果气溶胶粒子间距大于粒子振动的振幅,那么粒子将不易聚并。但 Zhou 等^[37]通过实验研究、Zhang 等^[38]通过数值模拟研究均表明:即使气溶胶粒子振动的振幅不大于粒子间的距离,聚并效率仍较为可观。这说明除同向团聚机制外,还有其他机制在气溶胶声聚并过程中发挥作用。

1.2 流体力学作用机制

由于同向团聚机制不能解释气溶胶粒子间距大于振幅或单分散相气溶胶粒子出现聚并现象,因此,科学家提出流体力学作用机制(hydrodynamic interactions)。流体力学作用机制指在声场中,由于粒子周围流体(空气)具有粘性,产生流体力学作用力,粒子运动使粒子周围流场产生不对称性,因而导致粒子间相互作用^[39]。研究^[14-16]发现,流体力学作用机制主要包括共辐射压效应(mutual radiation pressure effect)、共散射效应(mutual scattering effect)和声波尾流效应(acoustic wake effect)等。其中,共辐射压效应和声波尾流效应不仅能解释气溶胶粒子间距大于声波振幅却产生聚并的现象,而且也能解释单(或多)分散相气溶胶粒子的聚并现象。因此,流体力学作用机制被认为是适合单(多)分散气溶胶粒子声聚并的主要机制之一^[40]。

1.2.1 声波尾流效应

1959年 Pshenai-Severin^[16]首次从理论上提出基于奥辛(Oseen)流场的声波尾流效应,指出粒子在声场中以非零滑移速度运动(即粒子与空气存在相对运动)时,其后方会产生一个长的低压尾迹,称

为声尾迹。如果两个粒子足够接近,它们的尾迹相互影响。在声波的第1个半周期(图2a),如果粒子B出现在粒子A的尾迹中,由于粒子A后方的尾迹低压区域气压低,粒子B将受到气压梯度力的作用而加速向粒子A移动,因此它们之间的距离减小。从声波的第2个半周期开始,粒子A出现在粒子B的低压尾迹中,此时这两个粒子减速并转向,向相反方向运动,导致粒子A加速向粒子B运动(图2b)。这个过程交替反复进行,经过几个声波周期循环后,它们可能碰撞、聚并在一起,这种流体力学效应称为声波尾流效应。尾流低压由气溶胶粒子与气体介质之间的相对运动速度产生。研究发现,在较高的声频率下,粒子携带系数小,在声场中的滑移速度更大,而声尾流增强,但在高频时趋于平缓,与声频率呈非线性关系^[41-42]。Dianov等^[43]将声波尾流效应扩展,包括不同大小和相同大小粒子之间的相互作用,并得到两个粒子沿声波方向排列的声波尾流效应的解析解。一般地,同向团聚机制和声波尾流效应并不完全独立,其中一种机制增强可能会削弱另一种机制的影响^[44]。Hoffmann等^[45]通过实验研究粒子在声场中运动时,利用高速摄影机拍摄到在声场中两个相同粒径粒子的运动轨迹类似于音叉,证明确实存在声波尾流效应。Tiwary等^[46]通过粒子在声场中运动的数值模拟,认为声波尾流效应是声聚并的重要机制。Zhang等^[47]也通过数值模拟,表明声波尾流效应对多分散相和单分散相气溶胶粒子的聚并过程有重要作用。

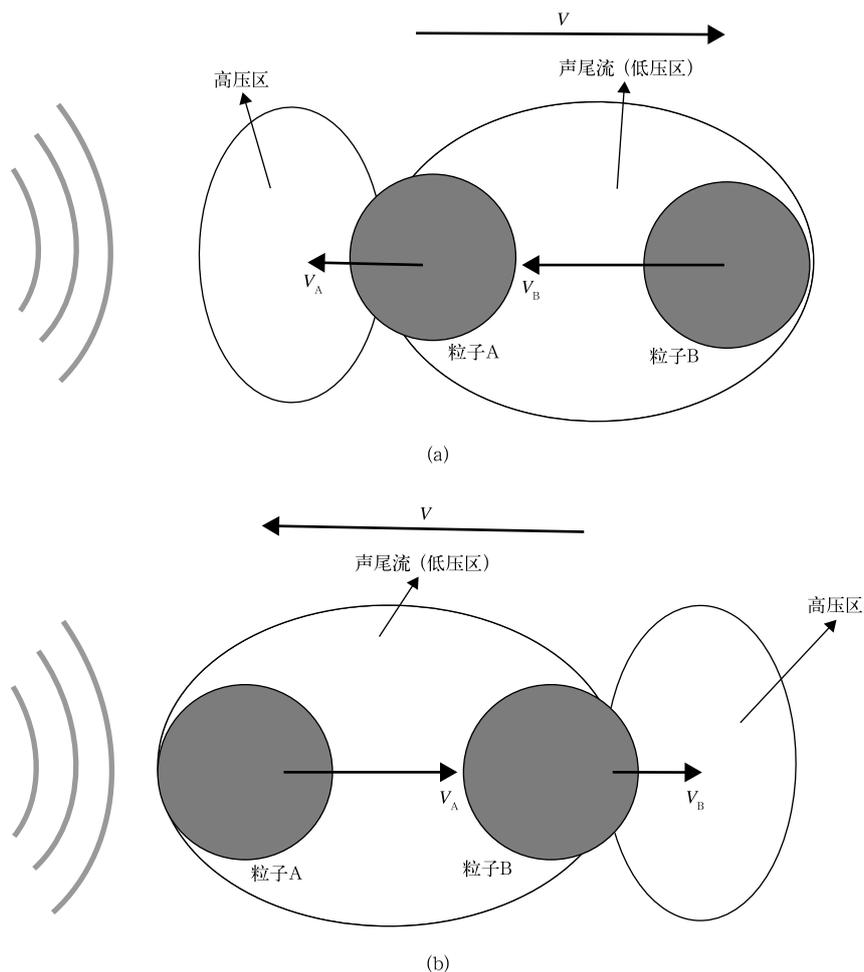


图 2 声波尾流效应示意图

(V, V_A 和 V_B 分别表示空气、粒子 A 和粒子 B 的振动速度)

(a) 声波上半周期, (b) 声波下半周期

Fig. 2 Schematic diagram of the acoustic wake effect of aerosol particles

(V, V_A and V_B represent the vibrational velocities of air, particle A and particle B, respectively)

(a) the first half of acoustic cycle, (b) the second half of acoustic cycle

1.2.2 共辐射压效应

共辐射压力指在流体介质中传播的声波,入射到障碍物,在其上所产生的前向的平均压力,力的大小取决于粒子大小、流体和粒子的密度比以及声强^[14]。由于粒子的大小不同,作用在粒子上的声辐射压力不同,从而导致粒子之间的相对运动和聚并。该过程被称为共辐射压效应。这种机制在沿着声轴运动的粒子之间产生最大排斥力,且力的大小随粒子中心连线与声轴间角度的增大而减小,超过某个角度后逐渐变为吸引力,当粒子中心连线与声轴垂直时吸引力最大,吸引和排斥力的存在造成粒子间

的相对运动从而产生碰并^[35](图 3)。

1.2.3 共散射效应

共散射效应是指由于气溶胶粒子对声波散射而形成的散射声场引起气体介质速度变化,进而对粒子产生影响,使粒子间发生相对运动的声聚并作用机制^[15]。根据该理论,粒子不仅受到外加声场影响,还受到相邻粒子散射的二次声波场影响。由于外加声场与散射的二次声波场之间存在相位差,粒子在一个振荡运动周期内不能回到原来位置,使粒子间产生相对运动而发生聚并(图 4)。

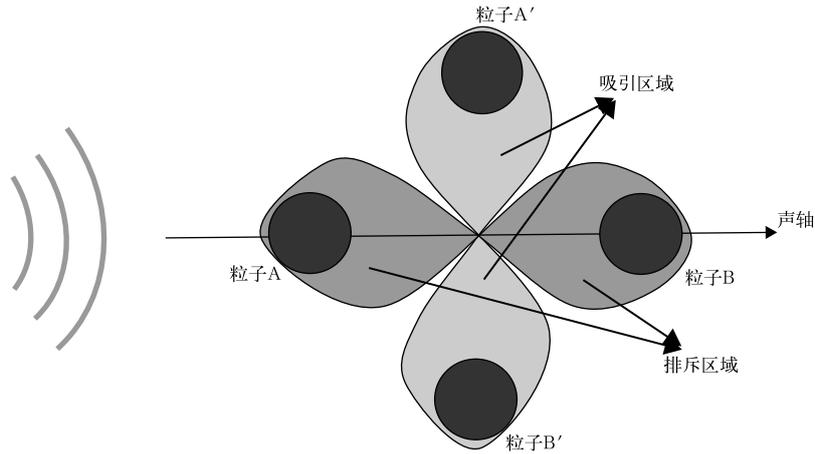


图 3 气溶胶粒子共辐射压效应示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the mutual radiation pressure effect of aerosol particles

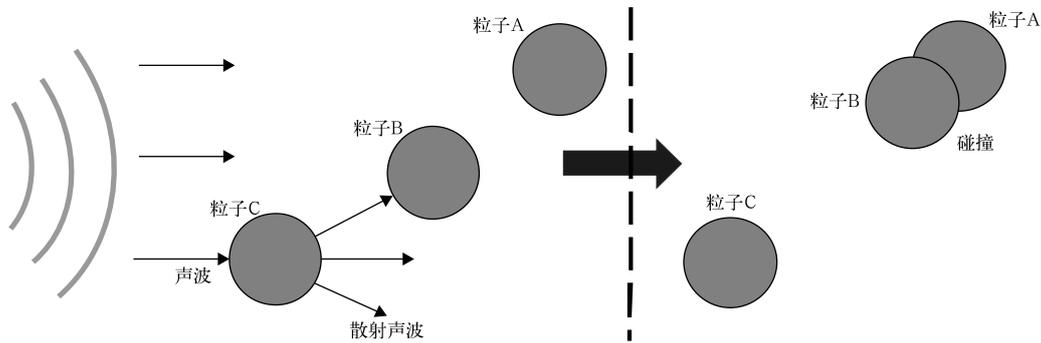


图 4 气溶胶粒子共散射效应示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the mutual scattering effect of aerosol particles

1.3 声致湍流机制

研究指出,声波的传播伴随着广泛变化的非线性效应^[48]。Merkli^[49]实验发现,对于较大的声波振幅,在理论和实验之间存在较大的波动差异。为了解决理论和实验的这种差异并研究这种差异是否对气溶胶聚并有影响,在这些研究的基础上,1980年Chou等^[17]提出声致湍流的概念,即在施加较高声压级的声波情况下,空气会产生湍流效应,称为声致湍流。在声致湍流的空气介质中,小粒子随湍流做无规则运动,大粒子相对静止,因而发生气溶胶的聚并现象,这种聚并现象被称为声致湍流机制(acoustic-induced turbulence effect)。Chou等^[17]通过实验发现,当声强超过某一阈值(声压级约为160 dB)时,就会发生声致湍流。在之后的理论和实验研究中,他们通过计算声聚并效率,认为声强超过这一阈值时,气溶胶的声聚并现象主要由声致湍流导致,它

是气溶胶声聚并的重要机制^[50]。然而,Tiwary等^[51]通过实验研究发现,尽管随着声强增加到160 dB声压级以上,可观察到一些由声波产生的随机运动现象,但湍流波动中的能量比声波频率和谐波中的能量偏低约3个量级,即声致湍流在声聚并中并不起重要作用。由于声致湍流的理论研究和实验难度很大,因此,随后针对这个理论的研究相对较少,目前尚无较统一结论。

通过以上归纳可以发现,气溶胶粒子声聚并机制主要有同向团聚机制、流体力学机制(包括共辐射压效应、共散射效应和声波尾流效应)和声致湍流机制等,这些机制各自存在一定的限制条件和适用范围,有的机制还未经大量实验证实(如共辐射压效应、共散射效应和声致湍流效应)(表1),不同研究对何种机制在气溶胶粒子声聚并中起主要作用的结论不同。同时,共辐射压效应、共散射效应和声致湍

流效应对气溶胶粒子声聚并的作用仍存在争议,且 缺少能够解释声聚并机制的统一理论。

表 1 声聚并的主要机制对比

Table 1 Comparison of the main mechanisms of acoustic coalescence

项目	同向团聚效应	声波尾流效应	共辐射压效应	共散射效应	声致湍流效应
是否对单分散相气溶胶有作用	否	是	否	是	是
是否对多分散相气溶胶有作用	是	是	是	是	是
是否有实验直接证明	是(大量)	是(大量)	是(少量)	否	否
是否能解释粒子间距大于声振幅时的聚并现象	否	是	是	是	是

2 声波对气溶胶粒子聚并影响实验研究进展

为了深入认识气溶胶粒子的声聚并特征,人们希望通过实验验证声聚并机制对气溶胶的聚并作用,并找到最佳声聚并效果的实验操作方案。目前,已开展大量气溶胶粒子声聚并实验研究。

实验装置主要由气溶胶粒子发生系统(feeding system)、声源系统(acoustic source system)、聚并室(agglomeration chamber)和气溶胶采样与分析系统(aerosol sampling and analysis system)构成^[37]。在聚并室顶部安装声源,由信号发生器(signal generator)、功率放大器(power amplifier)及驱动式压缩机(compression driver)组成;在前部接气溶胶粒子发生系统,产生气溶胶后输入聚并室进行声波的聚并过程;尾部接采样系统(一般包括电称低压冲击器、气溶胶稀释器和数据采集与处理计算机),用于测量气溶胶的粒径分布和浓度,评价实验效果。随着高速摄像机的发展,一些实验在聚并室外架设一个高速摄影系统(high-speed photography system)^[33],可将声波场中气溶胶粒子的运动进行可视化,获得声波场中粒子的运动轨道。这些轨道可以清晰地显示粒子振动速度和幅度,使人们直观地观察声波对气溶胶粒子的聚并作用并验证数值计算结果。

表 2 为气溶胶粒子声聚并实验研究的主要进展。这些实验结果表明:声聚并现象可发生在粒径为 $0.01 \mu\text{m}$ 的黑炭气溶胶粒子^[52]到 $270 \mu\text{m}$ 的水滴^[53]之间,单分散和多分散相气溶胶均可发生声聚并现象,同向团聚机制和声波尾流效应均取得大量实验证明。因此,声聚并现象是在同向团聚、声波尾流效应等多种机制共同作用下形成的。

声波频率对气溶胶粒子的聚并效果有重要影响。如果声波频率过低,粒子携带系数过大,被空气完全携带,无法产生相对运动;若频率过高,携带系

数过小,粒子几乎保持静止,也无法产生相对运动,因此声频率对气溶胶粒子聚并过程的影响是非线性的,存在最佳声频率^[35]。不同实验研究选用的频率范围为 $44 \text{ Hz} \sim 21 \text{ kHz}$,Hoffmann 等^[44]研究发现, 44 Hz 频率的声波能够在能耗较低的情况下达到较好的聚并效果,而 Zhou 等^[54]实验则发现, 1400 Hz 是气溶胶声聚并效果的最佳频率。同时,声聚并的最佳频率也受到其他因素影响,其中声压级的增加使声聚并的最佳频率缓慢减小,粒子平均尺度的增大也会导致最佳频率减小^[55]。

气溶胶的声聚并效率随着声压级的增加而增加,Li 等^[56]对比声压级在 $0 \sim 141 \text{ dB}$ 之间的多组实验,发现当声压级超过一定数值(120 dB)时,声聚并效率明显增加。因为在较高声强下,粒子振动振幅和粒子间相对运动速度增加,可提高气溶胶粒子的同向团聚效率。同时,随着声压级的提高,粒子滑移速度也增大,可加剧声尾流效应。因此,增加声压级同时增强同向团聚效应和声尾流效应,可使聚并效率增强。

初始气溶胶粒子浓度对其声聚并效果也有重要影响。Zhang 等^[57]设计 3 组不同初始气溶胶浓度的对比实验,发现声聚并效率随初始气溶胶粒子浓度的增大而增大,但随作用时间的推移,不同初始气溶胶粒子浓度对应的声聚并效率趋于一致。这主要是因为初始浓度较大,气溶胶粒子间平均距离较小,有利于聚并发生,从而提高聚并效率。随着聚并过程进行,粒子间的距离不断增大,相应地降低了聚并效率。

此外,粒径谱分布越宽,气溶胶声聚并效率越高,这是因为具有更宽粒径谱的气溶胶,其同向团聚效应更明显^[58]。声聚并效率还受到湿度、温度和气压等多种环境因素影响,这些影响因素并非独立,一种因素还会影响另一种因素对声聚并效率的作用效果。

目前,实验中很少直接观测到共辐射压效应和共散射效应。在声聚并进行一定时间后,随着粒子的聚并,将形成结构复杂的气溶胶粒子团,单个粒子

之间的相互作用将发展成粒子团之间以及粒子团与单个粒子之间的相互作用,这些相互作用机制有待进一步实验研究。

表2 气溶胶粒子的声聚并效应实验研究主要进展

Table 2 Progress in experimental studies on the acoustic coalescence effect of aerosol particles

年份	相关文献	研究成果
1976	[52]	用电子显微镜拍摄到粒径 $0.01\sim 0.1\ \mu\text{m}$ 的黑炭气溶胶粒子声聚并现象
1979	[34]	对粒径为 $0.17\ \mu\text{m}$ 的单分散相气溶胶进行实验,在驻波声场中观测到声聚并现象
1983	[32]	对粒径为 $0.16\sim 0.3\ \mu\text{m}$ 的氯化铵颗粒施加声压级为 $145\sim 155\ \text{dB}$,频率为 $600\sim 3000\ \text{Hz}$ 的行波条件,用 Berner 冲击器测量到声聚并现象,验证同向团聚机制
1996	[14]	拍摄到单分散玻璃微珠(直径为 $8.1\sim 22.1\ \mu\text{m}$)和分散石英颗粒(直径为 $25\sim 35\ \mu\text{m}$)的声聚并过程,发现音叉聚并效应,验证声波尾流效应
1999	[59]	设计一个实验装置,对粒径小于 $2.5\ \mu\text{m}$ 的飞灰粒子谱进行观测,发现一定时间后粒径谱往大的方向移动,证明存在声聚并现象
2006	[53]	拍摄到直径为 $270\ \mu\text{m}$ 的水滴在激波管中相互作用现象
2007	[60]	用电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)高速摄像机拍摄到驻波声场中燃煤飞灰单个颗粒(粒径为 $0.75\ \mu\text{m}$)和颗粒团(粒径为 $3\ \mu\text{m}$)的运动轨迹呈 S 型
2009	[55]	用扫描电子显微镜(scanning electron microscopy, SEM)高速摄像机拍摄到低频行波声场中粉煤灰颗粒的聚并现象,验证同向团聚机制
2016	[61]	利用扫描电迁移率颗粒物粒径谱仪测量了超细颗粒物的声聚并现象,发现频率为 $20\ \text{kHz}$ 的声波对 $10\sim 487\ \text{nm}$ 粒径的颗粒具有聚并作用
2017	[33]	获得行波和驻波声场中直径约为 $7.5\ \mu\text{m}$ 的单分散颗粒的运动速度
2018	[62]	使用高速摄像机拍摄到添加液态粘剂后,粉煤灰颗粒声聚并效率提高
2019—2020	[57-58]	使用高速摄像机拍摄分析室内烟气的声聚并过程,发现最佳频率为 $1500\ \text{Hz}$,认为此现象主要是同向团聚机制在起作用;声聚并效率随初始气溶胶粒子浓度的增大而增大,但随作用时间的推移,增大效应不明显
2020	[56]	对烟气进行实验,发现声压为 $1500\ \text{Hz}$ 时,烟气去除率可达 70% ,随着烟气温度降低,烟气去除效率提高。只有当声压级超过 $120\ \text{dB}$ 时,烟气去除率才有较大提高

3 声波对气溶胶聚并影响数值模拟研究进展

利用数值模拟方法研究气溶胶声聚并现象,在一定程度上可以弥补实验研究的不足,使人们能够获得更多数据以及实验尚无法观测到的现象,了解细节,同时也能单独分析某一个声聚并机制对气溶胶聚并的贡献。

关于声波对气溶胶聚并过程的数值模拟研究,主要是利用数值计算的方法,求解声波聚并作用一定时间后气溶胶的粒子数浓度谱和粒径的变化,从而得到不同声波作用机制对气溶胶聚并效果的影响。数值求解过程一般分为 3 个步骤:①建立描述不同声波聚并过程中粒子相互作用机理的动力学方程(数学模型);②针对这些数学模型(方程)建立对应的计算模型;③选择合适的计算方法,对模型中气溶胶动力学方程进行求解,得到气溶胶粒子数浓度谱和粒径分布。近年随着各种流体计算软件的发展,很多仿真软件逐渐应用到气溶胶动力学数值模

拟中,使得对气溶胶声聚并过程的数值模拟研究更加便利。

表 3 给出了关于气溶胶粒子间声聚并数值模拟研究的主要进展。20 世纪 90 年代前,数值模拟主要针对同向团聚、声波尾流效应和声致湍流效应等单一声聚并机制的基础研究^[50,63];90 年代后主要进行一种或多种声聚并机制(如共辐射压效应、共散射效应和声致湍流效应等)共同作用下气溶胶粒子聚并过程的研究^[14-15,41,45,64-66]。Lu 等^[67]使用 COM-SOL Multiphysics 软件进行计算流体力学、声学和粒子追踪模块的数值模拟,发现在声场作用下气溶胶粒子聚并成聚合体后破碎和不破碎情况下的粒径比区域,即当聚并粒子的粒径差在一定范围内时,聚合体不会破碎,否则会发生破碎而分离,聚并效率降低。在声聚并数值模拟中加入粒子破碎效应的影响后,得到的模拟结果更加符合真实情况。Zhang 等^[41]在原有模型基础上,加入描述水滴运动的方程组,数值模拟表明:在声场中加入液滴能够明显提高气溶胶粒子的声聚并效率,因为液滴(相当于大的气

溶胶粒子,被称为种子粒子)的加入拓宽了气溶胶粒子谱,一方面,使大液滴在其后面产生狭长的强尾迹低压区,增加声波尾流效应;另一方面,液滴出现使粒子间的粒径差增加,同向团聚作用增强。Shi 等^[68]使用计算流体力学与离散元方法耦合的三维模型(coupled computational fluid dynamics and discrete element method, CFD-DEM),研究液滴群的声聚并过程,结果表明:高声强(声压级为 170 dB)且高温高压环境下,聚并性能更好。这里需要指出的是,在实际中声压级达到 170 dB 的声强很难实现。

由于共辐射压效应和共散射效应均未(或很少)在实验中直接观测到,因此数值模拟成为研究这些机制的主要手段。

对于共辐射压效应的作用, Silva 等^[69]给出了理想流体中悬浮的气溶胶粒子在外加声场作用下相互作用的理论表达式。通过数值模拟,发现气溶胶在声场中的共辐射压效应,认为共辐射压效应是气溶胶粒子聚并的重要机制。然而, Maknickas 等^[70]通过理论分析和数值模拟,研究同向团聚机制、声波尾流效应和共辐射压效应在气溶胶声聚并中的贡献,认为相对于另外两种机制,共辐射压效应的贡献被高估。Danilov 等^[71]通过进行不同初始气溶胶粒

径和不同声波频率的多组数值模拟研究发现,当粒径较大、声波频率较高时,共辐射压效应更明显,此时,共辐射压效应可与同向团聚机制的作用相当。另外, Gonzalez 等^[35]根据声波的共辐射压理论进行数值模拟指出,共辐射压效应通常很小,但在 141 dB 的高强度声场下会变得较大,从而使共辐射压效应不容忽视。因此共辐射压效应在理论上还存在争议,有待进一步探索。

对于共散射效应的作用, Temkin^[72]对声场中振动粒子形成的散射声场进行理论研究,推导出散射的二次声波关系式。Song 等^[73]在理论推导基础上建立共散射效应作用下气溶胶粒子间相互作用模型,指出从粒子表面散射的附加声波对相互作用粒子之间的振荡运动有一定影响,可作为声聚并的再填充机制(当大粒子发生聚并后,其周围的小粒子密度减小,再填充机制将较远的小粒子推向较大的粒子,从而填充大粒子周边的团聚体积,即大粒子在一个声波周期内产生聚并效应的空间范围)。Hoffmann 等^[14]通过数值计算表明:共散射效应在声聚并过程中的影响很小,不足以作为多分散相气溶胶粒子声聚并的再填充机制。共散射效应本身也存在争议。因此,对共散射效应在声聚并中的作用还需

表 3 气溶胶粒子的声聚并效应数值模拟研究主要进展

Table 3 Progress in numerical simulations on the acoustic coalescence effect of aerosol particles

年份	相关文献	研究成果
1981	[50]	通过模拟,比较不同声强和粒子质量荷载下声致湍流的声聚并效应,并发现使用驻波的聚并效果好于行波
1987	[63]	模拟完全填充团聚体积假设下的声聚并过程,忽略重力沉降、布朗运动和声致湍流的影响
1990	[15]	模拟粉煤灰气溶胶的同向团聚和流体力学机制,首次定量确定流体力学机制对聚并速率的贡献
1994	[73]	采用改进的模型模拟声聚并过程,将声波散射引起的吸引力作为再填充机理之一,并将粒子间的共辐射压效应作为粒径相近的粒子聚并的主要机制
1997	[14]	模拟在同向团聚机制、重力和共散射效应共同作用下两个粒子的声聚并过程
1999	[64]	采用气溶胶动力学的分段算法模拟同向团聚和流体力学机制共同作用下的声聚并过程,除了中高频声波外,模拟结果与实验吻合较好
2003	[35]	模拟同向团聚机制、重力和声波尾流效应共同作用下二维气溶胶粒子声聚并
2011	[65]	模拟同向团聚机制、重力相互作用下两个粒子逐渐靠近直至碰撞后形成双粒子聚合体,并继续运动的动态过程
2015	[66]	对声场中的气溶胶粒子声聚并进行二维数值模拟,比较同向团聚机制、声波尾流效应和共辐射压效应,认为声波尾流效应是主要的声聚并机制
2017	[74]	基于直接模拟蒙特卡洛法,模拟包括同向团聚、重力沉降和布朗扩散等效应下 PM _{2.5} 粒子的声聚并,认为声聚并主要由同向团聚机制和重力沉降机制共同控制
2018	[41]	利用三维离散元模型模拟喷雾液滴作用下包括同向团聚等 4 种效应的气溶胶的声聚并过程,结果与实验有较好的一致性
2019	[67]	使用 COMSOL Multiphysics 软件的计算流体力学、声学 and 粒子追踪模块进行模拟,得到破碎和不破碎的粒子直径比的区域
2020	[68]	使用三维 CFD-DEM 耦合模型,研究了液滴群的声聚并,结果表明高声强(170 dB)且高温高压环境下,气溶胶的团聚性能较好

进一步研究。

由于影响气溶胶声波聚并效果的因素众多,如声强、声频、气溶胶浓度、声波波形、粒径分布以及环境条件(如温度、湿度和气压等),利用数值模拟研究这些因素对气溶胶声波聚并效应的影响有待深入。

4 声波对云雾粒子聚并影响研究进展

20世纪60年代人们开始了声波影响云雾粒子的研究(表4),以满足人工影响天气的需求。魏荣爵等^[75]通过计算气溶胶粒子在声场中受到的作用力,从理论上讨论利用声波消除水雾的可行性,并通过设计一个超声喷雾装置进行室内实验发现,声压级超过100 dB的声波对消雾具有明显作用^[76]。顾

震潮^[23]指出,声波能够促使云滴之间快速碰并,从而加快大云滴的产生。卡秋理^[77]在《人工影响大气过程的物理基础》著作中从理论和实验上讨论声波消雾的作用,认为声波导致多分散雾滴彼此相互补充位移,增大它们相互碰撞和并合效率。陈汝珍等^[78]使用一个模拟爆炸源产生冲击波,通过沉降取样观测爆炸前后的滴谱变化,进行多组不同声压级的云室实验研究,发现在爆炸声压级达到130 dB后,2 min内云滴谱变宽,较大云滴数浓度增加。许焕斌等^[79-80]通过数值模拟发现,在声强相当大(超过140 dB),且其频率和振幅满足一定条件时,可以使空气绕流流动的分离点向后移动,改善雨滴绕流流态并减少降落时的阻力,使雨滴降落速度变快,蒸发时间减少,地面降雨增加。

表4 云雾粒子的声聚并研究主要进展

Table 4 Progress in the studies on the acoustic coalescence of cloud and fog droplets

分类	年份	相关文献	研究成果
声波消雾	1963	[76]	通过室内初步实验发现,声波对水雾有显著消散作用,声压级超过100 dB左右后,消雾作用明显
	1964	[75]	从理论上初步讨论水雾粒子的声聚并过程,认为理论上利用声波消除水雾具有可行性
	1994	[77]	声波增大分散雾滴的相互撞击和合并效率
	2002	[83]	进一步实验发现低频(低于50 Hz)且高强度(131, 136 dB)声波对水雾消散有明显作用,并指出声聚并是声波消雾的主要因素之一
声波影响云和降水	1980	[23]	指出声波能够促使云滴之间碰并加快,尽快产生大云滴
	1984	[79]	计算发现,声波在高声强(超过140 dB)且其频率和振幅满足一定条件时,可减少雨滴下落阻力,雨滴降落速度加快,地面雨强增加
	1985	[84]	利用数值模拟研究声能对云的影响。结果表明:高强度的声波持续几秒钟会导致云滴谱向更大尺寸方向移动,在某些情况下,这会导致降水的早期发展
	1988	[28]	模拟在同向团聚和流体力学机制下液滴群的特征,发现单频且高强度的声波对其有明显影响,会导致降水的快速发展
	2005	[85]	模拟云滴粒子的声聚并过程,发现低频且高强度声场能够增大云滴半径,促进降水的产生
	2015	[87]	数值模拟显示,100 Hz的低频声波为云滴碰并的最佳频率
	2020	[86,88-89]	数值模拟显示,低频(特别是30 Hz左右)且高强度(143.4 dB)的声波能明显增强云滴碰并效果,对较小云滴(粒径为10 μm)的作用尤为明显

随着全球极端天气气候事件明显增加,灾害性天气事件频发^[81-82],人们对人工影响天气新技术新方法的需求越发迫切。声聚并作为一种影响云雾粒子的核化及碰并过程的新机制新技术再次受到关注。声聚并影响云雾技术基于声波的物理效应而没有使用任何催化剂,因此不会对环境产生化学污染。此外,不需要诸如飞机、火箭和高炮之类的运载工具,不需要为人工影响天气作业而申请空域,成本较低,且具有进行远程控制的可能性。因此,研究者正在将声波对气溶胶粒子的聚并理论应用到声波影响

云和降水过程及声波消雾等人工影响天气领域的研究中。侯双全等^[83]通过建立声波消雾室内实验装置,测量在声场中消雾时间和雾滴谱的变化过程,实验结果表明:低频(频率低于50 Hz)、高强度(声压级达到130 dB以上)的声波对水雾消散具有明显作用,且声聚并效应是其主要原因之一,且发现在消雾过程中,由消雾引起的温度起伏不大。Foster等^[28,84]利用数值模式模拟同向团聚和流体力学机制共同作用下的液滴群特征,Galechyan^[85]模拟云滴粒子的声聚并过程。这些研究结果表明:声波能够通过声聚并

过程,增大云滴尺度,导致碰并增长和降水的快速发展。

近年利用声波影响云雾和降水的科学性和有效性问题受到人们关注,并存在较大争议,有必要深入开展野外观测试验和数值模拟研究。Li等^[86]使用点粒子运动方程,设计多组声频率和声强对比实验,模拟从地面发射到高空的行进声波场对大气中云滴运动的影响,得出结论:30~100 Hz的低频声波^[87-88](30 Hz效果最佳)和高强度(143.4 dB)声波能显著增强10 μm粒径云滴的碰并效果;当声波的声压级低于100 dB且频率高于500 Hz时,声聚并作用可忽略不计。Shi等^[89]进一步使用CFD-DEM耦合的三维模型,研究声波对雾滴(粒径为15.97 μm)、云滴(粒径为25.85 μm)和大云滴(粒径为42.88 μm)的声聚并效应,指出雾滴、云滴和大云滴声聚并的最佳声频分别为225 Hz,150 Hz和125 Hz,最佳强度为120~130 dB。在最佳频率和强度下,初始雾滴在60 s后,初始云滴和大云滴在300 s后,粒径分别增长达到53 μm,40 μm和45 μm。

综上所述,已有的数值模拟研究结果表明:声聚并对云雾和降水过程有明显影响,且低频强声波的效果最好。声波影响云雾的内在机制是低频强声波在声聚并作用下增加云雾滴粒子之间的相对运动,加速粒子间的碰并过程,进而影响云雾的发展和演变。在潮湿的环境中,对于不稳定的小霾滴粒子而言,声聚并可使粒子发生碰撞、聚并,粒子直径增长超过活化直径后,突破饱和度的限制而继续增长。对于云雾滴和雨滴而言,以往研究认为其快速增长主要由重力碰并过程主导^[26,90-91],而对声场中云雾粒子声聚并的研究说明声聚并效应可以加速粒子间的碰撞,提高云雾粒子碰并增长效率。因此施加一定条件的声波则可与重力碰并机制以及湍流碰并、电碰等等过程^[92-93]共同作用,使雨滴和雾滴的粒径迅速增加,促进局地降水增强和雾的消散。

云雾粒子的声聚并研究虽然取得了一些成果,但就其在人工影响天气领域的应用而言,整体上还不够深入。首先,还需要对声波影响云雾粒子增长的基本原理加强研究,对声聚并的各种机制在对云雾粒子增长影响的贡献方面还需深入。其次,现有数值模拟和实验研究较简单,未考虑温度、湿度、气压和风等自然大气环境因素影响。第三,对云雾的声聚并机制缺乏更多真实大气环境的试验验证,也缺少声波消云雾和声波影响降水的大量外场试验研

究。第四,自然云和降水过程具有不可完全重复性^[94],很难在完全相同的环境背景下对施加声场和不施加声场时声波的作用效果进行比较,因此声聚并对云雾和降水影响效果的研究和准确评估依然是一个难题,需加强研究。另外,现有低频强声波影响云雾的试验装置存在声压级需要进一步提高、声波波束需要进一步集中、对周围环境的噪声影响需要进一步降低等技术问题,因此,需要改进与完善发声效率更高的试验装置。此外,为了在云室开展环境条件可控的声波影响云雾的精准实验,研制小型化可调频的低频强声波实验装置非常必要。

5 小结

本文针对声波对气溶胶和云雾粒子聚并影响的研究(包括理论、实验和数值模拟)进行概述性地回顾和总结:

1) 声波对气溶胶粒子聚并影响的声聚并机制主要包括同向团聚机制、流体力学机制(包括共辐射压效应、共散射效应和声波尾流效应)和声致湍流机制。声聚并现象是在同向团聚、声波尾流效应等多种机制共同作用下形成的。声聚并效应受到诸如声强、声频、气溶胶浓度、声波波形、粒径分布以及大气环境条件(温度、湿度、气压和风等)因素的影响。

2) 目前对声聚并的深入研究取得了大量成果,但使声聚并效率最高的最佳实验条件和参数配置依然具有很大不确定性,需要进行大量实验与数值模拟。亟需发展能够克服不同理论局限性的综合数理模型及数值模拟方法,同时,也应进一步加强实验技术的发展,验证所提出的声聚并理论和数值模拟结果(如共辐射压效应、共散射效应和声致湍流效应等)。

3) 数值模拟和初步实验研究表明:声聚并对云雾和降水过程有显著影响,声波影响云雾的内在机制是低频强声波在声聚并机制作用下会增加云雾滴粒子间的相对运动,促进粒子间的碰并过程,从而影响云雾的发展和演变。然而,目前对云雾声聚并过程的理论研究有待深入,其基础理论研究和科技发展均处于关键突破期。目前缺乏真实大气环境的试验验证,以及声波消云雾和影响降雨的大量外场综合试验研究。声聚并对云雾和降水影响效果的准确评估依然是一个难题。

鉴于利用声波影响云雾、降水过程是人工影响

天气领域的一项新兴技术,在其作用原理和影响机制以及如何定量评估声波作用效果等方面,还有很多科学和技术问题值得深入探究。因此,在加强理论研究的基础上,应针对适宜的气象条件,选择合适的外场试验地址,制定合理的试验方案。加强学科融合,克服原有设备的局限性,以探索声波调控大气湍流结构内云雾滴生长演化过程的多相多尺度复杂问题为核心科学目标,发展更高效的低频强声波影响云雾和降水装备。大量开展科学的声聚并对云雾和降水影响的外场试验,同时也应注重发展相应的效果评估方法。此外,需加强声波对云雾和降水粒子聚并机制的云室实验研究,为声波人工影响云雾和降水的理论突破提供基础支撑。这些研究对评估和发展基于低频强声波的云雾和降水影响技术具有重要的应用价值。

参考文献

- [1] 徐敬,张小玲,蔡旭晖,等.基于敏感源分析的动态大气污染排放方案模拟.应用气象学报,2016,27(6):654-665.
Xu J,Zhang X L,Cai X H,et al. Model assessment of dynamical atmospheric pollution control schemes based on sensitive source zone analysis. *J Appl Meteor Sci*, 2016, 27(6): 654-665.
- [2] 赵秀娟,徐敬,张自银,等.北京区域环境气象数值预报系统及PM_{2.5}预报检验.应用气象学报,2016,27(2):160-172.
Zhao X J,Xu J,Zhang Z Y,et al. Beijing regional environmental meteorology prediction system and its performance test of PM_{2.5} concentration. *J Appl Meteor Sci*, 2016, 27(2): 160-172.
- [3] Shao M,Tang X Y,Zhang Y H,et al. City clusters in China: air and surface water pollution. *Front Ecol Environ*, 2006, 4(7):353-361.
- [4] Mednikov E P. Acoustic Coagulation and Precipitation of Aerosols. New York: Consultants Bureau, 1965.
- [5] Wood R W,Loomis A L. The physical and biological effects of high-frequency sound-waves of great intensity. *Philos Mag*, 1927, 4(22): 417-436.
- [6] Patterson H S,Cawood W. Phenomena in a sounding tube. *Nature*, 1931, 127: 667-680. DOI: 10. 1038/127667a0.
- [7] Brandt O,Hiedemann E. The aggregation of suspended particles in gases by sonic and supersonic waves. *Transactions of the Faraday Society*, 1936, 32(2): 1101-1110.
- [8] Chang Q,Zheng C,Yang Z,et al. Electric agglomeration modes of coal-fired fly-ash particles with water droplet humidification. *Fuel*, 2017, 200(15): 134-145.
- [9] Zhao C S,Li Y W,Wu X,et al. Experimental investigation on aggregation of coal-fired PM₁₀ by magnetic seeding. *Chem Eng J*, 2007, 133(1/2/3): 301-309.
- [10] Huang S,Park H,Park Y K,et al. Dynamic trajectory and capture of fine dust by magnetic mesh filters based on a particle velocity model. *Aerosol Sci Tech*, 2015, 49(8): 633-642.
- [11] Smith N R,Shaviv N J,Svensmark H. Approximate analytical solutions to the condensation-coagulation equation of aerosols. *Aerosol Sci Tech*, 2016, 50(6): 578-590.
- [12] Fan F X,Zhang S H,Wang W Y,et al. Numerical investigation of PM_{2.5} size enlargement by heterogeneous condensation for particulate abatement. *Process Saf Environ*, 2019, 125: 197-206. DOI: 10. 1016/j. psep. 2019. 03. 018.
- [13] Guo Y Q,Zhang J Y,Zhao Y C,et al. Chemical agglomeration of fine particles in coal combustion flue gas; Experimental evaluation. *Fuel*, 2017, 203(1): 557-569.
- [14] Hoffmann T L,Koopmann G H. Visualization of acoustic particle interaction and agglomeration; Theory and experiments. *J Acoust Soc Am*, 1996, 99(4): 2130-2141.
- [15] Song L. Modelling of Acoustic Agglomeration of Fine Aerosol Particles. Pennsylvania: The Pennsylvania State University, 1990.
- [16] Pshenai-Severin S V. Aggregation of aerosol particles in a sound field under the influence of the Oseen hydrodynamic forces. *Dokl Akad Nauk SSSR*, 1959, 125(4): 775-778.
- [17] Chou K H,Lee P S,Shaw D T. Acoustically induced turbulence and shock waves under a traveling-wave condition. *J Acoust Soc Am*, 1980, 68(6): 1780-1789.
- [18] 刘佩,银燕,陈倩,等.吸湿性播撒对暖性对流云减雨影响的数值模拟.应用气象学报,2019,30(2):211-222.
Liu P,Yin Y,Chen Q,et al. Numerical simulation of hygroscopic seeding effects on warm convective clouds and rainfall reduction. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(2): 211-222.
- [19] Snider J R,Brenguier J. Cloud condensation nuclei and cloud droplet measurements during ACE-2. *Tellus B*, 2000, 52(2): 828-842.
- [20] Teller A,Levin Z. The effects of aerosols on precipitation and dimensions of subtropical clouds: A sensitivity study using a numerical cloud model. *Atmos Chem Phys*, 2006, 6(1): 67-80.
- [21] 赵春生,彭大勇,段英.海盐气溶胶和硫酸盐气溶胶在云微物理过程中的作用.应用气象学报,2005,16(4):417-425.
Zhao C S,Peng D Y,Duan Y. The impacts of sea-salt and nss-sulfate aerosols on cloud microproperties. *J Appl Meteor Sci*, 2005, 16(4): 417-425.
- [22] Pruppacher H R,Klett J D,Wang P K. Microphysics of clouds and precipitation. *Aerosol Sci Tech*, 1980, 28(4): 381-382.
- [23] 顾震潮. 云雾降水物理基础. 北京: 科学出版社, 1980.
Gu Z C. Base of Cloud and Mist Precipitation Physics. Beijing: Science Press, 1980.
- [24] Mason B J. The Physics of Clouds. Oxford: Oxford University Press, 1971.
- [25] 黄美元,徐华英. 云和降水物理. 北京: 科学出版社, 1999.
Huang M Y,Xu H Y. Physics of Clouds and Precipitation. Beijing: Science Press, 1999.

- [26] Gillespie D T. Three models for the coalescence growth of cloud drops. *J Atmos Sci*, 1975, 32(3): 600-607.
- [27] Kovetz A, Olund B. The effect of coalescence and condensation on rain formation in a cloud of finite vertical extent. *J Atmos Sci*, 1969, 26(5): 1060-1065.
- [28] Foster M P, Pflaum J C. The behavior of cloud droplets in an acoustic field: A numerical investigation. *J Geophys Res*, 1988, 93(D1): 747-758. DOI: 10. 1029/JD093iD01p00747.
- [29] Tamara T. Acoustic and Aerosol Methods for the Atmospheric Impact to Get Precipitation Enhancement. The 2nd International Workshop on Global Water Cycle and Sky River Research, 2019.
- [30] Hoffmann T L. An extended kernel for acoustic agglomeration simulation based on the acoustic wake effect. *J Aerosol Sci*, 1997, 28(6): 919-936.
- [31] Hoffmann T L. Environmental implications of acoustic aerosol agglomeration. *Ultrasonics*, 2000, 38: 353-357.
- [32] Cheng M T, Lee P, Berner A, et al. Orthokinetic agglomeration in an intense acoustic field. *J Colloid Interface Sci*, 1983, 91(1): 176-187.
- [33] Zhou D, Luo Z Y, Fang M X, et al. Numerical calculation of particle movement in sound wave fields and experimental verification through high-speed photography. *Applied Energy*, 2017, 185: 2245-2250. DOI: 10. 1016/j.apenergy. 2016. 02. 006.
- [34] Shaw D T, Tu K W. Acoustic particle agglomeration due to hydrodynamic interaction between monodisperse aerosols. *J Aerosol Sci*, 1979, 10(3): 317-328.
- [35] Gonzalez I, Gallego-Juarez J A, Riera E. The influence of entrainment on acoustically induced interactions between aerosol particles — An experimental study. *J Aerosol Sci*, 2003, 34(12): 1611-1631.
- [36] Hoffmann T L, Koopmann G H. A new technique for visualization of acoustic particle agglomeration. *Rev Sci Instrum*, 1994, 65(5): 1527-1536.
- [37] Zhou D, Luo Z Y, Fang M X, et al. Preliminary experimental study of acoustic agglomeration of coal-fired fine particles. *Procedia Engineering*, 2015, 102: 1261-1270. DOI: 10. 1016/j.proeng. 2015. 01. 256.
- [38] Zhang G X, Zhang L L, Wang J Q, et al. A new model for the acoustic wake effect in aerosol acoustic agglomeration processes. *Appl Math Model*, 2018, 61: 124-140. DOI: 10. 1016/j.apm. 2018. 03. 027.
- [39] de Sarabia E R F, Gallego-Juarez J A, Rodriguez-Corral G, et al. Application of high-power ultrasound to enhance fluid/solid particle separation processes. *Ultrasonics*, 2000, 38: 642-646.
- [40] Riera E, Gallego-Juarez J A, Mason T J. Airborne ultrasound for the precipitation of smokes and powders and the destruction of foams. *Ultrason Sonochem*, 2006, 13(2): 107-116.
- [41] Zhang G X, Wang J Q, Chi Z H, et al. Acoustic agglomeration with addition of sprayed liquid droplets: Three-dimensional discrete element modeling and experimental verification. *Chem Eng Sci*, 2018, 187: 342-353. DOI: 101016/j. ces. 2018. 05. 012.
- [42] Wu X, Zeng X, Zhao Y. Theoretical Study on the Acoustic Agglomeration Mechanism of Fine Aerosol Particles. The 21st International Congress on Sound and Vibration, 2014.
- [43] Dianov D B, Podolskii A A, Turubarov V I. Calculation of the hydrodynamic interaction of aerosol particles in a sound field under Oseen flow conditions. *Soviet Physics-Acoustics*, 1968, 13(3): 314-319.
- [44] Hoffmann T L, Chen W, Koopmann G H, et al. Experimental and numerical analysis of bimodal acoustic agglomeration. *J Vib Acoust*, 1993, 115(3): 232-240.
- [45] Hoffmann T L, Koopmann G H. Visualization of acoustic particle interaction and agglomeration; Theory evaluation. *J Acoust Soc Am*, 1997, 101(6): 3421-3429.
- [46] Tiwary R, Reethof G. Hydrodynamic interaction of spherical aerosol-particles in a high-intensity acoustic field. *J Sound Vib*, 1986, 108(1): 33-49.
- [47] Zhang G X, Liu J Z, Wang J, et al. Numerical simulation of acoustic wake effect in acoustic agglomeration under Oseen flow condition. *Chin Sci Bull*, 2012, 57(19): 2404-2412.
- [48] Beyer R T. Physical Acoustics. New York: Springer, 1965.
- [49] Merkli P. Theoretische und experimentelle thermoakustische untersuchungen am kolbengetriebenen resonanzrohr. *Zeitschrift Für Naturforschung A*, 1973, 17(4): 1124-1130.
- [50] Chou K H, Lee P S, Shaw D T. Aerosol agglomeration in high-intensity acoustic fields. *J Colloid Interface Sci*, 1981, 83(2): 335-353.
- [51] Tiwary R, Reethof G, McDaniel O H. Acoustically generated turbulence and its effect on acoustic agglomeration. *J Acoust Soc Am*, 1984, 76(3): 841-849. DOI: 10. 1121/1. 391308.
- [52] Volk M, Moroz W J. Sonic agglomeration of aerosol particles. *Water Air Soil Poll*, 1976, 5(3): 319-334.
- [53] Temkin S, Ecker G Z. Droplet pair interactions in a shock-wave flow field. *J Fluid Mech*, 1989, 202: 467-497. DOI: 10. 1017/S0022112089001254.
- [54] Zhou D, Luo Z Y, Jiang J P, et al. Experimental study on improving the efficiency of dust removers by using acoustic agglomeration as pretreatment. *Powder Technol*, 2016, 289: 52-59. DOI: 10. 1016/j.powtec. 2015. 11. 009.
- [55] Liu J Z, Zhang G X, Zhou J H, et al. Experimental study of acoustic agglomeration of coal-fired fly ash particles at low frequencies. *Powder Technol*, 2009, 193(1): 20-25.
- [56] Li K, Wang E L, Wang Q, et al. Improving the removal of inhalable particles by combining flue gas condensation and acoustic agglomeration. *J Clean Prod*, 2020, 261. DOI: 10. 1016/j.jclepro. 2020. 121270.
- [57] Zhang G X, Ma Z F, Shen J, et al. Experimental study on eliminating fire smokes using acoustic agglomeration technology. *J Hazardous Materials*, 2020, 382. DOI: 10. 1016/j.jhazmat.

2019. 121089.
- [58] Zhang G X, Zhang L L, Wang J, et al. Improving acoustic agglomeration efficiency by addition of sprayed liquid droplets. *Powder Technol*, 2017, 317: 181-188. DOI: 10. 1016/j. powtec. 2017. 04. 058.
- [59] 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. *Environ Sci Technol*, 1999, 33(21): 3843-3849.
- [60] 赵兵, 姚刚, 杨林军, 等. 燃煤细颗粒和颗粒团动力学特性的比较. *中国电机工程学报*, 2007, 27(8): 1-4.
Zhao B, Yao G, Yang L J, et al. Comparison of dynamical behavior between fine particles and aggregates from coal combustion. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(8): 1-4.
- [61] 康豫博, 朱益佳, 蔺锋, 等. 超细颗粒物超声波团聚的影响因素. *上海交通大学学报*, 2016, 50(4): 551-556.
Kang Y B, Zhu Y J, Lin F, et al. Influencing factors of acoustic agglomeration of ultrafine particles. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2016, 50(4): 551-556.
- [62] Zhang G X, Zhou T T, Zhang L L, et al. Improving acoustic agglomeration efficiency of coal-fired fly-ash particles by addition of liquid binders. *Chem Eng J*, 2018, 334: 891-899. DOI: 10. 1016/j. cej. 2017. 10. 126.
- [63] Tiwary R, Reethof G. Numerical simulation of acoustic agglomeration and experimental verification. *J Vib Acoust*, 1987, 109(2): 185-191.
- [64] Ezekoye O A, Wibowo Y W. Simulation of acoustic agglomeration processes using a sectional algorithm. *J Aerosol Sci*, 1999, 30(9): 1117-1138.
- [65] 王子兵, 钟晓晖, 闫永欣, 等. 声场中 PM_{2.5} 颗粒碰撞运动模型. *环境工程学报*, 2011, 5(12): 2839-2843.
Wang Z B, Zhong X H, Yan Y X, et al. Particles collision model of PM_{2.5} in sound field. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, 5(12): 2839-2843.
- [66] Markauskas D, Kačianauskas R, Maknickas A. Numerical particle-based analysis of the effects responsible for acoustic particle agglomeration. *Adv Powder Technol*, 2015, 26(3): 698-704.
- [67] Lu M S, Fang M X, He M C, et al. Insights into agglomeration and separation of fly-ash particles in a sound wave field. *RSC Advances*, 2019, 9(9): 5224-5233.
- [68] Shi Y, Wei J H, Qiu J, et al. Numerical study of acoustic agglomeration process of droplet aerosol using a three-dimensional CFD-DEM coupled model. *Powder Technol*, 2020, 362: 37-53. DOI: 10. 1016/j. powtec. 2019. 12. 017.
- [69] Silva G T, Bruus H. Acoustic interaction forces between small particles in an ideal fluid. *Phys Rev E*, 2014, 90(6). DOI: 10. 1103/PhysRevE. 90. 063007.
- [70] Maknickas A, Markauskas D, Kacianauskas R. Discrete element simulating the hydrodynamic effects in acoustic agglomeration of micron-sized particles. *Particulate Science and Technology*, 2016, 34(4): 453-460.
- [71] Danilov S D, Mironov M A. Radiation pressure force acting on a small particles in a sound field. *Soviet Physics Acoustics-Ussr*, 1984, 30(4): 280-283.
- [72] Temkin S. *Elements of Acoustics*. New York: John Wiley and Sons, 1981: 445-454.
- [73] Song L, Koopmann G H, Hoffmann T L. An improved theoretical model of acoustic agglomeration. *J Vib Acoust*, 1994, 116(2): 208-214.
- [74] Fan F X, Zhang M J, Peng Z B, et al. Direct simulation monte carlo method for acoustic agglomeration under standing wave condition. *Aerosol Air Qual Res*, 2017, 17(4): 1073-1083.
- [75] 魏荣爵, 章肖融, 王耀俊. 气悬微粒在声场中所受的作用力对凝聚的贡献. *南京大学学报(自然科学版)*, 1964, 8(2): 249-265.
Wei R J, Zhang X R, Wang Y J. Aerosol agglomeration due to forces in sound field. *Journal of Nanjing University(Natural Science)*, 1964, 8(2): 249-265.
- [76] 章肖融, 干昌明, 魏荣爵. 声波对水雾消散作用的初步实验研究. *南京大学学报(自然科学版)*, 1963, 7(5): 21-28.
Zhang X R, Gan C M, Wei R J. Sonic dissipation of water fog-a preliminary experimental study. *Journal of Nanjing University(Natural Science)*, 1963, 7(5): 21-28.
- [77] 卡秋理. 人工影响大气过程的物理基础. 胡志晋, 译. 北京: 气象出版社, 1994.
Ka Q L. *Physical Basis of Artificial Influence on Atmospheric Process*. Translated by Hu Z J. Beijing: China Meteorological Press, 1994.
- [78] 陈汝珍, 鄞大雄, 蒋耿旺, 等. 爆炸对云滴碰并增长的实验研究. *应用气象学报*, 1992, 3(4): 410-417.
Chen R Z, Feng D X, Jiang G W, et al. A laboratory study of explosion effects on cloud droplets coalescence. *J Appl Meteor Sci*, 1992, 3(4): 410-417.
- [79] 许焕斌, 王思微. 关于声振动对球形降水粒子运动边界层和运动状态的影响. *气象学报*, 1984, 42(4): 431-439.
Xu H B, Wang S W. On the influence of acoustic vibration on the regime of air motion in the boundary layer of spherical precipitation particle falling. *Acta Meteorologica Sinica*, 1984, 42(4): 431-439.
- [80] 许焕斌. 关于爆炸影响气流的力学效应. *气象*, 1979, 5(10): 26-28. DOI: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 1979. 10. 008.
Xu H B. On the mechanical effect of explosion on air flow. *Meteorological Monthly*, 1979, 5(10): 26-28. DOI: 10. 7519/j. issn1000-0526. 1979. 10. 008.
- [81] Tabari H. Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 13768. DOI: 10. 1038/s41598-020-74038-4.
- [82] 王玉洁, 周波涛, 任玉玉, 等. 全球气候变化对我国气候安全影响的思考. *应用气象学报*, 2016, 27(6): 750-758.
Wang Y J, Zhou B T, Ren Y Y, et al. Impacts of global climate change on China's climate security. *J Appl Meteor Sci*, 2016,

- 27(6):750-758.
- [83] 侯双全,吴嘉,席葆树. 低频声波对水雾消散作用的实验研究. 流体力学实验与测量,2002,16(4):52-56;63.
Hou S Q, Wu J, Xi B S. Experiments on acoustic dissipation of water fog at low frequency. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2002, 16(4):52-56;63.
- [84] Foster M P, Pflaum J C. Acoustic seeding. *Journal of Weather Modification*, 1985.
- [85] Galechyan G A. On acoustic stimulation of atmospheric precipitation. *Technical Physics*, 2005, 50(9):1191-1194.
- [86] Li F F, Jia Y H, Wang G Q, et al. Mechanism of cloud droplet motion under sound wave actions. *J Atmos Ocean Tech*, 2020, 37(9):1539-1550.
- [87] Tamara T, Svetlana A. Acoustical method and device for precipitation enhancement inside natural clouds. *Sci Discov*, 2015, 3:18-25. DOI:10.11648/j.sd.s.2015030201.13.
- [88] Li F F, Huang C, Xie E, et al. Microscopic experimental study on acoustic agglomeration of the droplets on wall. *Therm Sci*, 2020. DOI:10.2298/TSCI200309233L.
- [89] Shi Y, Wei J H, Bai W W, et al. Numerical investigations of acoustic agglomeration of liquid droplet using a coupled CFD-DEM model. *Adv Powder Technol*, 2020, 31(6). DOI:10.1016/j.appt.2020.04.003.
- [90] 方春刚,郭学良. 华北一次浓雾过程爆发性增强的微物理特征. 应用气象学报, 2019, 30(6):700-709.
Fang C G, Guo X L. The microphysical structure of a heavy fog event in North China. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(6):700-709.
- [91] 袁野,朱士超,李爱华. 黄山雨滴下落过程滴谱变化特征. 应用气象学报, 2016, 27(6):734-740.
Yuan Y, Zhu S C, Li A H. Characteristics of raindrop falling process at the Mount Huang. *J Appl Meteor Sci*, 2016, 27(6):734-740.
- [92] 肖辉,徐华英,黄美元. 积云中云滴谱形成的数值模拟研究(一)——盐核谱和浓度的作用. 大气科学, 1988, 12(2):121-130.
Xiao H, Xu H Y, Huang M Y. The study on numerical simulation on the formation of the cloud droplet spectra in cumulus clouds—Part I: The roles of the spectra and concentrations of salt nuclei. *Chin J Atmos Sci*, 1988, 12(2):121-130.
- [93] 肖辉,徐华英,黄美元. 积云中云滴谱形成的数值模拟研究(二)——各种碰并过程、大气层结等的作用. 大气科学, 1988, 12(3):312-319.
Xiao H, Xu H Y, Huang M Y. A study of numerical simulation on the formation of the cloud droplet spectra in cumulus clouds—Part II: The roles of various collision processes, atmospheric stratifications. *Chin J Atmos Sci*, 1988, 12(3):312-319.
- [94] 郭学良,方春刚,卢广献,等. 2008—2018年我国人工影响天气技术及应用进展. 应用气象学报, 2019, 30(6):641-650.
Guo X L, Fang C G, Lu G X, et al. Progresses of weather modification technologies and applications in China from 2008 to 2018. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(6):641-650.

A Review on the Effect of Sound Waves upon the Coalescence of Aerosol and Cloud and Fog Particles

Xiao Hui¹⁾²⁾ Shu Weixi¹⁾²⁾ Fu Danhong¹⁾²⁾ Feng Qiang³⁾ Sun Yue¹⁾ Yang Huiling¹⁾

¹⁾ (*Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

²⁾ (*College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

³⁾ (*Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094*)

Abstract

The effect of sound waves on the coalescence of aerosol particles and cloud and fog droplets is a frontier scientific problem in the field of cloud physics and weather modification. The technology of acoustic coalescence has attracted much attention due to its relatively simple experimental device, strong adaptability, and short operation time. These advantages make it a potential new technology of aerosol coalescence. The research progress of acoustic coalescence of aerosol particles and cloud and fog droplets is reviewed from the aspects of theory, experiment, and numerical simulation. The mechanisms of acoustic coalescence mainly include orthokinetic interaction, hydrodynamic interaction (including acoustic wake effect, mutual radiation pressure effect, and mutual scattering effect), and acoustic-induced turbulence effect. The coalescence of aerosol particles in the sound field appears under the combined action. The low-frequency strong sound wave can increase the relative motion between cloud and fog droplets and promote the process of collision and coalescence, which has a significant impact on cloud and fog growth and precipitation. Finally, the existing problems and improvement direction of the research on the theory, experimental observation, and numerical simulation of acoustic coalescence are discussed. The complexity of the acoustic coalescence process, the diversity of experimental conditions, and the limitations of the theory, the optimal experimental conditions and parameter configuration for high efficiency of acoustic coalescence are still imperfect, which requires further experimental studies and numerical simulations. In addition, the research on the coalescence effect of sound waves on fog and cloud particles is not deep enough, and the similarities and differences of acoustic coalescence mechanisms between cloud and fog particles and ordinary aerosols are not clear enough. It is emphasized that the cloud chamber and numerical simulation research on the effect of acoustic coalescence on cloud and fog particles should be strengthened, and a large number of field comprehensive observation experiments should be carried out, which is of great scientific significance for the development of new weather modification technologies.

Key words: acoustic coalescence; aerosol particles; cloud and fog droplets; artificial fog dissipation and precipitation enhancement