

# 荷电水雾团聚亚微米颗粒物试验研究

刘鹤欣 杨富鑫 李正鸿 谭厚章 杜勇乐 冯 鹏

(西安交通大学 热流科学与工程教育部重点实验室 陕西 西安 710049)

**摘要:** 荷电水雾团聚亚微米颗粒物是多场协同脱除微细颗粒物的一种方式,众多学者针对水雾荷电脱除颗粒物特性进行了大量理论和试验研究,但鲜见对超声波雾化液滴荷电团聚微细颗粒物的相关研究。设计了双层阻挡介质放电电极结构,在有效阻断传统电晕放电隙内放电电弧发展的同时,通过产生均匀稳定的高密度低温等离子体对雾化液滴进行荷电,并搭建荷电水雾团聚亚微米颗粒物试验平台对电极稳定特性和微细颗粒物的团聚特性进行研究,主要针对电极伏安特性、负载电压对团聚效率的影响以及水雾量对团聚效率的影响3方面进行比较与表征。结果表明,双层阻挡介质结构有利于改善荷电电极间隙的均匀性,雾化液滴的存在有利于促进气隙空间放电。荷电电极的起晕电压与不稳定运行电压随雾化量的增加均表现为减小;当通入水雾流量为102.9 mg/min时,稳定运行的电压区间为17.2~41.1 kV。荷电雾化液滴对微细颗粒物团聚具有明显效果,其中30~70 nm颗粒在45.0 kV作用下最高达到40%团聚效率。粒径分布曲线随雾化量的增加整体向粒径增大方向移动,也表明雾化量的增加有利于荷电雾化液滴对微细颗粒物的脱除;相同电压下,颗粒团聚效果随水雾量的增加明显提升。

**关键词:** 超声波雾化荷电; 介质阻挡放电; 团聚效率; 亚微米颗粒; 伏安特性

中图分类号: TK121

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2020)05-0119-08

## Experimental investigation on submicron particle agglomeration through atomized charged droplets

LIU Hexin, YANG Fuxin, LI Zhenghong, TAN Houzhang, DU Yongle, FENG Peng

(Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The submicron particle agglomeration by atomized charged droplets is an effective method of multi-field synergistic agglomeration of fine particles. Many scholars have carried out a lot of theoretical and experimental studies on the characteristic of fine particle removal through charged droplets. However, few studies have been conducted on the study of fine particle agglomeration of atomized charged droplets with particle size diameter of about 5  $\mu\text{m}$ . In this paper, a double-layer dielectric barrier discharge electrode was designed to effectively block the development of the discharge arc in the traditional corona discharge gap and charge the atomized droplets by producing a uniform and stable high-density low-temperature plasma. Meanwhile, an experimental platform of submicron particle agglomeration through the atomized charged droplets was built for the experimental study of electrode stability and agglomeration characteristics of fine particles. Three aspects of electrode volt-ampere characteristics, the influence of load voltage on the agglomeration efficiency and the influence of water mist quantity on the agglomeration efficiency were compared and characterized. The results show that the structure of the double-layer barrier medium is beneficial to improve the uniformity of the gap between charged electrodes, and the existence of atomized droplets is beneficial to promote the discharge in air gap space. Both the initiation voltage and unstable operating voltage of charged electrode decrease with the increase of the water mist flow. When the water mist flow is 102.9 mg/min, the voltage range for stable operation is 17.2~41.1 kV. The atomized charged droplets have obvious effect on the agglomeration of fine particles. The agglomeration efficiency of 30~70 nm particles can reach up to 40% under the action of 45.0 kV. With the increase of atomization amount, the particle size distribu-

收稿日期: 2020-08-06; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.IF20080617

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0601504)

作者简介: 刘鹤欣(1994—),男,云南曲靖人,博士研究生,从事微细颗粒物凝聚机理与应用研究。E-mail: liuhxlife@163.com。通讯作者: 谭厚章,教授,从事煤的高效清洁利用基础与应用研究。E-mail: tanhz@mail.xjtu.edu.cn

引用格式: 刘鹤欣,杨富鑫,李正鸿,等.荷电水雾团聚亚微米颗粒物试验研究[J].洁净煤技术,2020,26(5):119-126.

LIU Hexin, YANG Fuxin, LI Zhenghong, et al. Experimental investigation on submicron particle agglomeration through atomized charged droplets [J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(5): 119-126.



移动阅读

tion curve moves towards the increase of particle size as a whole, which also indicates that the increase of atomization amount is conducive to the removal of fine particles by charged atomization droplets. Under the condition of the same voltage, the particle agglomeration effect is significantly improved with the increase of the water mist flow.

**Key words:** ultrasonic atomizing charge; dielectric barrier discharge; agglomeration efficiency; submicron particles; Volt-ampere characteristic

## 0 引言

荷电水雾除尘技术是结合湿式相变除尘和静电除尘研发的新式控制技术,与传统除尘器不同,荷电水雾团聚除尘技术涉及多种颗粒物作用机制,主要包括气溶胶荷电、带电粒子与颗粒的碰撞团聚、惯性捕集及扩散拦截机制等。荷电水雾除尘主要利用液滴荷电后与细颗粒物之间的静电引力(库仑力)进行捕集,进而削弱细颗粒物自身对惯性的依赖并降低颗粒气流随动性,更有助于脱除细颗粒物。

国外研究方面,Lear等<sup>[1]</sup>将静电喷雾用于 $1\,700\text{ m}^3/\text{h}$ 废气处理,结果表明,荷电水雾对 $0.1\sim 1\text{ }\mu\text{m}$ 亚微米颗粒脱除效率最高达70%,比非荷电喷雾的30%提高了50个百分点,同时表明较高的脱除效率受限于合理的电极布置和烟气流速控制。Metzler等<sup>[2]</sup>研究了液滴荷电除尘及后续处理设备联用脱除效果,将静电除尘器与旋风分离除尘器相串联,结果表明,系统对亚微米颗粒的捕集脱除效率为67%,而非荷电喷雾工况仅为32%,与Lear等试验结果较符合,证明了将荷电水雾除尘置于传统除尘器前段作为预处理设备,是一项可发展的新型技术。D'Addio等<sup>[3]</sup>研究了自由落体的带电液滴对微细颗粒的捕获情况,结果表明,与不带电的液滴相比,带电液滴对 $100\sim 450\text{ nm}$ 微细颗粒具有明显捕获作用。Carotenutoa等<sup>[4]</sup>建立了荷电喷雾除尘效率的数学模型,该模型指出接触时间、喷雾量、液气相对速度、液滴尺寸以及荷电量是影响除尘效率的主要参数。Balachandran等<sup>[5-6]</sup>在密闭空间内利用旋流荷电喷雾对香烟烟雾进行了有关试验,结果表明,香烟烟雾颗粒物粒径集中分布在细颗粒物范围,粒径在 $0.5\sim 2\text{ }\mu\text{m}$ ,通过对比液滴荷电-颗粒荷电、液滴荷电-颗粒非荷电、液滴非荷电-颗粒非荷电的工况,发现液滴-颗粒均荷电的脱除效率最高,是液滴荷电时脱除效率的2倍、两者均不荷电时脱除效率的4倍,但试验水耗量较大,约为 $0.2\text{ L}/\text{m}^3$ 。Law等<sup>[7]</sup>以 $3\text{ mm}$ 粒径的带电液滴为对象,对径向电场带电雾滴蒸发过程电量与质量通量变化,结果表明,液滴表面所带电荷并不会影响到其表面水汽蒸发过程,同时水汽蒸发过程也不会驱散液滴表面的电荷。这意味着带电较弱或不带电的颗粒与带电液滴经过

黏附作用吸附后,液滴上的电荷经过蒸发作用会转移至颗粒上,进一步促进颗粒-颗粒、颗粒-液滴间的吸附作用。Polat等<sup>[8]</sup>研究了在水源中添加不同表面活性剂后水雾荷电除尘效率的变化,结果表明,离子类表面活性剂能促进雾滴荷电,进而提高雾滴除尘效率。

国内研究方面,吴琨等<sup>[9-10]</sup>利用荷电水雾与振弦栅相结合实现颗粒物脱除目的,荷电水雾对细颗粒物进行团聚后,经过振弦栅的声波和过滤作用进行颗粒物捕集,发现液滴荷质比越大,除尘效率越高,多场协同下设计为雾滴粒径在 $50\sim 150\text{ }\mu\text{m}$ ,振动格栅 $10\sim 16$ 层,过滤流速在 $16\text{ m/s}$ 时脱除效率最高,达99.5%。陈卓楷等<sup>[11]</sup>分析了超声波雾滴在除尘试验中的特性,发现雾滴粒径较小的超声波雾滴相比粒径较大的液滴脱除效率更高。马素平等<sup>[12]</sup>以煤矿井下浮沉颗粒为研究对象,通过相应的数学模型进行模拟,结果表明,水雾粒径越小,降尘效率越高,且不同粒径颗粒物对应存在一个最佳水雾粒度。左子文<sup>[13]</sup>针对荷电液滴捕集颗粒物进行可视化研究,结果表明,颗粒与荷电液滴撞击时受撞击角影响存在一定反弹概率,同时荷电液滴对颗粒微团的捕集效率较低。

结合传统除尘器,荷电液滴除尘有模块式发展潜力,有利于缩小设备面积并缩减环保经济投入。另外,国内外研究者还将荷电水雾除尘用于移动源-汽车尾气处理方面,证明了荷电喷雾、低温等离子体及选择性催化还原(SCR)耦合系统对尾气颗粒物、气态污染物( $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$ 、CO等)及挥发性有机物(VOCs)的有效控制作用<sup>[14-15]</sup>。综上所述,超声波雾化产生的小粒径雾滴适用于微细颗粒物的团聚过程,在传统除尘器前作为颗粒物团聚设备模块,能高效脱除烟尘中的细颗粒物。但目前对于液滴荷电除尘研究多基于大粒径雾滴和大粒径颗粒,无法针对超声波小粒径液滴及细颗粒物的团聚机理做出研究,因此,对细颗粒物及超细荷电液滴对其团聚的作用机制需要进一步深入研究。

本文搭建荷电水雾团聚颗粒物试验平台,采用双层介质阻挡电极进行水雾荷电。基于高斯分布规律建立颗粒物团聚评价指标,评估水雾荷电电极的电场伏安特性,研究了不同雾化流量以及不同加载

电压对颗粒物团聚的影响, 以期为荷电水雾团聚颗粒物的实验室研究提供参考。

## 1 试 验

### 1.1 试验测试方案

试验系统示意如图 1 所示, 主要由荷电水雾发生系统以及微细颗粒通风流道 2 部分组成, 其中空气压缩机、气溶胶发生器、扩散干燥器以及离心风机用于产生含微细颗粒物主流空气, 而雾化荷电段由双层介质阻挡电极荷电系统产生荷电水雾。双层介质阻挡电极荷电系统如图 2(a) 所示。接地电极选用不锈钢筛网, 介质材料为石英玻璃。电气系统原理如图 2(b) 所示, 电源为南京苏曼研制的 CTP-2000KP 调制脉冲电源, 输出频率调节范围在 5~20 kHz, 最大输出功率 500 W。反应器加载高压通过内置分压电容 C1、C2 测定, 分压比例 1 000:1, 放电电流通过测量取样电阻  $R_0$  得到, 电阻值为 50  $\Omega$ , 接入示波器监测电流瞬时值。

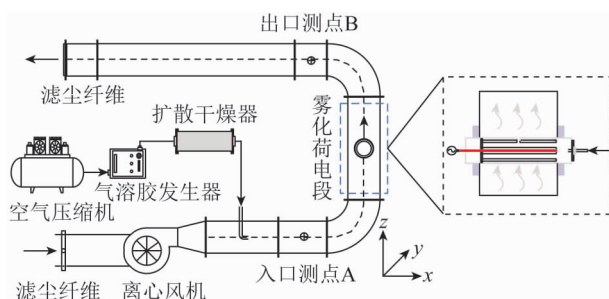


图 1 荷电水雾团聚颗粒物试验系统示意

Fig.1 Test system schematic diagram of charged water mist agglomerated particles

对于双介质阻挡结构, 计算其同轴圆柱电极不均匀系数  $f$  为

$$f = \frac{d}{r} \ln \frac{r+d}{r} = 1.82 < 2, \quad (1)$$

其中  $r$  为内电极半径, m;  $d$  为两电极之间距离, m。结果表明此种介质阻挡电晕放电为较均匀场, 此时, 击穿电压与电晕起始电压差别较小, 更利于实现均匀放电。

### 1.2 质量保证及质量控制

工况稳定方面, 采用热线风速仪实时监测流道风速, 使其稳定在设定工况下; 水雾量控制方面, 调整超声波雾化器水量及流道阻力至与标定时一致, 保证喷入水雾量稳定值在标定曲线值; 加载电压控制阶段, 通过调压器、电流调制器及示波器监测将反应器输入电流稳定在某一稳定值, 并通过示波器直接导出数据, 避免偶然误差。

试验系统误差控制方面, 单次试验时间控制在

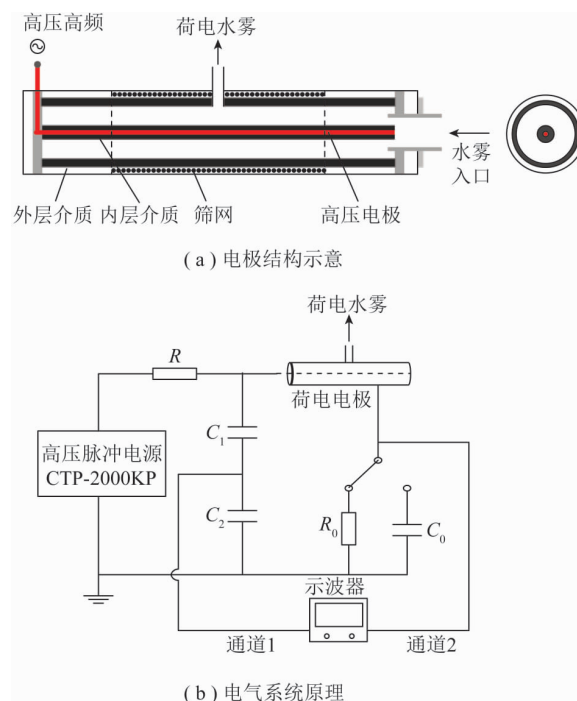


图 2 双介质阻挡荷电系统示意

Fig.2 Schematic diagram of double-layer dielectric barrier charging system

10 min 内, 避免阻挡介质表面产生大量的水雾凝结。每次试验完成后需将反应器内积水吹散, 并在室温环境下晾干待用。

在颗粒物测量方面, 气溶胶发生器出口接真空分子干燥筛, 排除湿度对结果的影响。取样测试颗粒粒径时, 全程使用导电硅胶管, 避免取样管内壁静电干燥。为保证试验数据可靠性, 每组工况重复 3 次试验, 取平均值进行分析。

## 2 颗粒物团聚评价指标

荷电水雾的喷入促使颗粒物团聚长大, 表现为颗粒物浓度、粒径分布、均值粒径等变化。为衡量颗粒物团聚效果, 定义颗粒物团聚评判指标如下:

### 1) 颗粒物团聚前后浓度变化

流道测点 A 与 B 处的颗粒物浓度变化直接反映了荷电水雾的喷入前后颗粒数浓度的变化, 直观反映团聚效果。扫描电迁移率粒径谱仪将 10~1 000 nm 颗粒分为 167 个通道, 以此测得各粒径通道的颗粒物数浓度。为显示不同粒径段颗粒浓度的变化, 颗粒浓度分布以对数坐标进行处理分析。

### 2) 分级团聚效率

定义分级团聚效率为各粒径通道颗粒变化量与入口段颗粒初始浓度的比值, 表示为

$$\eta_n = \frac{\Delta N}{N_{n0}} = \frac{N_{n1} - N_{n0}}{N_{n0}} \times 100\%, \quad (2)$$

其中,  $\eta_n$  为  $n$  粒径通道颗粒团聚效率, %;  $N_{n0}$  为  $n$  粒径通道入口颗粒数量浓度, 个/cm<sup>3</sup>;  $N_{n1}$  为  $n$  粒径通道出口颗粒数量浓度, 个/cm<sup>3</sup>。  $\eta_n > 0$  表示颗粒团聚长大使得本粒径颗粒浓度减少;  $\eta_n < 0$  表示颗粒团聚至此粒径, 使得本粒径颗粒浓度增多。

### 3) 双 $\sigma$ 粒径区间粒径分布特征

亚微米颗粒物整体粒径分布多符合类高斯分布, 为更好地衡量主粒径区间的颗粒团聚效果, 仿照高斯分布的双  $\sigma$  中心分布, 定义入口颗粒分布累计 15.87%~84.13% 为主要粒径段, 占颗粒总数量的 68.26%, 记为  $D_{2\sigma}$  (图 3(a))。  $D_{mode}$  为颗粒曲线峰值所对应的粒径,  $\mu\text{m}$ ;  $D_{mean}$  为颗粒曲线全粒径段的均值粒径,  $\mu\text{m}$ 。主粒径区间效率  $\eta_{2\sigma}$  定义为 68.26% 区间的粒径分布颗粒变化量与初始浓度的比值, 即主要粒径段分级团聚效率(图 3(b))。

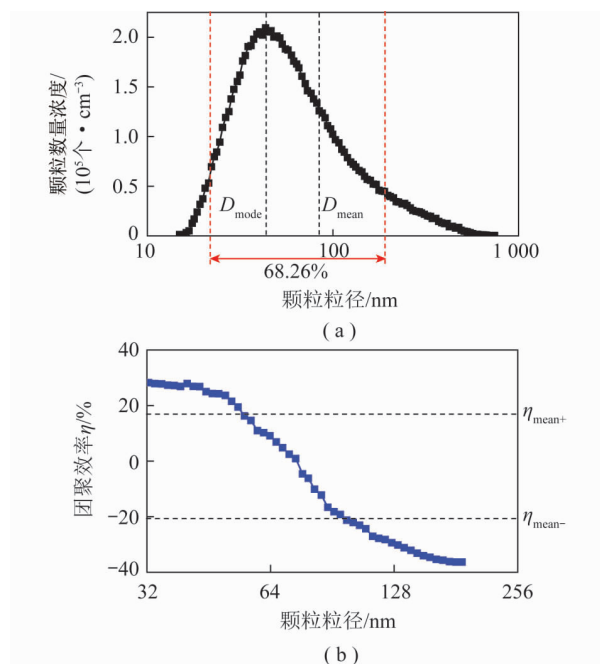


图3 双  $\sigma$  粒径区间及团聚效率

Fig.3 Double  $\sigma$  particle size interval and agglomeration efficiency

为了量化研究团聚效率, 定义主粒径区间的均值团聚效率为

$$\eta_{mean} = \frac{\sum_{-\sigma}^{\sigma} D_i \eta_i}{\sum_{-\sigma}^{\sigma} D_i}, \quad (3)$$

其中,  $\eta_{mean}$  为  $2\sigma$  粒径通道颗粒均值团聚效率, %;  $D_i$  为不同粒径值,  $\mu\text{m}$ ;  $\eta_i$  为  $i$  粒径颗粒团聚效率, %。相应地, 小颗粒的团聚效率平均后得到  $\eta_{mean+}$ , 大颗粒的相对变化率平均后得到  $\eta_{mean-}$ 。

### 4) 均值粒径增长率

对于多分散的亚微米颗粒而言, 均值粒径代表了总体颗粒粒径有效值大小, 均值粒径的变化率更

直观反映了整体团聚长大情况, 定义为

$$D_{mean} = \frac{\sum_{-\sigma}^{\sigma} k D_p}{N}, \quad (4)$$

$$\eta_D = \frac{D_{m1} - D_{m0}}{D_{m0}} \times 100\%, \quad (5)$$

式中  $k$  为分段粒径颗粒数;  $D_p$  为分段颗粒粒径,  $\mu\text{m}$ ;  $N$  为全粒径段颗粒数;  $\eta_D$  为均值粒径相对变化率, %;  $D_{m1}$  为出口均值粒径,  $\mu\text{m}$ ;  $D_{m0}$  为进口均值粒径,  $\mu\text{m}$ 。

## 3 结果分析与讨论

### 3.1 不同水雾流量下电场伏安特性

电场的伏安特性曲线是指随着加载电压的逐步升高, 放电反应器中电流与加载电压之间的关系。

双层介质阻挡试验中, 电场的伏安特性曲线代表了电极结构的放电特性, 是衡量其均匀特性与稳定运行特性的重要参数。反应器回路脉冲电流积分如图 4 所示, 因为高频脉冲电源的强干扰(正弦波形)需去除干扰后进行有效积分, 得到有效脉冲电荷量, 这里以单位周期  $T$  内的脉冲电流值作为反应器放电电流的衡量指标, 得到伏安特性结果如图 5

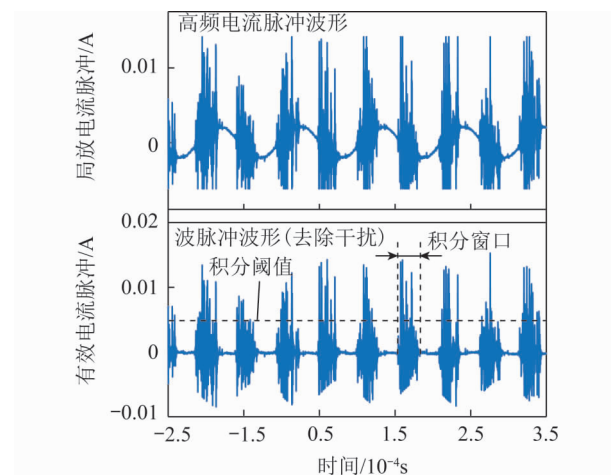


图4 电流脉冲积分

Fig.4 Current pulse integration

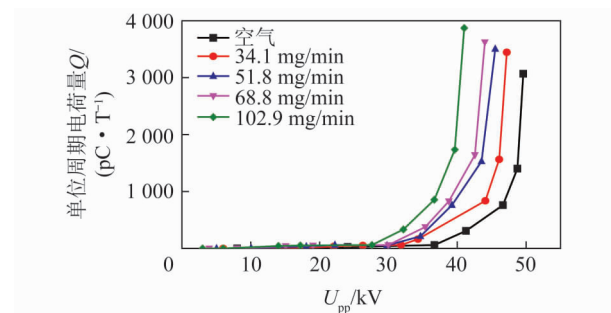


图5 不同水雾量时单位周期脉冲电荷量对比

Fig.5 Comparison of pulse charge per unit period under different water mist



所示。其中,电压仍用峰峰值  $U_{pp}$  表示,通过示波器直接导出,电流通过内置  $50\ \Omega$  测量电阻得到。

由图 5 可知,双层介质阻挡结构的放电特性符合均匀电场伏安特征:起始段区域,随着电压升高,气隙中开始产生基本放电离子,带电质点速度逐渐升高,气隙间放电量近乎呈线性比例增加;饱和段区域,电流出现急剧跃升,此阶段间隙内产生大量带电质点并全部参与导电,放电产生大量电子雪崩,并逐渐进入流注阶段;自持放电段区域,电压升高至临界值后,放电气隙出现大量微型脉冲,放电量再次出现跃升,反应器产生强烈噪音及发光现象,此时气隙内产生大量流注放电,并处于良好导电状态。放电气隙中通入水雾后更利于产生放电,且放电强度随着水雾量的增加而增强,相同电压下,水雾量越高,产生电流越大,回路产生放电量也越多。记有效起晕电压为  $U_{pd}$ ,不稳定运行电压为  $U_{sd}$ ,得到不同水雾量时的起晕及不稳定运行电压见表 1,其中,不稳定电压是指随电压升高示波器曲线开始波动,即电极开始不稳定运行时的电压值。

表 1 不同水雾量下的电极放电电压

Table 1 Electrode discharge voltage under different amounts of water mist

| 水雾量/( $\text{mg} \cdot \text{min}^{-1}$ ) | $U_{pd}/\text{kV}$ | $U_{sd}/\text{kV}$ |
|---|--------------------|--------------------|
| 0   | 30.0               | 49.6               |
| 34.1                                      | 26.2               | 47.2               |
| 51.8                                      | 22.2               | 45.5               |
| 68.8                                      | 19.0               | 44.1               |
| 102.9                                     | 17.2               | 41.1               |

### 3.2 加载电压对颗粒物团聚规律的影响

将加载电压控制为单一变量,其他主要变量按照工况设计分别定为:流道风速为  $2.5\ \text{m/s}$ ,水雾流量为  $100\ \text{mg/min}$ 。气溶胶发生器调整参数为:进口压力为  $1.38 \times 10^5\ \text{Pa}$ ,喷口数量为 6,稀释气流量  $25\ \text{L/min}$ (以下均同)。利用 SMPS 分析不同电压下进出口颗粒物粒径分布如图 6 所示。

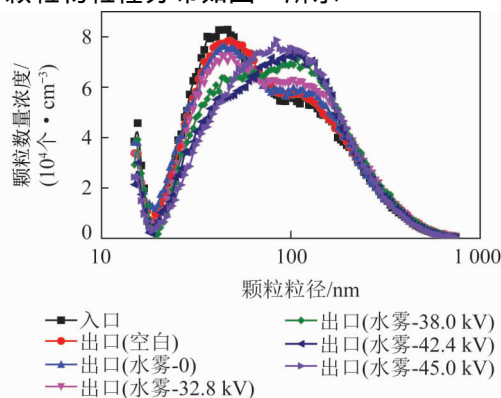


图 6 100 mg/min 水雾量时颗粒粒径分布

Fig.6 Particle size distribution at 100 mg/min water mist

由图 6 可知,初始亚微米颗粒分布存在 2 处峰值,分别为  $12 \sim 15\ \text{nm}$  的极小模态颗粒和  $40 \sim 50\ \text{nm}$  的中间模态,整体呈类高斯分布;试验空白对照组为单纯流道空气动力流动,可以看出,流道自身存在的流动不均匀性及荷电电极的扰流对颗粒物分布影响较小,颗粒总数量略有下降,但粒径分布不变;单纯喷入水雾及喷入荷电水雾后颗粒粒径变化明显,单纯喷入水雾后,颗粒呈现一定的团聚效果,表现为中间模态颗粒减少, $100\ \text{nm}$  以上颗粒略有增多,而喷入荷电水雾后颗粒粒径向右偏移量明显增大,平均粒径增幅明显,且粒径增大量幅度与加载电压量呈正相关关系,表明水雾荷电后对亚微米颗粒物的团聚长大有重要促进作用。

为定量研究颗粒团聚效果,取 68% 数量的主要粒径区间做团聚效率对比,结果如图 7 所示。可知粒径  $30 \sim 70\ \text{nm}$  的颗粒通过荷电水雾团聚作用后数量减少,即团聚长大为粒径更大的颗粒,表现为团聚效率大于 0,这里定义为小颗粒的效率,而粒径  $70 \sim 180\ \text{nm}$  的颗粒经团聚作用后数量增多,表现为团聚效率小于 0,定义为大颗粒的相对变化率。随着加载电压的升高,颗粒物团聚效率逐渐增强。从小颗粒的峰值团聚效率来看, $0 \sim 45.0\ \text{kV}$  五组工况下颗粒团聚效率分别在 5%、10%、25%、35% 和 40% 左右,表明荷电水雾促进颗粒团聚效果中,静电捕集占主导作用。

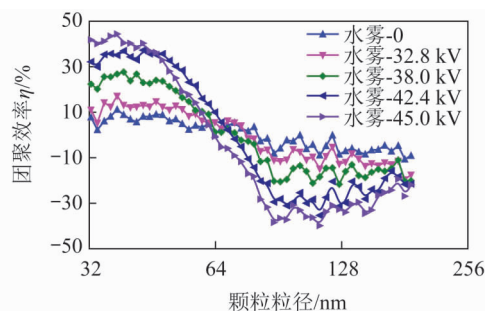


图 7 100 mg/min 水雾量时颗粒团聚效率

Fig.7 Particle agglomeration efficiency at 100 mg/min water mist

对不同粒径颗粒团聚效率分别做加权平均得到均值效率,结果如图 8 所示,其中,灰色区域代表未起晕阶段。可知单独喷入水雾时小颗粒的团聚效率在 4.3%,大颗粒的相对变化率在  $-8.0\%$ ,而随荷电电压升高,4 种不同电压下小颗粒的团聚效率依次升高至 9.3%、15.8%、22.3% 和 24.3%,大颗粒的相对变化率分别升高至  $-12.8\%$ 、 $-22.9\%$ 、 $-25.8\%$  和  $-29.0\%$ 。值得注意的是,在荷电水雾的作用下,小颗粒的团聚与大颗粒的破碎是一个动态相互转化的过程,在 68% 的主要作用区间表现为团聚作用主

导,而在极小粒径和极大粒径范围会保持动态平衡,表现出颗粒分布无明显差异,但 $0.1\sim 1\ \mu\text{m}$ 总颗粒数经团聚后浓度减少 $6\%\sim 13\%$ 。

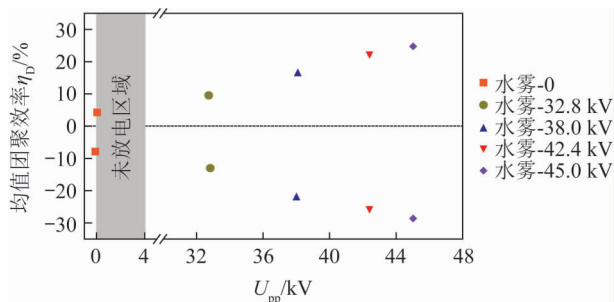
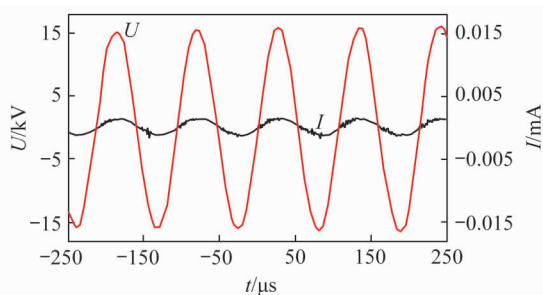


图8 100 mg/min 水雾量颗粒均值团聚效率

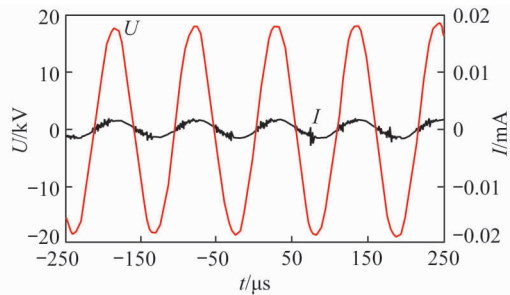
Fig.8 Average agglomeration efficiency of particles at 100 mg/min water mist

从机理上分析,荷电电压升高意味着水雾荷电量增大,颗粒间静电捕集作用增强,表现为团聚效率的升高。为进一步分析荷电反应器内部带电离子的产生,利用示波器监测得到不同电压下的电压电流波形如图9所示( $U$ 为加载电压, $I$ 为放电电流, $I_{\text{rms}}$ 为电压有效值, $I_{\text{rms}}$ 为电流有效值)。可知加载电压

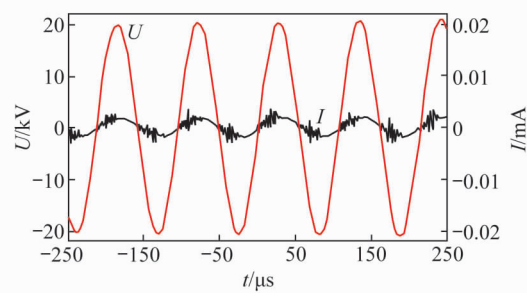
32.8 kV时,开始出现明显放电脉冲,随电压进一步升高,脉冲电流随之增强。由图9(d)可知,双层介质阻挡电极无极性效应,脉冲电流近似对称地分布于电压的正负半周期上升沿内,表现为多组微放细丝脉冲形式,当电压加载至自持放电电压后,半周期放电持续时间约 $25\ \mu\text{s}$ ,符合管-管阻挡介质结构的放电规律。研究表明<sup>[16]</sup>,含有电晕线电极结构的放电模式与双层阻挡介质结构放电有很大区别,线-管介质阻挡电晕电极中的线电极曲率较大,起晕时极易产生强电场而发生预电离作用,尤其在大放电间隙的不均匀结构下,预电离机制能为空间放电细丝的发展提供二次电子,是电场起晕的关键,但极易表现出极性效应;而在同等条件双介质阻挡电极则起晕更困难,对于较均匀的电场,当电极附近电离系数达到一定数值时,会形成初始电子崩,并迅速发展成放电流注,由于阻挡介质分别阻断高压端与低压端,加载电压后空间电荷迅速在介质表面集聚,介质内部形成削弱外加电场的附加电场,当气隙中电场强度低于击穿电压时,放电中断。



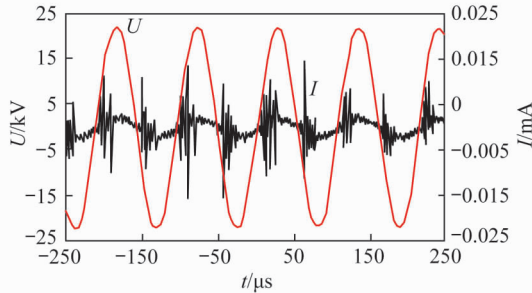
(a)  $U_{\text{rms}}=32.8\ \text{kV}$ ,  $I_{\text{rms}}=1.03\ \text{A}$



(b)  $U_{\text{rms}}=38.0\ \text{kV}$ ,  $I_{\text{rms}}=1.21\ \text{A}$



(c)  $U_{\text{rms}}=42.4\ \text{kV}$ ,  $I_{\text{rms}}=1.40\ \text{A}$



(d)  $U_{\text{rms}}=45.0\ \text{kV}$ ,  $I_{\text{rms}}=1.68\ \text{A}$

图9 不同加载电压下的电压电流波形

Fig.9 Voltage and current waveforms under different loading voltage

### 3.3 水雾量对颗粒物团聚规律的影响

作为电荷迁移及静电捕集的重要媒介,水雾量是决定颗粒团聚效率的关键因素之一。此部分以水雾量为研究变量,流道风速为 $2.5\ \text{m/s}$ ,气溶胶发生器调整参数不变,分别研究不同水雾量下对应不同荷电电压 $U_{\text{pp}}$ 时的颗粒团聚效率变化。

不同水雾量下68%均值小颗粒的团聚效率如

图10所示,不同水雾量下68%大颗粒的相对变化率均值如图11所示。可知水雾未荷电时,颗粒基础团聚效率较低,水雾量由 $34.1\ \text{mg/min}$ 增至 $102.9\ \text{mg/min}$ 时,小颗粒的团聚效率从 $1.5\%$ 增至 $4.3\%$ ,大颗粒的相对变化率从 $-4.9\%$ 增至 $-8.0\%$ 。加上荷电电压后,团聚效率明显增大,且水雾量越大,效率越高,因此同等电压下,增大喷雾量可促进

颗粒团聚效率的大幅提高。同一水雾量下,当加载电压高于起晕电压后,团聚效率逐渐增大,到达放电自持电压后,团聚效率进入平稳段,不再大幅提升,这主要是由于通过反应器的水雾量存在极限荷电量,当电压足够高时,反应器内能量离子密度极高,水雾量所携带电荷量达到饱和状态,继续升高电压并不能有效增大其荷载量,作用于气溶胶颗粒后使团聚效率存在某一极限。事实上,根据前述结论可以推测电压饱和现象的存在,但由于试验条件及高压限制,后续高电压(>50 kV)工况并未进行试验。另外,通过相同电压下的正负效率对比发现,大颗粒的相对变化率均高于小颗粒的团聚效率,这主要是由于去除两端极限粒径的 34% 颗粒后,研究粒径 31.1~174.7 nm 段包含大部分颗粒长大后的粒径段,而部分团聚减少的小颗粒并未包含其中,使得取均值后大颗粒的相对变化率稍高于小颗粒的团聚效率,另外,大颗粒破碎后形成的颗粒也多在小粒径段,削弱了颗粒团聚破碎动态平衡,这也导致了小颗粒的团聚效率略低。

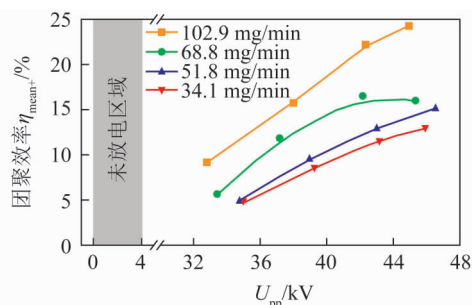


图 10 不同水雾量下 68% 小颗粒的团聚效率

Fig.10 Agglomeration efficiency of 68% small particles under different water mist amounts

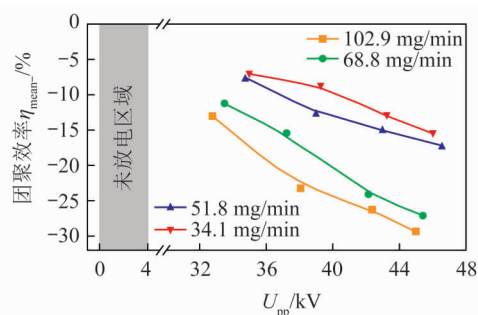


图 11 不同水雾量下 68% 大颗粒的相对变化率

Fig.11 68% negative agglomeration efficiency of 68% large particles under different water mist amounts

荷电水雾作用于颗粒物后,使其均值粒径整体右移,即颗粒粒径有所增大,不同水雾量下颗粒物均值粒径变化如图 12 所示。为研究颗粒的整体团聚效果,均值对象为所检测的全粒径范围 15.1~820.5

nm,入口测点 A 颗粒初始均值粒径约 100 nm,经过荷电水雾作用后,亚微米颗粒总数经团聚后减少,但整体亚微米均值粒径有所增大,表现在浓度分布上为峰值明显右移,且粒径增量与喷雾水雾量呈正相关关系,水雾量越大,峰值右移越明显。由图 12 可知,单独喷入水雾后,颗粒粒径变化并不明显,增长率在 1.6%~2.2%,经高压荷电后,颗粒均值粒径有效增大,且水雾量越大,增长越明显。

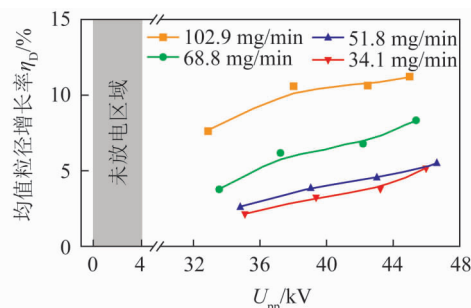


图 12 不同水雾量下颗粒均值粒径增长率

Fig.12 Average particle size growth rate under different water mist amounts

## 4 结 论

1) 双层介质阻挡结构会大大改善放电气隙的均匀性,水雾会促进气隙空间放电。对于接近均匀场的放电电极,起晕电压与不稳定运行电压相差不大,且放电脉冲电流随电压的增强变化较为平缓,常态空气时,起晕电压与不稳定运行电压分别为 30 和 49.6 kV,通入水雾流量 102.9 mg/min 时,起晕电压与不稳定运行电压分别降为 17.2 和 41.1 kV。另外,放电强度会随着水雾量的增加而增强,相同电压下,水雾量越多,电流越大。

2) 荷电电压是影响颗粒团聚效率的主要因素之一。喷入纯水雾时,主要粒径段颗粒均值团聚效率在 5% 以下,加入电压后,主要粒径段均值团聚效率大幅提高,在 2.5 m/s、100 mg/min、45 kV 电压下,均值团聚效率为 25% 左右。对于多分散的亚微米颗粒物,荷电的超声波水雾作用后,30 nm 左右极小粒径减少,100 nm 以上的大颗粒增多,直观反映了亚微米颗粒团聚效果。

3) 水雾量是电荷迁移并促进颗粒团聚的关键因素。相同电压下,水雾量的增加会大大增强颗粒团聚效果,另外,对于全粒径颗粒而言,荷电水雾其均值粒径整体右移,即粒径增大,说明荷电水雾对颗粒团聚长大有促进作用。

## 参考文献 (References):

[1] LEAR C W, KRIEVE W F, COHEN E. Charged droplet scrubbing

- for fine particle control [J]. Journal of the Air Pollution Control Association ,1975 ,25( 2) : 184-189.
- [2] METZLER P ,WEIB P ,BÜTTNER H ,et al. Electrostatic enhancement of dust separation in a nozzle scrubber[J]. Journal of Electrostatics ,1997 ,42( 1/2) : 123-141.
- [3] D'ADDIO L ,DI NATALE F ,CAROTENUTO C ,et al. A lab-scale system to study submicron particles removal in wet electrostatic scrubbers[J]. Chemical Engineering Science ,2013 ,97: 176-185.
- [4] CAROTENUTO C ,NATALE F D ,LANCIA A. Wet electrostatic scrubbers for the abatement of submicronic particulate[J]. Chemical Engineering Journal ,2010 ,165( 1) : 35-45.
- [5] BALACHANDRAN W ,KRUPA A ,MACHOWSKI W ,et al. Smoke precipitation by charged water aerosol[J].Journal of Electrostatics , 2001 ,51( 1) : 193-199.
- [6] BALACHANDRAN W ,JAWOREK A ,KRUPA A ,et al. Efficiency of smoke removal by charged water droplets [J]. Journal of Electrostatics ,2003 ,58( 3) : 209-220.
- [7] LAW S. Charge and mass flux in the radial electric field of an evaporating charged water droplet: An experimental analysis [J]. IEEE Transactions on Industry Applications ,1989 ,25 ( 6) : 1081-1087.
- [8] POLAT M ,POLAT H ,CHANDER S ,et al. Characterization of airborne particles and droplets[J]. Particle & Particle Systems Characterization ,2015 ,19( 1) : 38-46.
- [9] 吴琨 ,王京刚 ,毛益平 ,等. 荷电水雾振荡除尘器的性能研究[J]. 有色金属( 矿山部分) ,2004 ,56( 5) : 46-48.
- WU Kun ,WANG Jinggang ,MAO Yiping ,et al. Research on the performance of the charged spray vibratin string dust collector [J]. Nonferrous Metals( Mining Section) ,2004 ,56( 5) : 46-48.
- [10] 吴琨 ,王京刚 ,毛益平 ,等. 荷电水雾振荡除尘技术机理研究[J]. 金属矿山 ,2004 ,56( 8) : 59-62.
- WU Kun ,WANG Jinggang ,MAO Yiping ,et al. Study on mechanism of vibrating grid dedusting technology with charged fog [J]. Metal Mine ,2004 ,56( 8) : 59-62.
- [11] 陈卓楷 ,陈凡植 ,周炜煌 ,等. 超声雾化水雾在除尘试验中的应用[J]. 广东化工 ,2006 ,33( 10) : 74-77.
- CHEN Zhuokai ,CHEN Fanzhi ,ZHOU Weihuang ,et al. The application of atomization water made by ultrasonic technique in dust removal experiment [J]. Guangdong Chemical Industry , 2006 ,33( 10) : 74-77.
- [12] 马素平 ,寇子明. 喷雾降尘机理的研究[J]. 煤炭学报 ,2005 ,30( 3) : 297-300.
- MA Suping ,KOU Ziming. Study on mechanism of reducing dust by spray [J]. Journal of China Coal Society ,2005 ,30( 3) : 297-300.
- [13] 左子文. 荷电液滴捕集颗粒物机理和特性的研究[D]. 镇江: 江苏大学 ,2016.
- ZUO Ziwen. Research on the mechanism and characteristics of charged droplets to capture particles [D]. Zhenjiang: Jiangsu University ,2016.
- [14] ANTES T ,SZUDYGA M ,LIWISKI Ł ,et al. Future needs for ship emission abatement and technical measures[J]. Transport Problems An International Scientific Journal ,2013 ,8( 3) : 101-107.
- [15] HA T H ,NISHIDA O ,FUJITA H ,et al. Enhancement of diesel particulate matter collection in an electrostatic water-spraying scrubber[J]. Journal of Marine Science & Technology ,2010 ,15 ( 3) : 271-279.
- [16] SUN Yanzhou ,QIU Yuchang ,YU Fashan ,et al. Application of DBD and DBCD in SO<sub>2</sub> removal[J]. Plasma Science and Technology ,2004 ,6( 6) : 2589-2592.