

## 摘 要

21 世纪污染问题将是人类所面临的巨大挑战。随着污染问题越来越严重,在大气颗粒物污染方面,人们已经开始关注可吸入颗粒物浓度  $PM_{10}$  和超细颗粒物  $PM_{2.5}$  浓度对环境和人体健康的危害和影响。电凝并技术是脱除  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  的有效方法,电凝并技术一直是国内外气溶胶界的一个研究热点。

本文首先对颗粒物电凝并技术的研究进展作了归纳,并对本文中所使用的“电凝并脱除可吸入颗粒污染物”的实验系统做了介绍。

本文使用三种不同的实验方案对模拟烟气中粉尘颗粒进行荷电和凝并:(1)粉尘颗粒在脉冲高压电场中荷电,在直流电场中凝并。通过实验得到荷电电参数变化(脉冲荷电峰值电压  $V_p$ 、脉冲输出波形、脉冲重复频率  $f$ )、不同荷电凝并时间与凝并效率之间的关系;(2)粉尘颗粒在脉冲高压电场中荷电,在低压高频交流电场中凝并。在这一部分实验中主要探讨了交流电场峰值电压  $V_p'$  变化、不同放电电极(荷电电极和凝并电极)型式和不同荷电凝并时间对颗粒的凝并效率的影响;(3)粉尘颗粒在有直流基压的脉冲电场中同时进行荷电和凝并,通过改变单位烟气能耗、放电电极根数、凝并时间来讨论凝并效率的变化趋势。通过以上各组实验我们发现高压脉冲对小颗粒有良好的荷电效果,0.5-1.0  $\mu m$  粒径段的颗粒的凝并效率远远大于相同工况下其它粒径颗粒;当使用正负脉冲和正脉冲放电对颗粒荷电时,获得的凝并效果较好,而负脉冲最差;在使用相同的脉冲电场荷电方式时,低压高频交变电场对颗粒有一定的凝并效果,但是与直流凝并本比效果要差一些;流量对凝并效果有很大影响,流量越大,对应的荷电和凝并时间减少,凝并效果越差;

本文还对带电颗粒再凝并电场中的运动轨迹进行了数值模拟,并对带电颗粒在交变电场中的单个周期内同一横截面上所有颗粒的碰撞频率  $N$  进行了理论计算。得到  $N$  与交变电场峰值电压  $V_p'$  成正比,与交变电场频率  $f$  成反比。

### 关键词

高压脉冲电场 荷电 交变电场 直流高压电场 电凝并 凝并效率

## Abstract

Human being are confronted with the great challenge for the pollution problem in 21 century. In particle pollutant of atmosphere, the harm of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  gets more attention. Electric agglomeration technology is a effective way.

Firstly, we include actuality of particle agglomeration technology; We also include briefly the task system, which called  $PM_{10}$  electric agglomeration system.

In this article, we use three way to charge and agglomerate stimulant gas: (1)Charged in high-voltage impulse field and agglomerated in high voltage direct field; By task, the relation between charging parameters including impulse peak voltage, voltage output shape, agglomeration time and flux and agglomeration efficiency. (2)Charged in high-voltage impulse field and agglomerated in low voltage alternating field of high frequency; In this task, we chiefly discuss how different voltage value of alternating field, charging electrode and agglomeration time influent agglomeration efficiency; (3)In impulse field with direct base voltage, the dust particles are charged and agglomerated simultaneity; Through changing expend energy per gas volume, charging electrode number, agglomeration time, we get agglomeration efficiency curve. High-voltage impulse can charge fine particle well, agglomeration efficiency of particle diameter  $0.5-1.0\mu\text{m}$  is larger than other particles; Positive impulse and positive-negative impulse have better agglomeration effect on particle. Negative impulse is worst; Flux of stimulant gas  $Q$  has very important influence on agglomeration effect. With  $Q$  more, charging time and agglomeration time is longer, agglomeration effect is worse.

The movement track of charging particles is simulated numerically in this article. We also calculate collision frequency  $N$  of the charging particle on the same crossing section in alternating field in one cycling. The conclusion we get is that  $N$  directs to  $V_p'$  and reverses to  $f$ .

### Key word:

High-voltage impulse field; Charging; alternating field; High-voltage direct field; electric agglomeration; agglomeration efficiency

学号 20308186

## 独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 浙江大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：赵爽 签字日期：2006 年 3 月 7 日

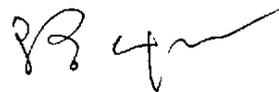
## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 浙江大学 有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权 浙江大学 可以将学位论文的全部或部分内内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名：赵爽

导师签名：



签字日期：2006 年 3 月 7 日

签字日期：2006 年 3 月 7 日

学位论文作者毕业后去向：

工作单位：

电话：

通讯地址：

邮编：

## 第一章 绪论

### 1.1 大气中固体颗粒物对人类的危害

空气是人类最宝贵的资源。现代工业的快速发展、车辆的急剧增加和废弃物的排放等，都使大气污染问题越来越严重，污染源控制已成为人类社会的一个重要的问题。空气污染源可以分为自然源和人为源两类，按形态分可以分为气溶胶状态污染物和气体状态污染物。按照气溶胶的来源和物理性质，可分粉尘，烟，飞灰和黑烟，但有时他们之间的界限难以确切划分，按照我国的习惯，我们将冶金过程或化学过程形成的固体颗粒气溶胶称为烟尘，将燃料燃烧过程产生的固体颗粒气溶胶称为飞灰或黑烟。这些颗粒物最大的粒径有  $1000\ \mu\text{m}$ ，小的能在  $0.01\ \mu\text{m}$  以下。当粒径大于  $10\ \mu\text{m}$  时，因本身的重力作用，能迅速沉降于地面，故称为“落尘”；当粒径小于  $10\ \mu\text{m}$  时，因能长期飘游在空中而做布朗运动，故称为“飘尘”。

燃烧系统、金属冶炼及汽车废气产生的飘尘的化学组成是复杂的，其中有如元素镍、铬、铍、钒、铅、砷的有毒化合物，特别是致癌物质 3、4-苯并芘、苯并蒽等，通过呼吸道

或皮肤进入人体，引起肺癌或皮肤癌。飘尘的危害程度与尘粒的大小及性质密切相关。在各种飘尘中，以粒径在  $0.5\sim 5.0\ \mu\text{m}$  飘尘对人体的危害最大。这是因为粒径大于  $5\ \mu\text{m}$  的飘尘能被鼻毛与呼吸道粘液挡住而排除；粒径小于

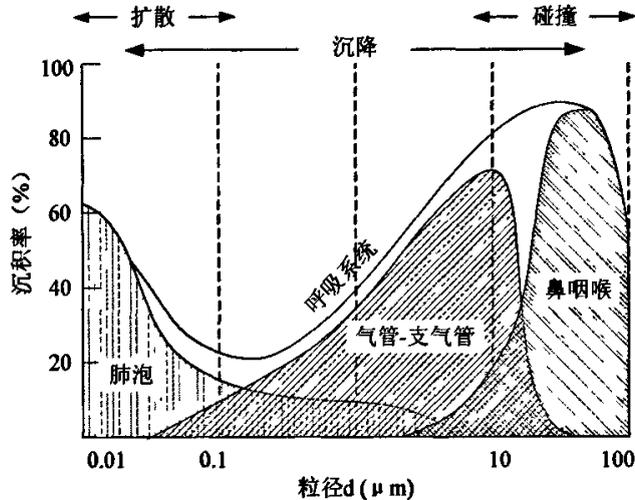


图 1-1 呼吸系统中烟尘沉积状况

$0.5\ \mu\text{m}$  的飘尘，能被粘附在上呼吸道表面随痰而排出，只有粒径在  $0.5\sim 5.0\ \mu\text{m}$

的飘尘能直接深入肺部，在肺泡内沉积、并可能进入血液输往全身，在身体各个部位累积产生症状，见图 1-1。

除对人类的危害外，空气中的颗粒物增多还会降低机械加工精度，对精密仪器的生产、安装、调试、使用都会产生不良的影响。植物蒙尘时光合作用将变弱；在烟尘污染严重的地区会引起农作物产量降低，植被受害，生长受损。烟尘严重污染大气会导致出现“烟雾日”，影响交通运输，增加发生交通事故的几率，影响人类的正常生活。

### 1.1.1 可吸入颗粒物的危害

随着污染问题越来越严重，原先对污染物的研究深度已不能满足新的要求，在大气颗粒物污染方面，人们已开始注意可吸入颗粒物( $PM_{10}$ ，指空气动力学当量直径小于 $10\mu m$ 的颗粒物)和超细颗粒物( $PM_{2.5}$ ，指空气动力学当量直径小于 $2.5\mu m$ 的颗粒物)浓度对环境和人体健康的危害和影响。众所周知，可吸入颗粒物(IP)浓度是反映大气质量的一个重要指标，而仅仅 $PM_{2.5}$ 就在IP中占约为70%的比重。可吸入颗粒物进入人体有两个方面的危害：一是可吸入颗粒物复杂的化学成分造成对人体的危害。 $PM_{10}$ 中大多含有氯化钠、氟化钙、镉的化合物、铁、钒化合物等，有的还携带苯及同系物，可引发癌症<sup>[1]</sup>。当这些物质沉积肺中，有些可溶解直接进入血液，造成血液中毒。如血液中铅量积累到一定程度时，使心肺病变，损害大脑、破坏神经，可影响儿童智力正常发育。二是 $0.5\mu m-5\mu m$ 的粒子以及未被溶解的污染物，可直接进入肺泡并在肺内沉积，被细胞吸收，侵入组织细胞，形成尘肺。研究还表明，由于超细颗粒物 $PM_{2.5}$ 可作为其它污染物的载体，可以吸附多种化学组分随呼吸进入人体，并能使毒性物质有更高的反应和溶解速度，而且随着其粒径的减小，超细颗粒物在大气中的存留时间和在呼吸系统的吸收率也随之增加。 $PM_{2.5}$ 易富集空气中有毒重金属、酸性氧化物、有机污染物、细菌和病毒等，且能较长时间停留在空气中，因此对呼吸系统影响极为严重<sup>[2]</sup>。

我国已在1996年把可吸入颗粒物浓度列入10种大气环境质量标准之一。美国环保局(US EPA)在1997年提出了 $PM_{2.5}$ 的大气环境标准。规定24小时平均值为 $65\mu g/m^3$ ，年平均值为 $15\mu g/m^3$ 。欧共体建议2010年实施 $PM_{2.5}$ 的限制值：24小时平均值为 $38\mu g/m^3$ ，年平均值为 $19\mu g/m^3$ 。

## 1.1.2 我国大气污染现状

我国是世界上大气污染比较严重的国家之一，城市大气污染更为突出。我国是世界上最大的煤炭生产国和消费国，也是以煤炭为主要能源的大国，并且这种能源结构在长期内不会改变。根据国家环保局(NEPA)公布的资料，中国的大气污染是典型的煤烟型，全国所排放烟尘量的 80%，SO<sub>2</sub>的 90% 都来自于煤的燃烧<sup>[3]</sup>。我国从 2004 年 1 月 1 日起开始实施的《火电厂大气污染物排放标准》GB13223-2003<sup>[4]</sup>，与先前执行的《火电厂大气污染物排放标准》GB13223-1996<sup>[5]</sup>比较，烟尘排放标准从 200~600 mg / m<sup>3</sup> 提高到 50~600 mg / m<sup>3</sup>。由于工业生产中大量使用煤，因此对工业尤其是电厂中燃煤锅炉所排放的大量粉尘治理也就相当重要。

## 1.2 传统除尘方式和除尘器

工业锅炉排放的烟尘根据产生的过程与性质不同，可以采取不同的方法收集。例如，黑烟（包括碳及重碳氢化合物未完全燃烧的产物）可以通过改造锅炉，改进燃烧的调节方式，使它们在炉膛内充分燃烧。而灰尘颗粒物则可以通过安装除尘器的方式来收集。把改进燃烧与安装除尘器这两项措施结合起来是最有效的方法。目前，使用除尘设备来控制污染源排放的颗粒物是保护大气环境的主要手段。

### 1.2.1 除尘器的分类

除尘器利用不同的作用力，如重力、惯性力、离心力、扩散附着力、静电力等使烟气中颗粒物得到分离与捕集。按烟尘从烟气中分离出来的作用原理，除尘器可分为以下四大类，即机械力除尘器（包括重力沉降室、惯性除尘器、离心力（如旋风）除尘器等）、电除尘器、过滤式除尘器（布袋除尘器）、洗涤式除尘器。

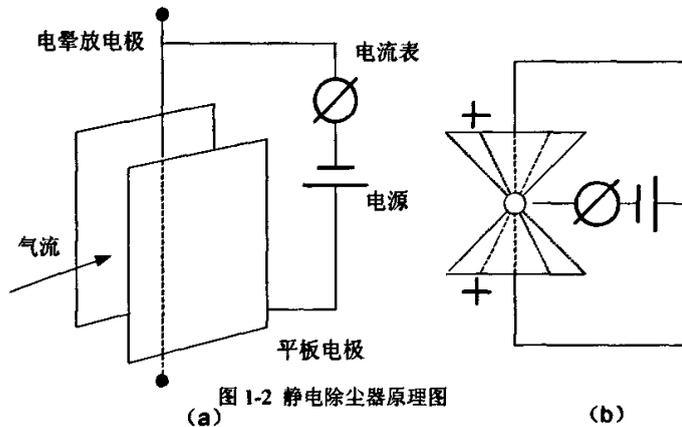
按照除尘过程中涉及到有无液体参与作用，又可将除尘器分为干式除尘器（无液体参与作用）和湿式除尘器（有液体参与作用）两大类。其中在我国燃煤电厂中使用得最多的是袋式除尘器和利用高压静电场力来除尘的各种高压静电除尘器。下面就简单介绍一下在我国广泛使用的静电除尘器。

## 1.2.2 静电除尘器

目前我国大多数电厂都是采用电除尘器（ESP）收集烟气中的飞灰颗粒。在常规电除尘器中，颗粒被单电晕放电电极产生的离子荷电，然后在电场力的作用下达到收尘极板。由于电除尘器内气流流速低，一般控制在  $1 \text{ m/s}$  左右，因此气流运动阻力损失很小，一般只有  $200 \text{ Pa}$  左右，除尘器能耗很低。电除尘器一般可以耐  $370^\circ\text{C}$  高温，是当今世界上能够每小时处理几百万立方米高温烟气的最主要的高效除尘设备。但是在实际运行中，由于对电除尘器除尘效率产生影响的因素很多，使得电除尘器性能不够稳定。影响电除尘器除尘效率的两大主要问题是除尘器的结构设计以及被处理的含尘气体的性质，尤其是粉尘的比电阻的调节。目前对稳定电除尘器性能所作的科学研究项目几乎都是围绕这两方面问题进行的。

### 1.2.2.1 静电除尘器工作原理

电除尘器的除尘作用力主要是静电力，其次是扩散力、惯性力与重力，原理如图 1-2 所示。



烟气通过除尘器时的净化过程可分为气体电离与烟尘荷电和烟尘沉积两阶段。烟尘的运载介质是空气，空气在一般情况下被认为是绝缘体。但空气中也有极少量的电子、离子存在。当在集尘板(为正极)与中央电线(为负极)之间所施加的电压足够高时(达数十千伏)，由于中央细电线表面附近的场强很高(可达  $10^6 \text{ V/m}$ )，且场梯度也很大(可达  $10^9 \text{ V/m}$ )，使残留于大气的正离子被加速吸向电

线表面,除中和外,在满足一定条件下还将撞出次级电子。或是由于外光电效应,或是由于电线表面的微观凹凸不平而引起电子隧穿等各种可能因素或综合效应,引起阴极表面电子发射,这些电子以及在空间中原始存在的少量自由电子经表面附近的强场、强梯度场的作用,其动能迅速变大,并与气体分子发生碰撞。当满足一定条件(量子化条件)时,这些气体分子也被电离而放出电子;这些电子再经加速又与其它分子碰撞再放出;如此重复上述过程(占次要地位的中和或俘获等逆过程[即消电]被忽略)。顷刻之间(约  $10^{-8}\text{s}$ ),电子数激增而形成电子雪崩。电子崩头作逆着电力线方向的定向漂移快速运动(留下正离子向着阴极线运动)。随着正负电荷的迅速分离,相互作用势能急剧增加(绝对值减少),在远离中央放电线的电晕外区,场强急剧降低甚至可能反向使电子的动能很快下降,碰到气体分子上不是使其电离,而是被其俘获,形成负离子,并将多余能量以光子形式放出,形成一个发蓝光的电晕区。这就是气体电离的过程,这一过程进行很快,顺气流运动可忽略,当负离子碰到具有较大俘获截面的粉尘粒子时,通过多种可能渠道(物理吸附、化学吸附、电子转移等)而使粉尘荷负电。荷负电粒子除作顺气流运动和扩散运动外,还在电场力驱使下,向阳极集尘板方向迁移。在迁移的整个路径上继续与其它未荷电粒子碰撞,电荷部分转移,使除尘器中绝大部分粉尘粒子荷电,粘附到集尘板上的粉尘层上,其电荷通过粉尘层向正极板上转移,由此完成了烟尘荷电及沉积的过程。最后,烟尘与气体便分离开来,烟尘被收集,而净化气排出<sup>[6]</sup>。

### 1.2.3 常规静电除尘器对亚微米级颗粒收集效率不高

电除尘器在正常运行工况下除尘效率很高,高效电除尘器的除尘效率(质量收集效率)高达 99.7%。但是对于粒径  $0.1\sim 1.0\mu\text{m}$  的亚微米级的颗粒来说,仍有高达 15%的颗粒会离开除尘器排入大气<sup>[7]</sup>。如此多的小颗粒进入大气会导致许多问题,其中最严重的就是环境和人类健康问题。现在已经有了关于  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  的排放规定,以后的规定将更加严格。目前,为提高除尘效率,有的电除尘器甚至采取两级或三级电场;但是由于静电除尘效率与极板面积成指数关系,所以虽然体积增大了许多,但除尘效率提高得却很少,特别是对  $\text{PM}_{2.5}$  的脱除作用依然很弱。

图 1-3 为常规电除尘器在亚微米级颗粒区的收集效率的下降趋势。这个下降是由于对小颗粒缺乏足够的荷电造成<sup>[8]</sup>。因此,改善静电除尘器的供电条件,提供高强度的电晕电场强制粒子荷电,是一种方法;利用颗粒的凝并特性,采用专门的技术手段,

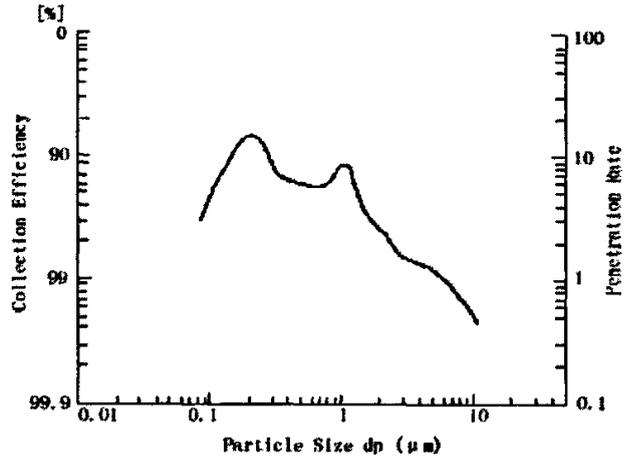


图 1-3 520MW 燃煤锅炉上电除尘器的除尘效率

使微细粒子凝并成较粗的粒子后再处理是另一种方法。凝并变大的粉尘颗粒采取常规除尘方式(如旋风除尘器、布袋除尘器、电除尘器等)去除时,可提高除尘效率,降低运行成本。因此颗粒凝并与普通除尘方式配合可以提高颗粒的收集效率,使除尘效率增加。

### 1.3 国内外对可吸入颗粒物的脱除方法

电站中煤的高温燃烧是  $\text{PM}_{10}$  的重要来源,也是其中毒害性最大的部分。国内现在一般采用电除尘方式,并开始逐步推广布袋除尘系统。静电除尘器依靠颗粒荷电被吸附脱除,小颗粒主要通过自身和电子的随机扩散和碰撞即扩散荷电作用被荷电;较大颗粒主要通过附着电场中方向运动的电子即电场荷电从而带电;但是  $1\mu\text{m}$  附近的颗粒由于处在场荷电和扩散荷电混合区,其荷电能力很差,从而很难脱除。布袋除尘器主要靠惯性碰撞、拦截和扩散脱除,同样,由于  $1\mu\text{m}$  附近的颗粒正好处于惯性和扩散混合区,布袋对其脱除效率同样很低。即使现在采用的覆膜滤料,增强了拦截作用,对  $\text{PM}_{10}$  作用有显著加强,但却仍未能达到期望水平<sup>[9]</sup>。

目前国内外对  $\text{PM}_{10}$  的脱除方法主要有静电与其它方式结合的方式,还有一种方式是在常规除尘器之前加上一个凝并器,使较小颗粒凝并成较大的颗粒,以达到常规除尘器的高效除尘范围。

#### 1.3.1 静电与其它方式结合

### 1、静电与传统旋风除尘器相结合

静电增强旋风分离器的基本思想是在旋风分离器空腔主轴上加入电晕极,在其周围能产生较高的电子密度和较强的电场力。纪万里等的实验显示,当风速为8m/s时,1 $\mu$ m粒径的分级效率从不加电时的35.5%上升到90.6%<sup>[10]</sup>。但是在实际过程中,这种方式容易出现两种机理的冲突。如入口风速增大,颗粒停留时间变短,静电作用降低,分级效率与旋风分离器的效率相似;风速太小的话,旋风作用减弱,如果风速太低,还会出现类似静电作用下的某段粒径分级效率“低谷”。

### 2、静电与颗粒层除尘器的结合

颗粒层除尘器是利用粒状物料(通常是1.5~5mm石英砂)作为过滤介质净化烟气的除尘设备,在水泥、炼焦、化工和冶金业得到广泛运用。静电增强颗粒层除尘器包括粉尘荷电,颗粒层不带电场;粉尘不荷电或荷电较少,颗粒层带外部电场;粉尘预荷电,颗粒层带外部电场三种方式。其中在第三种方式中,粉尘颗粒在颗粒层中受到电场力和镜像电荷吸引力,这种布置对颗粒脱除作用最大。但是这种系统由于压损太大,过滤速度只能控制在较小范围内,所以体积庞大,而且清灰复杂。

### 3、静电与布袋结合的方法

静电和布袋除尘是现在电厂利用最多的两种除尘方式。20世纪90年代开始美国电力研究所就开发出紧凑型混合颗粒收集器(COHPAC),即在原有静电除尘器后加一个脉冲布袋除尘器<sup>[11]</sup>。而且在这种方法中还可以在静电除尘器和布袋除尘器之间注入吸附剂,能协同脱除SO<sub>2</sub>、汞等污染物,提高吸附剂利用率,减少静电除尘器捕获灰粒的毒物含量,提高其经济价值。在美国能源部的资助下,美国能源环境研究中心又开发了一种结合更为紧凑的系统“先进混合除尘器(AHPC)”<sup>[12]</sup>。将静电除尘和布袋除尘集于一个腔内,把滤袋置于静电极板和极线之间,实现了真正的混合。这种系统体积更小,极板和滤袋材料的使用成倍减少。但是此技术的难点之一就是滤袋的保护。该系统于1999年7月在美国大石电厂对旋风燃烧锅炉产生的高比电阻飞灰进行了试验,试验测定其对

0.01~50 $\mu\text{m}$  颗粒的脱除效率达到了 99.99%，而且砷、镉、铅、镍已测不到。

### 1.3.2 凝并技术

由于传统的除尘技术难以控制超细颗粒物的排放，因而研究超细颗粒物凝并促进技术具有重要的意义。超细颗粒的凝并促进技术主要有：声凝并、电凝并、磁凝并、热凝并、湍流边界层凝并、光凝并和化学凝并。

#### 1. 热凝并

热凝并又称为热扩散凝并，是指超细颗粒物在没有外力、温度较高的环境下产生明显的成核和凝并的现象。由布朗运动(扩散)导致气溶胶粒子互相接触而合并的过程叫热凝并，也是最常见的一种凝并方式。通常情况下，对于烟尘浓度高，粒径相差较大的颗粒物，热凝并的效果比较明显<sup>[13]</sup>。对于常温下单分散性的球形尘粒，如将其计数浓度为  $10^6$  粒 /  $\text{cm}^3$  降至  $10^4$  粒 /  $\text{cm}^3$ 。也就是说让尘粒的体积等效径增 2.2 倍，忽略重力沉降和边壁效应，按经典的热凝并方程计算，其凝并时间约为 9 小时以上。显然，由于热凝并过程非常缓慢，难以到达有效分离细微粉尘的实际要求。

#### 2. 声凝并

声凝并是指在声场作用下，气固两相物中的固相和气相之间会发生复杂的相互作用。一般来讲各种相互作用是同时进行的，使得微粒相互靠近并且最终凝聚。而多分散系统的气溶胶本身是一种表面能不稳定的体系，有相互凝结成较大颗粒的趋势，声波能加速颗粒的运动速率，增加了粒子的碰撞几率，从而使气体中的微粒聚集成较大的颗粒，易于被捕集。

声凝并的机理有三种：第一种是同向凝聚作用。声波场中的粒子随气体介质的振荡而趋于前后运动，小颗粒随介质运动较快，而大颗粒较慢，结果不同粒径颗粒的相对运动加速颗

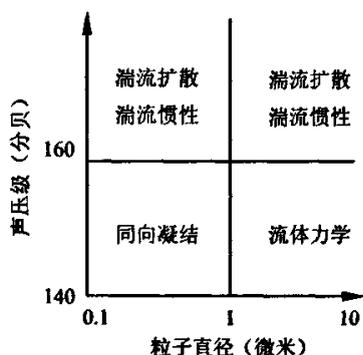


图 1-4 各种声凝并机理的相对重要性

粒碰撞而使颗粒凝并。第二种是流体力学作用，在单分散体系中，颗粒之间的相对速度为零，但声波凝并实验表明颗粒凝聚现象很明显。一般认为存在两种流体力学作用：伯努力流体力学作用，流场中在垂直于波速方向的两个颗粒之间形成类似射流的作用，根据伯努力原理存在的静压会拉近颗粒而使其碰撞；另外一种流体力学作用是由于围绕每个颗粒的流场不对称造成的。第三种是湍流扩散和湍流惯性。当声场强度超过某一数值（约 160dB）时，就会出现声致湍流，湍流中粒子间的碰撞有两种机理。一种是湍流扩散，是由于粒子空间不均性产生速度差异，产生碰撞；二是湍流惯性。粒子运动跟不上区域湍流而产生相对运动<sup>[14][15]</sup>。

各种声凝并机理的相对重要性如图 1-4 所示。

声波的频率和强度对凝并有一定的影响<sup>[16]</sup>，高频和低频对收尘都有一定的效果。实验室的声波除尘装置由声波发生器、声凝并箱和分离器组成。声凝并方法收集亚微米粉尘是有效的，曾一度引起除尘界的极大关注。但是对于高频来说，为了产生几十甚至上百千赫的声波，需要解决高能耗的问题，同时还需要消除噪声的危害。因此，如何产生低成本的有效声场，也是高频声能消烟除尘技术能得以应用的重要研究课题。也正是因为这个原因，到目前尚来制造出实用的声波除尘器。

### 3. 电凝并

电凝并是通过增加微细颗粒的荷电能力，促进微细颗粒以电泳方式到达飞灰颗粒表面的数量，从而增加颗粒间的凝并效应。

在外电场中，微粒内的正负电荷受到电场力的排斥，吸引而作相对位移。尽管位移是分子尺寸的，但相邻分子的积累效应就在微粒两侧表面分别聚集有等量的正负束缚电荷，并在微粒内部产生沿电场方向的电偶极矩。电场对微粒的这种作用即为电极化作用。微粒荷电后成为一种电介质，这种电介质进入电晕电场后，在场强的作用下，其原子或分子发生位移极化或取向极化，产生附加电场，这种附加电场反过来又进一步改善其极化程序。

微粒在电场中被极化而产生极化电荷，无论在非均匀电场（如电除尘器的电晕板附近），或在均匀电场（如电除尘器的近收尘极区域），粒子的偶极效应将使粒子沿着电力线移动，在很短的时间内就会使许多粒子沿电场方向凝结在一起，

形成灰珠串型（亦称链式结构）的粒子集合体。我们注意到，粒子在电场中形成“灰珠串”的现象与粒子是否带电（自由电荷）无关。因为极化产生的电荷起源于原子或分子的极化，因而总是牢固地粘缚在介质上。它与导体上的自由电荷不同，既不可能从介质的一处转移到另一处，也不可能从一个物体传递给另一个物体。即使物质同时具有导电性，情形也是如此。若使介质与导体相接触，极化电荷亦不会与导体上的自由电荷相中和。因此，只要有电场的存在，粒子就会极化，就会有凝并现象发生。而且这种粒子的偶极效应不仅发生在电场空间，形成空间凝并，即使在电除尘器的收尘极板上，已释放电荷的粒子间仍由于极化作用的存在而凝并在一起<sup>[17][18][19]</sup>。

电凝并理论与实验研究的核心是确定电凝并速率（电凝并系数）的大小，其研究目的是尽可能地提高微细尘粒的电凝并速度，使微细尘粒在较短的时间内尽可能地凝并而增大粒径，从而有利于被捕集。目前，应用电凝并技术收集亚微米粉尘是国内外气溶胶界的一个研究热点。

#### 4. 磁凝并

磁凝并指的是强磁性颗粒经磁场作用，即磁选或预磁后，由于其剩磁的相互作用而产生的凝并现象。研究表明，磁凝并除尘对收集亚微米粒子的效率是极高的。而且磁凝并也广泛应用于工业废水的处理当中<sup>[20]</sup>。

#### 5. 湍流边界层凝并

湍流凝并是指超细颗粒物在湍流的射流中有明显的成核和凝聚现象，而且成核和凝聚的颗粒将进一步长大。边界层凝并是由于横向速度实用梯度引起的碰撞而导致的凝并现象，又称为梯度凝并。

在湍流流动中，同时存在热凝并、梯度凝并和湍流凝并，并且随着超细颗粒物的直径增大，这三种凝并作用依次增强。湍流脉动速度会促使颗粒碰撞并发生凝并，且在湍流流动的边界层内，对于粒径较小的微粒，由于横向速度梯度引起的凝并效果也非常明显。

#### 6. 光凝并

光凝并是指应用光辐射的原理促进颗粒物凝并。光凝并一般遵循如下过程：入射电子束→等离子体膨胀→等离子体云膨胀→成核→冷凝膨胀长大+等离子体云膨胀→凝结→不规则片形状→凝并→凝胶化。

## 7. 化学凝并

化学凝并是指使用固体吸附剂捕获超细颗粒物的除尘方法，主要通过物理吸附和化学反应相结合的机理来实现的。化学凝并对除去超细颗粒物不仅十分有效，而且可以实现多种污染物同时脱除。

以上为几种不同的凝并形式。我国目前大部分电厂使用的都是电除尘器，因此电凝并的方式更适于电厂除尘器改造。在本文中，就主要阐述电凝并对颗粒物的脱除作用。

电凝并除尘方法通常是在电凝并箱后串联一常规除尘装置(如旋风除尘器、电除尘器、过滤除尘器等)以分离凝并后的粗尘。因此，研制速凝高效、能耗小、成本低的电凝并箱是推广其工业应用的关键，实现带电尘粒的快速凝并是理论与实验研究的核心。目前，国外的许多气溶胶科学工作者正致力于粒子凝并现象的研究。

### 1.4 带凝并区的新型电除尘器的提出

由于常规电除尘器在亚微米级颗粒区的较低收集效率，20世纪九十年代中期，日本京都大学(TMU)学者 Watanabe 等人首先将电凝并技术与常规电除尘技术相结合，提出了一种新型的电除尘器，专门用于高效收集烟气中的亚微米颗粒。基本结构如图 1-5 所示。

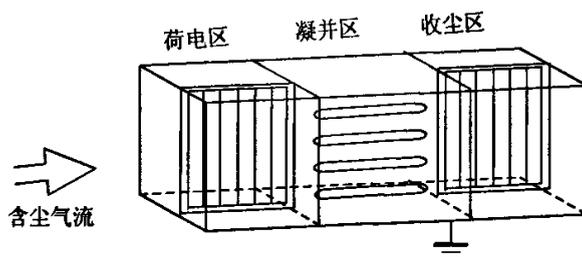


图 1-5 电凝并型电除尘器结构示意图

该除尘装置分三个区：前区为预荷电区，先将亚微米烟尘荷电并收集较大粒径的颗粒；中区为凝并区，厚而长的高压电极代替原来的放电电极。这些电极被

施加叠加了直流电压的交流电压（AC）以促进电凝并过程；末区为收尘区，收集凝并后变大的颗粒。前区和末区与常规板式电除尘器相同。

测试结果表明，采用电凝并时， $1\mu\text{m}$  以下的尘粒重量百分比减少 20%，平均粒径增加 4 倍。在凝并区交流电压 15KV，收尘区直流电压 30KV；温度  $60^\circ\text{C}$ ，粒径范围  $0.06\mu\text{m}\sim 12\mu\text{m}$ ，入口浓度  $7\text{g}/\text{m}^3$  的情况下，不采用电凝并的除尘效率为 95.1%，采用电凝并后的效率为 98.1%。效果是明显的，应该指出的是，Watanabe 采用的是单极性预荷电法，如果采用偶极荷电，根据前面的讨论，该除尘器的收尘效果可能会进一步提高。

### 1.4.1 不同荷电凝并形式的介绍

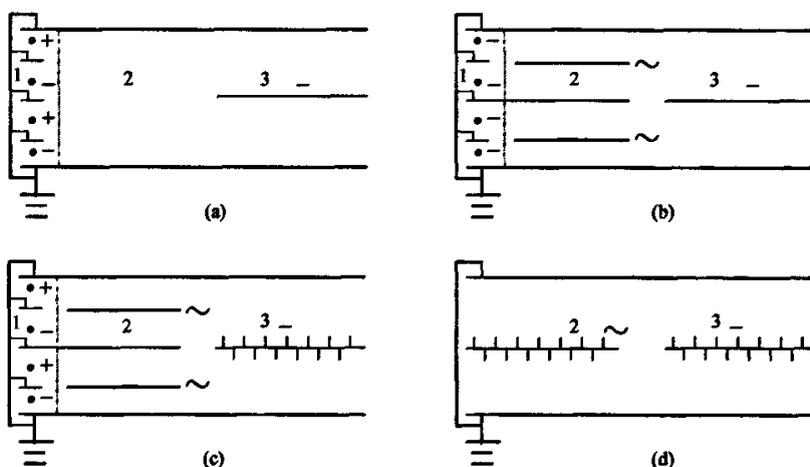


图 1-6 电凝并收尘装置的结构形式  
1-预荷电区；2-凝并区；3-收尘区。

按照粒子荷电极性可分为同极性荷电粒子的凝并<sup>[21]-[26]</sup>和异极性荷电粒子的凝并。将烟气分成两部分，在荷电器中，每部分被分别荷上相反的电荷，这种荷电方式被称为异极性荷电<sup>[27]</sup>。目前的研究主要概括为三方面：异极性荷电粉尘的库仑凝并；同极性荷电粉尘在交变电场中的凝并；异极性荷电粉尘在交变电场中的凝并。如图 1-6 所示。

#### 1.4.1.1 异极性荷电粉尘的库仑凝并

异极性荷电粉尘的库仑凝并原理如图 1-6 (a) 所示。微尘在预荷电区中荷以异极性的电荷，在凝并区内靠库仑引力而结成较大颗粒，然后在收尘区中被捕集。Kanazawa 等人采用图 1-6 (a) 所示的静电凝并除尘装置收集烟草烟雾（粒

径小于 0.5 微米)的效率达到 80%。

#### 1.4.1.2 同极性荷电粉尘在交变电场中的凝并

同极性荷电粉尘在交变电场中的凝并除尘装置如图 1-6 (b) 所示。粉尘在预荷电区荷以同极性电荷后,引入到加有交流电压的凝并器中。按理,同极性荷电粉尘相互排斥不利于凝并,但 Watanabe 认为:由于亚微米粉尘的布朗运动,加之荷电尘粒在交变电场力作用下的往复振动,增加了粒子间相互碰撞的机会,从而产生凝并作用。Watanabe 等人的实验结果表明:用图 1-6 (b) 的凝并除尘装置处理  $0.06\sim 12\mu\text{m}$  的飞灰,比常规电除尘器的效率提高 3%(由 95%增到 98%)。Hautanen 和 Kilpelaunen 采用类似的凝并装置除油烟,也得到较好的实验结果。

#### 1.4.1.3 异极性荷电粉尘在交变电场中的凝并

异极性荷电粉尘在交变电场中的凝并除尘装置如图 1-6 (c) 所示。由于采用异极性预荷电方式,加快了异极性荷电粉尘在交变电场中的相对运动,有利于荷电粉尘的相互吸引、碰撞、凝聚,从而提高了凝并速率。Kari

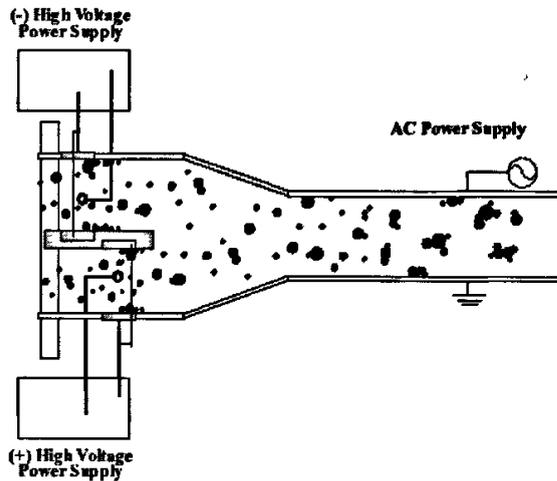


图 1-7 电凝并示意图

等人的对比研究发现,异极性荷电粉尘在交变电场中的凝并作用远大于同极性荷电粉尘在交变电场中的凝并。显然,异极性荷电粉尘在交变电场中的凝并除尘技术应成为电凝并除尘的发展方向。图 1-7 为异极性荷电的原理图,在预荷电区,粒子分别通过正负直流高压电场进行偶极荷电。在之后的凝并区施加交变电场。由于速率和振幅不同,荷电的大颗粒和微细颗粒间将发生碰撞。如果在碰撞后没有分开,烟气中微细颗粒的浓度将会减少,用常规除尘器就可以将这些较大的颗

粒很容易地收集下来。在研究中所使用的电凝并装置大多为线板式<sup>[28]</sup>。

### 1.5 凝并中的关键性问题：荷电电源和凝并电源的选择

粒子荷电问题几乎涉及到所有静电应用技术领域；在静电除尘技术中，粉尘粒子的荷电量是直接影响电除尘器性能的一个重要物理量。最初主要采用直流电晕的方法对微粒进行荷电，在直流电晕放电时，微粒主要通过离子的电场荷电和扩散荷电两种方式荷电，但由于离子获得的能量较低，微粒的荷电也就较低。Musuda 曾做过脉冲供电电除尘器的性能测试，结果表明：对于小于  $2\mu\text{m}$  粉尘粒子除尘效率提高很多。这是因为在纳秒级窄脉冲放电时，电子荷电在微粒荷电中

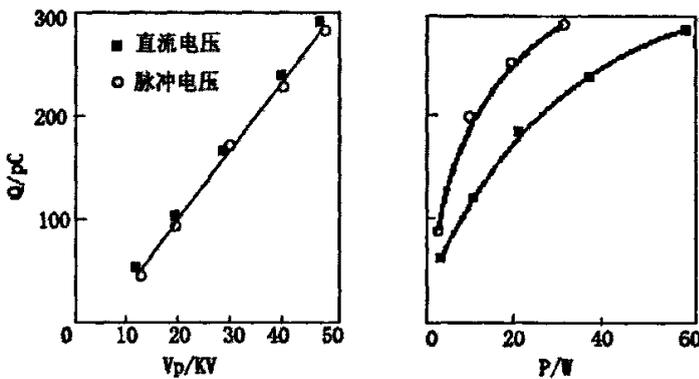


图 1-8 直流和脉冲电压下电压和输入功率对荷电量的影响

起到了重要的作用，因此可以显著地提高微细颗粒的荷电量。另外在恒电场中，场荷电很快在微粒表面形成势垒能，使微粒荷电达到饱和，抑制微粒的进一步荷电。但在脉冲放电期间，高能电子足以克服微粒表面的势垒能而轰击荷电微粒表面，从而可使微粒的荷电量大大超过场饱和荷电的极限。因此，脉冲荷电可显著提高微粒的荷电量。在本文中实验所用荷电电源为高压脉冲电源。

#### 1.5.1.1 脉冲荷电优势

大连理工大学电磁工程系<sup>[29]</sup>实验采用线-板式电极系统，采用钢球落下法对粒子在电晕场中的荷电量进行测量。对比直流和脉冲高压电源的不同荷电效果。吴彦等人使用自制的脉冲高压电源进行实验，峰值电压在  $0\sim 100\text{KV}$  范围内连续可调，重复频率为  $50\text{Hz}$ 。

当脉冲电压峰值与直流电压下相同时，两种电压下的粒子荷电量相同，即粒

子的荷电量与电压的峰值有关。随着电晕电压的增加粒子的荷电量增加,并在图中为一直线关系,所以粒子荷电量  $Q$  与峰值电压  $V_p$  应成正比关系。由于粒子的荷电量与电压的峰值成正比,而脉冲电压又具有较高的火花放电电压,所以与直流电压相比,在火花电压范围内,脉冲电压可以使粒子获得最大的荷电量。

无论是直流电压还是脉冲电压,粒子的荷电量都随着电晕功率的增加而增加。在相同的电晕功率下,脉冲电压对粒子的荷电量明显高于直流电压。即对于得到相同的粒子荷电量,脉冲电压可以具有较小的电晕功率,从能量的角度来讲,这也是十分有利的。

有些学者发现在直流供电时一些特定条件下与离子荷电不符的现象, Penny 和 Lynch<sup>[30]</sup>实验研究发现,在其它条件相同时,  $0.3 \mu\text{m}$  粒子负电晕荷电量比正电晕荷电量高 50%。McDonald<sup>[31]</sup>发现,在高温时直径  $1\sim 2 \mu\text{m}$  粒子负电晕荷电量是正电晕的 2 倍。他们认为是自由电子使粒子荷电量增加。许德玄在研究脉冲电晕放电荷电时也指出了电子的荷电作用<sup>[32]</sup>。

### 1.5.1.2 脉冲荷电机理

在脉冲供电时,特别是窄脉冲供电时,由于所加电压峰值比直流供电高很多,电子获得能量高,能电离中性分子,产生氧化性强的自由基,氧化脱除  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  等有害气体。而离子由于脉冲过窄,能量增加很少,仍处于与中性气体分子平衡状态。电晕放电区域可达异性电极,放电流注通道呈非平衡等离子体状态,存在电子、正离子和负离子,电子和离子能量不平衡,正、负离子数量不平衡。对纳秒级窄脉冲这样一种特定放电状态下的粒子荷电,不能再沿用传统的离子荷电理论<sup>[33]</sup>。

在窄脉冲流光放电的过程中,流光的发展起始于电子崩,在电场的作用下,电子在奔向阳极的过程中,不断撞击、电离气体分子,形成电子崩,在崩内电子数和离子数随电子崩发展的距离按指数规律急剧增长。由于电子的迁移率比正离子的迁移率大两个数量级<sup>[34]</sup>,所以电子总是跑在崩头部分,其后则是正离子区。电子崩的空间电荷分布使电场发生畸变,此时空间电场是外加电场和空间电荷所造成电场的叠加。崩尾电场被加强,崩内正负空间电荷混杂处的电场被大为减弱,而崩头前面的电场则被激烈加强。崩头的激烈电离过程必然会伴随着强烈的激励

和反激励过程，因为受激状态是极不稳定的，存在时间极短。强烈的反激励会放射出大量光子，光子向四方发射，发生光电离，产生次电子崩，次电子崩受主电子崩尾的正空间电荷中去。次电子崩头部的电子了汇合到主崩尾部正空间电荷区，使主崩本体区域成为正、负带电质点的混合通道。由于主崩电子进入阳极，通道中正离子多于电子和负离子，通道是微正电性。主崩通道头部边缘为次电子崩的崩尾正空间电荷区，这些正空间电荷大大加强了崩尾外围的电场，推动流光逐渐向阴极方向发展，最后到达阴极，形成贯穿间隙的流光通道。

在脉冲流光放电过程中，电子漂移速度最高可达  $10^7\text{cm/s}$ ，而离子速度只有  $10^4\sim 10^5\text{cm/s}$ ，脉冲放电开始到结束时间为  $200\sim 300\text{ns}$ ，在这段时间内，可以认为离子不动，气体放电主要为电子导电。脉冲放电时电流达到数十乃至数百安培，只有电子导电才能达到如此大的电流。通常的直流电除尘电晕电流只有几百毫安。在  $\text{ns}$  级窄脉冲高压下，电子能够获得  $5\sim 20\text{eV}$  的能量，可以电离其它气体分子，远高于气体温度，扩散系数与迁移率之比大，电子处于“热态”。离子由于其质量大，在脉冲放电过程中几乎不动，仍处于与气体平衡状态，与气体温度相同<sup>[35]</sup>，对粒子荷电能力弱。在脉冲放电期内，由于电子能量高，漂移速度大，荷电能力强，尽管时间很短，也能使粒子获得较高荷电量，所以主要是电子荷电。脉冲过后，由于大量电子的逸失，放电空间净电荷为正离子电荷，加藤等对流光模拟计算结果都显示，脉冲放电通道为微正电性，正离子密度略高于电子密度，比负离子密度高一个数量级<sup>[36]</sup>。脉冲过后，由于电场强度降低，正负离子迅速复合。由于负离子很快被复合掉，因此可以认为脉冲过后，放电间隙空间电荷为正离子电荷，在拖尾电压作用下对粒子进行荷电。

### 1.5.2 凝并电源的选择

加快带电粒子凝并的有效途径是增加粒子间相互碰撞的机会。交流高压电场的凝

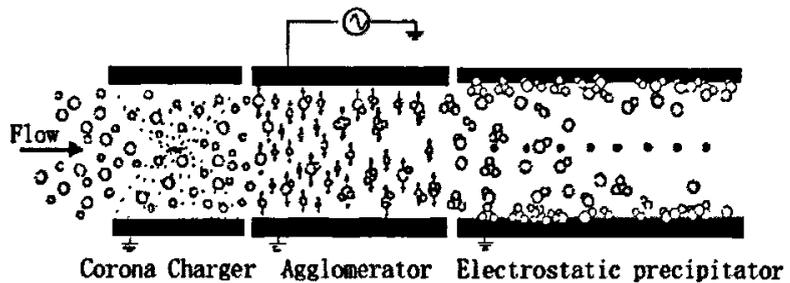


图 1-9 交变电场中小颗粒凝并原理

并区中，荷电尘粒在交变电场力作用下产生往复振动，粒子间相互碰撞而凝聚，可以极大地提高凝并速率。荷电粒子在交变电场中凝并过程如图 1-9 中中间区域所示。

## 1.6 本文研究内容

本文研究的内容为对可吸入颗粒物的电凝并脱除作用。全文共分八章；

第二章是电凝并脱除可吸入颗粒物的发展现状；

第三章为实验方法、实验仪器设备、实验装置的介绍。对实验中用到的仪器与设备的具体型号，工作原理和测试方法等进行较为详细的说明；并详细介绍了我们自己搭建的电凝并实验台结构和工作原理；

第四、五、六章是可吸入颗粒物电凝并的实验研究；本文实验中共使用三种不同的荷电凝并方式，在此三章中分别进行讨论；第四章主要是讨论颗粒在高压脉冲电场中荷电，在直流电场中凝并，脉冲荷电电参数变化对粉尘颗粒凝并效率的影响；第五章使用高压脉冲电源做荷电电源，低压高频交变电源做凝并电源，讨论不同脉冲荷电波形下，交流凝并电参数变化及不同电极布置型式对凝并效率的影响；第六章使用含有直流基压的脉冲电场，使粉尘颗粒荷电的同时凝并，并得到各种参数与凝并效率之间的关系。

第七章对带电颗粒在电场中的受力情况进行了分析，运用商用fluent软件对交变凝并电场、直流凝并电场中的运动轨迹做了数值模拟，并对交变电场中单个周期同一平面内所有颗粒的碰撞次数做了理论推导。

第八章是对全文的总结，包括本文的主要研究结果及实验中发现的一些问题，并对下一步工作做了展望。

## 参考文献

1. 林治卿，裘著革，杨丹凤，PM<sub>2.5</sub>的污染特征及其生物效应研究进展，解放军预防医学杂志，2005（4），150-152。
2. 郭静，阮宜纶，大气污染控制工程，化学工业出版社，2001年5月。
3. A. Laitinen, J. Hautanen, J. Keskinen, Bipolar charged aerosol agglomeration with alternation

- electric field in laminar gas flow, *Journal of Electrostatics*, 1996 (38), 303-315.
4. 《火电厂大气污染物排放标准》(GB13223-2003)。
  5. 《火电厂大气污染物排放标准》(GB13223-1996)。
  6. 熊振湖, 大气污染防治技术及工程应用, 机械工业出版社, 2003。
  7. M. Mohr, S. Ylatalo, N. Klippel, E. Kauppinen, O. Riccius, H. Burtscher, Submicron fly ash penetration through electrostatic precipitators at two coal power plants, *Aerosol Sci. Technol.*, 1996 (24), 191-204.
  8. M. W. McElroy, R. C. Carr, D. S. Ensor and G. R. Markowsky, Size distribution of fine coal combustion. *AAAS. Sci*, 2151982 (4528), 13-19.
  9. 黄斌, 姚强, 李水清, 静电增强脱除 PM<sub>2.5</sub> 研究进展. *电站系统工程*, 2003 (19) 6, 44-46.
  10. 刘建民, 王荣毅, 脉冲放电粒子机理的研究, *环境科学学报*, 1999 (3), 113-119.
  11. Chang Ramsay, COHPAC compacts equipment into smaller, denser unit[J], *Power Engineering*, 1996, 100.
  12. Ye Zhuang, Stanly. J. Miller, Advance Hybrid Particulate Collector final topic report for phase III[R]. 2001.
  13. S·卡尔弗特, H·M·英格伦, 大气污染控制技术手册, 海洋出版社, 1987.
  14. 白晓清, 张江微, 声能环保应用的最新研究进展, *节能*, 2001 (8), 44-45.
  15. 魏风, 张军营, 王春梅, 煤燃烧超细颗粒物团聚促进技术的研究进展, *煤炭转化*, 2003 (7), 27-32.
  16. 王连泽, 席葆树, 声场对流场影响的研究, *工程力学*, 2000, Vol:17(5), 79-87.
  17. 刘金祥, 国君杰, 用电介质极化理论分析粒子的场荷电问题, *热能与动力工程*, 1999 (5), 23-234.
  18. 唐敏康, 电除尘器中亚微粒子凝并机理的研究, *工业安全与防尘*, 1995 (6), 1-5.
  19. 唐敏康, 龚健保, 呼吸性粉尘电极化产生凝并行为的机理, *南方冶金学院学报*, 1997 (4), 92-96.
  20. 李奇勇, 转炉除尘污水污泥处理利用技术实践与探讨, *能源与环境*, 2004 (1), 35-37.
  21. M. Milchner and S. A. Self; EPRI Report, CS-3226, 1983.
  22. B. Eliasson et al; *Helvetica Physica Acta*, 1986(59), 1035-1042.
  23. J. F. Hughes et al; Proc. of 3rd International Conference on ESP, 337- 1987.
  24. S. Kanazawa et al; *Jr. of Electrostatics*, 1993(29), 193-209.

25. T.Watanabe et al; Proc. of 5th International Conference on ESP, C1, 1993.
26. N. Isahaya; Jr. of Hitachi, Hyonron ,1967(49),77.
27. S. Kanazawa, T. Ohokubo, K. Nomoto, T. Adachi, Submicron particle agglomeration and precipitation using bipolar charging method, J. Electrostat. 1993 (29), 193-209.
28. Jun-Ho Ji<sup>a</sup>, Jungho Hwang<sup>a\*</sup>, Gwi-Nam Bae<sup>b</sup>, Particle charging and agglomeration in DC and AC electric fields, Journal of Electrostatics 2004 (61), 57-68.
29. 吴彦, 王荣毅, 王宁会, 脉冲电压下粒子荷电的实验研究, 大连理工大学学报, 1995 (3) 309-311。
30. C. W. Penny and R. D. Lynch, Measurement of charge imparted to fine particles by a corona discharge, AIEE,1957(76), 294-299.
31. J. R. Monald, M. H. Andcraon, R. B. Moeley, Charge measurement on individual particle exiting laboratory precipitators with positive and negative corona at various temperature, J. Appl. Phya, 1980(7), 3632-3643.
32. 许德玄, 李祥生, 马祝阳, 脉冲电晕放电中自由电子荷电的影响, 第二届国际应用静电技术会议论文集: 应用静电技术-现状及展望, 1993, 6-40。
33. 姜雨泽, 赵金先, 窄脉冲放电粒子荷电过程分析, 山东电力技术, 2003 (4), 8-10。
34. 徐学基, 诸定昌, 气体放电物理, 上海复旦大学出版社, 1995。
35. J. C. Person, D. O. Ham, Removal SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> from stack gases by electron between irradiation, Radiat Phya Chem, 1988( 31), 1-8.
36. 阎克平, 赵君科, 夏连胜, 高压脉冲电晕放电氧化性的研究, 静电基础及其应用技术, 大连理工大学出版社, 1996, 63-66。

## 第二章 电凝并收集可吸入颗粒物的研究现状

### 2.1 前言

由于电凝并对微细粉尘有很好的收集作用,对控制污染物的排放有重要的意义,所以受到各国政府和学者的重视。在1993年11月在日本名古屋召开的第六届颗粒凝并国际研讨会上电凝并技术取得了很大的进展。在国外研究微细颗粒电凝并作用的研究机构主要有日本的京都大学,韩国 Yonsei 大学,印度热带气象研究所<sup>[1]</sup>和德国杜伊斯堡大学<sup>[2]</sup>等;国内电凝并技术的研究起步较晚,主要的研究单位有东北大学、清华大学和浙江大学等。

### 2.2 日本方面的研究

日本的几所大学在二十世纪九十年代对电凝并做过很多研究,并提出了专门用来收集亚微米级颗粒的新型电除尘器的概念。下面就主要介绍一下他们的研究成果。

#### 2.2.1 日本京都大学 (TMU)

日本京都大学教授 Wanatabe 等人在二十世纪九十年代中期提出了新型电除尘器的概念,该除尘装置分三个区:前区为预荷电区,先将亚微米烟尘荷电并收集较大粒径的颗粒,中区为凝并区,末区为收尘区,预荷电区和收尘区与常规除尘相同。在本实验中他们对三类荷电粉尘:富含碳黑颗粒(A类)、富含飞灰颗粒(B类)、两者各半(C类)分别进行凝并收集,并研究了荷电颗粒在电场中

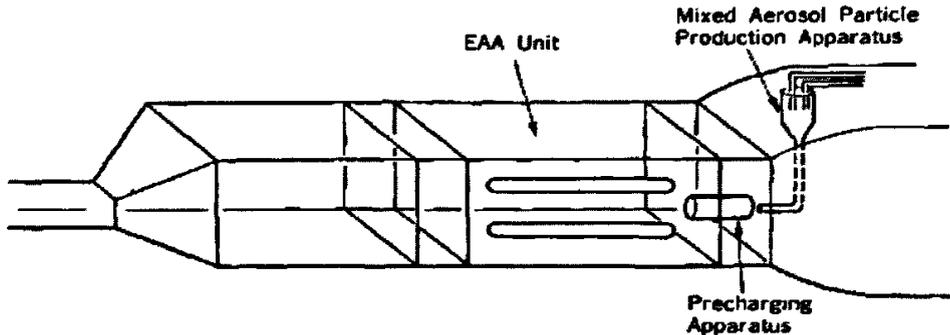


图 2-1 电凝并装置实验系统图

的运动轨迹，实验系统如图 2-1 所示<sup>[3]</sup>。

为便于观察，实验装置做成 50cm 宽、50cm 高、1m 长的玻璃容器，两边加导电板为接地极。凝并区采用两根直径 6cm 的圆柱形放电极，另外有两个间距 50cm 的平板做成接地电极，形成四极电场。在放电极和接地极之间施加一直流叠加交流的电场。在该电场中最大场强在圆柱放电极的表面。实验用粉尘粒度分布模拟电厂燃烧器出口烟气。

在本实验中，使用有凝并区（EAA）的静电除尘器后，粒径小于  $1\mu\text{m}$  颗粒的质量百分比减少了 20%，凝并后平均直径是入口处的四倍；Watanabe 等人预测：使用新型的带有 EAA 的 ESP 可以使除尘效率从常规除尘器的 95% 增大到 98%。

他们用电镜拍到荷电颗粒在凝并器进口和出口的照片如图 2-2 和图 2-3 所示。凝并前（进口处）球形的飞灰颗粒表面上附着有小部分的炭黑；凝并后颗粒明显变大，并且上面附着有成串的碳黑的颗粒。说明凝并取得了较好的效果。

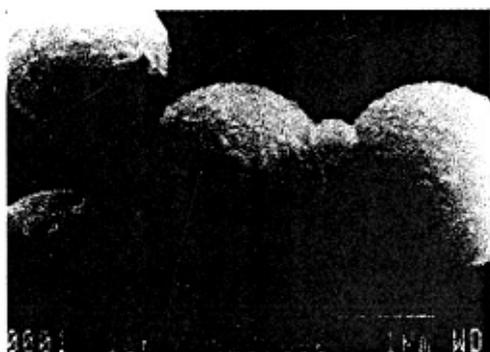


图 2-2 凝并前颗粒形状

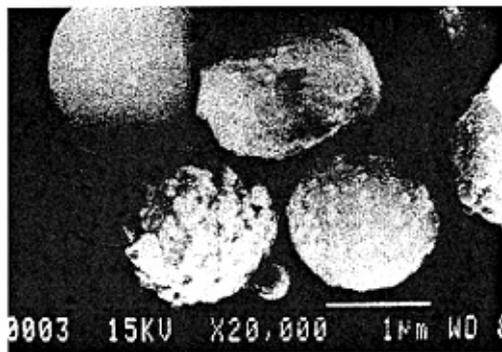


图 2-3 凝并后颗粒形状

他们使用计算机模拟绘制了粒径为  $3\mu\text{m}$  和  $0.5\mu\text{m}$  的颗粒的运动轨迹图。电场强度强烈影响荷电颗粒的运动轨迹。如果颗粒的初始位置电场强度高,那么它的趋近速度和振荡幅度也大,反之,则小。荷电颗粒粒径越大,速度和振幅越大。不同粒径的粒子将更快地凝并,并且粒径差别越大,凝并速率也越大。

另外,他们还对偶极荷电粒子的布朗凝并作了研究。将亚微米级的碳黑颗粒荷以负电,将微米级的飞灰颗粒用摩擦的方法进行偶极荷电。并将二者导入凝并器(不加任何电场)中,使二者进行凝并。在有飞颗粒参与的情况下,碳黑颗粒明显减少。并且,凝并速率(就是凝并系数)随飞灰颗粒浓度和停留时间的增加而增加<sup>[4]</sup>。

经实验证实,四极电场电凝并箱(如上图 2-1)即使是对单极性荷电的亚微米级粒子也有很好的凝并作用<sup>[5]</sup>。

Watanabe 建立数学模型对不荷电粒子、对称荷电粒子和不对称荷电粒子的粒径分布和电荷分布做了计算。计算结果表明:对于不荷电颗粒,由于小颗粒的扩散系数较大,粒径小的颗粒的减少速度比大颗粒快;偶极荷电粒子的凝并速率( $K_B$ )远远大于不荷电颗粒。对于对称荷电来说,由于较大的库仑力,粒径大的颗粒比小的更容易凝并。凝并后所带电荷变得很小,小颗粒和新产生的颗粒(凝并后的)很难再次凝并。在不对称荷电中,小颗粒被荷以负电,稍大颗粒被荷以正电。计算结果表明,不对称荷电与对称荷电结果相似,但是凝并的速度要快的多,尤其对于亚微米的颗粒<sup>[6][7]</sup>。

偶极荷电粒子在交变电场中的凝并实验结果表明:在交变电场强为  $3.5\sim 5\text{KV/cm}$ ,凝并时间  $4.8\text{s}$ ,初始质量浓度为  $0.5\text{g/m}^3$ ,凝并器中亚微米级的颗粒减少  $15\sim 20\%$ <sup>[8]</sup>。

### 2.2.2 日本北海道大学和北海道研究所

日本北海道大学和北海道研究所 Yoji Nakajima 和 Takashi Sato 等人也对电凝并做了研究,他们没有对亚微米颗粒直接进行荷电,而是使用声波或者施加 AC 交变电场的方法促使亚微米颗粒接近荷电的粒子(此处被称之为“核心粒子”),使亚微米粒子发生电极化,从而能受到电场力的驱使。Yoji Nakajima 和 Takashi Sato 两人指出当粒子被偶极荷电时,异极性的大颗粒之间更容易发生碰撞,而亚

微米颗粒由于荷电量小不能被及时凝并。在他们的研究中，通过实验证明当核心粒子粒径为  $8\mu\text{m}$  时，对亚微米级粒子的收集效果最好<sup>[9]</sup>。

### 2.3 韩国方面的研究

南韩 Yonsei 大学机械工程系 Jun-Ho Ji, Jungho Hwang 和韩国科技研究所全球问题研究中心 Gwi-Nam Bae 等人对粒子的荷电性质和偶极荷电粒子在交变电场中的凝并性质做了研究。所用实验系统图如图 2-4 和 2-5 所示<sup>[10]</sup>。

#### 实验条件

实验使用 100% 纯度，密度为  $0.915\text{g}/\text{m}^3$ ，平均几何直径  $1\mu\text{m}$  的 DOS（已癸二酸盐）颗粒与空气混合，分成两部分进入正负两个预荷电器。该荷电器（正&负）总横截面积为  $10\times 10\text{cm}$ ，分别施加  $\pm 8\text{KV}$  的直流电压；电极在预电器中央，

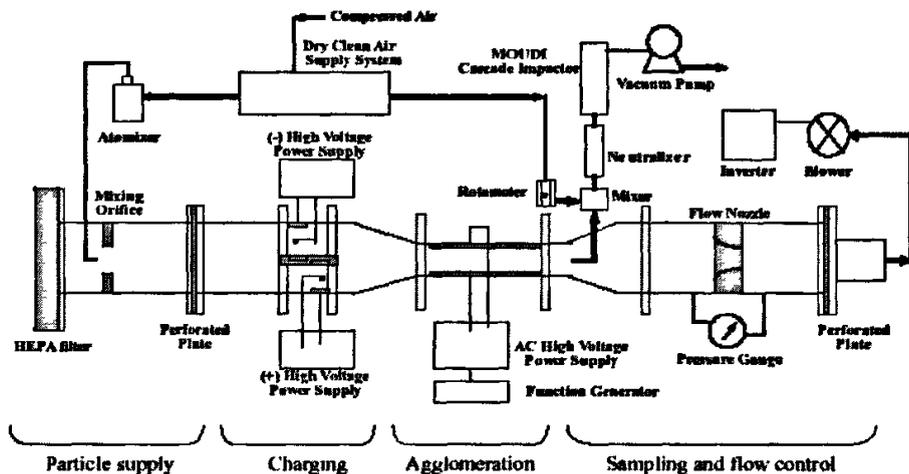


图 2-4 凝并实验系统图

直径  $0.25\text{mm}$ ，长  $100\text{cm}$ ；单个荷电器的两个平板之间距离为  $40\text{mm}$ 。荷电完成的 DOS 颗粒进入凝并区 ( $10\times 3.6\text{cm}^2$ )，凝并区由两块平行金属板组成，施加交变电场，其峰值电压为  $\pm 20\text{KV}$ ，平均场强为  $3.9\text{KV}/\text{cm}^2$ ，频率由信号发生器控制。粒子在凝并区的停留时间为  $1\text{s}$ 。

在研究粒子的荷电性质时，使用通过蒸发-凝结方法和经过 DMA 产生的 DOS 和异丙醇的混合单分散体。

#### 实验结果

当交变电场频率由 60-500Hz 变化时, 用 MOUDI (cascade impactor) 测得的粒径分布显示, 对于粒径小于  $1\ \mu\text{m}$  的颗粒的减少率为 25-29%。

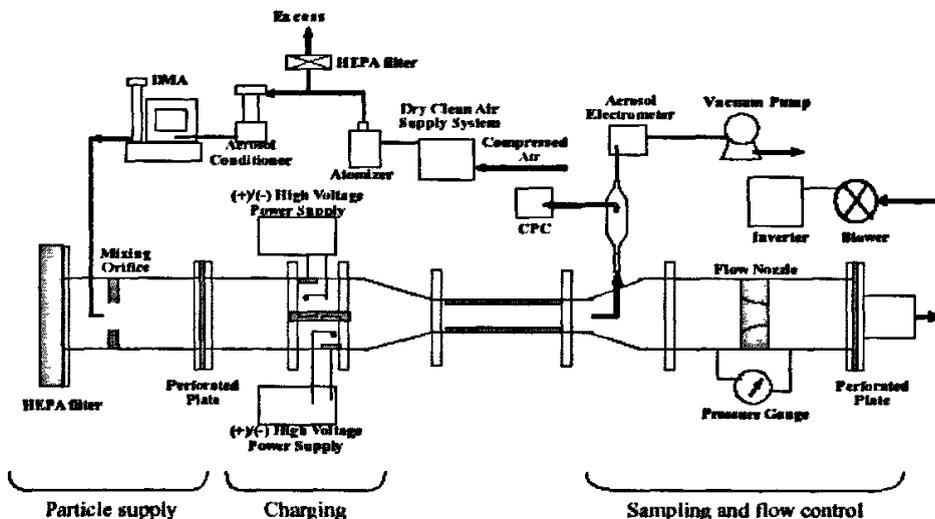


图 2-5 荷电实验系统图

当预荷电器的两部分均采用正电晕 (+8KV) 或负电晕 (-8KV) 放电时, 粒径  $0.07\ \mu\text{m}$  的单分散粒子单个粒子所荷基本电荷数为 3-4, 当粒径增至  $0.5\ \mu\text{m}$  时, 所荷基本电荷数可以达到 40-60。对于粒径小于  $0.03\ \mu\text{m}$  的粒子, 只能有部分粒子能够被荷电。结果表明, 在额定电压下对于所有粒径范围的粒子, 负电晕放电比正电晕放电荷电的效果要好。如图 2-6 所示。如果颗粒的质量浓度增大的话, 单个粒子平均荷电电荷数将会减少。

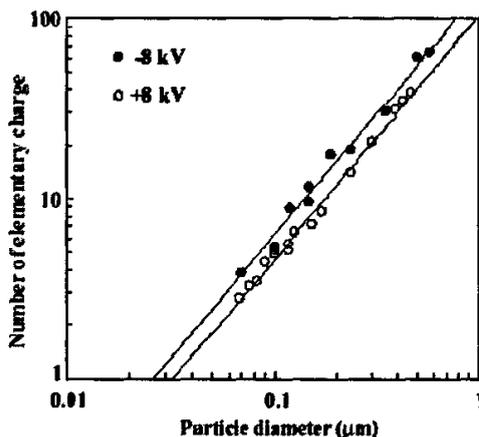


图 2-6  $\pm 8\text{KV}$  时, 单个粒子所荷电荷数与粒子直径的函数关系

他们还做了关于电压和电流变化的关系, 当气流中无颗粒, 施加电压分别为 +8KV 和 -8KV 时, 测得电流分别为 +5 和 -10.5  $\mu\text{A}$ , 当气流中加入 DOS 颗粒时在同样电压下, 电流变化为 +0.52  $\mu\text{A}$  和 -1.2  $\mu\text{A}$ ; 负电晕的电流下降的要更多一些。

当预荷电器中没有颗粒时, 电流是靠电晕电极放电产生的离子形成的, 如果颗粒

的浓度相对较低，那么电流由离子迁移产生，因为颗粒的电导性比离子低得多。

## 2.4 美国方面的研究

美国辛辛那提大学 Srinivas Vemury 和 Christian Janzen 等人主要对电凝并进行了理论的研究<sup>[11]</sup>。当粒子被强烈荷电后，偶极荷电可以提高凝并速率。不对称荷电可以使粒子的浓度更快的下降。采用两维模型，研究了对称荷电和不对称荷电两种荷电方式对凝并速率的影响。偶极对称荷电可以提高粒子的凝并速率，并形成大颗粒。而不对称荷电可以加速粒子数量浓度的减少，但是却产生更小的颗粒。

## 2.5 国内研究情况

### 2.5.1. 东北大学的研究进展

东北大学资源与土木工程学院的向晓东等人对交变电场中的小颗粒凝并做了很多深入的研究。向晓东等人提出了一种与 Watanabe 的三区式电凝并装置不同（电极布置如图 2-8 所示）的实验装置——双区式电凝并除尘装置，实验模型如图 2-7 所示。该装置分凝并区和收尘区，在凝并区内同时实现粉尘的荷电与凝并，收尘区则与普通的电除尘器相同。另外在理论方面，他们对异极性荷电粉尘在交变电场中的凝并系数以及粉尘凝并后的粒度分布进行了推导。

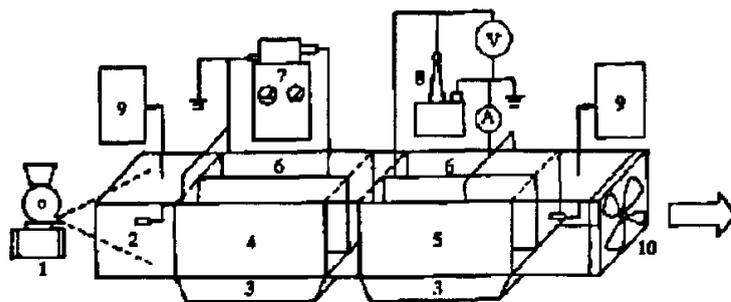


图 2-7 双区电凝并实验装置示意图

- 1-发生器；2-粉尘采样头；3-灰斗；4-交变电场荷电与凝并区；5-收尘区；6-芒刺电晕极；  
7-交流高压电源；8-直流高压电源；9-滤膜；10-转子流量计；11-排气泵；12-抽风扇。

向晓东等人主要做了以下工作：

### 1、做了双区电凝并除尘和三区电凝并除尘的对比实验研究。

通过实验向晓东等人得到如下

结论：

双区式相对于三区式电凝并除尘装置有较高的除尘效率，原因是在双区式电凝并除尘装置的凝并区。不断凝聚的粉尘重复荷电，粉

尘带电量增加，而三区式电凝并除尘装置为一次荷电，随着凝并中和。电量减少。另外，由于双区式的电凝并区存在非均匀电场、较强的电晕放电和电风，所以有较强的收尘作用。因此，在电场长度相等时，双区式的除尘效率高于三区式。因双区式无预荷电区，从而增加了电凝并区的有效长度。但在三区式中，预荷电区和凝并区之间必须留有足够的空间防止短路。所以，双区式在结构上优于三区式。双区式的除尘效率远高于电除尘器，是因为电凝并区的凝聚作用和一定的收尘作用。在平均场强为  $4 \text{ kV/cm}$  时处理中位径为  $2 \mu\text{m}$  粉尘，双区式电凝并除尘效率已达 98%。

2、推导出了异性荷电粉尘在交变电场中的电凝并系数及凝并后粉尘颗粒的质量粒度分布函数。并通过实验进行了验证<sup>[12][15][16][14][17]</sup>。

3、通过实验研究和理论推导得到交变电场频率变化对电凝并的影响。利用 Williams 求声凝并的方法，将其简化；若忽略粒子的惯性，则电凝并系数与交变电场的频率无关<sup>[13]</sup>。他们在双区式电凝并除尘装置上的实验结果表明：在交变电场频率较低的情况下，频率对电凝并的影响较小，甚至可以忽略。但过高的频率对电凝并的影响较大。低频时频率为  $6 \text{ Hz}$  时除尘效果较好。在电凝并除尘装置的应用中，交变电场的频率可在  $(4\sim 8) \text{ Hz}$  范围内选择<sup>[14]</sup>。

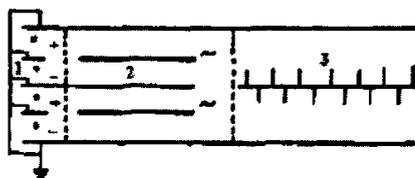


图 2-8 三区式电极布置结构形式  
1-预荷电区；2-凝并区；3-收尘区。

## 2.5.2 清华大学的研究进展

清华大学工程力学系的王连泽等人对双极荷电粉尘颗粒的电凝并做了初步研究。将含尘气体并行分别通过正负放电电场，然后再合二为一，空间大尺度范围依靠湍流输运，近距离依靠库仑力及范德瓦力的双极荷电凝聚方式，以滑石粉和锅炉飞灰为实验粉尘，初步研究了气流速度、含尘浓度、正负放电强度配合等

因素对凝聚效率的影响，得到了双极荷电可使沉降收集效率提高的 10% 的静电凝聚效果。实验装置简图如图 2-9 所示<sup>[18]</sup>。

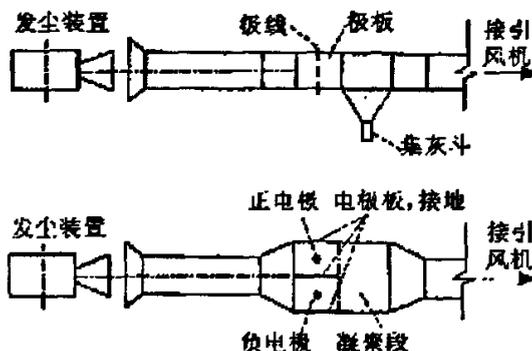


图 2-9 实验装置简图

他们在实验中采用电场风速范围 1.0-5.5m/s, 放电极采用直径 1.5mm 的钢丝, 极板采用高 140mm, 长 200mm 的 A3 钢板。实验用粉尘与空气混合后并行进入双极(正和负)荷电段, 接下来在凝并沉降段粉尘颗粒凝并变大, 增至足够大的颗粒在重力作用下沉降至下部灰斗, 本身粒径小且未凝并变为足够大的粉尘颗粒随气流排出实验系统。实验在不同电场风速下, 分别在系统加电前后及加载不同正负电压配合下测量凝并沉降段的收集效率, 得到凝并导致沉降的收集效率的提高量。在此实验中采用滑石粉和锅炉飞灰。由于不同的粉尘分散度和不同的比电阻, 在本实验中滑石粉的最大沉降收集效率增加为 9.5%, 锅炉飞灰最大为 8%。

测量实验装置的伏安特性。结果表明: 单一极性电场的伏安特性表现为负电晕放电时起晕电压比正电晕放电时起晕电压低。对称电极加电时, 同样遵循着这一规律。但是, 不论是将正电场施以电压(35KV)测负电场中电流随施加电压的变化, 还是将负电场施以恒定电压检测正电场中电流随增加电压的变化, 都发现对称电极的加电导致了起晕电压和击穿电压的降低。因此, 双极电场的交错布置有利于电场的尽早放电, 但也使得正常工作时施加电压的降低。

电场风速的增加一般情况下导致凝并效率的降低, 但凝并效果更多地依赖于所施加的正负电压和电流的配合。高电场风速情况下良好的正负放电配合可能使得凝并效果比低电场风速时欠缺的正负放电配合情况下更好一些。

正负极非对称荷电时静电凝并效率比对称荷电时有很大的提高。在非对称起

始荷电分布中大多数小颗粒迅速地凝并了。而在对称起始荷电分布中,小颗粒和新生成的颗粒由于其荷电量较小,因而很难凝并。因此,与对称荷电相比,非对称荷电分布更适用于亚微米尺度颗粒的凝并。

当粉尘置于双极放电电场中,有更多的颗粒带负电。这是由于负极性粉尘有更高的移动性。同时在取得较佳的静电凝并效率时,负极性的电流比正极性的电流更大。在相同的工作条件下,负电晕放电时颗粒荷电量明显高于正电晕放电时颗粒的荷电量,因而实际的正电晕电流比负电晕电流要小。

### 2.5.3 浙江大学的研究进展

浙江大学分别使用声凝并和电凝并的方法对可吸入颗粒物的凝并作用做了大量的研究。并得到国家自然科学基金、教育部科学技术研究重大项目资助和教育部科学技术研究重点项目资助。

## 2.6 本章小结

以上介绍了研究电凝并技术的几个主要科研机构的研究成果,都表明电凝并确实对小颗粒的很好的凝并促进技术。本文采用与它们完不同的脉冲荷电的方式及直流或低压高频交流电场凝并的方式,试图通过可吸入颗粒物电凝并脱除实验研究寻求不同荷电方式和凝并方式下对颗粒的凝并作用。以期得到最好的对可吸入颗粒物的脱除方法。

## 参考文献

1. Savita Dhanorkar, A. K. Kamra, Effect of coagulation on the asymmetric charging of aerosols, *Atmospheric Research*, 2003(66), 159-173.
2. Arkadi Maisels, Frank Einar Kruis, Heinz Fissan, Coagulation in bipolar aerosol chargers, *Journal of Aerosol Science*, 2004(35), 1333-1345.
3. Tsuneo Watanabe<sup>a</sup>, Fumiyoshi Tochikubo<sup>a</sup>, Yoshihisa Koizumi<sup>a</sup>, Submicron particle agglomeration by an electrostatic agglomerator, *Journal of Electrostatics*.
4. J. Hautanen, T. Watanabe, T. Tsuchida, Brownian agglomeration of bipolarly charged aerosol particles, *J. Aerosol Sci.* vol26, 21-22.

5. T. Watanabe, J. Institute of Electric discharge of Japan, 1991 (19) 133 (in Japanese) .
6. Y. Koizumi, F. Tochikubo, T. Watanabe, Bipolar-charged submicron particle agglomeration, Journal of Electrostatics 1995 (35), 55-60.
7. Kyo-Seon Kim, Dong-Joo Kim, Jong-Hwan Yoon, The charges in particle charge distribution during rapid growth of particles in the plasma reactor, Journal of Colloid and Interface Science 2003(257),159-207.
8. Kauppinen, Jorma Jokiniemi, Kari Lehtinen, Agglomeration of bipolarly charged aerosol particles in alternating electric field, J. Aerosol Sci. 1995 (26), 739-740.
9. Yoji Nakajima, Takashi Sato, Electrostatic collection of submicron particles with the aid of electrostatic agglomeration promoted by particle vibration, powder Technology, 2003 (135-136), 266-284.
10. Jun-Ho Ji, Jungho Hwang, Gwi-Nam Bae, Particle charging and agglomeration in DC and AC electric fields, Journal of Electrostatics, 2004 (61) , 57-68.
11. Srinivas Vemury, Christian Janzen, Sotiris E. Pratsinis, Coagulation of symmetric and asymmetric bipolar aerosols, J. Aerosol Sci. 1997(4), 599-611.
12. 向晓东, 陈旺生, 幸福堂, 交变电场中电凝并收尘理论与实验研究, 环境科学学报, 2000 (3), 187-191。
13. 陈旺生, 向晓东, 幸福堂, 交变电场中偶极荷电粒子电凝并的理论研究, 工业安全与防尘, 2004 (2), 3-5。
14. 陈旺生, 向晓东, 幸福堂, 交变电场频率对电凝并影响的理论及实验研究, 武汉冶金科技大学学报 (自然科学版), 1999 (12), 342-344。
15. 向晓东, 陈宝智, 张国权, 荷电粉尘在交变电场中的凝并与收集, 东北大学学报, 1999 (12), 615-618。
16. 向晓东, 陈旺生, 幸福堂, 烟尘在交变电场中电凝并收集的实验研究, 建筑热能通风空调, 9-11。
17. 向晓东, 陈旺生, 幸福堂, 烟尘在交变电场中的电凝并收集, 武汉冶金科技大学学报 (自然科学版), 1999 (9), 252-255。
18. 王连泽, 贺美陆, 孟亚力, 双极荷电粉尘颗粒凝聚的初步研究, 环境工程, 2002 (3), 31-34。

### 第三章 可吸入颗粒物电凝并实验台及实验方法介绍

#### 3.1 可吸入颗粒物电凝并脱除实验台简介

可吸入颗粒物电凝并脱除实验台由荷电电源、凝并电源、电凝并反应装置、模拟烟气发生装置和测量装置四大部分组成。可吸入颗粒物电凝并脱除实验台系统图如图 3-1 所示，实验台实际图如图 3-6 所示。

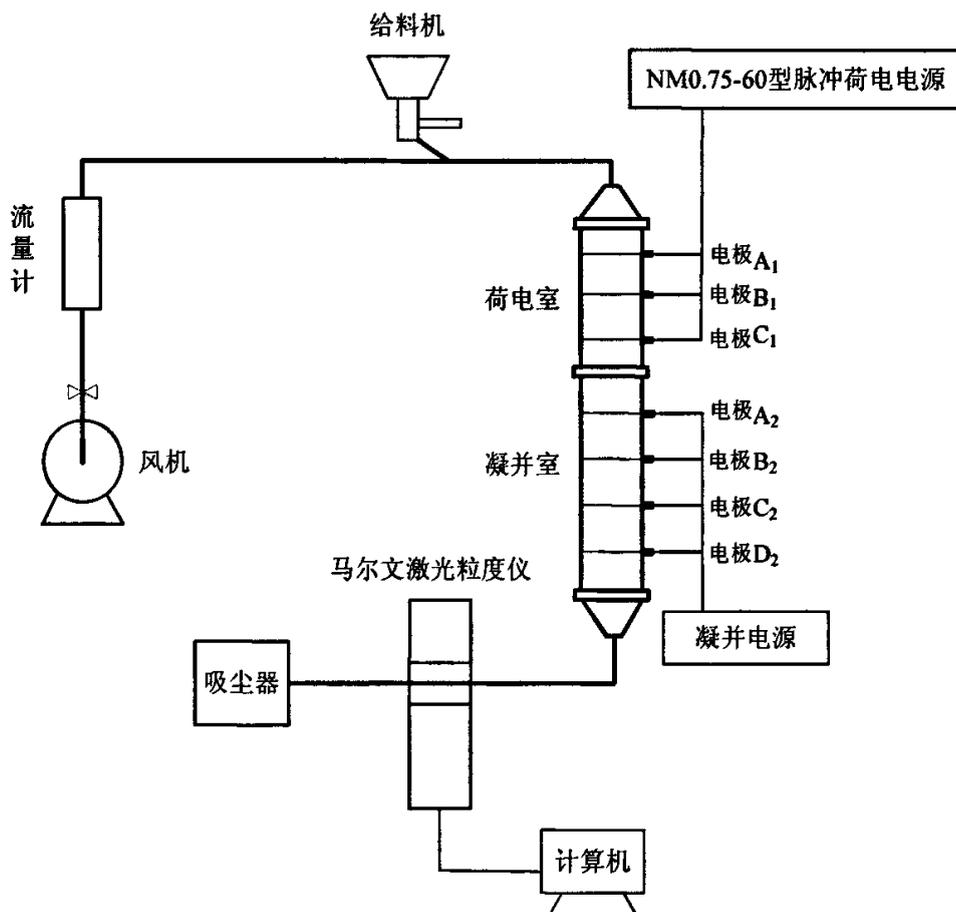


图 3-1 实验系统图

#### 1、荷电电源

中国工程物理研究所环保工程研究中心（四川绵阳）制造的 NM0.75-60 型脉冲电源，如图 3-7 所示；其运行参数：输出电压峰值为 0~+60kV，0~-60kV 和 -30kV~+30kV 三种；平均输出脉冲功率为 500W，重复频率为 0~300Hz，脉冲宽

度为 300~500ns, 脉冲前沿为 100~300ns, 这个电源主要作为荷电电源, 来对模拟烟气中粉尘颗粒荷电。

重复频率 300Hz, 单电极放电时, 该高压脉冲电源的正正、正负、正和负脉冲的输出波形如图 3-2 至 3-5 所示。

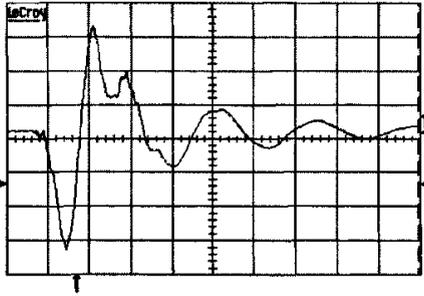


图 3-2 单电极负正脉冲放电波形

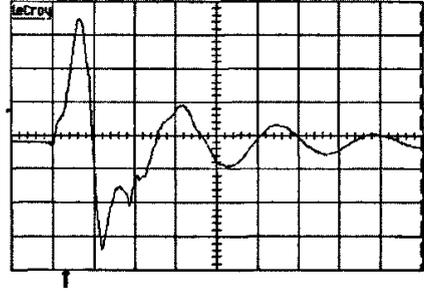


图 3-3 单电极正负脉冲放电波形

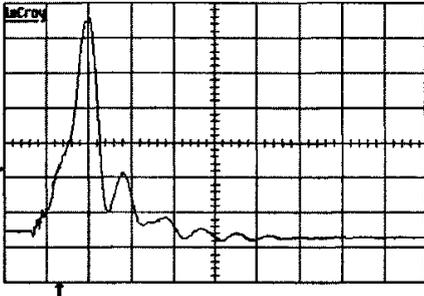


图 3-4 单电极正脉冲放电波形

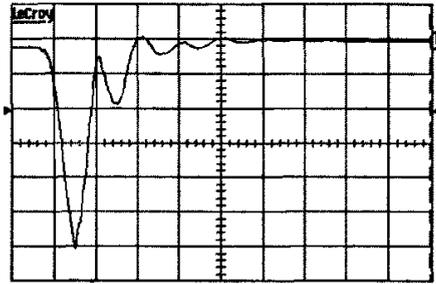
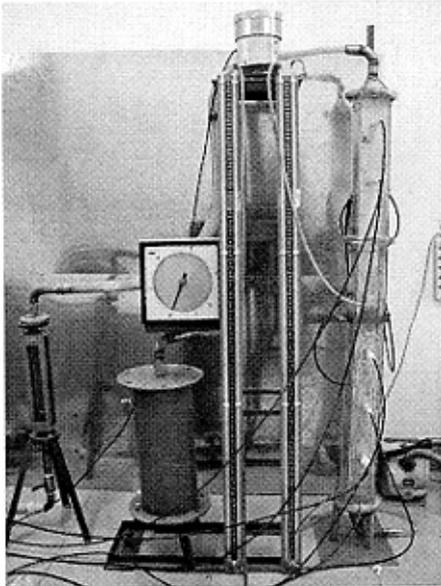


图 3-5 单电极负脉冲放电波形



3-6 电凝并实验台实拍



3-7 NM0.75-60 型脉冲电源

## 2、凝并电源

凝并电源装置使用两套。一套是直流-13KV 电源，由上海丽虹电源厂生产，参数为直流电压-13KV 调节，正弦脉冲宽度为 400ns，重复频率为 300Hz。主要用来对粉尘颗粒同时进行荷电和凝并脱除。还有一套低压交流电源是自行组装的，使用 1:25 倍变压器与 220V，50Hz 交流电相连，之间使用一个电压调节器调节电压输入值，电压输出范围为 0-6000V，频率 50Hz 不变。

## 3、电凝并反应器

在本文实验中使用线板式反应器，分上下两部分，为了便于对实验过程进行观察将其放在长为 150cm、截面为 10×10cm 的长方体有机玻璃容器中，两部分之间用绝缘胶片隔开。其中上部为荷电室，长 50cm，下部为凝并室，长为 100cm；在有机玻璃容器一侧壁面上每 20cm 开一Φ1cm 的小孔，中间插入用来绝缘的聚四氟乙烯圆棒，在圆棒中间开小孔使电极与 100KV 高压绝缘导线相连，放电极之间为并联形式；接地极采用不锈钢板。上下部分尺寸如图 3-8 和 3-9 所示，同极距为 20cm，异极距为 5cm。

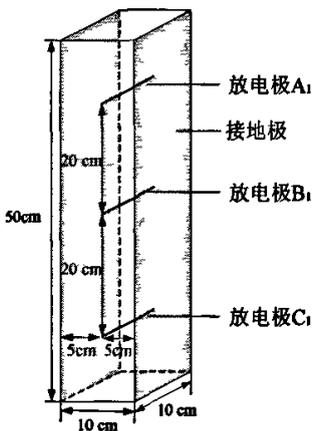


图 3-8 荷电室电极布置形式

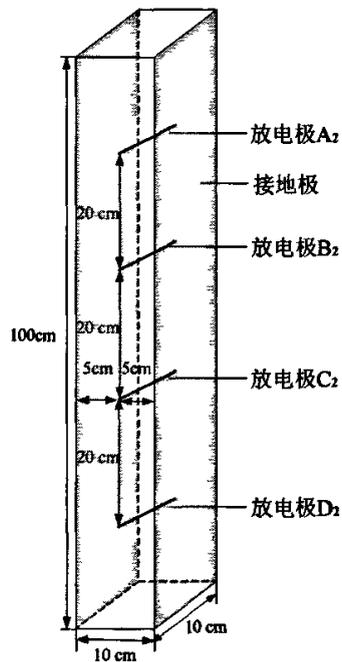


图 3-9 凝并室电极布置形式

#### 4、模拟烟气发生装置

模拟烟气发生装置由小型流化床给料机和风机组成。实验用粉尘采用电厂布袋除尘器所采集的灰，风机送入空气与给料机送下的粉尘混合形成模拟烟气进入反应器。由于天气潮湿等原因，一小部分灰会结成小球，因此在实验之前通常对其进行筛分及烘干。在本文实验中反应器入口处模拟烟气含尘浓度约为 0.005g/s。

#### 5、测量装置

测量装置由激光粒度仪（如图 3-10 所示）和计算机组成。在本实验中采用马尔文 MS2000 激光粒度分析仪，可分析粒径范围为 0.02~2000 $\mu\text{m}$ ，扫描速度达 1000 次/秒，大大提高了亚微米分辨率。

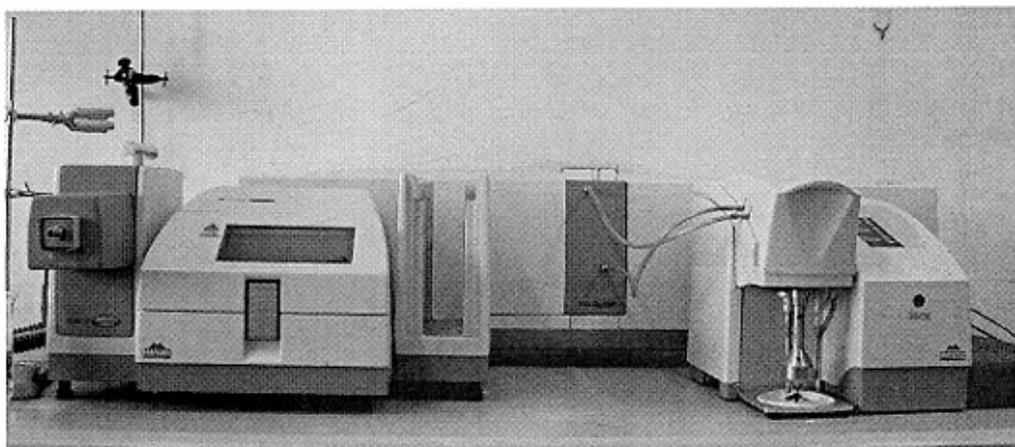
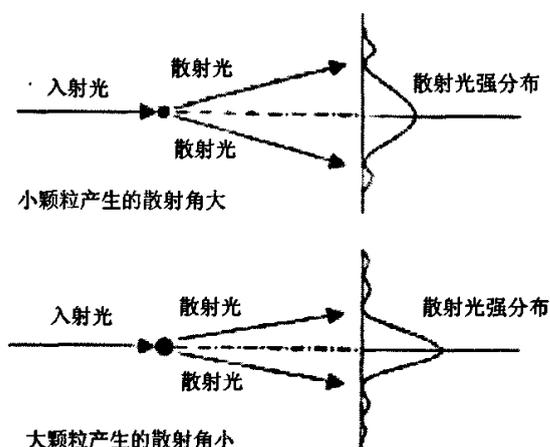


图 3-10 马尔文 MS2000 激光粒度分析仪

激光粒度仪是根据光的散射现象来测量颗粒大小的。所谓光的散射现象，是指光在行进过程中遇到颗粒（障碍物）时，将有一部分光偏离原来的行进方向。这个偏离的角度，我们称之为散射角。并且散射角的大小与光所遇到的颗粒的大小成反比，如图 3-11 所示。能过分析散射光的光强分布，我们就可以得到所测粉体样品的粒度分布数据



3-11 颗粒散射角大小

和曲线。激光粒度仪在作散射光强度分布分析时，使用两种光学理论。一种是 Mie 散射理论，另一个是 Fraunhoff 衍射理论。Mie 理论是描述散射光场的严密理论，理论上适用于任意大小颗粒的分析。

激光粒度仪原理结构如图 3-12 所示。光电探测器阵列放在该光学系统的焦平面上。经颗粒散射后的光线将在此焦平面上形成与样品粒度分布相对应的光场强分布，此光场强分布被光电探测器阵列转为模拟电信号，经放大后再由 A/D 转换器转换为模拟电信号，再经计算机运算分析，最后由计算机输出粒度分析结果<sup>[1]</sup>。

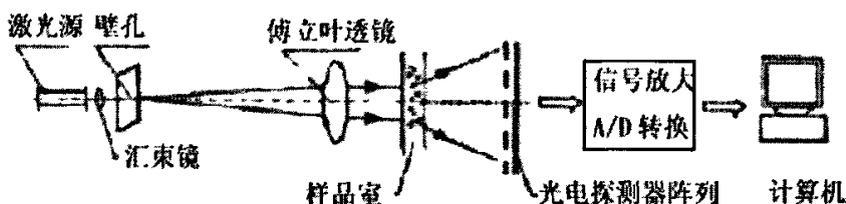


图 3-12 激光粒度仪原理结构示意图

在本实验中，在激光粒度仪出样口与一个吸尘器相连，可以在实验过程中使模拟烟气不间断流经激光粒度仪，实现了反应器出口烟气粒度分布实时测量。

### 3.2 实验方法

本文通过改变荷电电源电参数、凝并电源电参数及荷电凝并时间来讨论各种参数与凝并效率之间的关系。在本文实验中共使用三种实验方案对模拟烟气中的粉尘颗粒进行荷电和凝并：（1）粉尘颗粒在脉冲高压电场中荷电，在直流电场中凝并；（2）粉尘颗粒在脉冲高压电场中荷电，在低压交流电场中凝并；（3）粉尘颗粒在有直流基压的脉冲电场中同时进行荷电和凝并。在本文中用模拟烟气中颗粒凝并效率来衡量不同粒径颗粒的凝并程度。凝并效率定义如下：

$$\eta = \frac{v_0 - v}{v_0} \quad (3-1)$$

其中： $v_0$  为凝并前某一粒径颗粒占总体积的百分比， $v$  为凝并后某一粒径颗粒占总体积的百分比。

$v_0$ 、 $v$  也可以称为粒度分布。所谓粒度分布即指在粉尘中各种粒度大小的颗

粒占总颗粒数的比例，使用 MS2000 激光粒度仪可直接测量并得到这两个数值。

现将实验进程描述如下。

首先，依次打开风机、吸尘器（与激光粒度仪相连）和给料机，待模拟烟气在反应器中流动稳定，测量此时的粉尘颗粒的粒度分布。由于不加任何电场（包括荷电电场和凝并电场），粒度仪测量得到的数据可作为这一工况下的背景数据，即  $v_0$ ；

然后打开电源，按不同实验目的，可以先开荷电电源或凝并电源。再根据工况要求改变参数，等气流流动稳定再次测量，得到不同工况下的颗粒的粒径分布，即  $v$ 。颗粒在电场力的作用下发生凝并，实验前后粒度分布表现为：小颗粒的体积百分比减少而大颗粒的体积百分比增加，与粒度仪配套使用的 Mastersize 软件上可直接输出反应前后的粒度分布曲线。

测量结束后，依次关掉电源、给料机，吸尘器和风机。接下来对测量得到的数据进行处理。由于凝并效率能更加观地描述任一粒径颗粒的凝并多少程度，因此将测得的粒度分布换算成凝并效率。本文主要的研究对象为可吸入颗粒物，因此在计算时，计算的粒径范围为  $0.2-10\ \mu\text{m}$ 。

## 参考文献

1. 现代粉体测试技术，流程工业，2003（2），89—91。

## 第四章 脉冲荷电电参数变化对凝并效率影响的实验研究

### 4.1 前言

在使用脉冲放电对微细颗粒荷电时,脉冲电晕放电的电场强度和电子密度分布是颗粒荷电的关键参数,而电场强度和电子密度分布又是由脉冲放电电压和电晕电流大小及脉冲放电波形决定的<sup>[1]</sup>。在本章实验中使用高压脉冲电场对颗粒进行荷电,荷电后的颗粒进入-13KV 直流高压电场进行凝并,凝并参数不变。本章主要讨论脉冲放电峰值电压  $V_p$ 、脉冲重复频率  $f$  和不同脉冲波形等荷电电参数变化对颗粒荷电凝并过程的影响。

### 4.2 脉冲电压峰值 $V_p$ 变化对凝并效率 $\eta$ 的影响

#### 4.2.1 无凝并电源参与下,颗粒在脉冲电场中的自凝并现象

由第一章可知,高压脉冲电场对颗粒有很强的荷电作用,由于直径在  $0.2\sim 1.5\ \mu\text{m}$  间的微粒荷电是以场荷电和电子扩散荷电的联合荷电为主,使荷电量得以显著的提高。其中  $0.5\sim 1\ \mu\text{m}$  大小的微粒,荷电量增加得最多,达到 28 倍以上。即使对于  $0.1\ \mu\text{m}$  的小微粒来说,荷电量的增加也 15 倍左右<sup>[3]</sup>。本小节中,使用高压负脉冲放电对颗粒进行荷电,由于存在着外加电场,荷电的同时必然也会有凝并发生,下面就讨论颗粒在高压负脉冲放电电场中的自凝并效率与荷电峰值电压之间的关系。

实验条件:模拟烟气流量  $6\text{m}^3/\text{h}$ ,粉尘含量为  $3\text{g}/\text{m}^3$ 。荷电时间为 1.2s,使用单个直线电极 ( $B_1$ ) 放电,荷电电压波形为 150Hz 负脉冲。由于本实验中所用的高压脉冲电源的峰值电压是由电源上的直流电压表读数所表征,具体的直流电压和  $V_p$  之间的关系请参见附录 1。为方便表示,在本文中所说峰值电压  $V_p$  均指电源表盘读数的直流电压值,本文中用  $V$  表示这个直流电压量。在本章实验中  $V$  从 1KV 变到 5KV。

从图 4-1 中可以看出随着  $V$  增加,凝并现象越来越明显。在  $0.5\sim 1\ \mu\text{m}$  一段  $\eta$  值明显高于同曲线其它点的值。当电压为 5KV 时,对  $0.8\ \mu\text{m}$  的凝并效率可以达

到 35%。

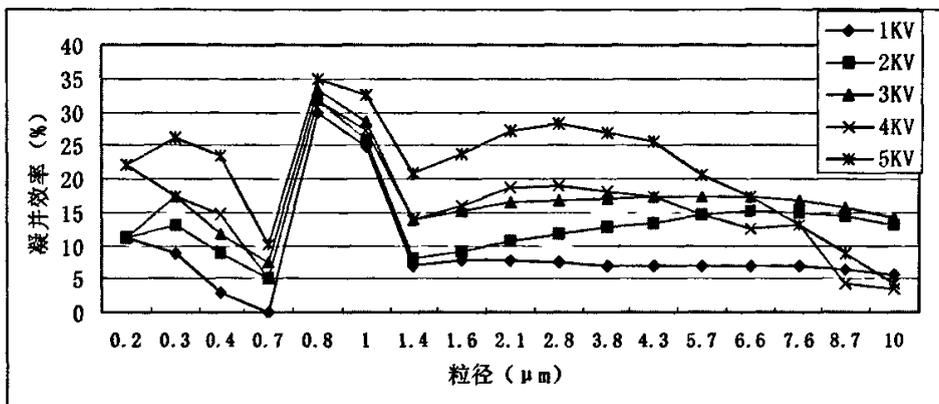


图 4-1 不同荷电电压下颗粒自凝并效率

#### 4.2.2 不同放电波形下荷电电压变化对凝并的影响

在脉冲电场中颗粒虽然也有凝并的作用，但是由图 4-1 可以看出，最高的凝并效率也只有 35%。烟气中粉尘颗粒加快凝并的根本出发点是提高两粒子间的相互驱近速度，引入外加电场正是为实现这个目的，这也是电凝并技术走向实用之路的有效方法。

在 4.2.2 节实验中，采用高压脉冲电场对颗粒进行荷电，并在凝并箱内的放电电极上施加-13KV 负直流高压电场来加强荷电颗粒的凝并作用。本节实验均采用 4-2 所示的电极布置型式。其中荷电电极采用两根长为 20cm，直径为 1mm 的不锈钢丝；凝并电极采用两个长为 20cm，外径为 4cm 的竖直不锈钢弹簧，两端分别由两根不锈钢线支撑，并和高压电线相连。流量均采用  $6\text{m}^3/\text{h}$ ，对应的荷电时间为 1.2s，凝并时间为 2.4s。荷电使用高压脉冲电源，凝并均采用-13KV 直流电源放电。在本节中讨论在相同的凝并条件下，脉冲放电波形不同时的荷电峰值电压  $V_p$  变化及脉

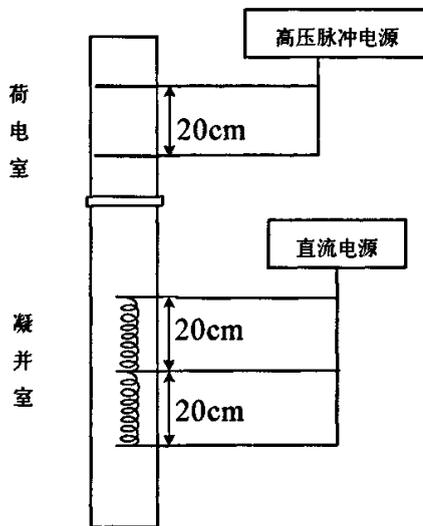


图 4-2 电极布置型式

在本节中讨论在相同的凝并条件下，脉冲放电波形不同时的荷电峰值电压  $V_p$  变化及脉

冲频率  $f$  变化对凝并效率  $\eta$  的影响。

#### 4.2.2.1 荷电波形为正脉冲时 $V$ 与 $\eta$ 的关系

图 4-3 为高压正脉冲放电,  $V$  从 1KV 到 5KV 变化, 凝并效率的变化曲线。从图中可以看出随着电压的增加, 各个颗粒段的凝并效率都变大, 极有规律。而且当粒径小于  $1\mu\text{m}$  时, 凝并效率大于 60%, 最小的也有 40%, 凝并效果很好。

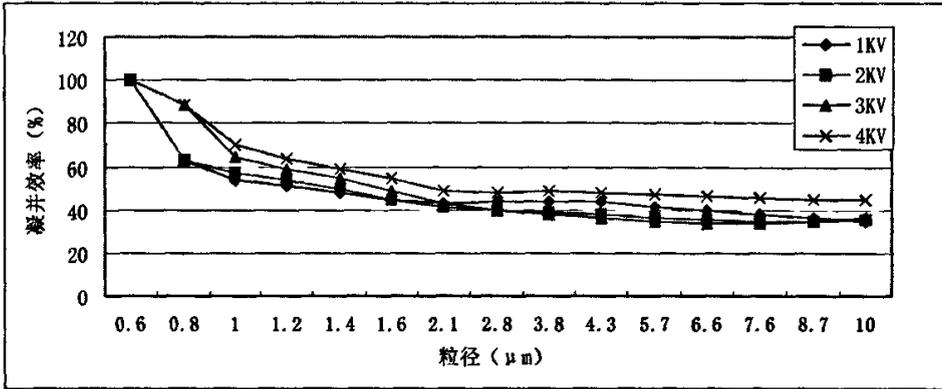


图 4-3 高压正脉冲放电时  $V$ - $\eta$  的关系曲线

#### 4.2.2.2 荷电波形为负脉冲时 $V$ 与 $\eta$ 的关系

图 4-4 为高压负脉冲放电时,  $V$  从 1KV 变到 5KV, 凝并效率的变化曲线。负脉冲时荷电电压变化与凝并效率的规律与上一小节中正脉冲电压变化完全不同。1KV 在整个颗粒段凝并效果都很好, 凝并效率并不是随电压的升高而增加, 规律性不明显。

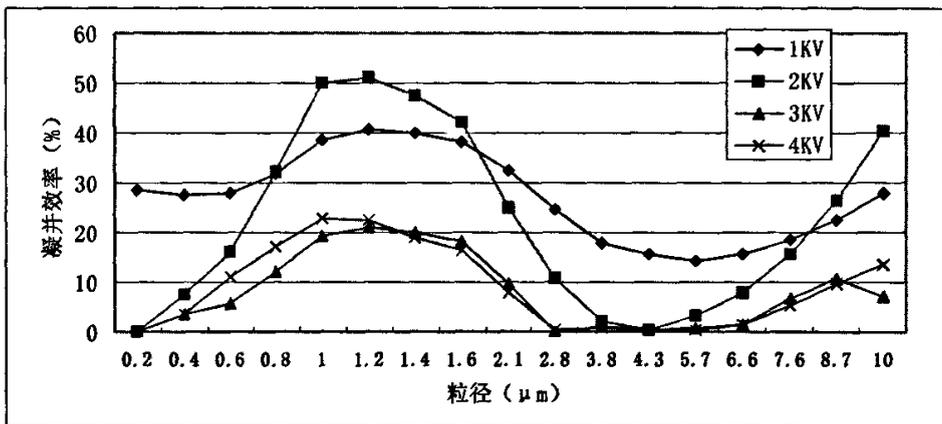
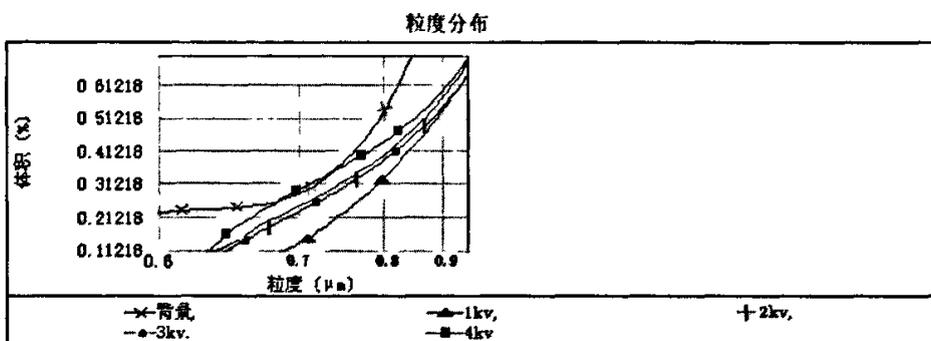


图 4-4 高压负脉冲放电时  $V$ - $\eta$  的关系曲线

### 4.2.2.3 荷电波形为正负脉冲时 V 与 $\eta$ 的关系

本小节实验使用高压正负脉冲放电，V 从 1KV 变化到 5KV。不种工况下粉尘颗粒的粒度分布如图 4-5 所示。计算得到 V- $\eta$  曲线如图 4-6 所示。



4-5 正负脉冲放电时凝并前后小颗粒段粒度分布

由图 4-5 可以看出随着电压增加，各个粒径的体积百分含量越来越小，但在图 4-6 中当电压为 4KV 时，1  $\mu\text{m}$  左右的颗粒的凝并效率出现负值。我们通过观察发现：有些时候在实验结束时，可以观察到凝并室中的接地板板和放电电极上

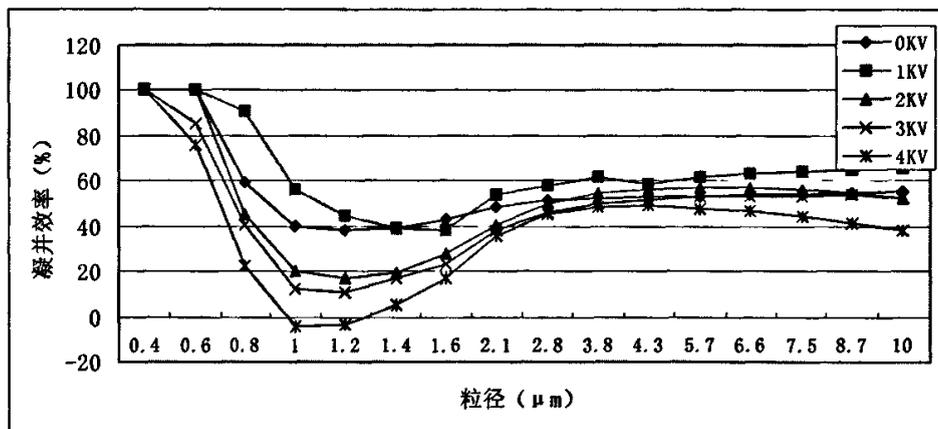


图 4-6 高压正负脉冲放电时 V- $\eta$  的关系曲线

均附着有灰颗粒；因此，负凝并效率的出现可能是由以下原因造成的：高压直流电源有收尘效果，凝并电极上加了直流电压后一部分大的颗粒会沉降在极板和电极上，一部分粒径很小的颗粒，由于其荷质比较大，因此有很大的扩散效果，也容易被极板所收集。其结果是使总的颗粒体积变小，而 1  $\mu\text{m}$  左右的颗粒本身被脱除的少，那么在总的体积百分比含量中所占的比例自然变大了。随着荷电凝并

时间的增加,也就是说收尘的时间也同时增加了,那么颗粒被脱除的越来越多,那么剩余颗粒所占的比例也就越来越大,表现为电压增大(收尘时间增长),但是却使随电压增加而使体积百分含量增加。

#### 4.2.2.4 荷电波形为负正脉冲时荷电电压变化对凝并效率的影响

##### 1. 荷电与凝并均采用直线电极时荷电电压变化对凝并的影响

实验条件:流量  $6\text{m}^3/\text{h}$ , 对应荷电和凝并时间均为  $1.2\text{s}$ 。荷电采用  $B_1$  放电,凝并采用  $C_2$  放电,电极均为直径  $1\text{mm}$  不锈钢直线。4-7 为  $V-\eta$  曲线。

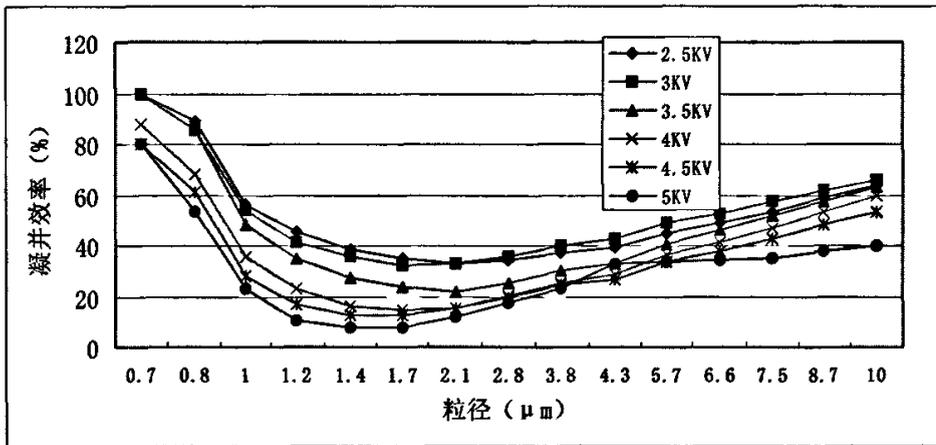


图 4-7 高压负正脉冲时  $V-\eta$  的关系曲线

由上图可以看出,凝并效率随着荷电电压增加而降低,当负正脉冲电压为  $2.5\text{KV}$  时,凝并效果最好。凝并效果最差的是粒径  $1.4\mu\text{m}$  左右的颗粒。

##### 2. 荷电采用直线电极,凝并采用弹簧电极时荷电电压变化对凝并的影响

该实验条件如下:流量  $6\text{m}^3/\text{h}$ ,电极布置如图 4-2 所示,凝并采用  $-13\text{KV}$  直流电源。

由图 4-8 可以看出,随着电压的增加,凝并效率也越来越大,尤其当电压增大到  $4\text{KV}$  时,凝并效果十分明显。由于所使用的电极不同,使 1 与 2 中  $\eta$  随  $V$  的变化规律完全相反。由此也可以说明,电极型式不同对颗粒的凝并作用有很大的影响,如果进行实际应用,应充分考虑到不同电极型式的优势,并结合电源及其参数进行选择。

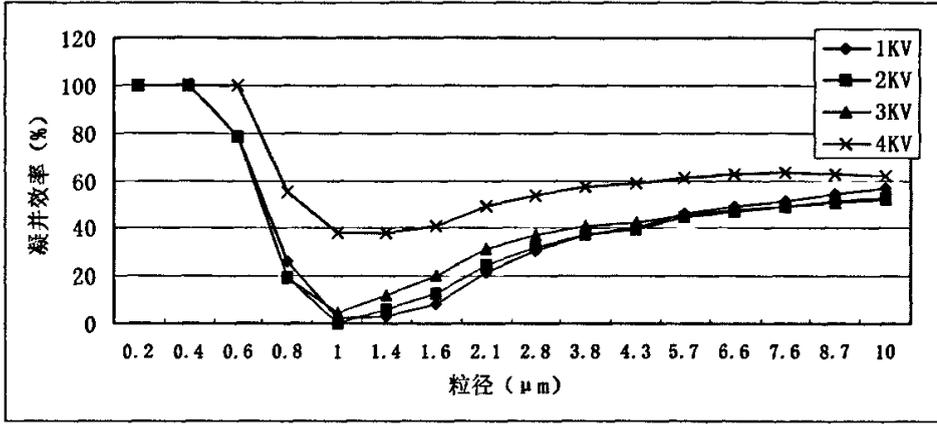


图 4-8 高压负正脉冲时 V-η 的关系曲线

### 4.2.2.5 本节小结

根据前面各种工况下得到的数据，分别计算得到不同波形下 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 的凝并效率，从表 4-1, 4-2 中可看出，当波形为正负和正时，凝并效率都很高，波形为负时最差。

表 4-1 不同脉冲波形下 PM<sub>2.5</sub> 的凝并效率(%)

脉冲波形 \ V (KV)	V (KV)			
	1	2	3	4
负脉冲	22.3	11.3	5.6	3.3
正脉冲	42.6	39.4	39.7	49.7
负正脉冲	40.8	40.3	42.8	59
正负脉冲	60.3	54.4	50.7	44.9

表 4-2 不同脉冲波形下 PM<sub>10</sub> 的凝并效率(%)

脉冲波形 \ V (KV)	V (KV)			
	1	2	3	4
负脉冲	34.2	23.1	18	12.9
正脉冲	51.9	51.7	58.4	63
负正脉冲	33.0	33.9	38.4	57.9
正负脉冲	61.4	37.5	44.4	37.3

这可能是由于：脉冲正流注放电可以使颗粒荷上两种电荷，荷负电颗粒数量随电压升高放电加强逐渐增加。归其原因为流注放电中发生电子雪崩和光电离，产生电子和负离子使油滴荷上负电。东北师范大学物理系的宋洪涛提出正流注放电油滴荷电模型：最开始脉冲放电产生大量高能电子，电子使气体发生电离，产

生正负离子，第一阶段可以认为电子在动而离子不动，所以是电子荷电，颗粒被荷负电；脉冲过后，一部分电子跑到电极，另一部分被负电性离子附着成为负离子，这时有正离子和负离子，所以此时是双极性荷电<sup>[2]</sup>。高压正负脉冲放电时机理上述相似，所以在脉冲放电波形为正负或正时凝并效率都远远高于负和负正脉冲。

不同脉冲波下，脉冲峰值电压对颗粒的凝并效率的影响也各不相同，其原理还有待于进一步探讨。

### 4.3 脉冲重复频率 (f) 变化对凝并效率的影响

脉冲重复频率(f)是脉冲供电电源一个很重要的参数，在实际的脉冲供电除尘过程中，有的人认为 f 与电场平均放电电流存在着近似正比的关系。随着脉冲频率的降低，电晕电流的平均值和变化速度都随之下降，这是因为随着脉冲频率的下降，平均电晕电压随之下降，从而导致电晕电流下降。不同频率的脉冲，对电晕电流将产生不同程度的影响，从收尘极来看，电晕电流的变化幅度（不均匀度）与脉冲频率成反比，所以，要使脉冲电流密度在脉冲周期内尽可能均匀化，应选择较大的脉冲频率<sup>[3]</sup>。而有的人的看法则恰好相反，他们认为 f 与电场击穿电压有一定的关系，当 f 提高时，由于脉冲出现的频度提高，电场内部被激发的带电离子就越多，因此有更易引起火花的倾向，火花电压就有所下降。也就是说，f 越高，电场可能获得的最高峰值电压就越低。表 4-3 列出某试验实测峰值电压的平均数据<sup>[5]</sup>（实验条件为基压为 20KV 不变）。

表 4-3 脉冲电压与 PRF 的关系

脉冲 PRF (pps)	200	100	50	25	20	10
脉冲最高峰值电压 (KV)	46	47.6	48	40.6	50	50

下面就通过实验来讨论一下 f 的大小在粉尘颗粒凝并中对凝并效率的影响。

本节实验条件如下：脉冲放电波形为负正，峰值电压 V 为 3 KV，用-13KV 直流电源做凝并电源，荷电和凝并电极均采用单根 1mm 不锈钢直线电极 (B<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>)，模拟烟气流量为 6m<sup>3</sup>/h。脉冲频率从 50Hz 上升至 300Hz，每次增加 50Hz，讨论频率变化对凝并效率的影响，f-η 曲线如图 4-9 所示，通过计算得到 PM<sub>2.5</sub>

和 PM<sub>10</sub> 的凝并效率，如表 4-4 所示。

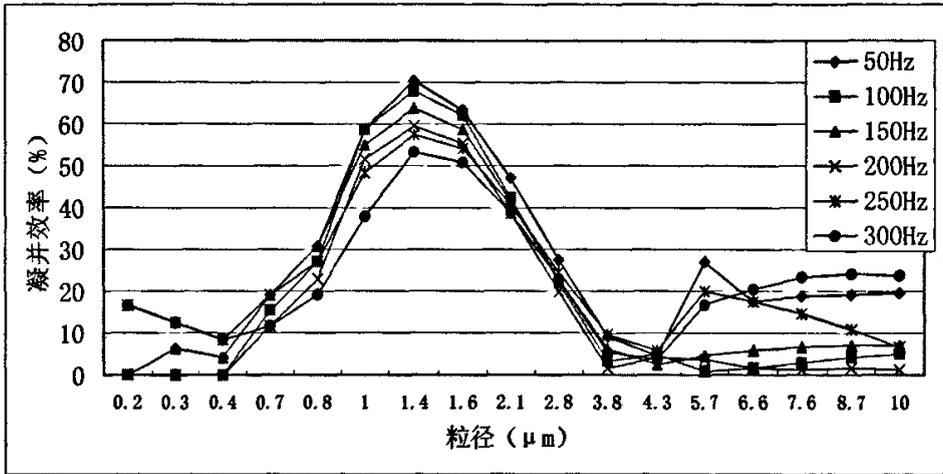


图 4-9 f-η 曲线

表 4-4 不同频率下 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 的凝并效率

f (Hz)	50	100	150	200	250	300
PM <sub>2.5</sub> 的 η (%)	40.7	37.5	35.8	33.7	19.9	34.8
PM <sub>10</sub> 的 η (%)	13.2	6.3	8.7	3.9	9.7	16.9

由图 4-9 可以看出频率高低对不同粒径段的颗粒影响是不同的。频率高的时候 (250Hz 和 300Hz) 对小颗粒 (小于 0.71 μm) 的凝并作用比较明显，但是对大颗粒的凝并作用反倒减弱。频率低的时候恰好相反。150Hz 恰好处于这二者之间。所以在本文中固定频率的工况一般都是在 150Hz 下进行的。

#### 4.4 流量 (Q) 变化对凝并效率的影响

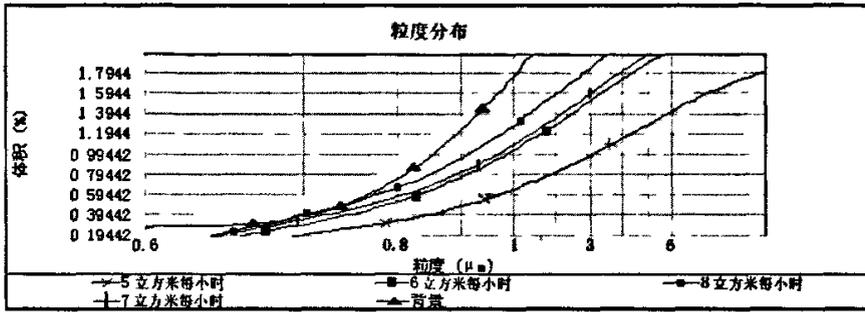
在本实验中改变进入反应器的空气的流量，单位时间内进入反应器的粉尘量不变，为 0.005g/s。讨论不同 Q 对应不同荷电凝并时间对颗粒凝并效率的影响。

该的实验条件如下：荷电电源为单电极 (B<sub>1</sub>)，150Hz，负正脉冲；凝并电源为 -13KV 直流电源，也使用单电极。流量 Q 与荷电时间和凝并时间的关系如

表 4-5 不同流量下的荷电时间和凝并时间

Q (m <sup>3</sup> /h)	5	6	7	8
荷电时间 (s)	1.44	1.2	1	0.9
凝并时间 (s)	2.88	2.4	2	1.8

表 4-5 所示。



4-10 不同流量下凝并前后颗粒粒度分布

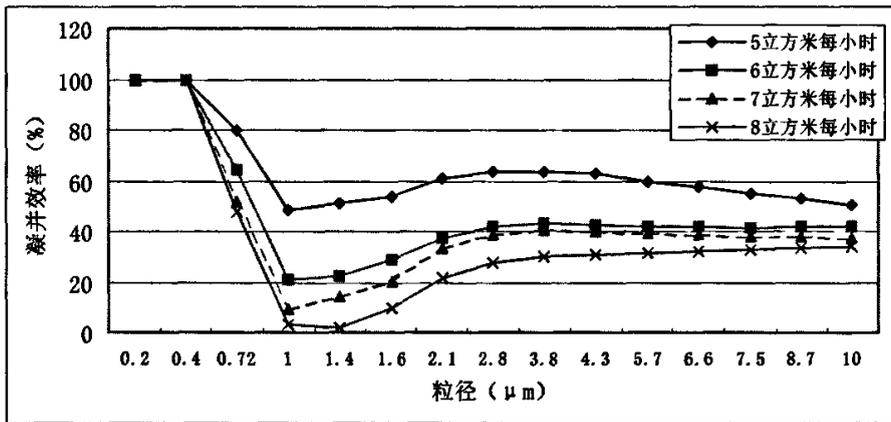


图 4-11 Q-η 关系曲线

由图 4-10 可以看出，凝并后粒径为  $0.2-0.6 \mu\text{m}$  的小颗粒的体积百分比和凝并前相比变得很小，凝并效率接近 100%。计算得到 Q-η 曲线 4-11。

随着 Q 增加，即凝并时间减小，凝并效果变差，由 4-12 可以看出，当  $Q=7\text{m}^3/\text{h}$  时凝并效果最差。在单位时间内进入反应器内粉尘颗粒个数不变的情况下，加大空气的流量，使得颗粒荷电和凝并时间减少，从而会导致凝并效率减少。

表 4-6 不同流量时  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  的凝并效率 (%)

Q ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	5	6	7	8
$\text{PM}_{2.5}$ 的凝并效率 (%)	67.1	47.6	41.2	32.9
$\text{PM}_{10}$ 的凝并效率 (%)	60.8	43.1	39.4	31.5

## 4.5 本章小结

(1) 采用高压负脉冲放电对粉尘颗粒进行荷电，在无凝并电源的情况下，得到颗粒自凝并的效率，由于脉冲对小颗粒良好的荷电性， $0.5-1.0 \mu\text{m}$  粒径段的

颗粒的凝并效率远远大于同工况下其它粒径颗粒；

(2) 在使用-13KV 直流高压电源对颗粒进行凝并后，颗粒的凝并效率大大提高。通过实验得到各种脉冲放电波形下， $V-\eta$  变化曲线。波形不同，电压变化对  $\eta$  的影响方式也不同，当正脉冲时  $V$  增加， $\eta$  也增加；其它波形时趋势相反；

(3) 脉冲重复频率对不同粒径大小的颗粒凝并的影响也不相同。频率较高时对小颗粒（小于  $0.7\mu\text{m}$ ）的凝并有利，频率较低时为大颗粒的凝并有利；

(4) 在单位时间内进入反应器内粉尘浓度不变的情况下，空气流量越大，对应的荷电和凝并时间减少，凝并效果变差，当  $Q=7\text{m}^3/\text{h}$  时凝并效果最差。

## 参考文献

1. 宁智, 路勇, 柴油机排气微粒脉冲荷电特性的研究, 北方交通大学学报, 2002 (2), 71-75。
2. 宋洪涛, 脉冲正流注放电对油滴荷电的研究, 长春师范学院学报, 2000 (3), 44-47。
3. 徐哲淳, 方正翔, 脉冲荷电情况下电除尘器中电场分布数值计算, 静电, 1993(1), 25-29。
4. 尹克, 郭俊, 电除尘器脉冲供电电源及其应用中的几个问题, 通风除尘, 1993 (2), 6-13。

## 第五章 凝并电参数变化对凝并效率影响的实验研究

### 5.1 前言

上一章中通过实验得到了荷电电参数变化与颗粒凝并效率之间的关系。在本章实验中我们使用高压脉冲电场对模拟烟气中的粉尘颗粒荷电,用交变电场对已荷电颗粒进行凝并,以下将讨论在不同放电电极型式,不同脉冲放电波形下,交流峰值电压  $V_p'$  的变化和流量  $Q$  的变化对颗粒凝并效率的影响。

### 5.2 凝并电压峰值 $V_p'$ 变化对凝并效率 $\eta$ 的影响

向晓东等人对荷电颗粒在低频高压交流电场中的凝并现象做了很多研究,为了使颗粒的电凝并理论更加完善,我们采用了和向晓东等人不同的实验方式和实验参数。在本章实验中使用低压高频交流电源产生交变电场,并和高压脉冲荷电电源一起使用,以探讨粉尘颗粒在低压交变电场中的凝并情况。在本章实验中使用了三种不同的电极布置型式,分别是:荷电电极为直线,凝并电极为竖直弹簧;荷电电极为弹簧,凝并电极为平板;荷电电极为水平弹簧,凝并电极为直线。

#### 5.2.1 荷电电极为直线,凝并电极为竖直弹簧时 $V_p'$ 变化对凝并的影响

在本节实验中,荷电和凝并电极型式如图 4-2 所示,这里不再进行描述。流量均采用  $6\text{m}^3/\text{h}$ ,对应的荷电时间为  $1.2\text{s}$ ,凝并时间为  $2.4\text{s}$ 。

##### 5.2.1.1 $V_p'$ 变化对不荷电粒子在交流电场中凝并效率的影响

粉尘颗粒在外加电场中受到极化作用,在颗粒两侧表面分别产生等量的极化电荷,使颗粒沿着电力线运动,并结成“灰珠串”,进行凝并。这种现象与粒子是否带电无关,因此只要有外加电场存在,就会有粉尘颗粒的凝并现象出现。在本小节实验中,在不加荷电电压的情况下, $V_p'$  从  $1\text{KV}$  上升到  $5\text{KV}$ ,图 5-1 为  $V_p' - \eta$  关系曲线。

由 5-1 可以看出,粉尘颗粒虽然没有荷电,由于亚微米粉尘的布朗运动,加之荷电尘粒在交变电场力作用下的往复振动,增加了粒子间相互碰撞的机会,从而产生凝并作用。在低压交变电场中粒径大于  $0.27\ \mu\text{m}$  的颗粒还是会发生凝并现

象。在相同电压下， $1\mu\text{m}$ 左右的颗粒凝并效率比其它粒径颗粒的低很多。在本实验中所使用的交流电压虽然比较低，但是处于电场中的较大的粒子还是会荷上一小部分电荷，在交变电场中碰撞并发生凝并。

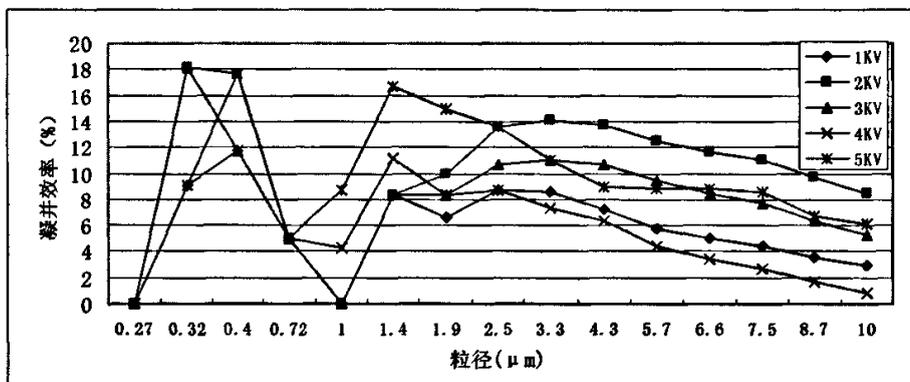


图 5-1  $V_p'$  变化对不带电颗粒在交变电场中凝并效率的影响

### 5.2.1.2 $V_p'$ 变化对荷电粒子在交流电场中凝并效率的影响

下面将讨论在相同荷电电压下，荷电脉冲电压波形为负、正负、正、负正时，交流电压峰值  $V_p'$  从 1KV 到 5KV 变化对凝并效率的影响。

#### 1. 荷电电压为负脉冲 3KV 时 $V_p'$ 与 $\eta$ 的关系

图 5-2 为当荷电电压波形为负时， $V_p'$  -  $\eta$  曲线。对照图 4-4，在相同的荷电方式下，低压交流电场对颗粒的凝并效率要比直流低，尤其在  $1\mu\text{m}$  左右处。

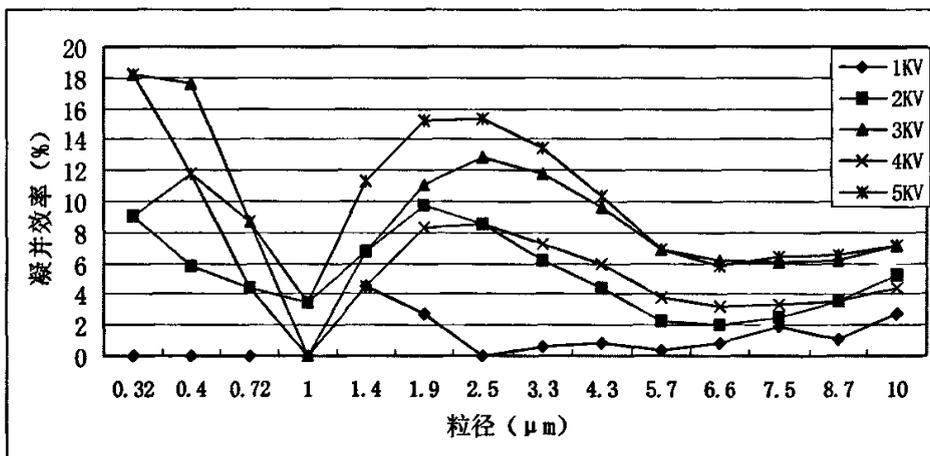


图 5-2 高压负脉冲荷电时  $V_p'$  -  $\eta$  关系曲线

## 2. 荷电电压为正负脉冲 4KV 时 $V_{p'}$ 与 $\eta$ 的关系

图 5-3 为当荷电电压波形为正负时的  $V_{p'}$  -  $\eta$  曲线。由图中可以看出, 当脉冲荷电波形为正负输出时, 粒径小于  $0.2\mu\text{m}$  的小颗粒已基本消失, 但粒径  $1\mu\text{m}$  左右颗粒的凝并效率最低, 这与第三章中正负脉冲荷电, 负直流高压凝并的情形有些相似 (参见图 3-15)。说明正负脉冲荷电更多有利于微细颗粒的凝并。 $V_{p'}$  值变化对  $\eta$  的影响在大颗粒段表现的不明显,  $V_{p'}$  为 2KV 时最好。

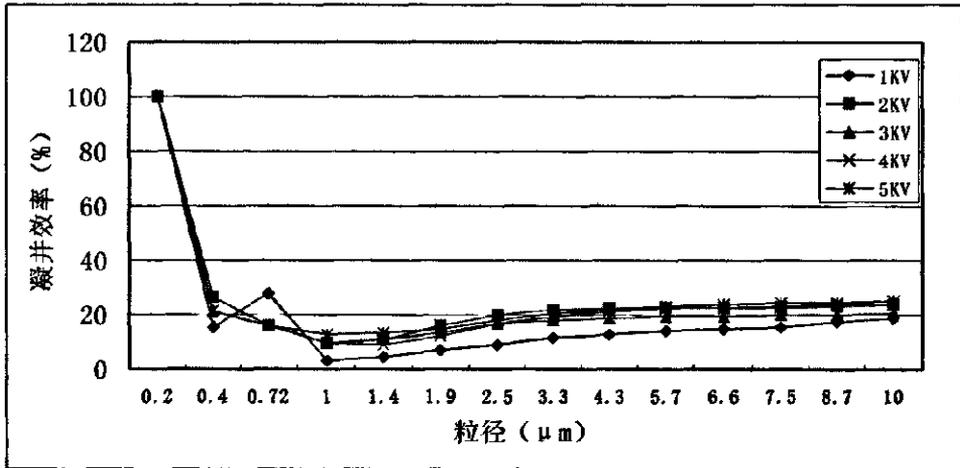


图 5-3 高压正负脉冲荷电时  $V_{p'}$  -  $\eta$  关系曲线

## 3. 荷电电压为负正脉冲 4KV 时 $V_{p'}$ 与 $\eta$ 的关系

图 5-4 为当荷电电压波形为负正时,  $V_{p'}$  -  $\eta$  关系曲线。总的来说, 是随着电压的增加, 凝并效果越来越好。

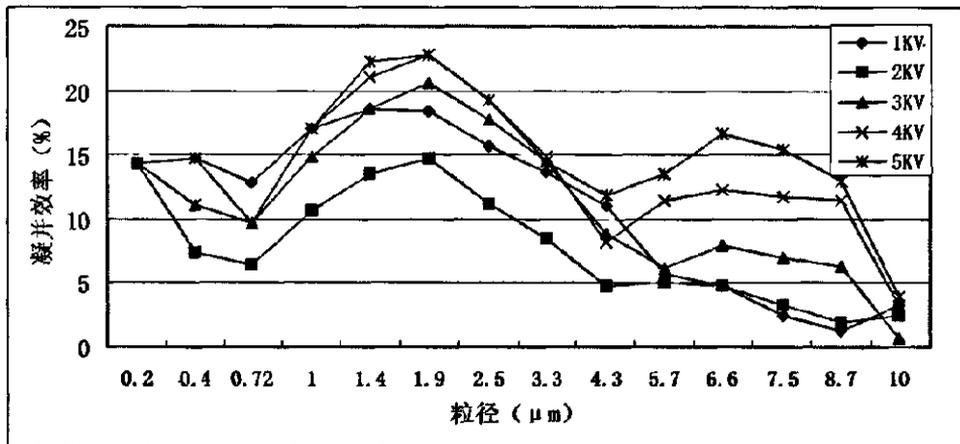


图 5-4 高压负正脉冲荷电时  $V_{p'}$  -  $\eta$  关系曲线

#### 4. 荷电电压为正脉冲 2KV 时 $V_{p'}$ 与 $\eta$ 的关系

图 5-5 为当荷电电压波形为正时,  $V_{p'}$  -  $\eta$  关系曲线。在小颗粒段的凝并是随着电压增加而变好的, 但是大颗粒段在交变电压增加时的凝并变得很差。

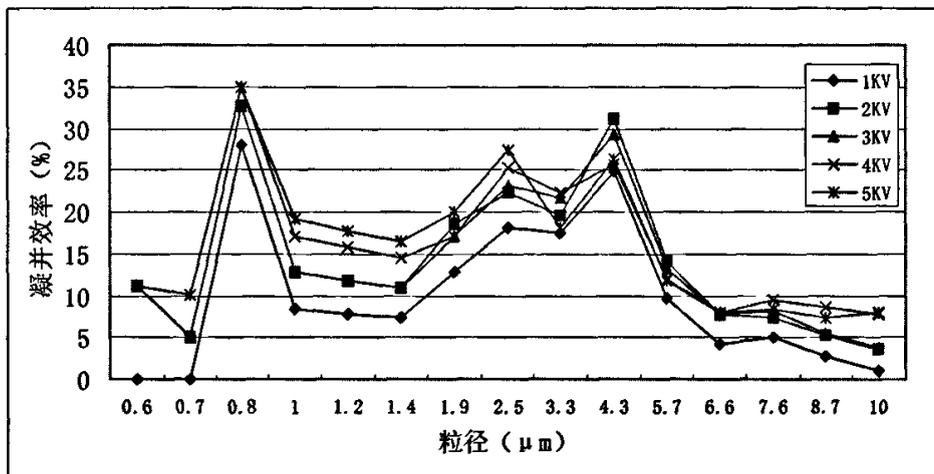


图 5-5 高压正脉冲荷电时  $V_{p'}$  -  $\eta$  关系曲线

#### 5. 本节小结

由以上各图可以看出, 当有凝并电源存在时, 除负脉冲外  $1 \mu m$  左右颗粒的凝并效率都比不加脉冲高压时要高。但是由于交流电压值较低, 所以总体的凝并效率都不如使用负直流电源进行凝并时好。

表 5-1 不同工况下  $PM_{2.5}$  的凝并效率 (%)

$V_{p'}$ (KV)	1	2	3	4	5
正脉冲	16.3	21.3	20.3	21.9	24.3
负正脉冲	16.2	11.4	14.9	15.2	16.1
正负脉冲	11.0	18.7	16.9	16.3	18.7
负脉冲	1.6	6.9	9.3	5.5	11.5

表 5-2 不同工况下  $PM_{10}$  的凝并效率 (%)

$V_{p'}$ (KV)	1	2	3	4	5
正脉冲	11.1	16.3	15.2	14.4	14.9
负正脉冲	13.0	6.4	3.5	8.6	13.6
正负脉冲	13.6	21.9	18.7	20.9	22.1
负脉冲	2.6	4.3	8.4	5.0	8.9

## 5.2.2 荷电电极为弹簧，凝并电极为平板时 $V$ 变化对凝并的影响

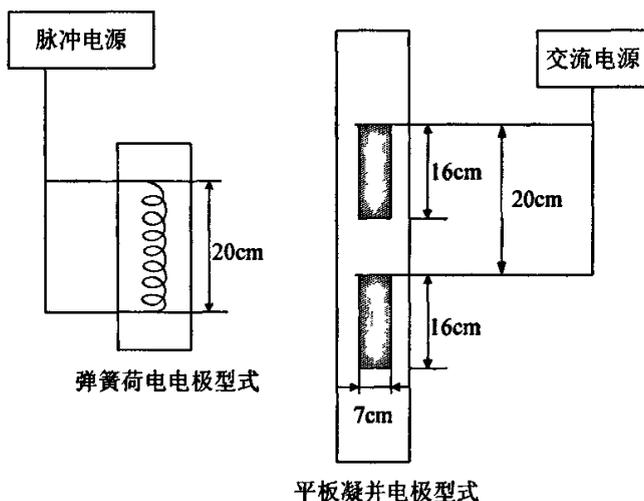
在本小节实验中，均采用 5-6 所示的电极型式。其中荷电电极采用一根长为 20cm，外径为 4mm 的不锈钢弹簧，两端由两根不锈钢线支撑，并和高压线相连。流量均采用  $6\text{m}^3/\text{h}$ ，对应的荷电时间为 1.2s，凝并时间为 1.92s。荷电使用高压脉冲电源，凝并使用 50Hz 交流电源。在本节中讨论在相同荷电电压下，荷电脉冲电压波形为负、正负、正、负正时，凝并电压峰值  $V_{p'}$  从 1KV 到 5KV 变化对凝并效率的影响结果。

### 5.2.2.1 荷电波形为负脉冲时 $V_{p'}$ 与 $\eta$ 的关系

实验条件：荷电电压采用 5KV，150Hz 负脉冲；凝并电压分别使用 1, 2, 3, 4, 5KV，50Hz 交流电压，实验结果如图

5-7 所示。从图中可以看出，当不加凝并电压时，

粉尘颗粒的自凝并效果没有加了电压以后的好，而且凝并效率是随着电压的增加而升高的。当电压增大到一定值时，所有颗粒段的凝并效率相当。



5-6 电极布置型式

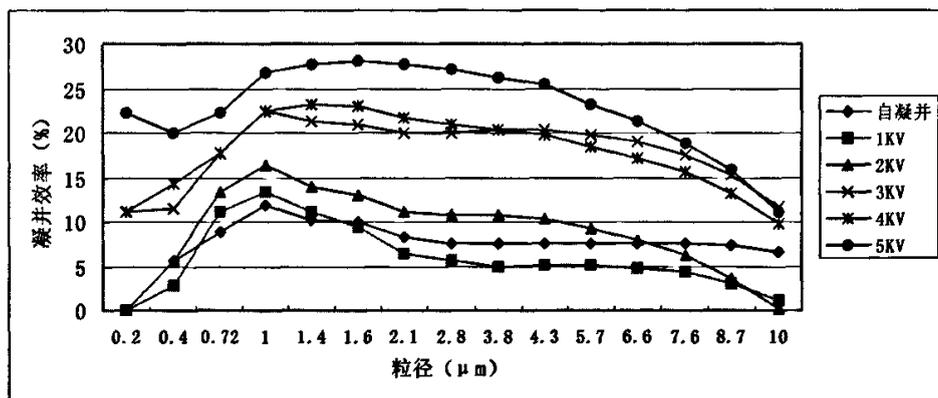


图 5-7 荷电电压为-2KV 负脉冲时  $V_{p'}$  -  $\eta$  关系曲线

### 5.2.2.2 荷电波形为正负脉冲时 $V_p'$ 与 $\eta$ 的关系

实验条件：其它参数不变，荷电电压采用 4KV，150Hz 正负脉冲。

总体来说，当  $V_p'$  为 4KV 时凝并效果最好，但是对于粒径为  $1\mu\text{m}$  左右的颗粒来说，3KV 更好一些。电压太低和太高时，凝并效果都会恶化。

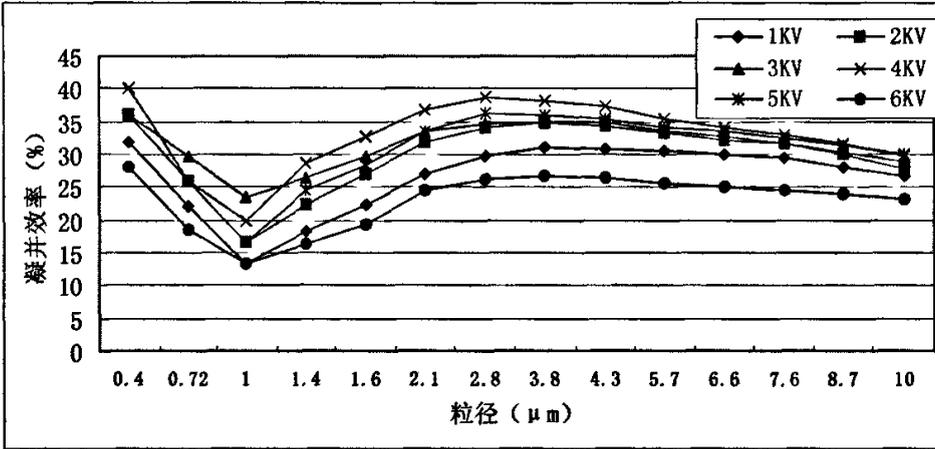


图 5-8 荷电波形为正负脉冲时的  $V_p'$  -  $\eta$  关系曲线

### 5.2.2.3 荷电波形为正脉冲时 $V_p'$ 与 $\eta$ 的关系

实验条件：荷电电压采用 1.8KV，150Hz 正脉冲。实验结果如图 5-9 所示。

从图中可以看出，电压为 4KV 时最好，3KV 时最好。 $V_p'$  和  $\eta$  之间没有一定的规律，但是对于每一个电压来说，凝并效率的值都比较稳定。

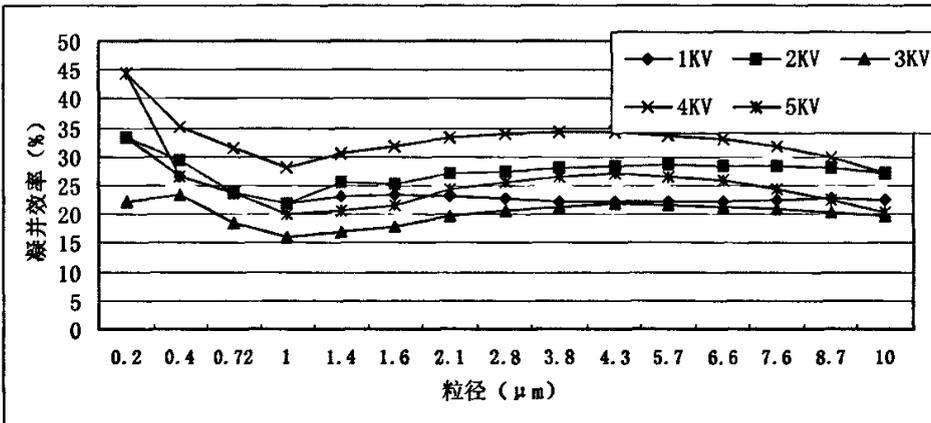


图 5-9 荷电波形为正脉冲时的  $V_p'$  -  $\eta$  关系曲线

### 5.2.2.4 荷电波形为负正脉冲时 $V_{p'}$ 与 $\eta$ 的关系

实验条件：荷电电压采用 4KV, 150Hz 负正脉冲。实验结果如图 5-10 所示加了凝并电压后  $\eta$  都有所提高，并且  $V_{p'}$  越高，凝并效果越好。但是随着粒径的增加，电压对凝并效果的影响越来越小。

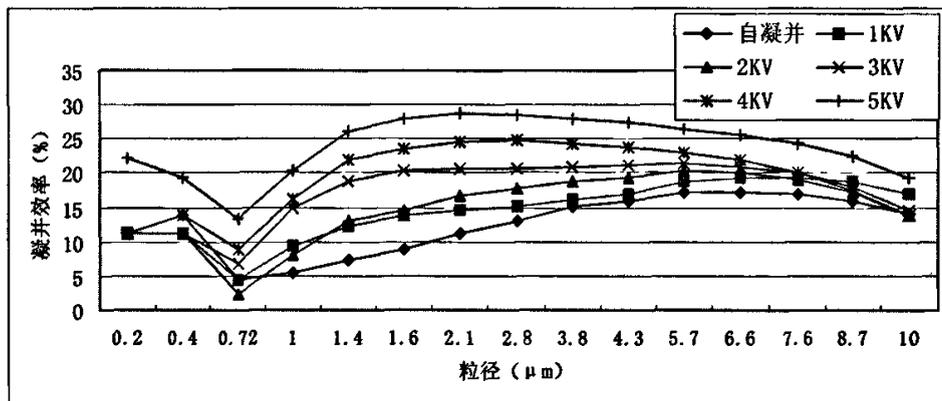


图 5-10 荷电波形为负正脉冲时的  $V_{p'}$  -  $\eta$  关系曲线

### 5.2.2.5 本节实验小结

对以上四种在不同输出波形荷电电压下，不同凝并电压下对  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  的脱除效率如下表 5-3 和 5-4 所示。当荷电脉冲电压输出波形为正负脉冲时凝并效果最好。负脉冲和负正脉冲较差。当凝并电压升高到 5KV 时，除正负脉冲外，其他的波形对  $PM_{2.5}$  的处理效果相近似。将表 5-3, 5-4 的结果与表 4-1, 4-2 的结果相比较，可以发现，无论脉冲电压的值是否改变，也无论使用何种凝并电源，正脉冲和正负脉冲对小颗粒的凝并效果都远好于负脉冲和负正脉冲。当使用直流电源作为凝并电源时比低压交流电源的凝并效率大很多。是可能是因为交流电源的电压太低（最高只有 5KV），不能对荷电颗粒进行很好的凝并作用。

表 5-3 不同工况下  $PM_{2.5}$  的凝并效率 (%)

荷电波形	$V_{p'}$ (KV)				
	1	2	3	4	5
负脉冲	8	11.4	18.9	20.2	25.4
正脉冲	23.7	26.4	19	32.4	23.4
正负脉冲	27.6	31.6	34	35.5	33
负正脉冲	11.7	11.9	16.3	19.3	23.5

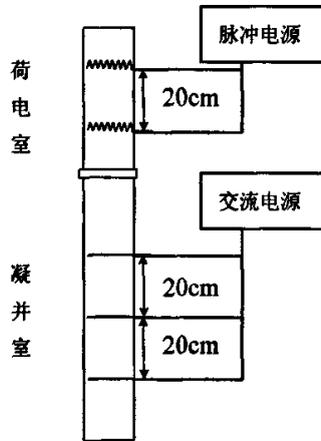
表 5-4 不同工况下 PM<sub>10</sub> 的凝并效率 (%)

荷电波形 \ V <sub>p</sub> ' (KV)	1	2	3	4	5
负脉冲	5.6	9.5	19.2	19.5	23.9
正脉冲	22.8	27.9	20.7	33.1	25.3
正负脉冲	29.6	33.0	33.3	35.5	34.0
负正脉冲	16.0	17.2	19.5	21.9	25.7

另外, 从本小节的 V<sub>p</sub>' - η 曲线都可以看出, 相同电压下的凝并曲线都比较平缓, 这可能是因为采用了不同的荷电和凝并电极, 弹簧电极和平板电极放电都比较均匀, 在整个反应器空间内对图中所列出的 0.2-3.8 μm 段的颗粒的凝并作用均好一些。

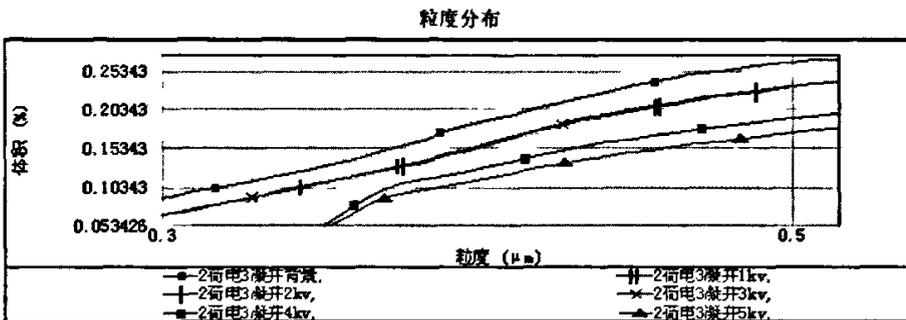
### 5.2.3 荷电电极为水平弹簧, 凝并电极为直线时 v<sub>p</sub>' 变化对 η 的影响

电极布置如 5-11 所示。其中, 荷电电极为两根外径为 3mm 的水平弹簧电极, 每个电极相距 20cm; 凝并电极使用三根 (B<sub>2</sub>、C<sub>2</sub>、D<sub>2</sub>) 直径 1mm 的不锈钢直线, 各个电极之间也为 20cm。



5-11 电极布置形式

实验条件如下: 流量为 6m<sup>3</sup>/h, 对应的荷电时间约为 1.2s, 凝并时间约为 3s; 荷电电压使用 150Hz, 4KV 的高压负脉冲, 凝并电压分别使用 1, 2, 3, 4, 5KV 交流电压, 频率 50Hz 不变, 实验结果如图 5-12 所示。



5-12 凝并前后小颗粒段粒度分布曲线

在本组实验中,对小颗粒段的凝并效果比较好,图 5-12 为粒径为  $0.2\sim 1\mu\text{m}$  之间颗粒凝并前所分别施加 1、2、3、4、5KV 交流电压后的粒度分布。从图中可以看到当电压增加至 4KV 和 5KV 后,小于  $0.3\mu\text{m}$  的颗粒已基本消失了。此颗粒段的凝并效率如 5-13 所示。

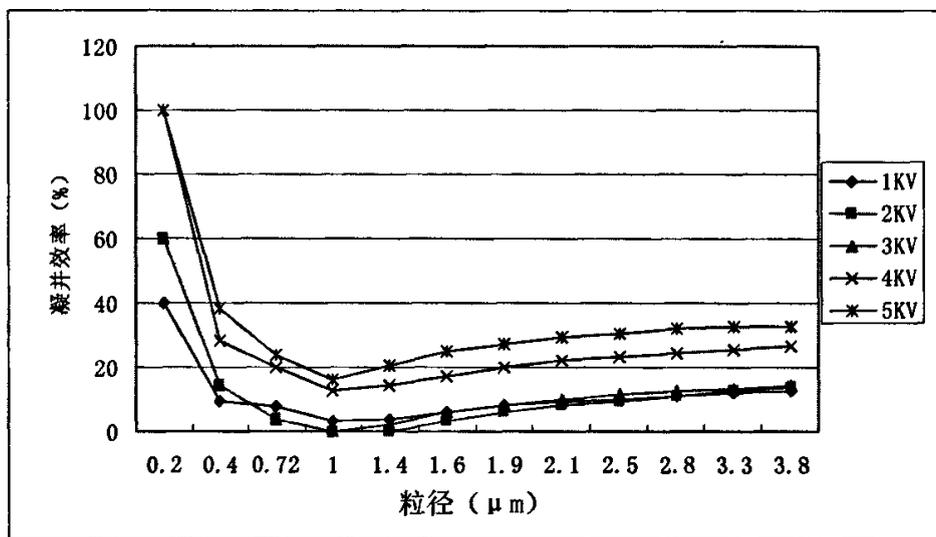


图 5-13  $Vp' - \eta$  关系曲线

## 5.2.4 本节小结

在众多放电极型式中,芒刺线具有电晕强烈电流密度大的特点,但是它的电流不均匀,另外芒刺尖端易引起火花放电,显著影响脉冲电压峰值,而通过前面实验可知脉冲峰值的高低是影响凝并收尘效率的关键因素。欧洲一些国家(如丹麦、瑞典等)倾向于采用放电均匀的螺旋线<sup>[1]</sup>。在本文的部分实验中使用了外径 4mm 的不锈钢弹簧作为放电极,在实验进行的过程当中,由于电极上所施加的电压都较高,所以模拟烟气中会有一些部分粉尘颗粒粘附在电极上,通过振打清理发现,弹簧电极比直线型电极,平板型电极,折线型电极更容易清理积灰。

在本节实验中,将图 5-6 和其它工况得到的凝并效率曲线相比,可知无论哪种脉冲波形放电对粉尘颗粒荷电,颗粒带无论带有相同符号的或不同符号的电荷,其碰撞后的凝并效果都明显高于不带电的中性粒子,而且带异号电荷的粒子的凝并效果比带同号电荷的更好。可以定性分析如下:对于带同号电荷的粒子,原则上讲由于粒子间存有斥力而不利于粒子的凝并。但分析前提是粒子呈球形单分散系,且粒子比气体的平均自由程大得多。而实际的粉尘颗粒都属于高度分散

体系，且形状不一，在相同的荷电条件下，粒子的荷电量不一样。即使粒子的荷电量一样，电荷在粒子表面的分布不一定相同。因此，当带同号电荷的粒子密切接近时，就会感应出符号相反的电荷，使引力大于斥力而凝并。对于带异号电荷的粒子，由于粒子间存在有强烈的吸引力(库仑力)，粒子间的碰撞几率急剧增加。粒子相互靠拢，促使粒子的凝并加速。当然，带异号电荷的粒子间也有一个作用范围，或称有效吸引范围。在这范围以外，库仑力不起作用<sup>[2]</sup>。

### 5.3 流量 (Q) 变化对凝并效率的影响

电极布置形式如上，荷电电压使用 150Hz，4KV 正负脉冲，凝并电压使用交流 3KV，50Hz。进入反应器内空气流量分别为 4m<sup>3</sup>/h，5 m<sup>3</sup>/h，6 m<sup>3</sup>/h，7 m<sup>3</sup>/h 和 8 m<sup>3</sup>/h，对应荷电时间分别为 1.8s，1.4s，1.2s，1.0s，0.9s，凝并时间分别为 2.88s，2.3s，1.92s，1.65s，1.44s。给料量不变，仍为 0.005g/s。

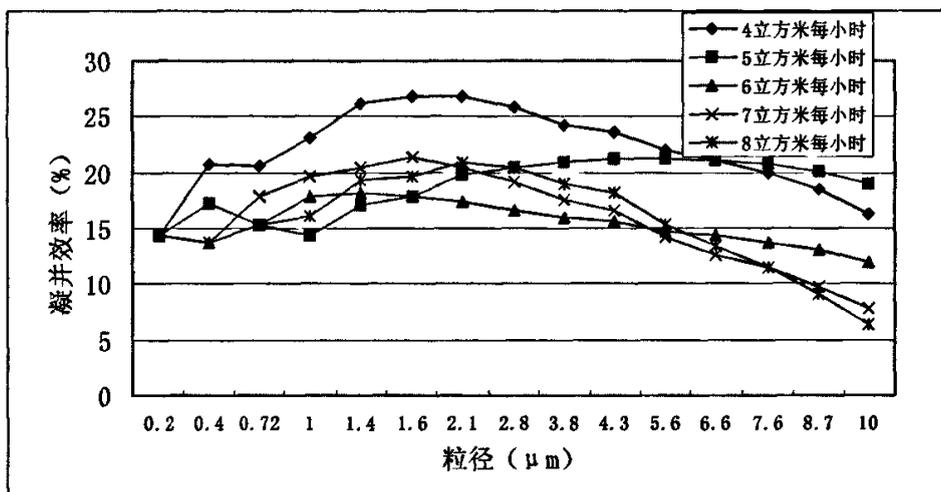


图 5-14 Q-η 关系曲线

表 5-3 不同流量下 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 的凝并效率对比

Q (m <sup>3</sup> /h)	4	5	6	7	8
荷电时间/凝并时间 (s)	1.8/2.88	1.4/2.3	1.2/1.92	1.0/1.65	0.9/1.44
PM <sub>2.5</sub> 的凝并效率 (%)	24.2	17.9	17.1	19.4	18.3
PM <sub>10</sub> 的凝并效率 (%)	23.0	20.0	15.6	16.1	16.5

从图可知，在单位时间进入反应器内粉尘量不变的情况下，当流量为 4m<sup>3</sup>/h 时，凝并效果最好，也就是说当荷电和凝并时间越长，荷电和凝并也就越充分，凝

并效率越高。其他流量时，凝并效率变化不大。

## 5.4 本章小节

(1) 与交流电场中颗粒的自凝并相比，加上荷电电场后， $1\mu\text{m}$ 左右颗粒的凝并效率都有所提高，这说明脉冲高压电场对颗粒有良好的荷电作用。但是由于交流电压值较低，所以总体的凝并效率均不如加负直流也高压电场进行凝并时效果好；

(2) 由第四章和第五章的实验结果可以得到如下结论：正脉冲和正负脉冲对小颗粒荷电后无论是使用高压直流电场还是低压交流电场进行凝并，总的凝并效果都远好于负脉冲和负正脉冲；

(3) 荷电和凝并时间越长，荷电和凝并也就越充分，凝并效率越高；

(4) 不同电极布置型式对凝并的效果也有一定的影响，总的来说荷电极为弹簧，凝并电极为平板荷电时的凝并效率最高， $V_p' - \eta$ 曲线也最平滑；这可能是因为弹簧的放电较均匀，平板的面积较大，这些都可以使空间的颗粒充分荷电和凝并。其他两种布置方式要稍差一些。

## 参考文献

1. 尹克, 郭俊, 电除尘器脉冲供电电源及其应用中的几个问题, 通风除尘, 1993 (2), 6-13.
2. 唐敏康, 电除尘器中亚微粒子凝并机理的研究, 工业安全与防尘, 1995 (6), 1-5.

## 第六章 有直流基压的脉冲电场对颗粒凝并作用的实验研究

### 6.1 前言

在前面的实验中我们讨论了荷电电源参数、凝并电源参数变化对粉尘颗粒凝并效率的影响。在本章实验中使用有直流基压的脉冲加电源，其参数为：直流电压 2~6 万伏调节，正弦脉冲宽度为 400ns，重复频率为 300Hz。在本章实验中只使用一套电源设备，在反应器中对粉尘颗粒同时荷电和凝并。在本节中主要通过实验得到单位体积烟气消耗能量、放电电极数及模拟烟气流量与对凝并效率之间的关系。

### 6.2 实验步骤

#### 6.2.1 单位体积烟气能耗对凝并效率的影响

本节实验条件如下：本节实验使用单根不锈钢直线（ $\phi=1\text{mm}$ ）电极（ $B_1$ ）放电，模拟烟气流量为  $6\text{m}^3/\text{h}$ ，进入反应器的粉尘量为  $0.005\text{g}/\text{s}$ 。当输入电压为 220V，输入电流分别为 0.20A、0.21A 和 0.22A 时，凝并后烟气中粉尘颗粒的粒度分布如图 6-1 所示。由图中可以看出，凝并后（曲线-1, 2, 3）粒径为 1~50  $\mu\text{m}$  的颗粒的数量明显比凝并前(曲线-0)减小，在有直流基压的脉冲电场中小颗粒凝并的效果十分明显。

本实验中不同输入电流所对应的处理单位体积烟气所消耗能量分别为  $7.3\text{Wh}/\text{m}^3$ ， $7.7\text{Wh}/\text{m}^3$  和  $8\text{Wh}/\text{m}^3$ 。通过计算得到单位能耗量与凝并效率之间的关系如图 6-2 所示，由图中可能直观的看出，不是单位体积能耗量越大，凝并效果就越好。当能耗量为  $7.7\text{Wh}/\text{m}^3$  时凝并效率最高。

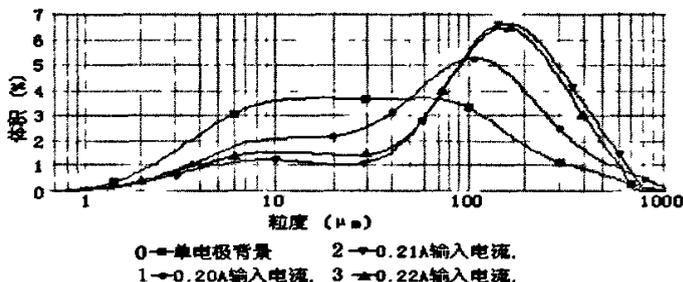
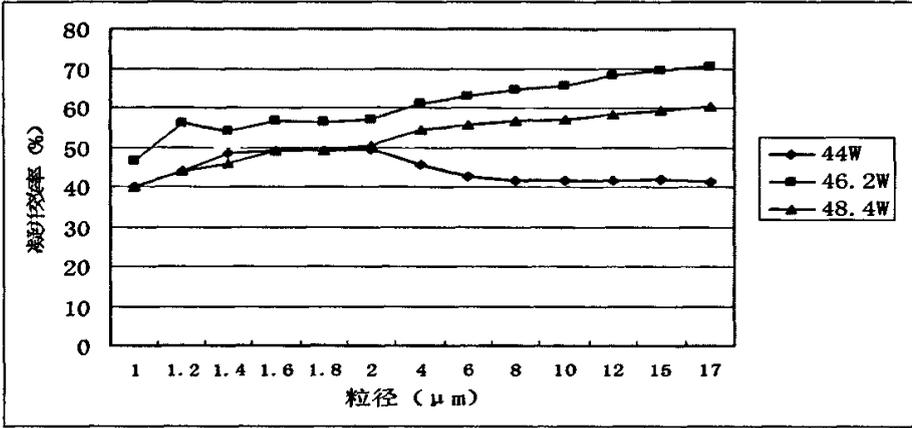


图 6-1 不同输入电流对粒度分布的影响



6-2. 单位烟气消耗功率对凝并效率的影响

### 6.2.2 电极数对凝并效率的影响

在本节实验中，分别使用单电极 ( $A_1$ )、双电极 ( $A_1$ 、 $B_1$ ) 和三电极 ( $A_1$ 、 $B_1$ 、 $C_1$ ) 进行凝并，电极均采用直径为 1mm 的不锈钢直线。模拟烟气流量为  $6\text{m}^3/\text{h}$ ，图 6-3 为马尔文激光粒度仪所测得的凝并前后颗粒粒度分布。经过计算得到凝并效率随电极数变化的关系曲线如图 6-4 所示。由图 6-4 可以看出电极数越多，凝并效率也就越好；单电极时的凝并效率较小，双电极和三电极凝并效率明显变大，当粉尘粒径大于  $3\mu\text{m}$  时，两者之间的变化并不明显，但是对于粒径小于  $3\mu\text{m}$  的微细颗粒来说，三电极的凝并效果明显优于双电极。三电极时对粒径为  $2\mu\text{m}$  的粒子凝并效率为 56.3%。这对捕集  $\text{PM}_{2.5}$  有重要的意义。即凝并效率随着电极数的增加而增加，但是增大到一定数目时，趋于一致。在本实验中放电极为并联形式，

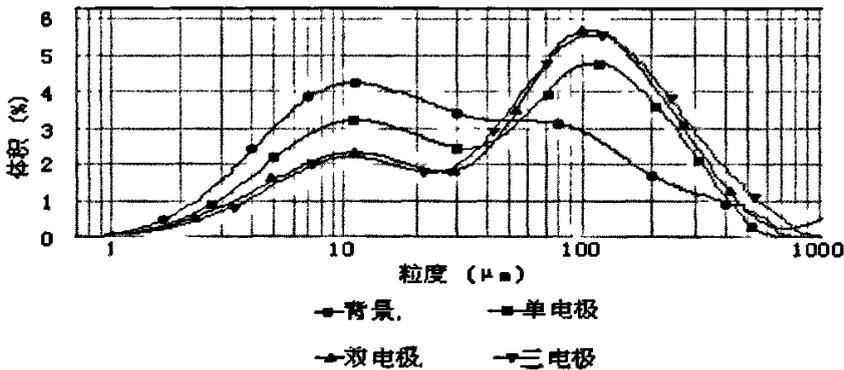


图 6-3 不同电极数对粒度分布的影响

当电极数增加时,总的电晕电流随其长度增加按线性函数上升趋势增长<sup>[1]</sup>,放电产生电晕的区域增加,这些都有助于颗粒更好地荷电和凝并,处理效果随之增强。

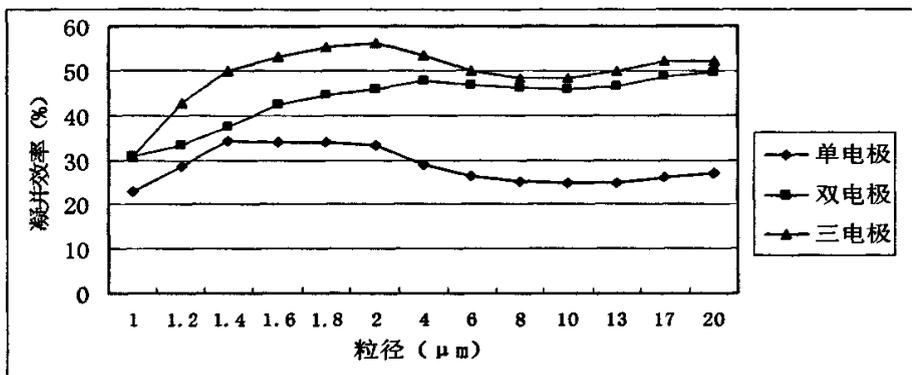


图 6-4 不同电极数对凝并效率的影响

### 6.2.3 凝并时间对凝并效率的影响

图6-5为在双直线电极 ( $A_1$ 和 $B_1$ ) 条件下,空气流量分别为 $5\text{m}^3/\text{h}$ 、 $6\text{m}^3/\text{h}$ 、 $7\text{m}^3/\text{h}$ 、 $8\text{m}^3/\text{h}$ ,粉尘浓度为 $0.005\text{g/s}$ 时,由马尔文激光粒度仪所测得的凝并前后颗粒的粒度分布曲线。从图6-5可以看出,随烟气流量增加导致烟气速度变大,粉尘颗粒在反应器中荷电凝并时间减少,凝并效果变差。上述流量对应凝并时间分别为 $2.9\text{s}$ 、 $2.4\text{s}$ 、 $2\text{s}$ 、 $1.8\text{s}$ ,不同粒径粉尘颗粒的凝并效率如图8所示。从图6-5和6-6中可看出,当凝并时间小于 $2\text{s}$ 时,凝并效果明显变差;当时间超过 $2\text{s}$ 时,凝并效率趋于稳定,与此同时处理单位烟气的能耗也增加。且由图中可以看出对粒径为 $10\mu\text{m}$ 左右的粉尘凝并效率为最大,当凝并时间为 $2.4$ 秒时,可达到 $75\%$ 。

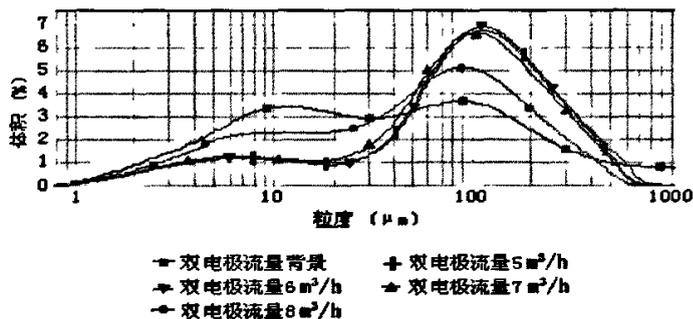


图 6-5 烟气流量对粒度分布的影响

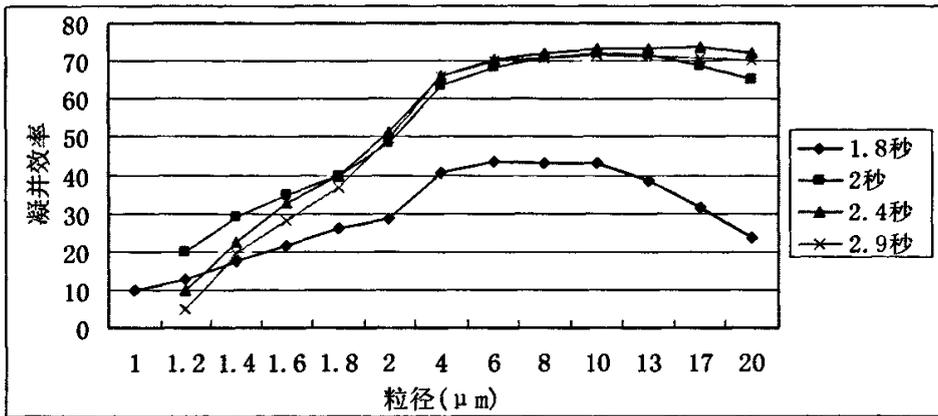


图 6-6 烟气流量对凝并效率的影响

## 6.4 本章小结

随着处理单位体积烟气能耗的增加, 对小颗粒的凝并效率会先增加后减小, 在本实验中, 能耗量为  $7.7 \text{ Wh/m}^3$  时, 凝并效率最高。凝并效率随电极数增加而增大, 对于粒径小于  $2.5 \mu\text{m}$  的细小颗粒, 电极数增加, 其凝并效率明显变大; 三电极时对于粒径为  $2 \mu\text{m}$  的粉尘粒子凝并效率可达 56.3%; 凝并时间增加, 凝并效率增大, 相应的能耗也增加。当时间增大超过一定值时, 凝并效率趋于稳定, 试验得出最佳凝并时间为 2s。

## 参考文献

1. 何正浩, 李劲, 电晕线串并联的脉冲电晕放电特性, 高电压技术, 2001 (1), 47-49。

## 第七章 颗粒在电场中凝并的数值模拟及理论计算

### 7.1 前言

本章对颗粒的电凝并现象作了理论上的研究,通过商用 fluent 软件对带电颗粒在不同凝并电场的运动情况进行了描述,在微观上解释了颗粒的电凝并现象。带电颗粒在凝并室内下降的过程中,彼此之间在电场力的作用下会发生碰撞,从而产生一定的凝并效果,因此碰撞次数是影响凝并效率的重要因素;本章通过研究带电颗粒在交变电场中的受力情况并结合运动方程推导出带电颗粒在交变电场中的碰撞次数公式。为进一步的理论计算提供依据。

### 7.2 基本模型及方程

颗粒首先在高压脉冲电场进行荷电,由于脉冲高压电场对颗粒有良好地荷电能力,因此假设荷电颗粒在进入凝并电场时所带电量均为饱和荷电量。荷上饱和电量的粉尘颗粒进入凝并室(线板式,凝并段长为20cm,宽为10cm,放电线布置在凝并器中间位置,异极距为5cm),在凝并室中的受力情况如图7-1所示。颗粒在水平方向上受到的力有库仑力 $F_e$ 和周围气流的斯托克斯粘性阻力 $F_f$ 。在竖直方向上有空气浮力 $F_{浮}$ 和重力 $G$ 。

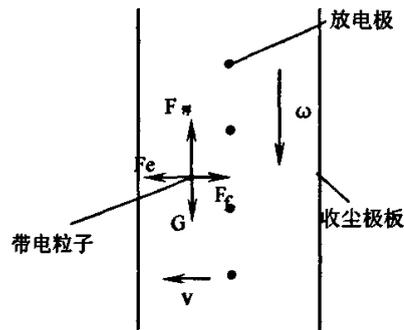


图 7-1 粒子在电场中的受力分析  
 $F_e$ ——电场力,  $F_f$ ——气流的粘性阻力,  $G$ ——重力,  $F_{浮}$ ——浮力,  
 $v$ ——粒子向收尘极板驱进速度,  $\omega$ ——气流速度。

当尘粒相对气流的速度较小和尘粒粒径很小时,尘粒在气流中相对运动的雷诺数 $Ret < 1$ ;此时,尘粒遇到的流体阻力适应于stokes阻力定律,表达式如下:

$$F_f = 3\pi\mu vx \quad (7-1)$$

其中:  $\mu$  ——空气的动力粘度, kg/ms;

$v$  ——粒子向收尘极板迁移的速度,也就是水平方向的速度, m/s;

$x$ ——粒子直径, m。

在交变电场中带电颗粒受到的电场力为:

$$F_e = q_{es} E' = q_{es} E_p' \sin \omega t = q_{es} E_p' \sin 2\pi f t \quad (7-2)$$

其中:  $E'$  ——交变电场强度, V/m;  $E_p'$  ——交变电场峰值场强, V/m;  $f$  ——交变电场频率, Hz;  $t$  ——时间, s。

饱和电量公式由下式给出:

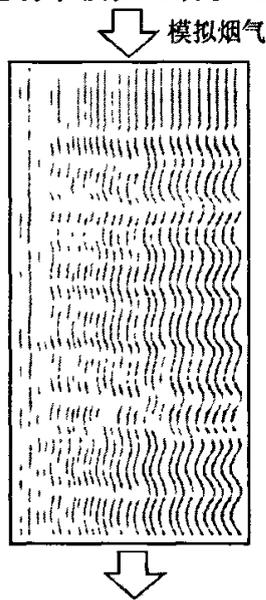
$$q_{es} = \frac{3\varepsilon_r}{2 + \varepsilon_r} \pi \varepsilon_0 E x^2 \quad (7-3)$$

其中:  $\varepsilon_0$  ——真空介电常数,  $8.854 \times 10^{-12} \text{Nm}^2/\text{c}^2$ ;  $\varepsilon_r$  ——粒子的相对介电常数;  $x$  ——颗粒的直径, m;  $E$  ——荷电电场强度, V/m。

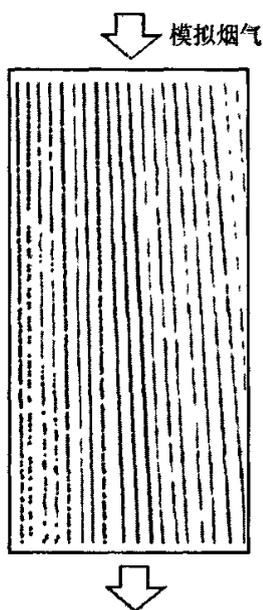
在脉冲放电期间, 由于电子能量非常高, 漂移速度大, 荷电能力强, 尽管时间很短, 也可以使粒子获得较高的荷电量<sup>[1]</sup>。因此脉冲电场场强峰值是影响粉尘粒子饱和荷电的主要因素, 此处可以用脉冲放电时的电场强度峰值 $E_p$ 代替 $E$ , 则上式可以表示为:

$$q_{es} = \frac{3\varepsilon_r}{2 + \varepsilon_r} \pi \varepsilon_0 E_p x^2 \quad (7-4)$$

### 7.3 凝并电场中颗粒运动轨迹数值模拟

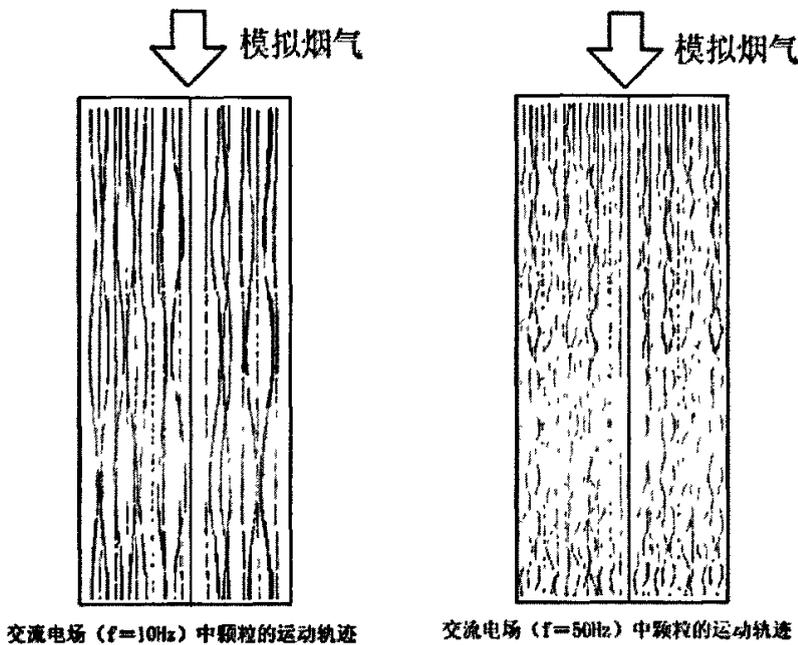


7-2 不同粒径颗粒在交变电场中运动轨迹



7-3 不同粒径颗粒在直流电场中运动轨迹

在本小节中，根据 7.2 小节中所做受力分析，通过计算得到 7-2 和 7-3 所示不同电场中不同粒径的运动轨迹，图中每一条线代表一个颗粒从进入到离开反应器间的运动轨迹，从左向右颗粒粒径依次增大，从  $0.1\ \mu\text{m}$  增大到  $600\ \mu\text{m}$ 。从图中可以看出，交变电场中带电颗粒在凝并电极极之间来回振荡，轨迹为正弦波形。颗粒粒径越小，轨迹越接近于直线；粒径越大，振幅越大，碰撞正是由于这种不同粒径间振幅不同而产生的。而在直流电场中，轨迹线为一条斜线，颗粒粒径越大，与反应器壁所成的角度也就越大。粒径不同倾角不同，颗粒在反应器中下降的过程中就会发生碰撞，从而发生凝并。



7-4 带电颗粒在交变电场(不同频率)中的运动轨迹

我们在 7.2 小节所提出的线板式反应器模型基础上使用 fluent 软件对带电颗粒在交流电场和直流电场中的运动轨迹进行模拟，荷电后模拟烟气从上向下流经凝并室，入口处颗粒粒径随机分布，图中曲线之间的相交点为两个带电颗粒在下降过程中相碰撞的点。在图 7-4 中，交变电场电压峰值均为  $5\text{KV}$ ，交变电场的频率分别为  $10\text{Hz}$  和  $50\text{Hz}$ ，通过对比发现，频率  $f$  越大，颗粒在反应器中振动的次数也越多。

直流电场中带电颗粒的运动轨迹如图 7-5 所示。

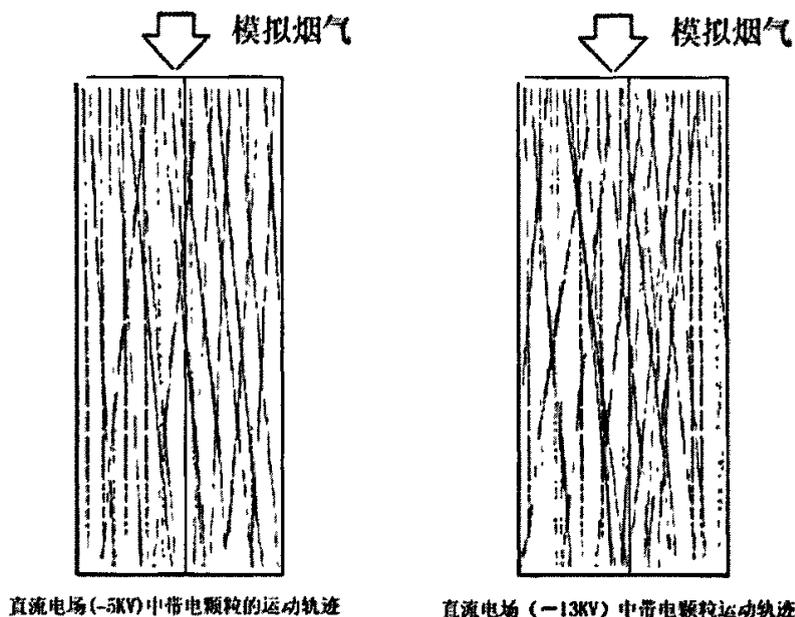


图 7-5 带电颗粒在直流电场（不同电压）中的运动轨迹

### 7.4 带电颗粒在交变电场中碰撞次数的理论计算

下面对交变电场中带电颗粒的在一个周期内的碰撞次数进行计算，这里将碰撞次数定义为在  $T$  ( $=1/f$ , 交变电场变化周期) 时间内，同一横截面内颗粒之间所有可能发生碰撞的碰撞总数，用  $N$  表示。

在推导过程中应用到如下假设：

- (1) 荷电电场不改变颗粒的粒度分布；
- (2) 凝并电场为匀场强电场，在任一时间全场内场强  $E$  处处相等；

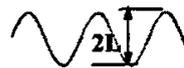


图 7-6 颗粒运动轨迹

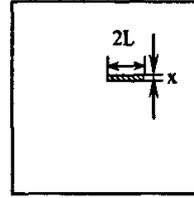
- (3) 颗粒在凝并室入口处均匀分布；
- (4) 假设每两个不同颗粒之间在一个周期内只能发生一次碰撞；
- (5) 忽略颗粒之间的静电力。

7.3 小节中模拟得到交变电场中带电颗粒的运动轨迹曲线为正弦波形，这里正弦曲线的振幅用  $L$  表示。颗粒在坚直方向上下降的速度相等，因此只考虑颗粒在水平方向上的运动情况，将该问题简化为二维求解。由于场强分布均匀，在水

平方向上，任意一个粒径为 $x$ 的带电颗粒都会在放电极和接地极板之间作直线往复运动。运动轨迹所经过的区域为 $S=2Lx$ ，如图7-4所示。

在这个区域之内，必定还有其他颗粒，那么该颗粒在下落过程中，将与这些颗粒发生碰撞。由于颗粒分布均匀，那么在这个范围之内的颗粒数可以用下式表示：

$$N = N_0 S / S_0 = 2 N_0 L x / S_0$$



7-7 凝并室横截面示意图

其中 $N_0$ ---同一横截面内按颗粒中位径进行计算得

到的颗粒总数，个/ $m^2$ ； $S_0$ ---反应器的横截面积， $m^2$ ； $S$ ---颗粒运动轨迹所经过的区域的横截面积， $m^2$ 。

在一个运动周期内，这个粒径为 $x$ 颗粒与其他颗粒碰撞的次数为：

$$N = N_0 S / S_0 = 2 N_0 L x / S_0 \quad (7-5)$$

为了避免两个颗粒碰撞次数被重复计算，将总数除2，则总的颗粒碰撞次数为：

$$N = (N_1 + N_2 + \dots + N_m + \dots) / 2 \quad (7-6)$$

在所有的颗粒中，会有一些颗粒粒径相同，则又可以用下式来表示碰撞次数：

$$N = (n_1 N x_1 + n_2 N x_2 + \dots + n_m N x_m + \dots) / 2 \quad (7-7)$$

其中 $n_m$ 表示粒径为 $x_m$ 的颗粒在 $N_0$ 中所占数目为 $n_m$ 个。

将7-5代入上式得到：

$$N = \sum \frac{N_0 L}{S_0} x n_m \quad (7-8)$$

由于工业烟尘近似服从对数正态分布，因此粒度分布可以用下式来表示<sup>[2]</sup>：

$$f(x) = \frac{1}{x \sqrt{2\pi} \ln \sigma} \exp \left[ - \left( \frac{\ln x - \ln a}{\sqrt{2} \ln \sigma} \right)^2 \right] \quad (7-9)$$

其中： $\sigma$  ----几何标准偏差； $a$  ----粉尘的数量中位径。

经过整理可以得到：

$$N = \frac{N_0^2 L}{S_0} \sum x f(x) \quad (7-10)$$

L通过以下方式求解。

L只与颗粒在水平方向上受力有关，故只考虑水平方向上颗粒受力有：

$$F_e - F_f = ma \quad (7-11)$$

将公式 7-1, 7-2 带入到上式得到 7-6:

$$3\pi\mu vx - q_{es} E_p' \sin 2\pi ft = ma \quad (7-12)$$

其中:  $a = \frac{dv}{dt} = v'$

a——颗粒在水平方向上的加速度; v——颗粒在水平方向上的运动速度; f——  
——交变电场频率。

$q_{es} E_p', m, \mu$ 均可通过计算得到,为便于表示令:

$$q_{es} E_p' / m = A, \quad 3\pi\mu x / m = B$$

则 7-6 式可以写成如下形式:

$$v' - Bv = -A \sin 2\pi ft \quad (7-13)$$

L 只与颗粒在水平方向受力有关, 如不考虑竖直方向的受力情况, 则

$$L = \int_0^T v dt \quad (7-14)$$

最后求得:

$$L = \frac{A}{B2\pi f} = \frac{3\varepsilon_0 \varepsilon_r E_p' E_p}{2\pi f (2 + \varepsilon_r) \mu} x \quad (7-15)$$

将 7-5, 7-10 代入到 7-6 中得到总的碰撞次数 N:

$$N = \frac{N_0^2 \varepsilon_r \varepsilon_0 E_p' E_p}{2\pi f S_0 \mu (\varepsilon_r + 2)} \int x f(x) dx \quad (7-16)$$

计算得到:

$$N = \frac{3N_0^2 \varepsilon_r \varepsilon_0 E_p' E_p \exp((\ln \sigma)^2 - 2 \ln a (\ln \sigma)^2)}{2\pi f S_0 \mu (\varepsilon_r + 2) \Phi(\ln x_{\max}) - \Phi(\ln x_{\min})} \quad (7-17)$$

其中  $\Phi(\ln x)$  是标准正态分布函数  $\Phi(\ln a - (\ln \sigma)^2, \ln \sigma)$ , 通过查标准正态表可以计算。式 7-12 中其它的值均可以查到, N 可求。

在本文实验中各个参数值如表 7-1 所示:

表 7-1 本文实验参数对照表

凝并反应器横截面积 $S_0, m^2$	0.01
反应器异极距, m	0.1
同一横截面内颗粒总数 $N_0$ , 个	1500
粉尘颗粒的相对介电常数 $\varepsilon_r$	6

空气的介电常数 $\epsilon_0$ , $\text{Nm}^2/\text{c}^2$	$8.854 \times 10^{-12}$
空气的动力粘度 $\mu$ , $\text{kg}/\text{ms}$	$1.8 \times 10^{-5}$
粉尘颗粒的几何标准偏差 $\sigma$	2.5
粉尘颗粒的数量中位径 $a$ , $\mu\text{m}$	1
粒径变化范围, $\mu\text{m}$	0.2-630

下面讨论两种情况下参数变化对 N 的影响:

(1) 当荷电电压  $V_p=2 \times 10^4\text{V}$ , 凝并电场(交变电场)频率  $f=50\text{Hz}$  时, 交变电场峰值电压变化与 N 的关系如下图所示:

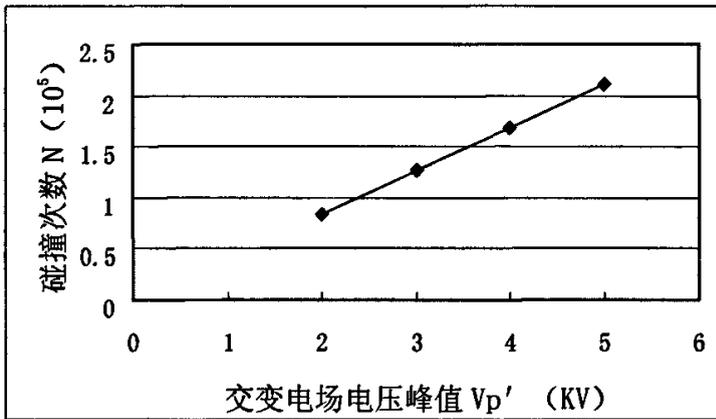


图 7-8  $V_p'$  -N 关系曲线

(2) 当  $V_p=2 \times 10^4\text{V}$ ,  $V_p' = 5 \times 10^3\text{V}$ , 频率变化与 N 的关系如下图所示。

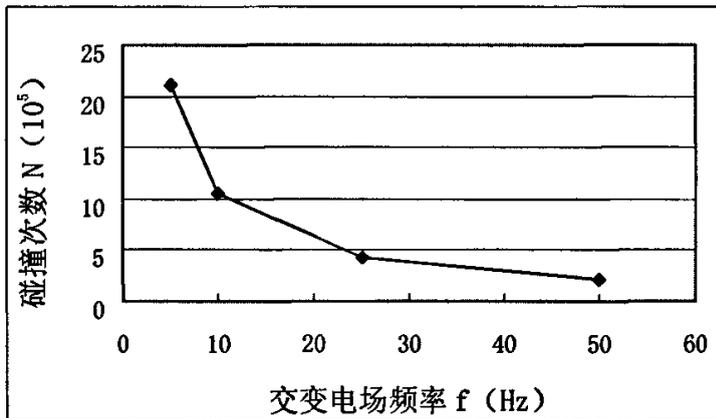


图 7-9  $f$ -N 关系曲线

从图中可以看出,碰撞次数是随着电压的增加而增加,但是频率增加,碰撞次数反而减少。由式 7-15 可知,当颗粒的粒径相同时,  $f$  和  $L$  成反比,所以频率增大,在一个周期内颗粒的碰撞次数会减少。

## 7.5 本章小结

本章通过对带电颗粒进入凝并电场后运动轨迹的模拟,得到颗粒在交变电场中的轨迹为正弦曲线,在直流电场为斜线;不同大小的颗粒在凝并电场中轨迹不同,粒径越大,在交变电场中振幅越大,在直流电场中的斜线倾角越大。通过理论推导得到带电颗粒在交变电场中的碰撞次数公式,分析了交变电场参数与单位周期内同一横截面内所有颗粒碰撞次数变化之间的关系;碰撞次数  $N$  与交变电场峰值电压  $V_p'$  成正比,与交变电场频率  $f$  成反比。

## 参考文献

- [1] 赵志斌, 吕晶, 脉冲放电粒子荷电机理的研究, 《东北电力技术》1999 (3)。
- [2] 向晓东, 陈旺生, 交变电场中电凝并收尘理论与实验研究, 《环境科学学报》, 2000 (3), 187-191。

## 第八章 全文总结

电凝并是脱除可吸入颗粒  $PM_{10}$  和微细颗粒物  $PM_{2.5}$  的主要途径, 由于目前国内大多数电厂都使用高压静电除尘器, 那么电凝并相对于其它的凝并方式可以更好地与现有的电除尘结合, 如果工艺成熟, 可以进行改造。通过本文实验结果可以看出用电凝并的方法可以使模拟烟气中粒径小于  $10\mu m$  的粉尘颗粒的数量上有不同程度的减少; 那么, 利用这种原理在常规静电除尘器或者布袋除尘器前加上一个电凝并的装置, 就可以提高常规除尘器对微细颗粒物的收集效率, 从而减少烟气中微细粉尘向大气中排放的质量。本文通过三种不同的荷电凝并方式, 脉冲电场荷电+直流电场凝并, 脉冲电场荷电+交流电场凝并, 含有直流基压的脉冲电场同时荷电和凝并, 对荷电电参数变化, 凝并电参数变化, 流量变化, 电极布置型式变化等参数对凝并效率的影响做了实验研究。

本文主要进行的工作和得出的结论如下:

(1) 采用高压负脉冲放电对粉尘颗粒进行荷电, 在无凝并电场参与的情况下, 得到颗粒自凝并的效率, 由于脉冲对小颗粒良好的荷电性,  $0.5-1.0\mu m$  粒径段的颗粒的凝并效率远远大于同工况下其它粒径颗粒; 不带电颗粒进入交变电场, 颗粒也发生自凝并, 但是对于  $0.5-1.0\mu m$  段的颗粒的凝并效果没有脉冲放电时好, 因此也说明脉冲放电对小颗粒有很好的荷电作用;

(2) 脉冲高压与直流高压一起使用对颗粒进行荷电凝并后, 颗粒的凝并效率大大提高。放电电压波形不同, 电压变化对  $\eta$  的影响方式也不同, 当正脉冲时  $V$  增加,  $\eta$  也增加; 其它波形时变化趋势相反;

(3) 脉冲重复频率对不同粒径大小的颗粒凝并的影响也不相同。高频对小颗粒 (粒径小于  $0.7\mu m$ ) 的凝并有利, 低频对大颗粒的凝并有利;

(4) 在对各种脉冲放电波形的实验研究中, 发现不论如何布置电极, 也不论使用何种的凝并方式, 正负脉冲和正脉冲放电对颗粒荷电时的凝并效果较好, 而负脉冲放电时最差; 这可能是因为不同波形放电时, 颗粒的荷电机理不同, 使得颗粒带上电荷的极性及其带上正负电荷的数量不同, 在这方面还需要进一步的理论研究来证明;

(5) 低压高频交变电场对颗粒有一定的凝并效果, 但是与直流凝并相比效

果要差一些;

(6) 在单位时间内进入反应器内粉尘浓度不变的情况下, 空气流量越大, 对应的荷电和凝并时间越少, 凝并效果越差;

(7) 通过对不同的荷电和凝并电极的比较, 可得到如下结论: 弹簧电极和平板电极放电都比较均匀, 在整个反应器空间内对所列出的  $0.2-3.8\ \mu\text{m}$  段的颗粒的凝并作用均好一些。

在理论方面, 本文通过对带电颗粒进入凝并电场后运动轨迹的模拟, 得到颗粒在交变电场中的轨迹为正弦曲线, 在直流电场为斜线; 不同粒径大小的颗粒在凝并电场中轨迹不同, 粒径越大, 在交变电场中振幅越大, 在直流电场中的斜线倾角(与竖直方向所成锐角角度)越大。通过理论推导得到带电颗粒在交变电场中的碰撞次数公式, 分析了交变电场参数与单位周期内同一横截面上所有颗粒碰撞次数变化之间的关系; 碰撞次数与交变电场峰值电压成正比, 与交变电场频率成反比。

在实验过程中还发现了一些问题, 例如除尘与荷电凝并的区分, 物料平衡等问题, 二者都是由于粉尘沉积造成的。在颗粒荷电和凝并的过程中, 由于所施加的电压均为高压, 所以当模拟烟气流经反应器时, 会有一部分粉尘的颗粒粘附在放电电极和接地极板上, 在实际的除尘过程中, 荷电, 凝并和除尘这三个过程是同时进行的, 不能完开。而且由于灰在电极上的粘附使反应器入口处和出口处的物料量不同, 这样会造成一些计算结果上的偏差。

以上是本文通过实验研究得出的一些主要结论, 针对实验结果和实验中所遇到的问题, 建议在以下几个方面进行后继研究:

(1) 同时考虑凝并和除尘, 将电凝并装置与除尘装置结合使用, 设计出新型的凝并型除尘器模型。并且可以通过改变放电电极型式来优化凝并除尘效果;

(2) 在本实验进行过程当中, 在高压正脉冲和正负脉冲放电时, 在反应器内会产生臭氧, 因此可以将等离子脱除  $\text{SO}_x$ 、 $\text{NO}_x$  与凝并除尘结合起来, 设计出新型的多效脱除反应器;

(3) 在理论方面, 针对不同放电波形, 不同重复频率, 对高压脉冲荷电机理进行研究, 与实验相结合, 以更深一步了解荷电凝并过程的原理。

## 附录

## 不同工况下对应的脉冲电压峰值

测量所用的示波器为 LeCroy Waverunner LT264, 350MHz, 1Gs/s, DSO

## 一、正脉冲输出

直流高压 V (kV)	脉冲峰值 $V_p$ (kV)		
	一根电极放电	两根电极放电	三根电极放电
1	$1.91 \times 5$	$1.8 \times 5$	$1.92 \times 5$
2	$3.63 \times 5$	$3.6 \times 5$	$3.89 \times 5$
3	$6.25 \times 5$	$5.3 \times 5$	$6.10 \times 5$
4	$8.97 \times 5$	$6.9 \times 5$	$7.04 \times 5$
5	$10.79 \times 5$	$8.7 \times 5$	$8.85 \times 5$
6	$14.35 \times 5$	$10.36 \times 5$	$12.66 \times 5$
7	电极出现击穿放电	$12.18 \times 5$	电极出现击穿放电

## 二、负脉冲输出

直流高压 V (kV)	脉冲峰值 $V_p$ (kV)		
	一根电极放电	两根电极放电	三根电极放电
1	$-1.989 \times 5$	$-1.944 \times 5$	$-1.88 \times 5$
2	$-4.13 \times 5$	$-4.18 \times 5$	$-4.03 \times 5$
3	$-6.16 \times 5$	$-6.42 \times 5$	$-6.6 \times 5$
4	$-8.36 \times 5$	$-9.3 \times 5$	$-8.72 \times 5$
5	$-10.68 \times 5$	$-10.34 \times 5$	$-11.58 \times 5$
5.5	$-12.69 \times 5$	$-12.16 \times 5$	$-13.01 \times 5$

## 三、正负脉冲输出

直流高压 V (kV)	脉冲峰值 $V_p$ (kV)		
	一根电极放电	两根电极放电	三根电极放电
1	$(1.09 \sim -0.875) \times 5$	$(1.08 \sim -0.905) \times 5$	$(1.0 \sim -0.838) \times 5$
2	$(2.14 \sim -1.89) \times 5$	$(2.16 \sim -2.02) \times 5$	$(2.0 \sim -1.84) \times 5$
3	$(3.67 \sim -3.17) \times 5$	$(3.73 \sim -3.34) \times 5$	$(3.82 \sim -3.46) \times 5$
4	$(4.66 \sim -4.03) \times 5$	$(5.04 \sim -4.4) \times 5$	$(3.85 \sim -3.96) \times 5$
5	$(4.79 \sim -4.46) \times 5$	$(6.6 \sim -5.65) \times 5$	$(7.10 \sim -6.4) \times 5$
6	$(8.71 \sim -6.76) \times 5$	$(8.84 \sim -7.56) \times 5$	电极放电

## 四、负正脉冲输出

直流高压 V (kV)	脉冲峰值 $V_p$ (kV)		
	一根电极放电	两根电极放电	三根电极放电
1	$(-1.16 \sim 0.96) \times 5$	$(-0.95 \sim 0.89) \times 5$	$(-1.08 \sim 1.05) \times 5$
2	$(-1.96 \sim 1.86) \times 5$	$(-2.17 \sim 2.11) \times 5$	$(-2.28 \sim 2.22) \times 5$
3	$(-3.45 \sim 3.11) \times 5$	$(-3.49 \sim 3.36) \times 5$	$(-3.44 \sim 3.41) \times 5$
4	$(-5.03 \sim 4.54) \times 5$	$(-4.05 \sim 4.26) \times 5$	$(-4.92 \sim 4.83) \times 5$
5	$(-6.03 \sim 5.16) \times 5$	$(-6.55 \sim 6.26) \times 5$	$(-6.42 \sim 6.01) \times 5$
6	$(-7.78 \sim 6.79) \times 5$	$(-8.06 \sim 7.56) \times 5$	$(-7.74 \sim 7.26) \times 5$

# 致 谢

本文得以完成首先感谢岑可法院士和骆仲泱教授，骆仲泱教授对整个试验进程和试验台的设计及改造给予了许多关键性的建议和指导。感谢循环流化床课题组的方梦祥教授、王勤辉教授、程乐鸣教授、施正伦研究员、高翔教授、周劲松教授、余春江副教授、王树荣副教授对本论文研究工作的帮助，在两年多的学习和生活上给予了许多无私的关心和帮助，在此向几位老师表示衷心的感谢。

感谢徐鸿师姐、王鹏师兄、徐飞同学、候全辉同学在实验中及论文写作过程中给我的帮助，在整个实验的过程中，大家朝夕相处，一起合作，解决实验中遇到的各种问题，形成了一个具有凝聚力的小集体。特别感谢陈勇强师傅在建造“可吸入颗粒电凝并脱除实验台”中所付出的辛勤劳动。

感谢马孝琴师姐、邢守祥师兄、焦有宙师兄、何红玉师兄、李彦师姐、姚燕和王君同学在生活上和学习上给予我的帮助和关怀，感谢他们伴我度过了我的研究生阶段，这里尤其感谢王君同学带给我们整个办公室的欢笑。

感谢我的室友谢琳、杨慧敏、马吉恩，我的同学徐琳、孙小丹、焦波陪伴的日子，感谢他们给我的快乐时光和美好回忆。

感谢循环流化床组的全体同学。

衷心感谢工程热物理 03 硕研究生班的全体同学，在这个团结奋进、温馨和睦的大家庭中，使我充分感受到集体的温暖。

最后，我还要感谢我的家人，感谢您们对我永远不变的默默的支持。

希望所有帮助过我的人都能幸福快乐！

赵 爽

2006 年 1 月于热能所 C203