

我国静电技术对 PM_{2.5} 控制研究进展

张卫风*, 陶术平, 向速林

(华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 简要介绍了 PM_{2.5} 的起源与危害, 详细阐述了静电技术(电除尘器和电凝并技术)对 PM_{2.5} 的去除, 同时对防控 PM_{2.5} 的技术提出相关建议。

关键词: PM_{2.5}; 除尘; 静电除尘器; 电凝并技术

中图分类号: X513

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2016)01-0021-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.01.005

Research progress of controlling PM_{2.5} by electrostatic technology in China

ZHANG Wei-feng*, TAO Shu-ping, XIANG Su-lin

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The source and harm of PM_{2.5} are briefly introduced in this paper. The processing of PM_{2.5} by electrostatic technology including electric precipitator technology and electric coagulation technology are introduced. The suggestions about the prevention and control technology of PM_{2.5} are given in the end.

Key words: PM_{2.5}; dust removal; electrostatic precipitator; electric coalescence technology

通常, 人们将空气动力学直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的大气颗粒物定义为 PM_{2.5}, 因其直径相对较小能够进入人体肺泡, 也将其称为可吸入肺颗粒物^[1]。由于 PM_{2.5} 粒径小、重量轻、传播距离远, 可逗留于空气中时间长, 且易在细颗粒物上富集细菌、病毒和重金属, 对大气能见度和人体健康影响很大^[2]。鉴于 PM_{2.5} 已成为国内外城市大气的首要污染物^[3], 各国对颗粒物开展了大量的研究工作^[4], 而我国也在 2012 年将 PM_{2.5} 排放浓度允许的最大值纳入《环境空气质量标准》(GB 3095—2012) 中, 在北京、天津、长江三角洲、珠江三角洲等重要地区对可入肺颗粒物展开了初步的监控, 并计划于 2016 年在全国范围内开展监测^[2]。

燃煤、生物质、汽车燃料等经过燃烧而排放的尾气是燃烧源 PM_{2.5} 的主要来源^[5]。我国消耗的一次能源主要是煤炭, 占到 70%, 其用于燃烧的约为 75%, 虽然燃煤锅炉产生的颗粒物既包括细颗粒 PM_{0.38}, 又包括粗颗粒^[6], 但 0.2 ~ 2.5 μm 的细颗粒物是尾部烟气经电除尘器除尘后排放出来的颗粒物中比例最大的^[7]。鉴于现有的电除尘器对 PM_{2.5} 的脱除很难满足新的排放标准, 因此需要对电除尘器改进或对 PM_{2.5} 进行相应的电凝并处理, 从而提高电除尘器对 PM_{2.5} 的除尘效率。本文中针对电除尘器改进和电凝并技术等进行探讨, 以期对 PM_{2.5} 的控制提供相应的参考。

1 电除尘器的改进

静电除尘器是一种高效除尘器, 其工作原理如图 1 所示, 当高压静电作用于负电极上时, 负电极上就产生电晕放电, 释放大量的电子和离子, 同时在电场力的推动下, 它们分别向高压直流电源的两极移动, 且在移动过程中粉尘会捕集电子和离子荷电, 移向集尘极后被收集, 达到除尘效果。

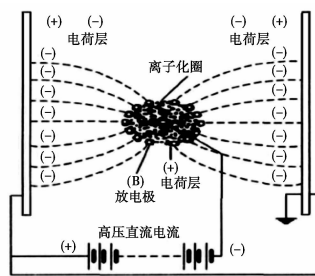


图 1 电除尘器的工作原理

烟气的特性与粉尘的特征极易影响电除尘器工作的运行参数。而粉尘比电阻对其影响最大, 太高或太低的粉尘比电阻都会在很大程度上降低除尘效率。此外, 集尘板上捕集到的粉尘一般为振打清灰导致二次扬尘, 会使粉尘再次扬起, 很大程度降低了其对 PM_{2.5} 的脱除效率。

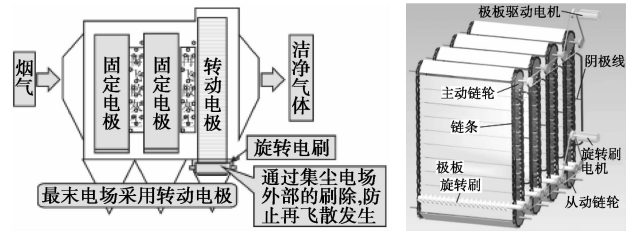
1.1 湿式电除尘器

有关清除被集尘板所捕获粉尘的方法, 湿式电

除尘器(WESP)与干式电除尘器(DES)区别较大。DES 通常采用机械振打或声波来清灰,而 WESP 则采用冲刷液来定期洗涤电极,粉尘随着冲刷液的运动而被清除。WESP 对含湿烟气、微细颗粒物、高比电阻的微细粉尘处理效果较好。因为在水和被集尘板所捕获的粉尘之间存在黏着力,WESP 不会产生二次扬尘。张会君等^[8]研究发现,试验采用湿式电除尘器(WESP)处理高比电阻的微细粉尘除尘效率较好,所脱除的粉尘中粒径小于 $1\ \mu\text{m}$ 的微细粉尘占 60%。杨志燕^[9]依据微细颗粒物在 WESP 中被脱除过程的分析,对不同极配型式下电晕放电流的性能展开了研究,结果表明,90% 以上微细颗粒物均被湿式电除尘器有效去除。莫华等^[10]利用 2 亿 kW 的煤电机组加装 WESP 在京津冀、长三角、珠三角等重点区域进行测算,结果表明,每年排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 可减少约 63.8 万 t。当前,在湿法烟气脱硫系统后面会加装 WESP,使微细粉尘能被有效捕集^[11]。WESP 只适用于处理高湿、低温以及较低负荷烟气的烟气。为了清理颗粒物,防止水的消耗,应增加循环和污水处理设备;且电场构件的材质必须耐腐蚀,WESP 系统不仅运行成本较高,而且投资成本也较高^[11-12]。

1.2 转动极板电除尘技术

与传统的电除尘器相比,转动极板电除尘器在以下 2 个方面做了变动(图 2),一是将末电场中阳极板变成可旋转的形式,二是除尘方式由原来的振打变成旋转刷。杨继发等^[13]研究表明,与常规电除尘器相比,转动极板电除尘器从工艺结构上改变了清除和捕获灰尘的方式,同时可用于捕获很细或比电阻很高的粉尘,一般出口排放的粉尘浓度 $\leq 30\ \text{mg}/\text{m}^3$,并提高了除尘效率。张涛等^[14]研究发现,转动极板电除尘器利用旋转刷清灰避免了二次扬尘,可使 $\text{PM}_{2.5}$ 等细颗粒物达到 99.89% 的去除效率。



(a) 除尘器结构

(b) 转动极板结构

图 2 转动极板电除尘器

采用常规电除尘器,由于振打清灰使得出口粉尘浓度出现周期性波动,而转动电极电场的应用不但可以降低电除尘器出口中粉尘浓度,而且能够保证出口粉尘浓度稳定不变,常规电除尘器的改造特别适合利用这种技术。但由于该技术具有相对复杂的结构,制造、安装工艺及维护相对要求较高。

1.3 高压电源改造技术

电除尘器的高压电源也会影响其除尘的效率,因此可以通过改进高压电源来提升脱除颗粒物效率。樊兴超^[15]研究发现,改变直流-交流交替供电的方式可以提高除尘装置对 $\text{PM}_{2.5}$ 等细小颗粒物的除尘效率,粒径 $2.5\ \mu\text{m}$ 的粒子除尘效率最高可达到 97.3%。姚福德^[16]研究发现,当除尘器电源采用的是恒流电源时,将恒流电压从 20 kV 上升至 50 kV, $\text{PM}_{2.5}$ 级别的细颗粒物脱除率从 28.3% 提高至 53.1%。

电源改造的应用可取得良好的效果。针对提高烟尘排放标准,如果在火电行业普遍采用高压电源改造,可以降低投资且满足烟尘排放的新标准,并能取得良好的节能减排效果^[17]。

1.4 其他技术

随着烟气调质技术的工业化,传统电除尘被动地适应粉尘和工况参数的特点可得到极大改变。烟气条件和粉尘的特性对常规电除尘有很大的影响,使烟气调质技术不能用于所有的工况,这就要求首先应展开理论分析,随后利用试验来确定其对烟气条件的适应性。

(上接第 20 页)

- [19] Noguchi T, Itai T, Tue N M, et al. Exposure assessment of lead to workers and children in the battery recycling craft village, Dong Mai, Vietnam [J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2014, 16(1): 46-51.
- [20] 毋嫫,叶知新,张炯理,等. 铅污染对儿童行为与神经功能的影响[J]. 中国妇幼保健, 2012, 10(15): 82-86.
- [21] Lugo A M. Longitudinal study to monitor blood lead level reduction in 0 to 15 year old children residing at a large community near a lead smelter in Mexico [D]. Minnesota: University of Minnesota, 2013.

- [22] Wang S, Zhang J. Blood lead levels in children, China [J]. Environmental Research, 2006, 101(3): 412-418.
- [23] He K, Wang S, Zhang J. Blood lead levels of children and its trend in China [J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(13): 3986-3993.
- [24] Ye X, Wong O. Lead exposure, lead poisoning, and lead regulatory standards in China, 1990-2005 [J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2006, 46(2): 157-162.
- [25] Randy Lee L. Frisco, Texas, Lead smelter a reminder of industry before suburban boom [N]. Knight Ridder Tribune Business News, 2003 Apr 14(1). ■

李亚林等^[18]研究发现,除尘效率与排烟温度有关,通过将排烟温度调整至130~150℃,可使PM_{2.5}等颗粒物的去除率达到最佳。熊桂龙等^[19]研究发现,当低低温电除尘器进口烟气温度从130℃降到90℃时,其出口的PM_{2.5}质量浓度可由15.2 mg/m³(标准状态)变为6.7 mg/m³,去除率由95.9%提高到97.5%。

低低温电除尘技术的使用亟需处理下面2个问题:①因为降低了粉尘比电阻,粉尘黏结力就会减小,从而产生二次扬尘,需要在振打方式和极板结构方面采取相应的改进措施;②原烟气中含有高浓度粉尘,当其通过换热器时,应该采取相适应的换热器结构和清灰方式。

从多依奇公式中可知,在一定范围内电除尘器去除颗粒物效率与尘粒迁移速度(静电力等于空气阻力时)呈正比,去除颗粒物效率随着迁移速度增大而增大。依成武等^[20]研究表明,在离子风的作用下,收集板边界内气流方向由单向流动变为向四面八方扩散,边界外的非均匀分布仍保持不变,这有益于捕获微细颗粒,试验结果表明,若离子风被忽略,微细颗粒物的除尘率将从99.95%降至99.65%。

为了促使微细粉尘能够充分荷电而被捕集,同时能够避免振打清灰而产生的二次扬尘,需要增大尘粒与收集板的接触机会,这在很大程度上有效地捕获荷电尘粒,Wang等^[21]提出了通透型收尘板电场结构,可减少微细粉尘30%~70%的排放。

2 电凝并技术

电凝并是利用增加细微颗粒的荷电能力,继而促使微细颗粒通过电泳方式到达其他颗粒表面并与其接触来增加颗粒间的凝并效果,从而提高颗粒的脱出效率。电凝并的工作原理如图3所示。

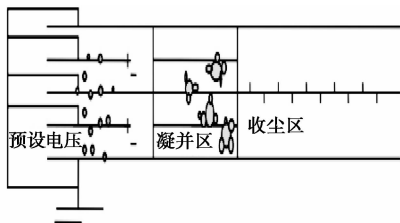


图3 电凝并原理示意图

目前研究的电凝并技术可分为4类,即异极性荷电粉尘凝并(直流电场)、同极性荷电粉尘凝并(直流电场)、同极性荷电粉尘凝并以及异极性荷电粉尘凝并(交变电场)^[22]。

王剑波等^[23]研究发现,采用双极微粒聚合器能使双极电晕放出电流,进而使粉尘荷电,荷电后的粉尘凝聚效果增强,在使用聚合器后,PM_{2.5}的质量浓度降低了15.9%。郦建国等^[24]研究结果表明,将凝聚器安设在电除尘器进口封头的第一层分布板前,增大荷电颗粒之间的碰撞机会和能够凝聚的概率,提高PM_{2.5}被捕集的能力,可使PM_{2.5}减少的排放率超过30%。李济吾等^[25]采用脉冲供电方式,构建了一种双区电除尘器试验模型(如图4),研究结果表明,脉冲供电能够明显地影响电除尘器对PM_{2.5}的去除性能,相比较于直流供电,其使微细颗粒分级效率增大了16.9%。

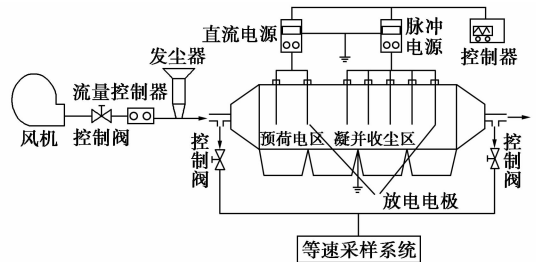
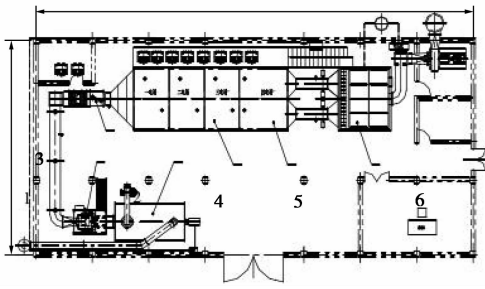


图4 双区电除尘器实验装置图

孙晓荣^[26]针对荷电粉尘量或粉尘是否被荷电、凝聚状态以及在电场空间中性质的变化,依次在2个不同放电(干式电晕放电与雾化电晕放电)的情形下展开了试验分析,研究发现,在雾化电晕放电情形下能够更好地捕集粉尘,且粒径范围在0.1~0.6 μm时,微细颗粒物被捕获的效率能够得到很大地提升,粒径为0.4 μm时捕获效率最好,达到68.08%。

目前电凝并技术的典型应用是烟气除尘强化型湿式电除尘器^[27],其是2010年在浙江某工业窑炉生产线被中国重型机械研究院有限公司建立,PM_{2.5}脱除效率可达到90%。2012年,浙江菲达环保公司建立了工业性模拟试验装置,其烟气处理量为25 100 m³/h,试验发现,当采用了凝并器后,电除尘出口处微细颗粒物PM_{2.5}的质量浓度降低了15.9%,PM_{2.5}的排放得到了有效地控制^[28],在实验室中的总体布置图如图5所示。

电凝并装置实质上是利用电除尘器有效面积的增加来使PM_{2.5}的去除效率增大,但未能使PM_{2.5}的脱除效率达到最佳。对此,白敏韵等^[29]研究发现,当交变电场中频率在100~150 Hz,电离电场强度取最大值1.75 kV/cm时,交变电场中的微细粉尘是先通过与离子碰撞荷电,然后凝聚成大粒径粉尘,



1—加料系统;2—燃油热风炉;3—聚合器;4—双室四电场电除尘器;5—旋转电极式电场;6—布袋除尘器

图5 实验室总体布置图

试验表明,凝聚后小于 $2\ \mu\text{m}$ 的中位径($0.2\ \mu\text{m}$ 硅粉中的粒径)质量分数从 71% 降到了 53%;而在 $5\sim 10\ \mu\text{m}$ 的硅粉却提高了 162%;此时质量脱除微细颗粒物的效率增大了 27.6%。

目前,在国内外采用电凝并技术捕集微细颗粒是研究的热点,对电凝并技术理论或试验方法需要更深入地研究。

3 结论与展望

综上所述,与常规的电除尘器相比,改进后的电除尘器具有使用范围广、除尘效率高等优点,在大气研究领域具有很好的应用前景,成为目前大气领域研究的热点。但目前电除尘器改进技术还处于实验室研究阶段,存在处理成本高或难以工业化的问题。电凝并去除技术的效率是现阶段微细颗粒凝并技术研究的重点,因为微细颗粒的微观性和凝并过程的复杂性,主要依据理论推导和试验方法对微细颗粒的凝并过程进行推测,具有较多的不确定性因素,使得微细颗粒的污染治理研究受到极大制约。今后的发展方向是深入研究电除尘器和电凝并技术的作用机理及相关影响因素,提高微细颗粒物的处理效率,降低处理成本,开发电除尘器、电凝并去除技术与其他除尘技术联合使用的组合技术,互补不足,尽快实现工业化应用。如王成福^[30]研究发现,把电凝并、转动极板、高频电源等组合在一起构成一个电除尘方案,其能使微细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 的收集效率得到有效提升。

参考文献

[1] 刘小峰. $\text{PM}_{2.5}$ 及其工业源头控制技术[J]. 中国环保产业, 2012, (8): 27-30.
 [2] 吕艳萍, 耿超, 李春蕾, 等. 大气中的 $\text{PM}_{2.5}$ 现状分析及新的思考[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(61): 151-154.
 [3] 包贞, 冯银厂, 焦荔, 等. 杭州市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染特征及来源解析[J]. 中国环境监测, 2010, 26(2): 44-48.

[4] 李令军, 王英, 李金香. 北京清洁区大气颗粒物污染特征及长期变化趋势[J]. 环境科学, 2011, 32(2): 319-323.
 [5] Yao Q, Li S H, Xu H W, et al. Studies on formation and control of combustion particulate matter in China: A review [J]. Energy, 2010, 35(4): 4480-4493.
 [6] 史妍婷, 杜谦, 曹阳, 等. 燃煤锅炉 $\text{PM}_{2.5}$ 控制现状及改进建议[J]. 节能技术, 2013, 31(4): 345-349.
 [7] 代旭东, 徐晓亮, 缪明烽. 电场 $\text{PM}_{2.5}$ 排放现状与控制技术[J]. 能源环境保护, 2011, 25(6): 1-4.
 [8] 张会君, 卢徐胜. $\text{PM}_{2.5}$ 控制的除尘技术概述[J]. 中国环保产业, 2012, (3): 29-33.
 [9] 杨志燕. 湿式电除尘器收集 $\text{PM}_{2.5}$ 微细粉尘的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.
 [10] 莫华, 朱法华, 王圣, 等. 湿式电除尘器在燃煤电厂的应用及其对 $\text{PM}_{2.5}$ 的减排作用[J]. 中国电力, 2013, 46(11): 62-65.
 [11] 刘鹤忠, 陶秋根. 湿式电除尘器在工程中的应用[J]. 电力勘测设计, 2012, (3): 43-47.
 [12] 沈浩. 湿式电除尘器用于控制燃煤烟气污染物的测评[J]. 电力与能源, 2014, 35(1): 54-58.
 [13] 杨继发, 王绪棠, 李彬彬, 等. 转动电除尘器应用分析[J]. 热力发电, 2010, 39(11): 85-87.
 [14] 张涛, 胡伟, 张雄图. 转动极板技术用于 600 MW 机组电除尘器提效改造[J]. 机械工程师, 2014, (11): 246-248.
 [15] 樊兴超. 直流-交流交替式高压静电除尘技术的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
 [16] 姚福德. 电除尘器对细颗粒脱除性能及凝并特性影响的实验研究[D]. 南宁: 广西大学, 2014.
 [17] 朱法华, 李辉, 王强. 高频电源在我国电除尘器上的应用及节能减排潜力分析[J]. 环境工程技术学报, 2011, 1(1): 26-32.
 [18] 李亚林, 王玉川. 排烟温度与静电除尘器除尘效率的关系[J]. 现代营销, 2011, (2): 100-101.
 [19] 熊桂龙, 李水清, 陈晟, 等. 增强 $\text{PM}_{2.5}$ 脱除的新型电除尘技术的发展[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2217-2213.
 [20] 依成武, 曲文明, 马帅, 等. 提高静电除尘器粉尘驱进速度方法研究[J]. 环境工程, 2010, 28(4): 49-52.
 [21] Wang Cheng-fu, Sh Xiao-dong. Harm and trapping strategy research on tiny dusts $\text{PM}_{2.5}$ [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 88/89: 503-508.
 [22] 冯涛, 许镭. 凝并区放电类型对电凝并装置去除亚微米粉尘效果的影响[J]. 黄河水利职业技术学院学报, 2012, 24(4): 24-26.
 [23] 王剑波, 陈招妹, 尹得仕. 一种有效减少 $\text{PM}_{2.5}$ 排放的微粒聚合器的性能研究[J]. 电力科技与环保, 2013, 29(1): 22-23.
 [24] 郇建国, 刘含笑, 姚宇平, 等. 电除尘器进口封头内设置凝聚器对流场的影响[J]. 电力与能源, 2014, (3): 362-365.
 [25] 李济吾, 李世远. 收尘区脉冲供电对电除尘器收集性能的影响[J]. 环境科学学报, 2011, (2): 399-403.
 [26] 孙晓荣. 放电环境与尘粒电凝并效应分析研究[D]. 保定: 河北大学, 2011.
 [27] 张磊, 李彦涛, 艾华. 燃煤锅炉烟气微细颗粒物控制技术[J]. 工业安全与环保, 2012, 38(6): 28-30.
 [28] 祝冠军, 周林海, 余顺利, 等. 燃煤电厂 $\text{PM}_{2.5}$ 及其治理技术[J]. 电站系统工程, 2012, 28(4): 19-20.
 [29] 白敏茵, 王少雷, 陈志刚, 等. 烟道荷电凝并电场对电捕集微细粉尘效率影响[J]. 中国环境科学, 2010, 30(6): 328-332.
 [30] 王成福. 提高工业微细粉尘捕集效率研究[J]. 环境工程, 2013, 31(2): 62-66. ■