荷电气固两相流动凝并特性试验

闻建龙，张 星，王志强
（江苏大学 能源与动力工程学院，江苏 镇江 212013）

摘 要：采用传统除尘设备很难有效清除亚微米粉尘，而静电凝并是净化亚微米粉尘的有效方法. 设计了一种静电凝并试验装置，以电厂飞灰为实验粉尘，对其荷电性能及凝并沉积性能进行了试验研究. 飞灰粉尘直径在0.5～10 μm之间，绝大多数在2～10 μm之间. 试验结果表明：荷电颗粒的荷质比随荷电电压值的升高呈现非线性方式增长，粉尘颗粒更容易荷负电；凝并沉积效率随风速的增大及浓度的减小而增加，随荷电电压绝对值的升高而增加；在双极非对称荷电组合电压+25 kV/-23 kV时具有最高的凝并沉积效率. 荷电后粉尘的粒径分布情况表明，在荷电段出口处，10 μm以上颗粒的粒径频率分布有了明显的增加.

关键词：气固两相流；静电；亚微米；凝并；沉积效率
中图分类号：O355 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-6254(2009)05-0337-04

Experimental study on agglomeration of charged gas-solid two-phase flow

Wen Jianlong, Zhang Xing, Wang Zhiqiang
(School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjing, Jiangsu 212013, China)

Abstract: Traditional dust removal equipment is difficult to remove sub-micron dust effectively while electrostatic coagulation is an effective way to clean sub-micron dust. By designing a test-bed and using fly-ash as experimental dirt, performance of charge and deposition was studied. Result shows a non-liner rise of charge-mass ratio with charging voltage ascending, an increase of coagulation-deposition efficiency with wind speed increasing, concentration debasing and charging voltage rising, and the highest coagulation-deposition efficiency at +25 kV/-23 kV under asymmetrical bipolar charging voltage. The distribution of the diameter of the dust after charging shows that, in the entry, the dust diameter of 10 μm is increased markedly.

Key words: gas-solid two-phase flow; electrostatic; sub-micron; coagulation; deposition efficiency

随着工业化进程的加快，工业生产过程中会产生大量的有害粉尘，其中可吸入颗粒物PM10是91.1%的重点城市中的首要污染物. 这类粉尘颗粒极易包含有毒有害物质，其长时间、长距离飘浮在大气中，很容易被人吸入肺部，危害人体健康，危害生态环境[1]. 而现有的除尘设备效率较低. 因此，提高可吸入颗粒物的净化效率已成为当今世界范围内的热点研究课题[2].

研究表明，细微颗粒的凝并可提高净化效率. 目前，理论上细微颗粒的凝并机理主要有热凝并、声凝并、磁凝并和静电凝并等[3]. 从凝并能耗比、凝并过程复杂难易程度、有无二次污染等方面来综合考虑，静电凝并由于其高效、易实现、无污染等优点，成为细微颗粒净化中的研究热点[4].

收稿日期：2009-05-02
基金项目：江苏省自然科学基金资助项目(BK2007095)
作者简介：闻建龙(1962—)，男，江苏常熟人，教授(jlwen@ujs.edu.cn)，主要从事荷电两相流研究.
张 星(1985—)，男，山西太谷人，硕士生(zhx19850415@yahoo.cn)，主要从事荷电两相流研究.

万方数据

本试验以气固两相流动与静电学为理论基础，对影响凝并效率的主要因素，即颗粒直径、荷质比、速度、浓度等，进行相关的试验研究.

1 试验条件

1.1 荷电方式与试验原理

颗粒荷电的基础是依靠电极在高压静电下发生电晕放电，在其周围产生高浓度的离子群，离子群通过一定的.物理过程将电荷传给颗粒来完成荷电的目的[5].电晕荷电理论中的两种荷电方式为[6,7]：①电场荷电或碰撞荷电；②扩散荷电.本试验主要以电场荷电为主.

试验原理为：通过外加高压静电作用，对亚微米级的细微颗粒进行荷电；荷电后的细微颗粒在输运过程中，将主要以外电场力及粒子间的库仑力而使小颗粒凝并成较大颗粒，凝并后的大颗粒再通过常规的除尘设备进行清除.

1.2 试验装置及测量设备

本试验所用试验及测量设备包括：①荷电设备：EST803A 型正、负高压静电发生器各 1 台，0 ~ ±30 kV；②电流测量：PA - 15 型面板式直流数字电流表，精度 0.1 μA；③质量测量：FA - 1604 型数显式电子天平，精度 0.1 mg；④风速测量：QDF - 3 型热线式风速仪，精度 0.01 m/s；⑤粒度测量：winner99 型微镜图像颗粒分析仪，精度 0.1 μA/像素；⑥其他设备：秒表、变频器等.试验在直流小风洞中进行，装置简图如图 1 所示.

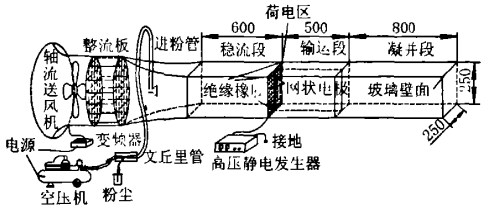


图 1 试验装置

Fig. 1 Experimnetal device

1.3 试验材料

本试验采用在电厂电除尘器中捕集，经干燥、碾磨后的飞灰作为试验用粉尘，能较好地体现亚微米粒子的特性.电厂飞灰的初始粒径分布见表 1.

2 试验测量与结果

2.1 荷质比

荷质比是体现颗粒荷电性能的重要参数之一，试验采用图 2 所示的网状目标法来测量.

表 1 电厂飞灰粒径分布

Tab. 1 Power plant dusts diameter distributions

粒径范围/μm	频率分布/%	累积分布/%
0.2 ~ 0.5	0.59	0.62
0.5 ~ 1	9.96	10.57
1 ~ 2	16.61	27.18
2 ~ 5	32.87	60.05
5 ~ 10	38.29	98.14
10 ~ 15	1.83	99.97
15 ~ 20	0.03	100

注：质量平均粒径 $D = 4.22$ μm，中位径 $D_{50} = 4.23$ μm.

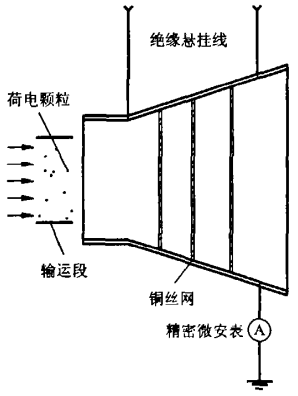


图 2 荷质比测量装置

Fig. 2 Measurement device of charge to mass ratio

荷质比的测量方法为：荷电粉尘均匀喷射到多层金属栅网上，荷电的粉尘接触到接地的金属网后形成回路，电荷在金属网上产生微电流，将此电流接至精密微安表后可测出这一电流值，秒表可读出产生电流的时间，根据试验风速及粉尘浓度，由公式

$$A_q = \frac{q}{m} = \frac{It}{vAtQ_m} = \frac{I}{vAQ_m}$$

即可求出颗粒的荷质比.式中 A_q 为荷质比，C/kg；q 为荷电量，C；m 为喷粉质量，kg；I 为电流强度，A；t 为测试时间，s；v 为风速，m/s；A 为试验管段横截面积，m^2；Q_m 为喷粉质量流量，kg/m^3.

图 3 给出了在不同荷电工况下的荷质比分布.图中 U 为电压.

2.2 凝并沉积效率

细微颗粒的沉积效率，是反映荷电凝并效果的一个重要指标，当多个细微颗粒凝并成一个较大颗粒时，则加速度沉降。

颗粒凝并沉积效率试验测量方法为：调节至所需的风速及荷电电压，在凝并试验段底部每 10 cm 均匀放置一片 25 cm × 10 cm 的玻璃板，在不同的试

万方数据

验工况下进行试验；之后将各玻璃板上沉积的粉尘在精密电子天平上称量，减去玻璃板自重，即可得到管段内各距离上的粉尘沉积量；再将粉尘沉积量与该面积上的理论沉积量相对比，即可得到沉积效率.

图4～图8分别给出了凝并沉积效率随荷电正电压、荷电负电压、双极荷电电压、风速及浓度的变化趋势. 图中 L 为轴线水平距离；η 为凝并沉积效率.

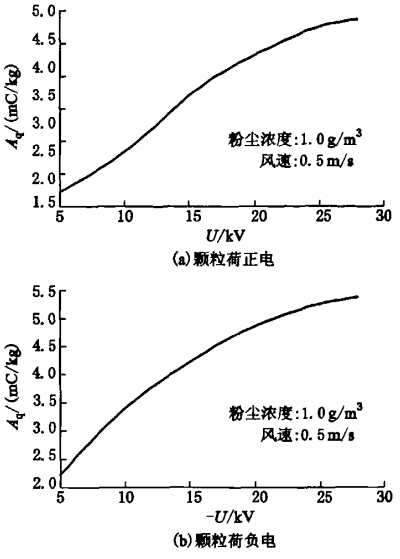


图3　荷质比测量结果

Fig. 3　Results of charge to mass ratio

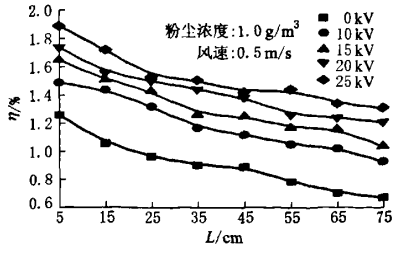


图4　凝并沉积效率与荷电正电压的关系

Fig. 4　Relation of sediment efficiency and positive voltage

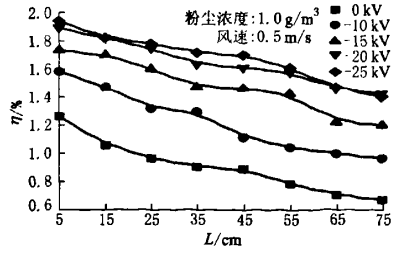


图5　凝并沉积效率与荷电负电压的关系

Fig. 5　Relation of sediment efficiency and negative voltage

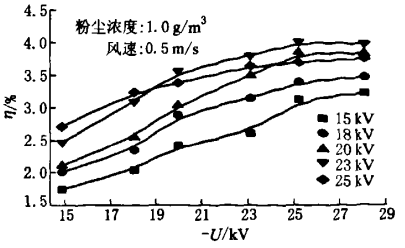


图6　双极荷电下凝并沉积效率

Fig. 6　Sediment efficiency under double pole charge

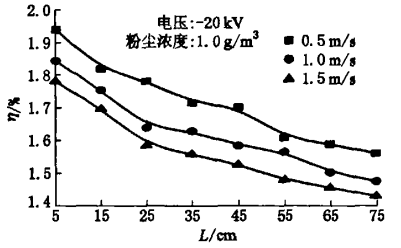


图7　凝并沉积效率与风速的关系

Fig. 7　Relation of sediment efficiency and wind speed

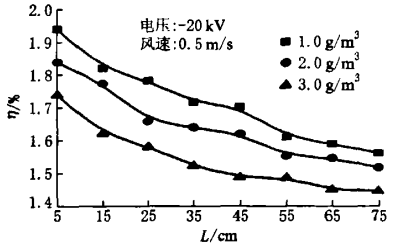


图8　凝并沉积效率与浓度的关系

Fig. 8　Relation of sediment efficiency and concentration

2.3　粒径分布

粉尘粒径分布的变化是表示凝并效果的直接体现. 本试验通过测量在最优单极荷电电压 -20 kV 工况下凝并段进、出口处的粒径分布，并将其与试验粉尘的原始粒径分布作对比，来研究细微颗粒的凝并效果. 试验每组随机读取500个颗粒直径，通过百分比计算即可得到凝并段进出口处的粒径分布变化情况，如图9所示. d 为颗粒直径，f_i 为频率分布.

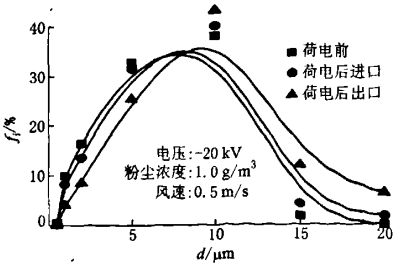


图9　电厂飞灰荷电后粒径分布

Fig. 9　Power plant dust diameter distributions with charge

万方数据

3 试验结果分析

通过图3对比发现,电厂飞灰的荷质比随荷电电压绝对值的升高而增加,增长趋势呈现非线性方式,并且荷负电时的荷质比要优于荷正电时的.

从图4和图5可以看出,颗粒凝并沉积效率,随荷电电压绝对值的升高而成非线性方式增长,且随电压绝对值的升高,粒子凝并沉积效率的增长趋势相对减缓.从两组图的对比可以发现,颗粒荷负电时的凝并沉积效率比其荷正电时凝并沉积效果要好,这表明粉尘颗粒更容易荷负电.

试验发现,双极荷电电压下的凝并沉积效率,要明显高于单极荷电情况下的凝并沉积效率.这是由于颗粒所带的电荷分布不均,凝并后新生成的粒子还会带有少量电荷,继续和其他粒子发生凝并,如此则有效提高了粒子的凝并效率.在双极不对称荷电中,粉尘的凝并沉积效率峰值出现在正电压25 kV,负电压-23 kV配比时,良好的正负电压配合能获得更好的凝并沉积效果.

从图7可以看出,在相同荷电条件下,粒子的凝并沉积效率随风速的增大而降低.这是由于风速的增加使粒子通过凝并段的时间减少,致使粒子不能充分凝并;同时,即使凝并后变大的粒子也不易沉降下来,随气流排出系统,影响了粒子的凝并效率.

图8表明,在相同荷电条件下,粒子的凝并沉积效率在相同荷电条件下随浓度升高而降低.颗粒浓度变大会导致粒子荷电不能像低浓度时完全饱和,引起荷电效果的差异,进而影响了粒子的凝并效果.

从图9可以看出,荷电后粉尘的粒径分布,与原始的粒径分布相比,有了明显的变化.在荷电段进口处,10 μm以上颗粒的粒径频率分布略有增加;而在出口处,10 μm以上颗粒的粒径频率分布则有了明显的增加.这表明荷电过程不仅会引起颗粒凝并沉积量的增加,还会对颗粒粒径分布的变化产生较大影响.

4 结 论

1)细微颗粒的凝并效果受风速、粉尘浓度及荷电电压的影响.在实际应用中,应根据实际工况设计相应的收集条件.

2)在双极非对称荷电效果下凝并效果最好;大粒子带电量较高,相对于小粒子来说更易发生凝并.

3)静电凝并除尘技术在收集亚微米粉尘方面优于其他除尘器,具有诱人的应用前景.双极非对称荷电凝并技术是静电凝并除尘理论与应用研究的发展方向.

参考文献(References)

[1] 董雪玲,袁杨森. 大气可吸入颗粒物中有机污染物的研究进展[J]. 资源与产业, 2006, 8(6): 87-90.
Dong Xueling, Yuan Yangshen. Study progress on organic pollutants in inahlable particles in atmosphere [J]. *Resources & Inductries*, 2006, 8(6): 87-90. (in Chinese)

[2] Watanabe T, Tochikubo F, Koizumi Y, et al. Submicron particle agglomeration by an electrostatic agglomerator[J]. *Journal of Electrostatics*, 1995, 34(4): 367-383.

[3] 陈志刚,孙英琨, 储金宇, 等. 网状目标法测量雾滴或粉尘荷质比的精度分析[J]. 排灌机械, 2006, 24(4): 40-43.
Chen Zhigang, Sun Yingkun, Chu Jinyu, et al. Study of measuring precision for charge to mass ratio by mesh target[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2006, 24(4): 40-43. (in Chinese)

[4] Watanabe T, Tochikubo F, Hautanen J, et al. Review of particle agglomeration[J]. *Journal of Aerosol Science*, 1995, 26(1): 19-20.

[5] Li Y W, Zhao C S, Wu X, et al. Aggregation experiments on fine fly ash particles in uniform magnetic field [J]. *Powder Technology*, 2007, 174(3): 93-103.

[6] 鲍重光. 静电技术原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993.

[7] Clement C F. Aerosol penetration through capillaries and leaks: theory[J]. *Journal of Aerosol Science*, 1995, 26(3): 369-385.

(责任编辑 张文涛)

万方数据