

电凝并技术脱除 PM_{2.5} 的研究现状及发展方向

竹涛, 陈锐, 王晓佳, 夏妮, 赵文娟, 李笑阳
(中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083)

摘要:针对传统除尘器无法有效捕集 PM_{2.5} 的问题, 笔者论述了同极荷电颗粒在交变电场中的凝并、异性荷电粉尘的库伦凝并、异性荷电颗粒在交变电场中的凝并、异性荷电颗粒在直流电场中的凝并、四级凝并 5 种电凝并技术的研究现状, 并提出了电凝并技术的发展方向。5 种电凝并技术中, 异性荷电颗粒在交变电场中的凝并效果较好; 两区式异性荷电颗粒在交变电场中的凝并效果优于三区式。低温等离子体-电凝并技术将低温等离子体-电凝并设备直接置于管道中, 对粉尘预荷电; 基于原有布袋除尘器开发出双踪电笼布袋除尘装置, 联合脱除 PM_{2.5}。利用低温等离子体-电凝并技术开发的复合反应器结构紧凑, 占地面积小, 对细微粒子的除尘效率高达 99%, 可实现脱硫脱硝脱汞的协同脱除, 是电凝并技术的发展方向。

关键词:电凝并; 除尘器; 捕集效率; PM_{2.5}; 亚微米颗粒物

中图分类号: X513 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2015)02-0006-04

Research status and development direction of electric agglomeration technology for PM_{2.5} removal

ZHU Tao, CHEN Rui, WANG Xiaojia, XIA Ni, ZHAO Wenjuan, LI Xiaoyang

(School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to improve capture efficiency of traditional filter for PM_{2.5}, the agglomeration of homopolar and heteropole charged particles in alternating electric field, coulomb agglomeration of heteropole charged particles, agglomeration of heteropole charged particles in direct-current electric field were introduced. The development direction of electric agglomeration was analyzed. The agglomeration effects of heteropole charged particles in alternating electric field was the best. The two-area filter had better fine particle capture performance than the three-area filter. The low temperature plasma electric agglomeration equipment was placed directly in pipe to precharge dust. A double-beam electric cage bag filter was developed based on the original bag filter. Based on the new bag filter, a compound reactor which could remove S, NO_x and Hg at the same time had tight structure and small volume. Its dust removal efficiency was able to reach 99%.

Key words: electric agglomeration; filter; capture efficiency; PM_{2.5}; submicron particle

0 引 言

细颗粒物是指空气动力学直径不大于 2.5 μm 的颗粒物, 煤炭燃烧对全国总悬浮颗粒物 (TSP) 的贡献超过 70%, 细颗粒物是主要贡献源之一。清华大学从国内 4 个燃煤电厂中颗粒物采样研究发

现^[1], 燃煤电厂排放的颗粒物 PM₁₀ 中, 大于 1 μm 颗粒物占主要比例, 而数量浓度却是 PM_{0.1} 占主要比例。总颗粒物中 PM₁、PM_{2.5}、PM₁₀ 质量分数分别为 0.10% ~ 0.85%、1.70% ~ 5.70%、14.10% ~ 35.80%, PM₁₀ 中 PM₁、PM_{2.5} 分别占 0.60% ~ 6.00% 和 16% ~ 24%。其中 PM_{2.5} 对人体危害最

收稿日期: 2014-01-12; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2015.02.002

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51108453); 中央高校基本科研业务专项基金资助项目(2009QH03); 国家环保公益项目(201409004); 新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET120967); 北京市优秀人才培养资助项目(2012ZG81)

作者简介: 竹涛(1979—), 男, 山西临猗人, 副教授, 博士, 博士生导师, 从事大气污染控制方面的研究。E-mail: bamboozt@cumtb.edu.cn

引用格式: 竹涛, 陈锐, 王晓佳, 等. 电凝并技术脱除 PM_{2.5} 的研究现状及发展方向[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(2): 6-9.

ZHU Tao, CHEN Rui, WANG Xiaojia, et al. Research status and development direction of electric agglomeration technology for PM_{2.5} removal [J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(2): 6-9.

大,且最难清除。细颗粒物能长期悬浮于大气环境中,具有大的比表面积,易于富集多环芳香烃、多环芳烃类、病毒和细菌等有毒物质以及痕量有毒元素。值得注意的是,在 TSP 和 PM10 浓度下降的同时,我国 PM2.5 排放量及部分城市大气中 PM2.5 浓度均呈现上升趋势^[2-5]。目前工业上用于脱除颗粒物的除尘设备主要有机械除尘器、湿式除尘器、过滤式除尘器、静电除尘器以及相关的组合除尘器。机械除尘器对粗粉尘处理效果较好,而对于微米级和亚微米级颗粒物,其分离能力较低。湿式除尘器、静电除尘器和布袋除尘器在 0.1 ~ 1 μm 存在一个穿透窗口,且捕集效率多低于 95%^[6-8]。因此传统除尘设备已无法满足细颗粒物有效去除的要求,一些新的除尘技术应运而生。目前,提高细颗粒物的捕集效率主要有 2 种方法,一是将细颗粒物进一步团聚凝并成大颗粒物(即凝并),然后利用传统除尘设备去除颗粒物;二是通过改进原有除尘设备以进一步提高细颗粒物的捕集效率,如静电布袋除尘器等。凝并主要包括电凝并、声凝并、磁凝并、光凝并、热凝并、化学凝并等^[6]。其中,电凝并因其更容易满足实际工作条件,处理气量大,适应粒径范围广而受到重视。基于此,笔者介绍了 5 种电凝并技术的研究现状,并提出了电凝并技术的发展方向,以期为控制 PM2.5 提供技术支持。

1 电凝并技术研究现状

电凝并理论研究主要是对凝并速率的研究,使颗粒物在尽可能短的时间内凝并增大,从而有利于后续颗粒捕集。20 世纪 60 年代初,Friedlander 指出在弱带电情况下,凝聚受带电粒子的影响很小;而对于强带电气溶胶,由于两粒子间的静电引力造成凝并作用增强^[9]。

目前电凝并主要有同极荷电颗粒在交变电场中的凝并、异性荷电粉尘的库伦凝并、异性荷电颗粒在交变电场中的凝并、异性荷电颗粒在直流电场中的凝并 4 种,其他类型主要是此基础上的变形,此外还有改进的其他凝并设备,如芬兰坦佩雷大学设计的四级凝并器^[10]。所谓同极荷电是指所有颗粒物在电场中带有相同的电荷;异性荷电是指颗粒物在电场中带有不同极性的电荷,主要包含 2 种形式,一种是对同一电极施加交变电压,另一种是对 2 个电极施加直流电压。清华大学对外电场促进荷电颗粒间的凝聚进行研究。结果表明,对于初始对称双极

荷电颗粒,外电场不改变颗粒初始电荷分布的对称性,且带任意电荷量的颗粒质量浓度随凝聚时间单调减少,对于初始非对称双极荷电以及单极荷电颗粒,其质量浓度并非都随凝聚时间单调减少^[11]。

1.1 同极荷电颗粒在交变电场中的凝并

颗粒物首先被单极荷电,然后进入交变电场,受颗粒物尺寸、质量,荷电量及惯性差异,电场力变化的影响,造成颗粒物震动幅度差异,进而使这些颗粒物产生碰撞。对于亚微米级颗粒,颗粒物的震动幅度随粒径的增加而增大,颗粒物的凝并效果随着交流电频率的升高而增加。如频率为 50 Hz 时,凝并颗粒直径可达 4 ~ 8 μm ,而在 300 Hz 下,能得到 30 ~ 50 μm 的凝并颗粒物^[12]。Watanabe 等^[13]将电凝并技术与常规电除尘技术结合,提出了三区式静电除尘器(图 1),分别为预荷电区(ESP Unit,负直流高压电源),将亚微米颗粒同极荷电;中区为交流凝并区(EAA Unit,直流叠加交流高压点源),厚而长的高压电极代替原来的放电电极,施加一直流叠加交流的电场以促进电凝并过程;末区为收尘区(ESP Unit),收集凝并后的颗粒。其中预荷电区、收尘区与常规板式电除尘器相同,采用 3 种荷电粉尘(炭黑颗粒、飞灰颗粒、炭黑与飞灰的组合颗粒(质量比 1 : 1))进行凝并收集,并研究了荷电颗粒的运动轨迹。通过研究混合粉尘发现,采用直流电压 30 kV,交流电压 15 kV,1 μm 以下颗粒物质量分数减少了 20%,平均粒径增大 4 倍。通过研究 3、0.5 μm 粉尘运动轨迹发现,颗粒物粒径差别越大,凝并速率越高。

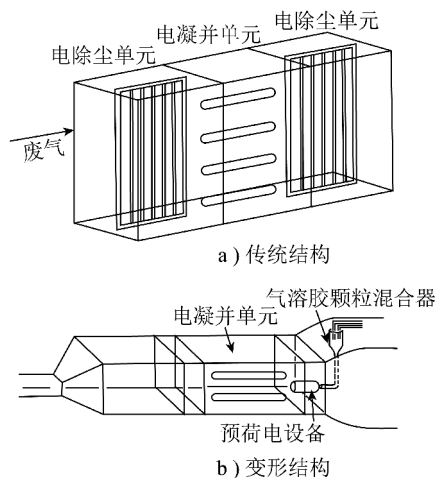


图 1 三区式电凝并除尘器结构

1.2 异性荷电粉尘的库伦凝并

颗粒物在荷电电场中带不同极性电荷后,进入

凝并区,带电颗粒物在库伦力的作用下凝聚成较大颗粒,然后进入收尘区并被捕集下来。20世纪90年代,Kanazawa等^[14]设计了静电凝并除尘装置,并研究烟草烟雾凝并性能。烟雾先经过异极荷电,带不同极性电荷,然后进入凝并区,在库仑力作用下,凝并成大颗粒物。研究发现,经凝并后,0.3~1 μm颗粒物质量分数由初始的75%下降至18%;1~5 μm颗粒物质量分数由25%增至82%,平均直径增大2倍;在最优条件下,亚微米颗粒的收集效率达到80%。

1.3 异极荷电颗粒在交变电场中的凝并

芬兰坦佩雷大学采用食用油模拟亚微米颗粒物的凝并,初始质量浓度为0.2 g/m³,荷电区停留时间约0.1 s,质量中位直径为0.5 μm,层流状态下(雷诺数 $Re=550$)经电压3.3 kV、频率50 Hz的凝并区后,1 μm以下颗粒物数量减少到初始数量的17%~19%,且0.1 μm以下颗粒物比1 μm以上颗粒物更容易凝并^[15]。试验从亚微米角度直接入手,更直观地展现凝并效果,但未从更广粒级范围、温度等参数角度来讨论。东北大学向晓东与艾塞克斯大学联合进行了两区式双极荷电电气溶胶颗粒的凝并试验^[16],设计了两区式凝并设备,在质量中位直径2 μm,电场强度4 kV/cm的凝并区,对矽砂粉的去除效率为98.2%,高于97.4%的三区式凝并效率^[9]。

1.4 异极荷电颗粒在直流电场中的凝并

颗粒物在异极电场中荷电,使两区颗粒物带相反电荷,颗粒物在自身库伦力作用下发生碰撞,然后在直流凝并电场中,在电场力的作用下产生凝并(图2)^[17]。对于小于1 μm颗粒物收集效率达到100%,但对0.03 μm以下颗粒物捕集效率只有10%^[17-18]。清华大学设计了一种凝并试验装置(图3),研究了异极荷电颗粒在外加直流电源情况下进入凝并区的电凝并效率^[19]。气溶胶颗粒物经过相互分离的阴阳两极电极荷电区,然后通过直流电凝并区,最后被集尘器收集。当荷电区阳极电压为5 kV,阴极电压为-13 kV,停留时间为0.2 s的条件下,研究凝并装置对数量中位直径7.71 μm颗粒物的凝并效率。结果表明,当凝并区电场强度为0时,对0.5 μm颗粒物凝并效率仅为14.8%;当凝并区电场强度为1.6 kV/cm时,凝并效率上升至24.0%。

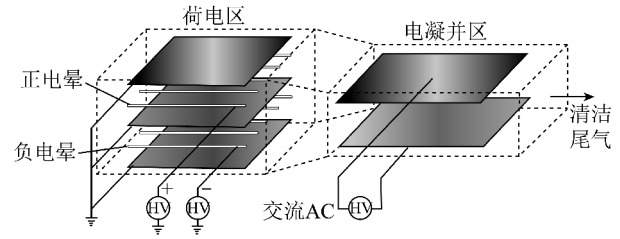


图2 异极荷电颗粒在交变电场中的凝并

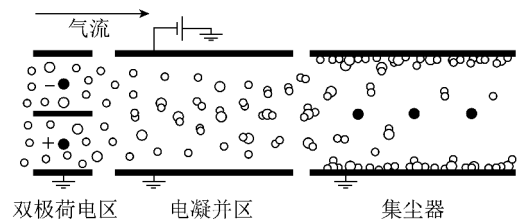


图3 异极荷电颗粒在直流电场中的凝并

1.5 四极电凝并

四级电凝并是指荷电颗粒物都聚集在四级电极轴上,对于0.06~1 μm颗粒,其荷质比为1 mC/kg,颗粒物数量减少20%^[20]。芬兰坦佩雷大学设计了1个四级凝并器(2个平板,2个电极)(图4)^[10]。用雾化植物油模拟颗粒物,两平板间电场强度为5 kV/cm,总颗粒物质量浓度为1~2 g/m³,凝并后,亚微米颗粒物含量减少了4%~8%。

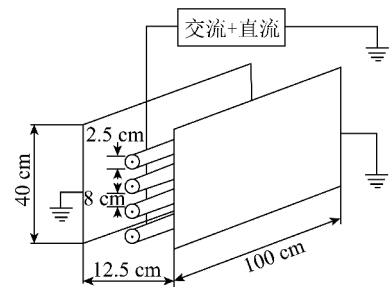


图4 四极电凝并器

2 电凝并技术发展方向

工业源烟气具有气流量大、粒径范围广、颗粒物浓度易波动等特点,而电凝并技术显然是较好的选择。目前国内外电凝并技术主流研究集中在同极荷电颗粒在交变电场中的凝并、异极性荷电粉尘的库伦凝并、异极荷电颗粒在交变电场中的凝并、异极荷电颗粒在直流电场中的凝并。4种电凝并技术中,两区式异极荷电颗粒在交变电场中的凝并效果优于三区式,但均面临能耗和一次环保投资较高的问题,若颗粒物比电阻较高,还需加入降低比电阻的工艺。因此文中所述5种电凝并方法作为预处理技术更为

合理。笔者对电凝并技术进行改造,开发出低温等离子体-电凝并技术,将低温等离子体-电凝并设备直接置于管道中,对粉尘预荷电;同时对原有布袋除尘器改型,开发出双踪电笼布袋除尘装置,联合脱除 PM2.5,所用粉尘均来自于韶关冶炼厂 ISP 冶炼生产工艺重点产尘节点熔铅锅,并通过 Fluent 软件进行流场模拟验证分析,得出合理设计方案。根据以上思路设计的复合反应器结构紧凑,占地面积小,对细微粒子的除尘效率高(可达 99%),可实现脱硫脱硝脱汞的协同脱除,是今后电凝并技术的重要发展方向。

3 结 语

电凝并是使细颗粒物团聚增大的重要处理手段,在声、磁、电、热、化学等多种凝并技术中,可行性较大,将其与现有除尘技术相结合可显著提高细颗粒物脱除效率,具有一定的工业应用前景。但电凝并过程较为复杂,影响因素众多,如烟尘温度、颗粒物性质(黏度、比电阻、成分、初始粒径分布、荷电量、极性以及荷电对称性)、外加电场具体参数(电压频率、电长强度、电极形状)等。因此,凝并效果不一,但多数学者认为,异极荷电颗粒在交变电场中的凝并是电凝并技术的重要方向。目前对细颗粒物控制技术的研究尚处于试验探索阶段,真正可实现工程应用的技术很少。目前颗粒物分级脱除就是将亚微米颗粒物从性能复杂、粒径分布广泛的颗粒物中分离,通过后续的电凝并技术将颗粒物团聚成大颗粒物,最终通过传统除尘器捕集,有望提高对亚微米颗粒物的捕集效率,进而减少大气污染物排放量。

参考文献:

[1] Maximova N, Dahl O. Environmental implications of aggregation phenomena; current understanding[J]. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 2006, 11(4): 246-266.

[2] Wang Xi, Chen Renjie, Men Xia, et al. Associations between fine particle, coarse particle, black carbon and hospital visits in a Chinese city[J]. *Science of Total Environment*, 2013, 458/460: 1-6.

[3] Darcovich K, Jonasson K A, Capes C E. Developments in the control of fine particulate air emissions[J]. *Advanced Powder Technology*, 1997, 8(3): 179-215.

[4] Wilson W E, Suh H H. Fine particles and coarse particles concentration relationships relevant to epidemiologic studies[J]. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 1997, 47(12):

1238-1249.

[5] Norbert Englert. Fine particles and human health; a review of epidemiological studies [J]. *Toxicology Letters*, 2004, 149(1/3): 235-242.

[6] Fernandez Art, Wendt J O L, Wolski N, et al. Inhalation health effects of fine particles from the co-combustion of coal and refuse derived fuel [J]. *Origins, Fate, and Health Effects*, 2003, 51(10): 1129-1137.

[7] Helble J J. A model for the air emissions of trace metallic elements from coal combustors equipped with electrostatic precipitators[J]. *Fuel Processing Technology*, 2000, 63(2): 125-147.

[8] 赵毅,沈艳梅. 燃煤过程中亚微米颗粒物形成及防治的研究进展[J]. *洁净煤技术*, 2008, 14(5): 83-85, 92.

[9] Mavrocordatos D, Kaegi R, Schmatloch V. Fractal analysis of wood combustion aggregates by contact mode atomic force microscopy[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(36/37): 5653-5660.

[10] Hautanen J, Kilpelainen M, Kauppinen E I. Electrical agglomeration of aerosol particles in an alternating electric field[J]. *Aerosol Science and Technology*, 1995, 22(2): 181-189.

[11] 张向荣,王连泽,朱克勤. 外电场对荷电颗粒静电凝聚的影响[J]. *清华大学学报:自然科学版*, 2005, 45(8): 1107-1109.

[12] Onischuk A A, Strunin V P, Karasev V V, et al. Formation of electrical dipoles during agglomeration of uncharged particles of hydrogenated silicon [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2001, 32(1): 87-105.

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

[14] Kanazawa S, Ohkubo T, Nomoto Y. Submicron particle agglomeration and precipitation by using a bipolar charging method[J]. *Journal of Electrostatics*, 1993, 29(3): 193-209.

[15] Laitinen A, Hautanen J, Keskinen J, et al. Bipolar charged aerosol agglomeration with alternating electric field in laminar gas flow [J]. *Journal of Electrostatics*, 1996, 38(4): 303-315.

[16] Xiang X, Chen B, Colbeck I. Bipolar charged aerosol agglomeration and collection by a two-zone agglomerator[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2001, 13(3): 276-279.

[17] Hu J, Zhang X, Chen W, et al. Electrostatic precipitation of fine particles with a bipolar pre-charger[J]. *Journal of Electrostatics*, 2010, 68(2): 174-178.

[18] Zukeran A, Ikeda Y, Ehara Y, et al. Agglomeration of particles by ac corona discharge [J]. *Electrical Engineering in Japan*, 2000, 130(1): 30-37.

[19] Tan B, Wang L, Zhang X. The effect of an external DC electric field on bipolar charged aerosol agglomeration[J]. *Journal of Electrostatics*, 2007, 65(2): 82-86.

[20] Vishnu Thongle, Tanongkiat Kiatsiriroat. Agglomeration of sub-micron particles by a nonthermal plasma electrostatic precipitator [J]. *Journal of Electrostatics*, 2014, 72(1): 33-38.