



高流场中微细粉尘荷电凝并粗化对电捕集效率的影响

陈志刚¹, 王少雷^{1,2}, 毛首蕾², 王永伟²

1. 江苏大学环境学院, 江苏镇江 212013

2. 大连海事大学环境工程研究所, 辽宁大连 116026

摘要 目前电除尘器存在微小颗粒粉尘捕集效率低、本体体积庞大和能耗高等问题。本文基于烟道中粒子动量高, 放电通道中离子输运特性较好的特点, 将离子源、荷电凝并装置设置于电除尘器前烟道中。实验结果表明, 离子浓度随电场强度加大而增加; 在高离子动量情况下, 烟道中的离子浓度可达到 $1.97 \times 10^9 / \text{cm}^3$, 比现有电除尘器的离子浓度高出 2~3 个数量级; 矩形电晕极优于圆形电晕极, 而芒刺电晕极起晕电压低, 耗能少, 产生离子浓度高且稳定, 因此以芒刺电晕极为最佳; 中位径为 $0.2 \mu\text{m}$ 的硅粉、中位径为 $6 \mu\text{m}$ 的滑石粉和两种粉体的混合粉等微细颗粒荷电凝并后被粗化为电除尘器有效捕集的颗粒, 电捕集效率显著提高。本实验可在不增加电除尘器室数、不改变原有运行方式和运行参数条件下, 有效解决现有电除尘器预荷电离子浓度过低问题, 增大其捕集效率。

关键词 高流场; 亚微米粉尘; 荷电凝并; 电除尘器效率

中图分类号 X701.2

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)06-0098-05

Effect of Submicron Dust Charging and Coagulation on Efficiency of ESP in the High Flow

CHEN Zhigang¹, WANG Shaolei^{1,2}, MAO Shoulei², WANG Yongwei²

1. School of Environment, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu Province, China

2. Institute of Environmental Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning Province, China

Abstract Due to the inefficiency of collecting submicron dust, the current electrostatic precipitator (ESP) suffers from disadvantages of great size and much consumed energy. This paper proposes to put the ion source and the charging and coagulation equipment in the flue, to secure a high ion transportation rate with high particle momentum. The results show that the ion density is increased with the increase of the electric field intensity. In the condition of high momentum, the ion density reaches $1.97 \times 10^9 / \text{cm}^3$, 2~3 orders of magnitude higher than that of ESP. Rectangular powered electrodes are shown to be better than circular powered electrodes. The prickles powered electrodes, with low corona onset voltage, consume less power and generate ions of high density in a stable way. So the prickles powered electrodes are the best choice. Median-particle-size of $0.2 \mu\text{m}$ silicon powder, median-particle-size of $6 \mu\text{m}$ talcum powder and the mixed powder of silicon powder and talcum powder were charged and coagulated to big particles. The efficiency of ESP is significantly improved. A charging system equal to a room of ESP can be saved. The problem of low efficiency of the current ESP can be solved without the need to increase the rooms of ESP and to change the running matter and the parameters, but only by making use of the high momentum of charging particles in the flue.

Keywords high flow; submicron dust; charging and coagulation; efficiency of ESP

0 引言

工业生产会产生粒数众多的亚微米 ($0.01 \sim 1 \mu\text{m}$) 分子的

漂浮簇微粒烟尘。这一问题引起了世界各国重视^[1-2], 学者们进行了大量的荷电凝并研究。Watanabe 等^[3]研究了荷电凝并

收稿日期: 2009-11-19

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (2008AA06Z3107); 国家自然科学基金项目 (50778028)

作者简介: 陈志刚, 教授, 研究方向为气体污染治理和高级氧化技术, 电子信箱: chenzz@ujs.edu.cn

的三区电除尘方法,结果表明粒径小于 $1\mu\text{m}$ 粉尘质量减少了 20%。向晓东等^[4]也进行类似的新型双区荷电凝并除尘研究。Jun-Ho Ji 等^[5]进行两个平板式粉尘电晕荷电及两个平板式交变电场(160~500Hz)凝并研究,结果表明小于 $1\mu\text{m}$ 粉尘的颗粒数减少了 25%~29%。Yoji Nakajima 等^[6]使用声波或施加 AC 交变电场促使亚微米颗粒凝并成粒径为 $8\mu\text{m}$, 此粒径收集效果最好。Byeon 等^[7]在电除尘器前设置介质阻挡放电模块的荷电电场, 荷电粉尘将在电除尘器中的直流电场中进行凝并,提高了除尘效率。目前烟尘荷电凝并存在问题是:① 电离电场中的中性气体粒子动量低,相应电晕放电生成的离子浓度很低^[8],降低了烟尘荷电几率;② 现有电除尘器烟尘荷电凝并电场大多是直流静电场,烟尘与离子碰撞荷电凝并几率也相应降低。目前电除尘的荷电凝并电场实质上是电除尘器稍加改变的延伸,相当于增加 1 个电除尘器,同时又增加了能耗,并没有从源头上解决现在电除尘技术存在的问题^[9]。解决微细粉尘的荷电凝并存在问题,将成为电除尘技术研究热点。

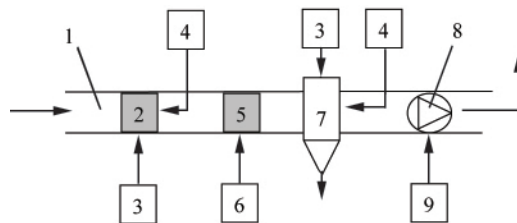
用粉尘质量浓度评价微细粉尘荷电凝并效果不够精确,因为烟气中微细粉尘粒数多,质量轻,1 个较大颗粒粉尘质量相当于亿万个微小粉尘的质量,所以应以粉尘粒数浓度或某粒径的质量浓度来评价电除尘器捕集微小尘粒的性能。

近来粒子动量对离子输运性、离子浓度影响的研究取得进展,气体粒子平均动量为 $131\times 10^{-22}\text{g}\cdot\text{m/s}$ 时,离子输运率达到 $8\times 10^{10}/(\text{cm}^3\cdot\text{s})$ ^[10],此时离子浓度达到 $1.1\times 10^{10}/\text{cm}^3$ ^[11-12],可见气体粒子动量(风速)增加将导致离子浓度成倍数或成数量级地增加。这些研究进展提示:有可能在不增加电除尘器室数(有效集尘面积),不改变原运行方式和参数条件下,利用烟道中气体粒子动量大的有利条件,使得微细烟尘在烟道高速流场交变电场中与高浓度离子碰撞荷电,凝并成电除尘电场可捕捉的大粒径粉体,进而有望解决目前电除尘器捕集亚微米烟尘效率低的问题。

本文将重点研究烟道中高流场(18~20m/s)的离子产生物理过程,为微细烟尘荷电凝并提供基础条件;同时本文研究微细烟尘荷电凝并的交变电场的建立条件,以实现微细烟尘荷电凝并粗化,提高电捕集效率。

1 实验系统与方法

实验流程如图 1 所示。用 ABBDrives 调频器及 BYF7142 型低噪声强力中压引风机控制实验气体流量;用 MODEL KA2 型热式风速计检测风速;通过 $\phi 100\text{mm}\times 5\text{m}$ 的管道及 $90\text{mm}\times 90\text{mm}\times 0.6\text{m}$ 矩形管道使其匀速;电晕放电离子源采用板线形式,均为不锈钢板材制成,放电极分别为截面积为 $1.5\text{mm}\times 1.5\text{mm}$ 的矩形电晕极, $\phi 1.8\text{mm}$ 的圆形电晕极和芒刺长度为 3mm 间距为 20mm 的芒刺电晕极组成,根据实验需要选用;接地极为 $90\text{mm}\times 100\text{mm}$ 的不锈钢板;气道长度 200mm ,有效截面积为 $90\text{mm}\times 90\text{mm}$,共有 4 个窄单气道,每个单气道有 4 根电晕极,可根据实验取舍。电源为 $26\text{kV}/5\text{mA}$ 直流/



1—烟道;2—离子源;3—直流高压电源;4—大气离子测量仪;5—荷电凝并装置;6—交流高压电源;7—电除尘器;8—引风机;9—调频器

图 1 实验系统流程图

Fig. 1 Schematic diagram of the experiment setup

交流高压电源,离子源采用负电晕放电产生离子。本实验采用球形测试仪测试离子浓度,并用 DLY-3 型大气离子测量仪校核。其他仪器仪表:Q3-V 型高压静电表,MB3406 毫安电流表,MLDELSJ-2A 数字检流计。

2 实验结果与讨论

2.1 离子浓度与电场强度关系

烟道和电除尘器中的粒子动量分别为 $9.82\times 10^{-22}\text{g}\cdot\text{m/s}$ 和 $1.03\times 10^{-22}\text{g}\cdot\text{m/s}$ 。前者模拟离子源中气体粒子动量,后者模拟现有电除尘器中荷电凝并的气体粒子动量。离子浓度与电场强度关系实验结果如图 2 所示。粒子动量为 $1.03\times 10^{-22}\text{g}\cdot\text{m/s}$ 条件下,电场强度为 $5、7\text{kV/cm}$ 时,负离子浓度分别为 $4.41\times 10^6、1.41\times 10^7/\text{cm}^3$ 。粒子动量为 $9.82\times 10^{-22}\text{g}\cdot\text{m/s}$ 条件下,电场强度为 $5、7\text{kV/cm}$ 时,负离子浓度分别为 $1.16\times 10^9、1.97\times 10^9/\text{cm}^3$ 。由图 2 可见,离子浓度随电场强度加大近似线性增加。离子源的粒子动量高出 1 个数量级,负离子浓度相应增加了 2 个数量级,这是由于粒子动量增加降低了离子复合的几率,大幅度增加了离子输运项,使得更多的离子被输运到荷电凝并电场中,极大地提高了离子浓度,为烟道中烟尘在交变电场中荷电凝并提供足量离子。

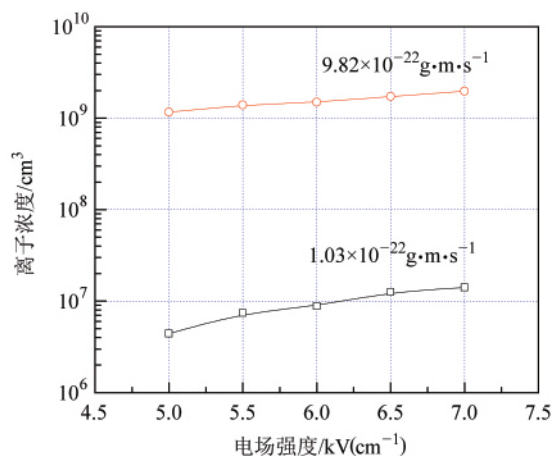


图 2 离子浓度与电场强度关系曲线

Fig. 2 Relationship between ion density and electric field intensity

2.2 气体粒子动量对离子浓度的影响

气体粒子动量对离子浓度的影响结果如图 3 所示。随着气体粒子动量、电场强度的增加,离子浓度增加。当粒子动量从 $0.20 \times 10^{-22} \text{g} \cdot \text{m/s}$ 增加到 $9.82 \times 10^{-22} \text{g} \cdot \text{m/s}$ 时,电场强度为 9.5kV/cm 的离子浓度由 $1.18 \times 10^7/\text{cm}^3$ 增加到 $3.99 \times 10^8/\text{cm}^3$,升高了 1~2 个数量级。这是由于粒子动量增加,降低了离子复合的几率,更多的离子被运输离开电场。从电场强度曲线的变化率可见,由于电场强度增加,离子产生率相应地增大。总之,气体动量的增加大大降低了离子复合机率,大幅度增加了离子输运项,从而提高了离子浓度。这将是解决电收尘器离子浓度低下的有效方法之一。

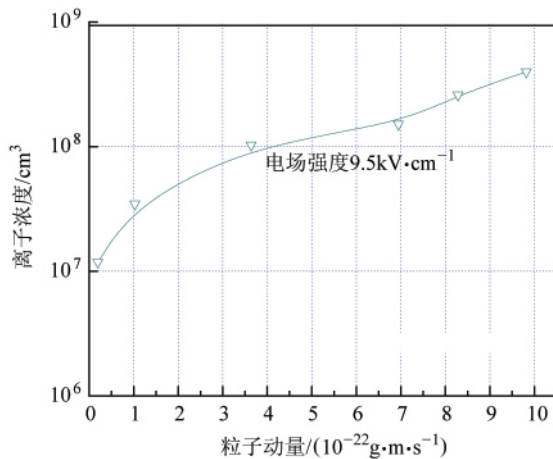


图 3 粒子动量对离子浓度的影响
Fig. 3 Relation between particle momentum and ion density

2.3 电晕极形状对离子浓度的影响

选取粒子动量为 $9.82 \times 10^{-22} \text{g} \cdot \text{m/s}$,分别采用直径为 1.8mm 的圆形电晕极,截面积为 $1.5 \text{mm} \times 1.5 \text{mm}$ 的矩形电晕极和芒刺长度为 3mm 、间距为 20mm 的芒刺电晕极,在出口 20cm 处测量。电场强度同生成的离子浓度的关系曲线如图 4 所示。电场强度从 4.5kV/cm 增加到 7kV/cm 的过程中,芒刺电晕极的离子浓度从 $8.54 \times 10^8/\text{cm}^3$ 增加到 $1.97 \times 10^9/\text{cm}^3$; 电场强度从 8kV/cm 增加到 10.5kV/cm 的过程中,圆形电晕极和矩形电晕极的离子浓度分别由 $2.18 \times 10^6/\text{cm}^3$ 和 $1.51 \times 10^7/\text{cm}^3$ 增加到 $3.08 \times 10^6/\text{cm}^3$ 和 $7.56 \times 10^8/\text{cm}^3$ 。由图 4 可见,在电场强度 4.5kV/cm 到 7kV/cm 的区域内,圆形电晕极和矩形电晕极离子缺失。这是因为起晕电压与电晕线的芒刺尖端曲率半径密切相关,曲率半径越大,起晕电压越高,圆形电晕极与矩形电晕极的芒刺尖端钝,曲率半径都较大,起晕电压约为 7.5kV 。芒刺电晕极有尖锐的芒刺,更容易产生尖端放电,起晕电压较低,约为 4kV 。电晕极芒刺尖端的曲率半径越小,在同样电压下其附近区域的电场强度越大,起晕电压越低。在电场强度 8kV/cm 到 10.5kV/cm 的区域内,芒刺电晕极离子缺失,这是因为电场强度为 7.5kV/cm 时开始出现火花放电,电场强度再增大会出现

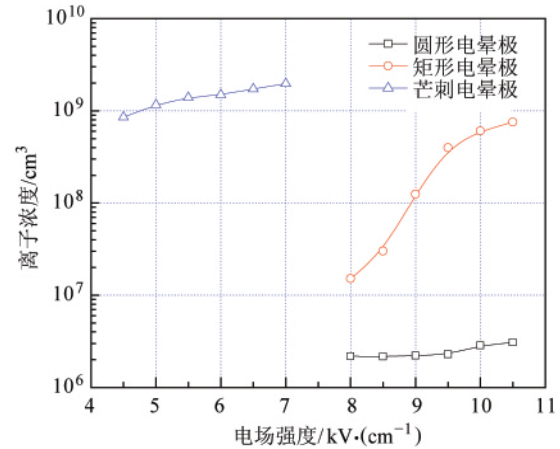


图 4 电晕极形状对离子浓度的影响
Fig. 4 Effect of shape of powered electrodes on ion density

“抽丝”甚至“闪络”,密集于某处的闪络会烧坏电极,电能消耗大而无助于粉尘荷电,连续的闪络还会过渡到弧光放电,因此不在这一区域检测离子浓度。由上述实验数据可知,在相同条件下,矩形电晕极优于圆形电晕极,而芒刺电晕极起晕电压低,耗能少,产生离子浓度高且稳定,因此以芒刺电晕极为最佳。

2.4 中位径 $0.2 \mu\text{m}$ 硅粉的交变电场荷电凝并

烟道中粒子动量为 $9.82 \times 10^{-22} \text{g} \cdot \text{m/s}$,负离子浓度为 $1.97 \times 10^9/\text{cm}^3$,交变电场频率和折合电场强度峰值分别为 100Hz 和 7Td 条件下,进行了中位径 $0.2 \mu\text{m}$ 硅粉的交变电场凝并实验,结果如图 5 所示。由图 5 可见,凝并前,中粒径小于 $2 \mu\text{m}$ 的硅粉占 71% (质量百分含量,下同),大于 $2 \mu\text{m}$ 的硅粉占 29% ,其中粒径在 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 和大于 $10 \mu\text{m}$ 的硅粉分别占 11% 、 8% 和 10% 。经高流场交变电场荷电凝并后,小于 $2 \mu\text{m}$ 的硅粉降至 53% ,减少了 18% ,质量变化率为 -25.4% ;粒

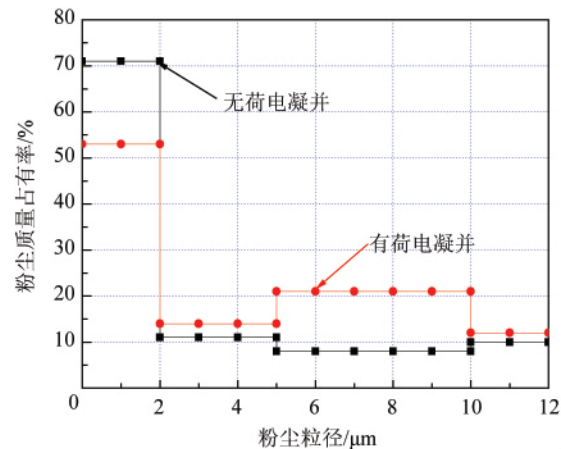


图 5 中位径为 $0.2 \mu\text{m}$ 硅粉凝并前后的不同粒径质量占有率分布

Fig. 5 Mass percent of different dust particle deiameter before and after coagulation for median-particle-size of $0.2 \mu\text{m}$ silicon

径为 $2\sim 5\mu\text{m}$ 的硅粉占 14%, 质量变化率为 +27.4%; 粒径为 $5\sim 10\mu\text{m}$ 的硅粉增至 21%, 质量变化率为 +162%; 大于 $10\mu\text{m}$ 的硅粉增至 12%, 质量变化率为 +20%。由此可见, 交变电场利于将粒径小于 $2\mu\text{m}$ 的微细粉尘凝并成粒径为 $5\sim 10\mu\text{m}$ 的大颗粒粉尘, 而此粒径范围在电除尘器有效捕集粉尘粒径范围之内。

2.5 中位径 $6\mu\text{m}$ 滑石粉的交变电场荷电凝并

中位径 $6\mu\text{m}$ 滑石粉实验条件同 2.2 节, 实验结果如图 6 所示。中粒径为 $5\sim 10\mu\text{m}$ 的滑石粉占 56%, 粒径小于 $2\mu\text{m}$ 和 $2\sim 5\mu\text{m}$ 的滑石粉分别占 22% 和 13%。经交变电场凝并后, 粒径小于 $2\mu\text{m}$ 和 $2\sim 5\mu\text{m}$ 的滑石粉降至 11% 和 6%, 质量变化率分别为 -50.0% 和 -53.8%; 粒径 $5\sim 10\mu\text{m}$ 和大于 $10\mu\text{m}$ 的滑石粉增加了 17.0% 和 1.0%, 质量变化率分别为 +30.4% 和 +11.1%。由此可见, 交变电场将一半以上的粒径小于 $5\mu\text{m}$ 的滑石粉凝并成 $5\sim 10\mu\text{m}$ 粒径的滑石粉, $5\sim 10\mu\text{m}$ 粒径的质量占有率增加了 17.4%, 质量变化率为 30.4%, 比中位径为 $0.2\mu\text{m}$ 硅粉的质量变化率低了 131.6%。

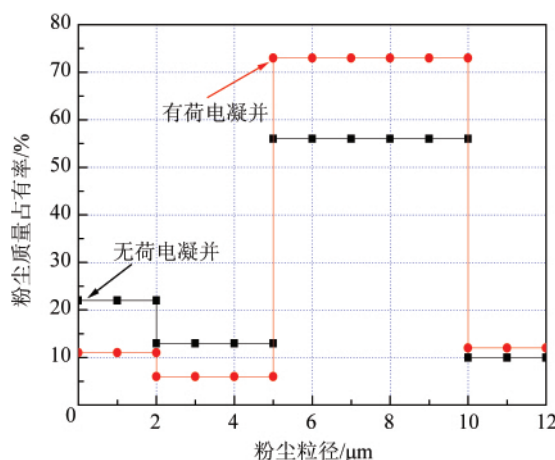


图 6 中位径为 $6\mu\text{m}$ 滑石粉凝并前后的不同粒径质量占有率分布

Fig. 6 Mass percent of different dust particle diameter before and after coagulation for median-particle-size of $6\mu\text{m}$ French chalk

2.6 混合粉的交变电场荷电凝并实验

为了模拟电除尘器可以捕捉的烟尘粒径范围, 采用质量比为 1:1 的硅粉、滑石粉混合粉为实验粉体, 实验条件同 2.2 节。中位径为 $0.2\mu\text{m}$ 硅粉与中位径为 $6\mu\text{m}$ 滑石粉, 混合后质量粒径分布及实验数据如图 7 所示, 粒径小于 $2\mu\text{m}$ 、 $2\sim 5\mu\text{m}$ 、 $5\sim 10\mu\text{m}$ 及大于 $10\mu\text{m}$ 的粉体分别占 44%、9%、35% 和 12%。经交变电场凝并后, 粒径小于 $2\mu\text{m}$ 的粉体减少 16%, 而粒径为 $2\sim 5\mu\text{m}$ 、 $5\sim 10\mu\text{m}$ 及大于 $10\mu\text{m}$ 的粉体分别增加了 8%、5% 和 3%。从图 7 可以看出, 粒径小于 $2\mu\text{m}$ 和 $2\sim 5\mu\text{m}$ 的粉体凝并后质量变化率较大, 分别达到 -36.4% 和 +88.8%。

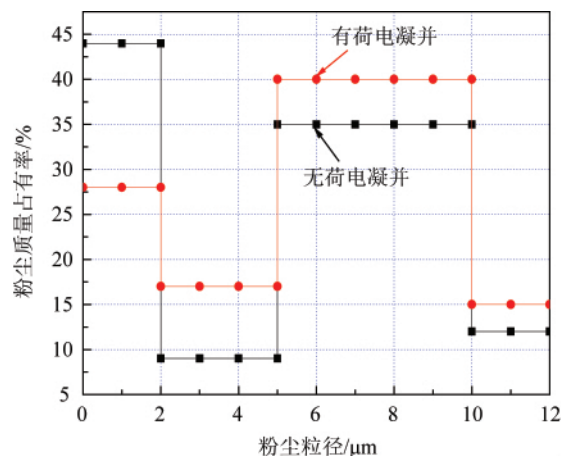


图 7 混合粉体凝并前后的不同粒径质量占有率分布

Fig. 7 Mass percent of different dust particle diameter before and after coagulation for the mixed powder

2.7 交变电场荷电凝并对微细粉尘电除尘效率影响

除尘静电场强度为 $1.75\text{kV}/\text{cm}$, 电除尘电场中风速为 $1.12\text{m}/\text{s}$, 分别用中位径 $0.2\mu\text{m}$ 硅粉、中位径 $6\mu\text{m}$ 滑石粉和质量比为 1:1 的硅粉、滑石粉混合粉进行粉尘荷电凝并实验, 粉体浓度均为 $7.27\text{mg}/\text{m}^3$ 。其他实验条件同 2.2 节。

实验粉体与离子源输出的负离子均通过荷电凝并装置进行荷电凝并反应。粉尘荷电凝并后, 通过电除尘器进行除尘, 实验结果如图 8 所示。中位径 $0.2\mu\text{m}$ 的硅粉在无、有荷电凝并时的除尘效率分别为 28.2% 和 55.8%, 硅粉经荷电凝并后除尘效率提高了 27.6%, 除尘效率增加值达到 0.98; 中位径 $6\mu\text{m}$ 滑石粉无、有荷电凝并时的除尘效率分别为 42.8% 和 52.3%, 施加荷电凝并后除尘效率只增加了 9.5%, 除尘效率增加值仅为 0.22; 质量比为 1:1 的硅粉、滑石粉的混合粉在无、有荷电凝并时的除尘效率分别为 34.3% 和 59.5%, 除尘效率提高了 25.2%, 经荷电凝并的除尘效率增加值为 0.74。由此可

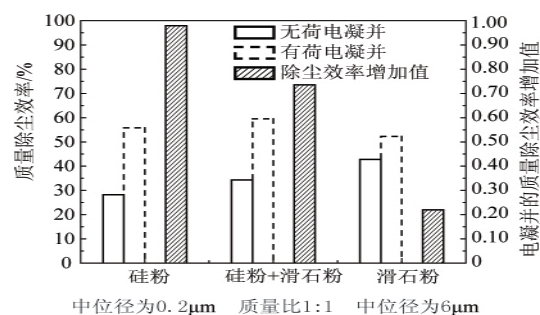


图 8 不同中位径、不同粉尘的交变电场凝并前后质量除尘效率及其增加值

Fig. 8 Mass capturing efficiency and the increased value for different median-particle-size diameters and different dust before and after charging and coagulation in alternating electric field

知,在烟道中设置荷电凝并电场可使较大提高电除尘器捕集微细粉尘效率。

3 讨论

近来气体电离放电、大气压非平衡态等离子体物理及其连续性方程、运动方程研究均取得了令人鼓舞的进展。离子浓度大幅度增加提示我们可以充分利用烟道中气体分子动量大的特点,为微细粉尘荷电凝并提供大量高浓度的离子,将比现有技术的离子浓度高出3个数量级左右。本文将离子产生装置(源)放置在气道中,由于放电极、接地极采用板线形式,对烟道中气体流量、流向均没有明显影响。利用烟道中气体粒子动量高的特点,有效解决了粉尘荷电凝并过程中离子浓度过低的问题。

本文高速流场中的气体粒子动量为 $9.82 \times 10^{-22} \text{g} \cdot \text{m/s}$, 约比现有技术高20倍左右,因此可将离子源、荷电凝并装置设置在高流场烟道中,解决了当前离子产生及荷电凝并电场设备庞大等问题;荷电凝并折合交变电场强度峰峰值为7Td,约为现有技术的1/5,提高了离子在荷电凝并电场中的滞留时间,进而提高了离子与粉尘碰撞概率;交变电场频率为100Hz,比Watanabe^[2]、向晓东等^[13]实验得到的最佳频率分别高20倍和25倍。高流场中微细粉尘以扩散荷电凝并为主,相对于离子运动速度,粉尘可看成是运动速度极低甚至不动,离子在电场力作用下,以很高速度在两极间做往返正弦波运动,极大地增加了离子与粉尘碰撞概率,解决了离子无规律运动的问题。荷电凝并电场低于100Hz时,离子与粉尘碰撞机率降低;高于100Hz则离子在电场中进行小幅度振动,也大幅度降低了离子与粉尘碰撞概率。本文荷电凝并电场技术条件与现有技术相差很大,凝并效果超过现有技术的5倍,荷电凝并效果远优于现有技术。在本文荷电凝并电场技术条件下,中位径 $0.2 \mu\text{m}$ 的硅粉中,粒径小于 $2 \mu\text{m}$ 的质量占有率降低了42%,而粒径为 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 的硅粉质量变化率高达+162%,除尘效率从28.2%提高到55.8%,表明高速流场中交变电场有利于微细粉尘荷电凝并成电除尘器可捕捉的粒径范围。

4 结论

为解决目前电除尘器捕集微细粉尘效率低的难题提供技术支持。为了便于验证电凝并对电除尘效率影响程度,采用单室单电场电除尘器,其风速、静电场强度分别高于、低于现在电除尘器,便于将除尘效率控制在中间值,利于评价微细粉尘荷电凝并对除尘效率的影响程度。

综上所述,在电除尘器入口烟道中设置等离子体产生装置和荷电凝并装置,可在烟道中完成微细烟尘荷电凝并成大粒径烟尘的物理过程,其荷电凝并效果高于目前电除尘器荷电凝并技术水平,同时又省去相当于一个电除尘器电场(室)的荷电凝并系统,为解决现有电除尘器捕集微细烟尘效率低的难题提供新方法。

参考文献 (References)

- [1] Frey A H. Enhancing contaminant control to mitigate aeroallergies [J]. *Annals of Allergy, Asthma & Immunology*, 1997, 77(6): 460-466.
- [2] Ohlstrom M O, Lehtinen K E J, Moisio M, et al. Fine-particle emissions of energy production in finland [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34 (22): 3701-3711.
- [3] Watanabe E I. Submicron size carbonic particle agglomeration by an electrostatic agglomeration apparatus [C]//Proc Third Internat. Aerosol Conf Kyoto, Japan, 1990, 2: 749-752.
- [4] 向晓东, 陈旺生, 幸福堂, 等. 交变电场中电凝并收尘理论与试验研究 [J]. *环境科学学报*, 2000, 20(2): 187-191.
Xiang Xiaodong, Chen Wangsheng, Xing Futang, et al. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20(2): 187-191.
- [5] Ji J H, Hwang J, Bae G N, et al. Particle charging and agglomeration in DC and AC electric fields[J]. *Journal of Electrostatics*, 2004, 61(1): 57-68.
- [6] Nakajima Y, Sato T. Electrostatic collection of submicron particles with the aid of electrostatic agglomeration promoted by particle vibration[J]. *Powder Technology*, 2003, 135(Special Issue): 266-284.
- [7] Byeon J H, Hwang J, Parka J H, et al. Collection of submicron particles by an electrostatic precipitator using a dielectric barrier discharge [J]. *Aerosol Science*, 2006, 37(11): 1618-1628.
- [8] 毛程奇, 白敏葭, 依成武, 等. 电除尘器中带电粒子输运特性的实验研究[J]. *高电压技术*, 2007, 33(2): 182-185.
Mao Chengqi, Bai Mindi, Yi Chengwu, et al. *High Voltage Engineering*, 2007, 33(2): 182-185.
- [9] 白希尧, 储金字, 白敏葭, 等. 电除尘器及其电离荷电机理的研究新进展[J]. *电力环境保护*, 2007, 23(5): 39-42.
Bai Xiyao, Chu Jinyu, Bai Bindi, et al. *Electric Power Environmental Protection*, 2007, 23(5): 39-42.
- [10] 白希尧, 白敏冬, 杨波, 等. 强电场中离子运动规律及应用基础研究进展[J]. *中国基础科学*, 2004, 6(4): 23-27.
Bai Xiyao, Bai Bindong, Yang Bo, et al. *China Basic Science*, 2004, 6 (2): 23-27.
- [11] 白敏葭, 邱秀梅, 刘栋, 等. 高气压非平衡等离子体源的小型化研究 [J]. *科学通报*, 2008, 53(10): 1238-1240.
Bai Mindi, Qiu Xiumei, Liu Dong, et al. *J Chinese Science Bulletin*, 2008, 53: 1238-1240.
- [12] 白敏葭, 谷建龙, 张芝涛, 等. 高气压强电场电离过程中的离子浓度分布规律[J]. *核聚变与等离子体物理*, 2005, 25(3): 218-222.
Bai Bindi, Gu Jianlong, Zhang Zhitao, et al. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 2005, 25(3): 218-222.
- [13] 向晓东. 除尘理论与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
Xiang Xiaodong. Theory and technology of collecting dust [M]. Beijing: Metallurgical Industry Publishing House, 2004.

(责任编辑 代丽)

《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在研读相当数量文献资料的基础上,全面、深入、系统地论述某一方面的问题,并对所综述的内容进行归纳、分析、评价,以反映作者的观点和见解。本栏目欢迎广大一线科技工作者投稿。投稿网址:www.kjdb.org;投稿信箱:kjdbbjb@cast.org.cn。