

PM_{2.5}颗粒声波团聚 控制技术

张光学 张丽丽 刘建忠 著



科学出版社

PM_{2.5} 颗粒声波团聚控制技术

张光学 张丽丽 刘建忠 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

声波团聚是一种控制 $\text{PM}_{2.5}$ 排放的气溶胶预处理技术, 本书主要从实验、团聚机理和数值模拟几个方面对该技术进行系统的研究。首先, 研究各操作参数对声波团聚的影响, 发现低频时团聚效果比高频时好得多。对于给定粒径分布的燃煤飞灰气溶胶, 存在唯一的最佳团聚频率, 燃煤飞灰的最佳团聚频率为 $1400\sim 1700\text{Hz}$, 在 147dB 时, 声波团聚使气溶胶的颗粒数目浓度降低 70% 以上。接着, 对声波团聚中存在争议和尚未研究清楚的几个机理进行理论研究, 包括同向团聚作用机理、碰撞效率及声波尾流效应, 建立相应的数值模型。最后, 针对该数值模拟, 采用改进的分组算法及积分近似矩量法对其进行求解, 发现其能够准确预测气溶胶的声波团聚效果。

本书可作为高等院校环境工程、热能工程、化学工程等专业师生的参考书, 也可供能源、环境、化工等领域的相关研究人员、工程技术人员和管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

$\text{PM}_{2.5}$ 颗粒声波团聚控制技术 / 张光学, 张丽丽, 刘建忠著. —北京: 科学出版社, 2015.6

ISBN 978-7-03-044726-5

I. ①P… II. ①张… ②张… ③刘… III. ①可吸入颗粒物-污染防治-研究 IV. ①X513

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 124348 号

责任编辑: 耿建业 刘翠娜 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 铭轩堂

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 6 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2015 年 6 月第一次印刷 印张: 10

字数: 186 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

作者简介



张光学，男，1982 年出生。浙江大学工程热物理专业博士，副教授，目前就职于中国计量学院能源工程研究所，研究领域包括大气污染物排放控制、计算流体力学（CFD）和工程气固多相流动等。主持国家自然科学基金项目 1 项、省自然科学基金项目 1 项、省部级及企业横向课题共十余项。获浙江省质量技术监督科学技术进步奖二等奖。获国家专利 9 项，其中发明专利 6 项。发表论文 30 余篇，其中 SCI 收录 5 篇，EI 收录 13 篇。

前 言

大气中的颗粒物污染不仅影响气候，而且对人类健康造成了严重危害，已经引起国际社会的广泛关注，其中毒性最大的是 $\text{PM}_{2.5}$ 。为此，各国均制定了严格的空气质量标准对其进行限制。然而，目前工业生产中常见的除尘器，如静电除尘器、旋风分离器等，虽然整体除尘效率很高，但对细颗粒的捕集效率很低，因此大量 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒在工业生产中被排入大气。

声波团聚是一种气溶胶预处理技术，在烟气进入除尘器前，运用高强声场进行辐射处理，在数秒的时间内，烟气中的颗粒之间发生团聚，使烟气的颗粒数目减少，平均粒径增大，能够在后续的除尘器中获得更好的除尘效率，从而达到控制细颗粒排放的目的。

然而至今为止，对声波团聚技术的研究仍存在不足：声波团聚中各个操作参数对团聚的影响情况尚未完全被了解，尤其是最佳团聚频率的确定，仍存在争议；对声波团聚机理的研究还不够深入，特别是同向作用团聚机理、再填充机理和声波尾流效应等；对声波团聚过程的数值模拟研究不足，已有的研究中，采用的理论模型过于简化，而数值求解的方法效率偏低，精度差。

针对以上问题，本书主要从实验、团聚机理和数值模拟这几个方面展开研究工作。

首先，搭建实验台架，采用燃煤飞灰作为实验气溶胶，研究各操作参数对声波团聚的影响，其中声源包括低频和高频两套。实验结果表明，声波频率对团聚效果影响很大，低频时团聚效果比高频时好得多。对于给定粒径分布的燃煤飞灰气溶胶，存在唯一的最佳团聚频率，偏离该频率将使团聚效果急剧降低。在本书的实验条件下，燃煤飞灰的最佳团聚频率为 $1400\sim 1700\text{Hz}$ ，在 147dB 时，声波团聚使气溶胶的颗粒数目浓度降低 70% 以上。本书还发现一个重要规律，气溶胶的最佳团聚频率随声压级的增大而逐渐降低，这是国际上的首次实验发现。另外，实验结果还表明，随着声压级的增大、气溶胶初始浓度的增大或停留时间的增加，声波团聚效果增强。

接着，对声波团聚中存在争议和尚未研究清楚的几个机理进行理论研究。在对同向团聚作用机理的研究中发现，颗粒之间的碰撞效率在团聚中起到重要作用。以往的研究者为了简化计算，将碰撞效率设为 1，这对 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒是不合理的。本书将碰撞效率纳入同向团聚作用模型，使之更准确。同时，对声波尾流效应进行深入研究，建立数值模型计算声场中的颗粒在该效应下的运动轨迹。计算结果表

明, 在声波尾流效应的作用下, 颗粒之间吸引力很强, 一般能在很短的时间内发生碰撞团聚。将数值计算结果与文献中的高速摄影实验结果进行比较, 发现两者非常吻合。根据研究结果, 本书提出将声波团聚作为同向团聚作用的再填充机理和单分散相气溶胶的主要团聚机理。

然后, 在对声波团聚机理展开理论研究的基础上, 建立声波团聚数值模型, 并采用改进的分组算法对其进行求解。为了验证数值模拟的正确性, 将实验结果与计算结果进行比较, 发现两者吻合得很好。这表明该数值模型能够准确预测气溶胶的声波团聚效果。同时, 通过数值模拟研究了各操作参数对团聚的影响, 与实验得到的规律基本一致。

最后, 为克服数值模拟中计算量大、计算耗时长的缺点, 将最新发展起来的积分近似矩量法应用于声波团聚的数值模拟中。结果表明, 该算法精确度比分组算法更高, 而计算时间大大缩短, 适合应用于声波团聚的数值模拟。

本书所涉及的研究工作得到了国家自然科学基金(编号: 51408574)、浙江省自然科学基金(编号: Y1100299)和浙江省属科研院所专项(编号: 2014F60002)的资助, 在此深表谢意。

虽然作者对本书尽了很大努力, 但由于水平有限, 疏漏之处仍在所难免, 敬请读者批评指正。

作 者

2015年4月1日

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 声波团聚研究进展	4
1.2.1 声波团聚发展概况	4
1.2.2 声波团聚实验研究进展	4
1.2.3 声波团聚机理研究进展	6
1.2.4 声波团聚数值模拟的研究进展	10
1.3 现有研究的不足之处	11
1.3.1 实验研究	11
1.3.2 机理研究	12
1.3.3 数值模拟	13
1.4 本书主要研究内容	14
第 2 章 燃煤飞灰声波团聚的实验研究	16
2.1 引言	16
2.2 实验系统及方法	18
2.2.1 试验台架	18
2.2.2 声源系统	19
2.2.3 声测量系统	21
2.2.4 团聚室	25
2.2.5 气溶胶采样及测量系统	26
2.3 实验方法	30
2.4 高频下声波团聚的实验研究	31
2.4.1 声波作用下气溶胶粒径分布变化	31
2.4.2 声压级对声波团聚的影响	32
2.4.3 停留时间对声波团聚的影响	34
2.4.4 初始浓度对声波团聚的影响	36
2.4.5 高频下声波团聚实验结果的讨论	37
2.5 低频下声波团聚的实验研究	38
2.5.1 声波作用下气溶胶粒径分布变化	38

2.5.2	微观形态变化	40
2.5.3	频率对声波团聚的影响	43
2.5.4	声压级对声波团聚的影响	45
2.5.5	停留时间对声波团聚的影响	47
2.5.6	初始浓度对声波团聚的影响	49
2.5.7	低频下声波团聚实验结果的讨论	51
2.6	声波团聚的优化研究	51
2.6.1	增湿促进团聚的实验研究	51
2.6.2	锯齿波促进团聚的实验研究	54
2.7	声波团聚技术经济性分析	56
第 3 章	声波团聚中碰撞效率的研究	57
3.1	引言	57
3.2	同向团聚机理的理论模型	58
3.2.1	颗粒在声场中运动及受力分析	58
3.2.2	同向团聚机理的核函数	60
3.3	碰撞效率计算模型	62
3.4	计算结果及分析	65
3.4.1	颗粒粒径的影响	65
3.4.2	频率的影响	67
3.4.3	声压级的影响	68
3.4.4	温度的影响	70
第 4 章	声波尾流效应的研究	72
4.1	引言	72
4.2	声波尾流效应的数值模型	75
4.3	计算结果及分析	77
4.3.1	颗粒之间的夹角对声波尾流效应的影响	78
4.3.2	颗粒之间距离对声波尾流效应的影响	81
4.3.3	频率对声波尾流效应的影响	82
4.3.4	颗粒粒径对声波尾流效应的影响	83
4.3.5	声振速对声波尾流效应的影响	83
4.4	数值模拟的正确性验证	84
4.4.1	与 Dianov 的近似解比较	84
4.4.2	与高速摄影实验结果比较	85
4.5	声波尾流效应在声波团聚中的作用分析	89
4.5.1	作为单分散相气溶胶的主要团聚机理	89

4.5.2 作为同向团聚作用的再填充机理	95
第 5 章 声波团聚数值模拟研究	99
5.1 引言	99
5.2 声波团聚的理论模型	100
5.2.1 气溶胶动力学方程	100
5.2.2 声波团聚理论模型	102
5.3 数值计算方法	104
5.3.1 改进的分组算法	104
5.3.2 时间步长的选取	109
5.4 计算结果及分析	110
5.4.1 气溶胶粒径分布在声场中的变化情况	110
5.4.2 频率对声波团聚的影响	113
5.4.3 声压级对声波团聚的影响	114
5.4.4 停留时间对声波团聚的影响	115
5.4.5 初始气溶胶浓度对声波团聚的影响	116
5.4.6 气溶胶粒径分布的标准偏差对声波团聚的影响	117
5.5 数值模拟的正确性验证	118
5.5.1 与解析解的比较	119
5.5.2 与实验结果比较	120
第 6 章 积分近似矩量法应用于声波团聚数值模拟的研究	127
6.1 引言	127
6.2 理论模型及算法	128
6.3 数值模拟的准确性验证	131
6.3.1 与解析解比较	131
6.3.2 与分组算法比较	133
6.4 计算结果及分析	134
6.4.1 声场中气溶胶各阶矩量和平均粒径的变化情况	135
6.4.2 各操作参数对声波团聚的影响	136
参考文献	140

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

大气颗粒物指的是分散在大气中固态或液态的颗粒物，其中空气动力学直径大于 $100\mu\text{m}$ 的颗粒物能长期停留在大气中，称为总悬浮颗粒物 (total suspended particle, TSP)，而空气动力学直径小于 $10\mu\text{m}$ 的颗粒能通过呼吸进入人体，称为可吸入颗粒物 (inhalable particle, IP)，又称为 PM_{10} 。另外，空气动力学直径小于 $2.5\mu\text{m}$ 的颗粒物称为 $\text{PM}_{2.5}$ 。

随着我国工业的发展，空气污染问题日益突出，尤其是 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度居高不下，在全国范围内引发了严重的雾霾天气。2013 年 1 月，我国发生了 4 次大范围雾霾，笼罩 30 个省，其中北京市就遭遇了 25 天的雾霾^[1]，部分地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值达到 $700\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。2013 年 12 月，我国中东部发生严重雾霾^[2]，几乎涉及中东部所有地区。天津、河北、山东、江苏、安徽、河南、浙江、上海等多地空气质量指数达到六级严重污染级别，使京津冀与长江三角洲（简称长三角）雾霾连成片，其中上海市在 2013 年 12 月 6 日污染达到 $600\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上。

中国社会科学院与中国气象局在 2013 年 11 月联合发布的《气候变化绿皮书：应对气候变化报告（2013）》中指出^[3]，近 50 年来中国雾霾天气总体呈增加趋势，且持续性霾过程增加显著，珠江三角洲（简称珠三角）和长三角地区雾霾日数增加最快。

雾霾天气的主要特征是高浓度的 $\text{PM}_{2.5}$ 。由于粒径极小，比表面积很大， $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒容易富集多环芳烃和重金属等有害物质^[4, 5]，且能够通过肺泡进入血液循环^[6]，对人体危害很大。研究表明^[7-11]，空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度增大，将显著增加心脏病和肺癌的发病率。

Samet 等^[12]对美国 20 个主要城市的 PM_{10} 浓度与人体健康的关系进行了研究，结果表明，若 PM_{10} 浓度增加 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，则患心脏病和呼吸系统致死的风险增大 0.68%，总死亡率增加 0.51%。Pope 等^[10]通过对 50 万例数据的研究发现，人体如果长期暴露在颗粒物污染的大气中，患肺癌和心脏病的风险将增大。大气中的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度每增加 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，暴露其中的人群总死亡率增加 4%，由肺癌和心脏病导致的死亡率分别增加 8% 和 6%。Dominici 等^[7]分析了 20 万以上病例，确定了即使短时间暴露在颗粒物污染的大气中，呼吸系统和心脏病的患病风险也会增大。这些研究提供了大气颗粒物诱发肺癌和心脏病的确切证据，并且证实了颗粒物粒径越小，危害越大。

大气颗粒物污染已经引起了国际社会的高度重视,近几年来,各国制定的空气质量标准日趋严格。以美国为例,美国环保署(EPA)在1985年制定的空气质量标准中,用PM₁₀浓度取代了原先的TSP浓度^[13]。1997年,EPA新增加了对PM_{2.5}浓度的限定。2006年^[14],EPA又修改了标准,更加严格地限定了PM_{2.5}浓度。目前美国大气颗粒物浓度标准如表1-1所示。

表 1-1 美国现行颗粒物浓度标准 (2006 年起执行)

颗粒物	年平均/($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24h 平均/($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
PM ₁₀	—	150
PM _{2.5}	15	35

我国从1996年开始实行新的环境空气质量标准(GB 3095—1996),新标准增加对PM₁₀的浓度限制,并将环境空气质量标准分为三级,规定不同的地区可执行不同的级别。2012年修订了长期落后的《环境空气质量标准》,首次增加了PM_{2.5}浓度限值(一类地区日均值为35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)。

2013年9月,国务院发布了被称为“史上最严”的《大气污染防治行动计划》^[15],首次将细颗粒物纳入约束性指标。目标是经过五年努力,全国空气质量总体改善,重污染天气较大幅度减少。要求到2017年,全国地级及以上城市可吸入颗粒物浓度比2012年下降10%以上,优良天数逐年提高;京津冀、长三角、珠三角等区域PM_{2.5}浓度分别下降25%、20%、15%左右。

大气颗粒物污染主要来源于煤等化石燃料的燃烧,汽车等机动车辆尾气排放,钢铁等工业生产以及人类生活等^[16-21]。目前工业上常用的除尘设备主要有旋风分离器、静电除尘器、布袋除尘器和湿式洗涤器等。这些设备具有较高的总除尘效率,如静电除尘器可以达到99%以上,但是它们有个共同的缺陷,即对粒径较大的颗粒的脱除效率很高,而对微米或亚微米级颗粒脱除效率却很低。因此,这些除尘设备对PM₁₀特别是PM_{2.5}的捕集效率很低^[22,23]。典型的静电除尘器效率曲线如图1-1所示^[24],可见其对0.3~3 μm 的颗粒效率非常低。也就是说,未被除尘器捕集而排入大气中的颗粒物绝大部分是PM_{2.5},而恰恰这部分颗粒物的毒性最大,进入大气后,构成了大气颗粒物污染的主要部分。因此,提高除尘器对细颗粒的捕集效率、控制PM_{2.5}的排放是目前亟须解决的问题。

为了提高除尘器效率,有效的途径之一是在烟气进入除尘器之前进行预处理,减小细颗粒的浓度,提高气溶胶平均粒径。利用高强声波对气溶胶进行处理,使其中的颗粒发生碰撞团聚,颗粒数目浓度降低、平均粒径增大,这种技术称为声波团聚技术^[25](图1-2)。经过声波处理后的烟气,在后续的除尘器中能达到更好的脱除效率(图1-3),从而减少细颗粒的排放。

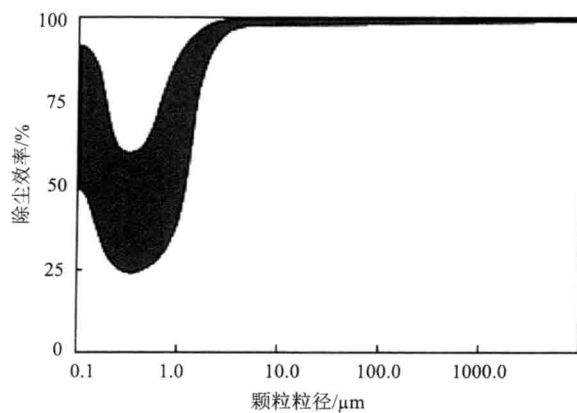


图 1-1 除尘器典型效率曲线

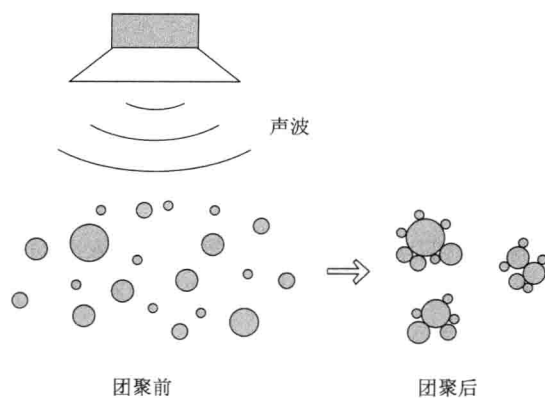


图 1-2 声波团聚过程示意图

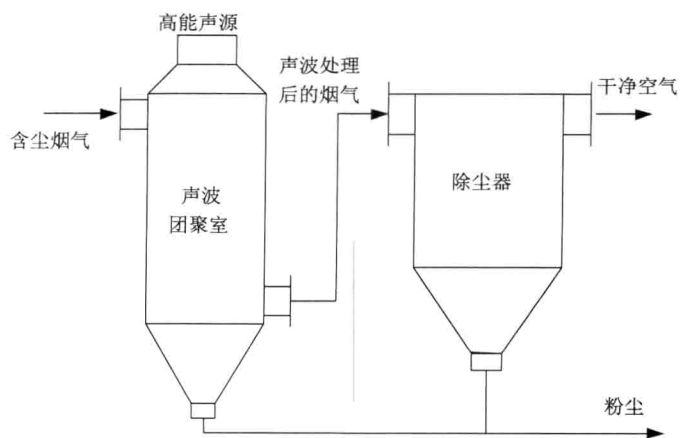


图 1-3 声波团聚工业应用示意图

1.2 声波团聚研究进展

1.2.1 声波团聚发展概况

1931 年 Patterson 和 Cawood^[26]在实验室首次发现声波团聚。此后,这一现象引起了各国科学家的广泛关注,苏联、德国、美国 and 西班牙等国均对此展开了独立的研究^[27, 28]。1936 年,伦敦法拉第学会召开会议研究了声波用于除雾的可行性。第二次世界大战期间,声波团聚技术曾用于机场除雾^[29],以改善跑道和机场上空的可见度。到 20 世纪 50 年代,声波团聚在美国纽约已有数个小规模的工业应用^[30],用于回收硫酸气溶胶颗粒和造纸厂余热锅炉的碳酸钠颗粒。之后由于能耗过高以及工业中静电除尘器的推广使用,各国对该技术的研究相继停止^[31],但苏联仍坚持这方面的研究,在揭示声波团聚的机理上获得了很大的成就。

1965 年苏联的 Mednikov^[32]出版了第一本关于声波团聚的著作,书中对之前各国学者的研究工作进行了总结,而且对声波团聚的机理进行了分析。之后对声波团聚的研究基本上停止,直到 1970 年,未见声波团聚新的研究报道。

然而至 20 世纪 70 年代中后期,各国对声波团聚的研究重新开始升温。原因有以下几点。

(1) 各国政府环保意识的增强,对环境空气细颗粒浓度的限定标准日趋严格,亟须颗粒物尤其是 PM_{2.5} 的有效控制技术。声波团聚有望应用于常规除尘器前,作为烟气的预处理技术,以提高除尘效率,减少 PM_{2.5} 的排放。

(2) 声波团聚在煤气化、增压流化床锅炉、液态金属冷却快增殖反应堆和磁流体发电站等领域的应用很有潜力^[31, 33-35]。这些烟气通常是高温、高压,常规除尘器无法使用,而声波团聚却不受此影响。

随后对声波团聚的研究开始增多,到目前为止仍是热点的研究课题之一。研究工作主要集中在研究声波团聚机理、研制适合声波团聚使用的高效高能换能器、探寻工业使用声波团聚的最佳操作参数和声波团聚效果数值模拟等方面。

我国对声波团聚的研究始于 20 世纪 90 年代后期^[36, 37],虽然起步较晚,但发展较快。目前浙江大学^[38-40]、东南大学^[41]等高校均开展了声波团聚的理论和实验方面的研究工作。

下面从实验研究、机理研究和团聚过程数值模拟三个方面,对声波团聚这几十年的发展历程和目前的研究现状作详细阐述。

1.2.2 声波团聚实验研究进展

1931 年, Patterson 和 Cawood^[26]首次对声波团聚进行实验研究,他们发现 MgO 气溶胶在驻波管内聚集长大的现象。1949 年 Clair^[27]使用氯化铵气溶胶进行

实验,发现了絮状团聚物生成,该实验采用的是观察法,并无定量数据。同年,Fahnoe等^[28]采用800~5000Hz的声波对平均粒径为 $1\mu\text{m}$ 左右的NaCl气溶胶进行预处理,提高了其在旋风分离器的除尘效率,并发现在团聚室里喷入水蒸气能增强团聚效果。

此后直到20世纪70年代中期这段时间内,几乎没有声波团聚的实验研究。1975年Scott^[42]创新性地采用了锯齿波代替正弦波声场,对ZnO气溶胶进行团聚实验,取得了很好的团聚效果,并发现提高气溶胶初始浓度能增强团聚。由于缺乏合适的锯齿波声源,且能量转换效率不高,这方面的研究没有进行下去。

1976年Volk等^[43]采用 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ 的炭黑作试验气溶胶,研究了声压级、频率、含尘浓度和停留时间对声波团聚的影响,发现最佳频率为3kHz。然而在他的实验中需要很长的团聚时间(10~50s)才能得到明显的团聚效果,因此无法为工业应用提供参考。

1977年,Rajendran^[44]通过实验研究了低声压级声场中声波团聚的可行性,实验采用了0.5~5kHz的声驱动器作为声源,氯化铵颗粒($0.5\sim 2\mu\text{m}$)作为试验气溶胶,结果表明在烟气进入除尘器前,使用声波团聚进行预处理,是经济可行的。

1979年Shaw等^[45]采用了低频的电声喇叭(1~3kHz)和高频的旋笛(10~20kHz)两套声源,对单分散相气溶胶进行了声波团聚实验,发现在低频下团聚效果更好,而高频时声波衰减比较严重。Rajendran等^[46]比较了气溶胶在流动和静止两种情况下的声波团聚效果,发现在流动条件下团聚效果降低。他认为原因是流动条件下,气流压制了声波产生的湍流,使湍流引起的团聚减少。

1983年Cheng等^[47]采用了声压级为145~155dB、频率为600~3000Hz的声场,对氯化铵气溶胶进行声波团聚实验研究,发现声波频率对团聚影响很大,在3kHz时效果最好。

1985年Tiwary^[48]采用声压级为140~165dB、频率为1~3kHz的声场,对燃煤飞灰气溶胶(浓度为 $1\sim 30\text{g}/\text{m}^3$,粒径为 $0.1\sim 20\mu\text{m}$)进行预处理,在小于6s的停留时间获得较好的团聚效果。他认为对于燃煤锅炉排放的烟气,最佳声波团聚的参数是声压级为160dB,频率为2kHz。

1993年Hoffmann等^[49]采用低频(44Hz)、高声强(160dB)声场,实验研究了燃煤飞灰的声波团聚,并通过添加 CaCO_3 大颗粒(粒径为 $88\mu\text{m}$)增加燃煤飞灰的团聚效果。

1995年,Capéran等^[50-53]进行了一系列的声波团聚实验,采用的声源是21kHz的超声波换能器,最大功率为200W,发现乙二醇液滴气溶胶、 TiO_2 颗粒和燃煤飞灰在长时间的辐射下,能产生明显的团聚效果。

1999年,Gallego-Juarez等^[54]进行了中试规模的实验,在一台0.5MW的循环流化床锅炉出口和静电除尘器之间加装了一个团聚室,采用4台400W的大功率

超声波换能器作为声源, 频率为 10kHz 或 20kHz。实验发现 10kHz 和 20kHz 的声波效果相当, 处理后的烟气颗粒数目浓度减少了 40% 左右。Riera-Franco 等^[55]使用同样的声源, 对柴油机排放的烟气进行处理, 发现 20kHz 的声波团聚效果比 10kHz 更好, 同时发现如果在烟气中增加体积分数为 6% 的水蒸气, 可以提高团聚效果。

2000 年, Liu 等^[56]实验发现, 经 1.5kHz, 150dB 的声波处理后, 旋风分离器对燃煤飞灰的除尘效率提高了 3%~4%。

2004 年, Komarov 等^[57]实验研究了 900℃ 高温条件下的声波团聚, 使用 Zn 在高温下增发, 凝聚成 0.1~80μm 的气溶胶, 实验发现声波频率为 991Hz 时团聚效果最好, 此时气溶胶颗粒数目浓度减少 50% 左右。

2007 年, 陈厚涛等^[58]采用 1kHz 的声波对流化床锅炉的烟气进行处理, 使气溶胶颗粒数目浓度降低 60% 左右。之后, 又采用同样的声源对柴油机排放的亚微米气溶胶进行声波团聚实验, 也取得了很好的团聚效果^[41]。

2007 年, 徐鸿等^[59]采用 1~5kHz 的声波进行团聚实验, 发现对于燃煤飞灰, 最佳团聚频率是 2.9kHz。

除了研究声波团聚效果、各操作参数对团聚的影响, 随着高速摄影技术的发展, 20 世纪 90 年代中期开始, 不少研究者开始尝试用微观高速摄影技术观察颗粒在声场中的团聚过程^[13, 60-64]。在这些实验中, 颗粒之间相互靠近直至碰撞团聚的过程被拍摄下来, 这对研究声波团聚机理有很大帮助。

1.2.3 声波团聚机理研究进展

声波团聚过程非常复杂, 涉及流体力学、声学、气溶胶动力学等多个领域。几十年来, 对声波团聚机理的研究从未停止过, 取得了一些成果。

Mednikov^[32]首先建立了系统的理论来解释声波团聚现象, 提出了著名的同向团聚机理 (orthokinetic agglomeration mechanism)。当对气溶胶施加声场时, 气体介质在声波的作用下发生振荡运动。由于气体的黏性力, 气溶胶中的颗粒也随之发生振荡运动, 这种现象称为声波挟带。颗粒的振幅与气体介质的振幅之比称为挟带系数, 介于 0~1。不同粒径的颗粒, 由于其惯性不同, 被挟带的程度不同, 所以振动的幅度也不同。粒径很小的颗粒几乎能够完全跟随气体运动, 而粒径很大的颗粒, 在声波作用下振动幅度很小, 几乎保持静止。这样, 大颗粒和小颗粒就产生了相对运动, 发生碰撞而团聚。对于微米级的颗粒, 以范德华力为主的表面力远大于重力和流动中的剪切力。所以, 碰撞后就紧紧粘在一起形成一个新的更大的颗粒。Mednikov 还引入团聚体积 (agglomeration volume) 概念, 指的是大颗粒周围能与小颗粒碰撞的区域。如果小颗粒出现在某个大颗粒的团聚体积内, 因为两者的挟带系数不同, 产生速度差, 能够与该大颗粒发生碰撞团聚。

在某些实验条件下, 根据同向团聚机理得到计算结果能与实验值定性符

合^[31, 33, 47, 57, 65]。很多研究者认为, 同向团聚机理是声波团聚中最重要的团聚机理^[34, 35, 66, 67]。但是, 同向团聚机理有两个未解决的难题: 碰撞效率的计算和再填充现象。

在团聚体积内, 如果小颗粒都按直线往返运动, 则团聚体积内的所有小颗粒都能与大颗粒发生碰撞。但实际情况是, 当小颗粒靠近大颗粒时, 运动轨迹无法继续保持直线运动, 而会向远离大颗粒方向偏转, 这样导致团聚体积内部分小颗粒无法与大颗粒发生碰撞团聚。团聚体积内能与大颗粒发生碰撞的小颗粒的比例, 称为碰撞效率。如果颗粒都按直线运动, 则碰撞效率为 1, 但颗粒总会因流体力学作用力发生偏转, 故碰撞效率总是小于 1, 根据同向团聚机理计算得到的团聚率应当乘以碰撞效率得以修正。目前关于碰撞效率的研究较少, 有些采用经验值^[68]或简单计算公式^[69, 70], 而更多的研究者则简单地将其设为 1。

另一个难题是团聚体积的再填充现象。根据同向团聚机理, 团聚体积内的小颗粒发生振荡, 与大颗粒团聚。那么一个周期后, 团聚体积内的小颗粒将全部与大颗粒团聚, 团聚体积就被“清空”了。如果团聚体积外部没有新的小颗粒进入, 之后将不会再发生团聚。而实际情况是, 声波团聚能够持续数秒或数百秒, 这表明外部的小颗粒能迅速进入, 对团聚体积进行填充。团聚体积外部的小颗粒通过各种途径进入团聚体积内部的过程, 称为再填充。团聚体积内部与外部的小颗粒浓度之比, 称为再填充因子。显然, 同向团聚机理还需要再填充因子的修正。Cheng 等^[47]认为布朗扩散运动可作为再填充机理, 他通过数值模拟, 发现通过再填充因子修正后的计算值更符合实验结果。而 Tiwary 等^[65, 71]则认为, 布朗运动太弱, 不足以作为再填充机理。他通过对颗粒之间的流体力学作用的理论研究, 认为流体力学作用可作为有效的再填充机理。实验发现, 当气溶胶浓度高于 5g/m^3 、声强 $150\sim 160\text{ dB}$ 和 2500 Hz 时, 再填充因子可以达到 $90\%\sim 100\%$ 。

为了解释快速再填充现象, 1990 年 Song^[67]提出了共散射作用 (mutual scattering interaction)。由于气溶胶颗粒对声波具有散射作用, 在声场中的某个颗粒不仅受主入射声波的挟带, 还受临近颗粒的散射波的挟带。由于主入射声波和散射声波存在相位差, 一个声波周期后, 颗粒无法回到原来的位置, 使振动的轨迹发生偏移, 所以颗粒之间产生了相对运动。当两颗粒之间的连线与声场方向垂直时, 在共散射作用下会相互吸引, 这样团聚体积外部的小颗粒将被大颗粒吸引, 对团聚体积进行快速填充。随后, Song 等^[72]在理论研究中, 将共散射作用作为声波团聚数值计算中的一个重要机理。但后来, Hoffmann 等^[61]对该作用重新进行计算, 发现按照 Song 的理论, 在开始阶段, 小颗粒的确会被大颗粒吸引, 但当其足够靠近大颗粒时, 吸引力总会转变为排斥力, 使小颗粒再次远离大颗粒。因此, 他认为 Song 提出的共散射作用作为同向团聚的再填充机理不能成立。到目前为止, 声波团聚中团聚体积的再填充机理仍未得到很好的解决。大部分研究者都将

再填充因子设为 1, 发现可以与实验结果符合。因此, 目前对再填充机理的研究, 主要侧重于对快速填充现象的解释上, 而不是对再填充因子的计算。

虽然同向团聚机理取得很大的成功, 但其显然不是声波团聚的唯一机理, 无法解释以下两个现象: ①单分散相气溶胶的声波团聚现象。单分散相气溶胶中的所有颗粒粒径相同, 按照同向团聚机理, 在声场中被声波挟带的程度也一样, 因此颗粒之间没有相对运动, 无法发生团聚。但是, 实验证明^[45], 单分散相气溶胶在声波下也能发生有效团聚, 而且微观实验中也拍摄到相同粒径颗粒之间的团聚^[61]。②按照同向团聚机理, 不同粒径的颗粒在声场中的振幅不同是团聚的根源, 而最大振幅差总是小于声波的振幅, 因此, 颗粒之间最大的作用范围为声波的振幅, 超出该范围则无作用。而实验表明^[64], 颗粒之间能够相互靠近并团聚的距离远大于气体振幅, 因此一定有其他机理在起作用。

为了解释上述两种现象, 研究者提出了流体力学作用机理 (hydrodynamic interaction mechanisms), 主要有声波尾流效应 (acoustic wake effect) 和共辐射压作用 (mutual radiation pressure interaction) 两种。与同向团聚机理不同, 目前对流体力学作用机理的研究较少, 发展不成熟, 而且各研究者的结论差异很大。

声波尾流效应基于声场中颗粒前后流场的不对称^[69], 当颗粒在气体介质中运动时, 颗粒的后面会出现一个低压区域, 称为尾流。如果另外一个颗粒出现在这个颗粒的尾流中, 阻力会变小, 从而加速向前一个颗粒靠近。下半个周期, 颗粒运动方向相反, 两个颗粒的角色互换, 但仍然相互靠近。经过几个周期后, 这两个颗粒就有可能碰撞团聚。

1967 年 Dianov 等^[73]导出了 Stokes 流动条件下, 颗粒连线平行于声波方向时, 声波尾流产生的聚合速度的近似解。1968 年, Dianov 等^[74]又通过忽略二阶小量, 得到 Oseen 流动条件下, 颗粒连线平行于声场的方向时聚合速度的计算公式。此后, 声波尾流效应一直没有得到重视。1985 年, Tiwary^[48, 71]通过数值方法计算了声波尾流现象, 发现该作用力很强, 可以作为同向团聚的再填充机理。1996 年, Hoffmann 等^[61, 62]通过微观高速摄影, 拍摄到单分散相气溶胶颗粒在声场中类似于音叉形状的团聚轨迹, 推断为声波尾流效应引起的, 因此将声波尾流效应作为单分散相气溶胶的主要团聚机理, 这是首次对声波尾流效应的实验验证。此后, Gonzalez 等^[64, 75, 76]对该机理作了更深入的研究, 确定了声波尾流效应是导致单分散相气溶胶声波团聚的主要机理之一。

另一种流体力学作用是共辐射压作用, 基于伯努利定律^[77]。如图 1-4 所示, 当两颗粒垂直于声波方向排列时, 气体介质在两颗粒之间的区域流动速度增大, 根据伯努利定律, 两颗粒之间将产生一个低压区, 使两颗粒相互吸引^[78]。当颗粒之间连线与声波方向平行时, 该作用将产生排斥力。