

电厂 PM_{2.5} 排放现状与控制技术

代旭东, 徐晓亮, 缪明烽

(中环(中国)工程有限公司, 江苏, 南京, 210008)

摘要: 大气颗粒物特别是超细颗粒物 PM_{2.5} 对人体健康及环境会产生很大危害, 燃煤电厂是超细颗粒物的重要排放源。本文简要阐述了燃煤电厂超细颗粒物排放的现状, 并针对燃煤电厂重点介绍了超细颗粒物的排放控制技术, 包括传统的除尘器加湿法脱硫设施的除尘、混合除尘控制技术、以及在传统除尘器前设置团聚预处理装置的技术等。指出了各种技术的利弊、应用现状及应用前景展望。

关键词: 燃煤电厂; 超细颗粒物; PM_{2.5}

中图分类号: X131.1

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2011)06-0001-04

EMISSION STATUS AND CONTROL TECHNOLOGY OF ULTRA FINE PARTICLES IN COAL-FIRED POWER PLANTS

DAI Xu-dong, XU Xiao-liang, MIAO Ming-feng

(GCL Engineering Limited, Jiangsu, Nanjing, 210008)

Abstract: The atmospheric particles, especially ultra fine particulate matter PM_{2.5} will produce great harm on human health and the environment, coal-fired power plants is an important fine particulate matter emission sources. This paper describes the status of coal-fired power plants emissions of ultra fine particles, and highlights for the coal-fired power plant emissions of fine particulate matter control technologies, including traditional wet desulphurization facilities, plus ESP dust, mixed dust control technology, and set the reuniting pretreatment device before conventional filter, etc. Pointed out the pros and cons of various technologies, application status and prospect for application.

Keywords: coal-fired power plants, ultra-fine particles, PM_{2.5}

1 引言

大气颗粒物, 即大气气溶胶体系中分散的各种粒子。根据空气动力学等效直径大小, 可将其分为总悬浮颗粒物 (total suspended particles, TSP)、可吸入颗粒物和超细颗粒物。TSP 指的是粒径 < 100 μm 的所有颗粒物。可吸入颗粒物是指粒径 < 10 μm 的颗粒物, 用 PM₁₀ 表示^[1], 超细颗粒物是指粒径 ≤ 2.5 μm 的一类颗粒物, 用 PM_{2.5} 表示。

颗粒物越细即粒径越小, 分散度越高, 在空气

中稳定性越好, 越难以沉降。PM_{2.5} 在大气中的停留时间为 7~30 d, 不易扩散, 可以远距离传输, 成为导致环境恶化的重要因素。同时, 由于 PM_{2.5} 的比表面积大, 表面活性强, 吸附性强^[2], 很易于富集空气中的有毒重金属、酸性氧化物及有机污染物等, 其对人体健康的危害远比空气动力学直径在 2.5~10 μm 之间的粒子大。

燃煤排放 PM_{2.5} 不同于来源于自然的尘土等颗粒物, 通常富集各种重金属元素 (如 As、Se、Pb 和 Cr 等) 和 PAHs、VOCs 等有机污染物, 煤中所含有的微量元素可在燃烧产物上进一步迁移或富集

于这些细粒子上, 这些多为致癌物质和基因毒性诱变物质, 危害极大^[3]。

目前, 多数燃煤电厂均采用了较为先进的除尘设备和湿法烟气脱硫设施, 这些措施几乎能全部除去烟尘颗粒物中的粗粒子, 但对细粒子的脱除能力则很弱。尤其是采用湿法烟气脱硫工艺之后, 在某种程度上反而增加了可吸入颗粒物的排放量, 燃煤电厂已经成为可吸入颗粒物的主要排放源^[4]。

2 燃煤电厂超细颗粒物排放现状

经过对燃煤电厂电除尘器前后细灰组成进行研究, 发现, 除尘器前粉尘大颗粒占大多数, PM₁₀ 和 PM_{2.5} 占总灰百分比为 39.35% 和 2.42%, 而除尘器后高达 92.47% 和 35.56%, 说明电除尘器对细灰捕集效率不高, PM_{2.5} 除尘效率较低^[5]。从而造成在人为源中, 燃煤电厂排放可吸入颗粒物占据很大比例。据美国环保署的统计, 美国大气中 PM_{2.5} 约 32% 是由燃烧所产生的, 而燃煤电厂在燃烧源中占据了举足轻重的地位。美国能源日报文章认为燃煤电厂是大气中细微颗粒物的主要源头。另外, 根据统计, 在中国各行业中, 燃煤电厂排放的工业烟尘所占比例也是最高的。

我国是煤炭生产和消费大国, 目前煤炭占我国一次能源的 75% 左右, 在未来几十年内, 煤炭仍将是我国主要的一次能源, 由燃煤电厂排放的颗粒物已引起了各界广泛重视。陈灿云等对广州市 4 个功能区的夏季大气 PM_{2.5} 进行了监测, 结果表明: 广州市夏季 PM_{2.5} 的平均质量浓度为 97.54 μg/m³, 其中机动车排放和燃煤的贡献率分别为 54%~75% 和 32%~52%。石晓亮等研究了火电厂烟气排放对广州市大气环境的影响, 结果发现: (1) 所有观测到的烟尘颗粒物均属于可吸入颗粒物范畴, 在广州发电厂周围确实存在可吸入颗粒物污染; (2) 通过与参照点的对比, 燃煤发电厂确实会对周围大气环境造成污染, 火电厂排放的烟尘颗粒物是形成“灰霾天气”的重要污染物之一^[4]。

据美国国家能源技术实验室的数据, 美国燃煤电站锅炉的平均一次可吸入颗粒物排放质量浓度为 52.8 mg/m³ (干烟气, 6% O₂, 350 Nm³/GJ), 1970 年排放量超过了 160 万 t。尽管燃煤电厂采取控制措施, 1996 年将 PM₁₀ 的排放量降至约 26 万 t/a, 但其排放的一次可吸入颗粒物仍是造成空

气能见度降低、酸雨和酸沉降的主要原因。

3 燃煤电厂超细颗粒物控制技术

3.1 传统控制技术

对于火电厂颗粒物排放的控制技术, 目前仍是以静电除尘器为主, 并在其下游安装湿法烟气脱硫装置。一个带有高效静电除尘器 (ESP) 或袋式除尘器的燃煤电厂, 可以将排放出的颗粒粒径很好地控制在 PM₁₀ 以内。湿式烟气脱硫 (WFGD) 洗涤器也可以捕获颗粒物 (除尘效率约 75%), 它可以将颗粒大小控制在 PM_{3.5} 以内, 其中大部分是 PM₁。联合使用 ESP 和 WFGD 可以使除尘率达到 99.99%^[6]。不论是除尘器还是 WFGD 系统, 对较大粒径颗粒物有很高的收集效率, 但对大量细微颗粒物的收集效率并不高。

王瑛等进行了湿法脱硫系统对烟气中细颗粒物脱除作用的实验研究, 结果表明: WFGD 对总飞灰颗粒物平均有 74.5% 的脱除效率, 但对于粒径小于 2.5 μm 的可吸入颗粒物的脱除效率并不高, 并且随着粒径的减小脱除效率明显下降。在 WFGD 系统入口处飞灰颗粒物呈典型的双峰分布, 峰值出现在 1 μm 和 3 μm 处; 经过 WFGD 系统的喷淋洗涤后, 烟气中颗粒物的粒径分布峰值向小粒径方向迁移, 且细颗粒成分明显增加, 中位径由入口处 3 μm 减少到出口处的 1 μm, 质量比 W(PM_{2.5})/W(PM₁₀) 的值由入口的 0.434 显著增加到出口的 0.764^[7]。

进一步研究发现, WFGD 系统虽然可以有效降低总颗粒物浓度, 但在某种程度上反而增加了超细颗粒物的排放量。丹麦两个燃煤电厂 (Nordjylland 电厂和 Avedore 电厂) 采用石灰石-石膏湿法脱硫工艺, 虽然脱硫吸收塔使总的粉尘浓度降低了 50%~80%, 但 PM₁ 浓度却提高了 20%~100%。这是因为湿法脱硫吸收塔脱除了部分粗颗粒, 却提高了细颗粒的浓度, 这些细颗粒是除雾器无法除去的湿法脱硫烟气中的细小液滴干燥后产生的浆渣。此外, 湿法脱硫工艺对烟气中的 SO₂ 有较高的脱除效率, 但对烟气中 SO₃ 的脱除效率并不高。这是因为当烟气通过空气预热器时烟气温度骤然降低, SO₃ 与水反应生成 H₂SO₄ 气溶胶, 这些气溶胶比较容易穿透吸收塔的喷淋层和除雾器, 因而 SO₃ 的脱除效率一般低于 50%。由于湿法烟气脱硫系统排出的净烟气温度较低, 处于酸露点以下, 因此, 烟囱排出的 SO₃ 主要以硫酸气溶胶

状态存在,这些硫酸气溶胶会与大气中的其他物质反应,产生二次可吸入颗粒物。

因此,针对湿法脱硫工艺所造成的可吸入颗粒物排放量增加,目前正在探索的解决方法是采用在吸收塔下游安装湿式电除尘器,减少硫酸气溶胶和微细粉尘的排放,但由于目前大容量湿式电除尘器技术尚未成熟,存在结构复杂、造价昂贵等问题,因此,还没有达到工程应用阶段。

3.2 混合除尘控制技术

(1) 静电加旋风

旋风除尘器是一种传统的除尘设备,主要靠高速旋转运动的气流产生的离心力对颗粒进行分离,具有结构简单、造价低廉等特点。但其对细粒的控制作用较弱。静电增强旋风分离器的基本思想就是在旋风分离器空腔主轴上加入电晕极,在其周围能产生较高的电子密度 N_i 和较强的电场力 E ,若近似地将其看作是串联,那么在下行流区旋风分离起主要作用,脱除掉较大的颗粒,未能分离的小颗粒将随气流进入上行区,上行区离电晕极较近,这将使其受到更强的电场力而径向运动到下行流区直至撞到壁面被捕获。由于下行流区同样受静电力的作用,对大颗粒的分级效率也提高。王志等的实验显示,电场为 10~25kV 时,当风速达到 16 m/s 时,总效率与不加电场时相同。但总的来说,在较大一个风速范围内,效率随着风速的降低会有所升高,而且高速气流能起到清灰作用,能有效防止后电晕发生,对各种比电阻都有较好的适应性。

(2) 静电加颗粒层除尘器

颗粒层除尘器是利用粒状物料(通常是 1.5~5 mm 石英砂)作为过滤介质净化烟气的除尘设备,在水泥、炼焦、化工和冶金业得到广泛运用。其具有耐高温和高效性等特点,在 IGCC 和 PFBC 燃煤联合循环发电系统燃气轮机入口烟气净化方面得到了重点研究。但这种方式主要还是依靠扩散、惯性碰撞和拦截作用,所以其对 PM_{2.5} 的脱除并不好。

(3) 静电加布袋

静电除尘器后的烟气中颗粒已经很少,加上由于这些颗粒都带有相同电荷而相互排斥,能在滤袋表面形成更多孔隙和凝并的颗粒层,从而过滤阻力较小,表面清灰容易,脉冲清灰时间增加,能耗降低,并且颗粒带电又增强了粉尘层和纤维层对细颗粒的作用,其机理类似于前述电场增强

颗粒层除尘器。ESP 与布袋除尘的结合,通过调整各自负荷,还可以适应更广泛性质的尘粒。另外,鉴于 ESP 除去了大部分的颗粒,可在 ESP 后喷入吸收剂脱除 SO₂、Hg 等污染物,然后吸收剂进行多次循环利用,可以提高协同脱除效率和吸收剂使用率^[8]。

3.3 团聚技术

由于传统的除尘方式难以控制超细颗粒物的排放,在传统除尘器前设置预处理阶段使超细颗粒物通过物理或化学的作用团聚成较大颗粒后加以清除将成为除尘技术发展的趋势,因而研究超细颗粒物团聚具有特别重要的意义。超细颗粒物团聚促进技术主要有电团聚、声团聚、磁团聚、热团聚、湍流边界层团聚、光团聚和化学团聚等。

(1) 电团聚

电团聚是提超细颗粒物团聚的有效方法之一。这种方法通过增加超细颗粒物的荷电能力,促进超细颗粒物以电泳方式到达飞灰颗粒表面的数量,从而增加颗粒间的团聚效应。电团聚研究主要概括为四个方面:异性荷电粉尘的库仑团聚,异性荷电粉尘在恒电场中的团聚,同性荷电粉尘在交变电场中的团聚,异性荷电粉尘在交变电场中的团聚。研究发现:异性荷电粉尘在交变电场中的团聚作用远大于同性荷电粉尘在交变电场中的团聚。

采用电团聚技术能够使电除尘器除去超细颗粒物的效率大为提高,但除尘极板捕捉的颗粒累计一定数量后,效率大大降低了,需用燃烧法再生,这限制了电团聚技术在工业中的使用^[9]。

(2) 声团聚

声团聚是根据声学原理,利用具有很高能量密度的声区,使超细颗粒物发生团聚。实验室运用声团聚理论的除尘装置一般由声波发声器、声团聚箱和分离器组成。18 世纪末, Konig 提出了声场挟带微粒的理论。此后,很多学者对颗粒在声场中的振动、团聚进行了研究,在团聚机理及理论模型的建立方面也进行了大量的工作。但由于声波团聚问题的复杂性、实验条件不同和测试方法的局限性等,使得至今为止,在一些关键性问题上还没取得一致的看法,甚至有的结论还相互矛盾致使这项技术仍处于试验阶段。

声团聚技术的研究已逾百年,由于声团聚方法收集亚微米粉尘是有效的,曾一度引起人们的极大关注。但是为了产生几十甚至几百千赫的声波,

需耗费大量的电能,同时还需要消除噪声的危害,因此到目前尚未制造出实用的声团聚除尘器^[10]。

(3) 热团聚

热团聚又称为热扩散团聚,是指超细颗粒物在没有外力、温度较高的环境下产生明显的成核和团聚的现象。

通常,对于烟尘浓度高,粒径相差较大的颗粒物,热团聚的效果比较明显。但是热团聚的团聚过程十分缓慢,因而难以在工业中得到应用。

(4) 湍流团聚和梯度(边界层)团聚

湍流团聚就是超细颗粒物在湍流的射流中有明显的成核和凝聚现象,而且成核和凝聚的颗粒将进一步长大。梯度团聚是由于横向速度梯度引起的碰撞而导致的团聚现象,在边界层的横向速度梯度最大,故梯度团聚也称为边界层团聚。

湍流团聚和梯度团聚在高温下,或雷诺数较大时效果才比较明显;因此,这类团聚技术有一定的局限性。

(5) 磁团聚

磁团聚指的是强磁性颗粒经磁场作用,即磁选或预磁后,由于其剩磁的相互作用而产生的团聚现象。磁团聚技术应用于生产实践已有很长的历史。如物料的提纯、磁力选矿等,20世纪80年代开始了磁团聚除尘的应用研究。但到目前为止,关于磁团聚除尘的研究还很少。

磁团聚除尘对收集亚微米粒子的效率是极高的,目前的主要问题是如何高效收集弱磁性尘粒,以及如何清除和解磁附着在面上的被收集的粒子。

(6) 光团聚

光团聚的方法是应用光辐射的原理促进颗粒物团聚。超细颗粒物团聚遵循如下过程:入射电子束→等离子体膨发→等离子体云膨胀→成核→冷凝膨胀长大+等离子体云膨胀→凝结→不规则片状形→团聚→凝胶化。

通过改变激光传播的折射角、光的强度等多种参数可以促使超细颗粒发生团聚。但其成本相当大,目前还不可能大规模利用。

(7) 化学团聚

化学团聚是指使用固体吸附剂捕获超细颗粒物的除尘方法,主要通过物理吸附和化学反应相结合的机理来实现的。在化学团聚的煤燃烧高温条件下能够稳定存在的吸附剂,不仅和超细颗粒

物反应生成较大粒径的颗粒,还能为气态物质提供凝结面。目前,国内对超细颗粒物的化学团聚方法研究很少;而国外也主要研究高岭石、铝土矿和石灰石等常用吸附剂对超细颗粒物团聚的影响作用。

化学团聚对除去超细颗粒物不仅十分有效,而且可以实现多种污染物同时脱除。并且由于是在除尘设备前对超细颗粒物进行团聚,对正常生产条件和除尘设备的正常操作影响较小^[11]。

4 结语

大气颗粒物特别是超细颗粒物 PM_{2.5} 对人体健康及环境会产生很大危害,燃煤电厂是超细颗粒物的重要排放源。目前,多数燃煤电厂均采用了较为先进的除尘设备和湿法烟气脱硫设施,这些措施几乎能全部除去烟尘颗粒物中的粗粒子,但对细粒子的脱除能力则很弱。对燃煤电厂超细颗粒物的排放控制应根据实际情况,在现有除尘器及湿法脱硫设施的基础上,采用更加先进的混合除尘技术。鉴于超细颗粒物难以有效去除,在传统除尘器前设置团聚预处理环节使之成为较大颗粒后加以清除将成为除尘技术发展的趋势,超细颗粒物团聚的研究与应用将具有特别重要的意义。

参考文献

- [1] 张楚莹,王书肖,赵瑜,郝吉明. 中国人为源颗粒物排放现状与趋势分析. 环境科学, 2009, 30(7): 1881~1887.
- [2] 高永华, 宏哲. 燃煤电厂超细粉尘的危害及控制. 能源环境保护, 2010, 24(3): 5~8.
- [3] 赵承美, 孙俊民, 邓寅生, 鲁静. 燃煤煤灰中细颗粒物(PM_{2.5})的物理化学特性. 环境科学研究, 2004, 17(2): 71~80.
- [4] 郑进朗, 潘雪琴, 马果骏. 燃煤电厂的可吸入颗粒物排放. 电力环境保护, 2009, 25(1): 53~55.
- [5] 刘建忠, 范海燕, 周俊虎, 曹欣玉, 岑可法. 煤粉炉 PM₁₀/PM_{2.5} 排放规律的试验研究. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 145~149.
- [6] 徐杰英, 刘晶, 郑楚光. 燃烧源超细颗粒物的研究进展. 煤炭转化, 2003, 26(4): 16~20.
- [7] 王瑛, 宋蕾, 姚强, 陈昌和. 电厂湿法脱硫系统对烟气中细颗粒物脱除作用的实验研究. 中国电机工程学报, 2008, 28(5): 1~7.
- [8] 尚伟, 黄超, 王菲. 超细颗粒物 PM_{2.5} 控制技术综述. 环境科技, 2008, 21(2): 75~78.
- [9] 向晓东, 陈旺生, 幸福堂等. 交变电场中电凝并收尘理论与实验研究. 环境科学学报, 2000, 20(2): 28~42.
- [10] 郑世琴, 刘淑艳, 黄虹宾等. 用分形理论处理煤飞灰颗粒在声场中的团聚现象. 燃烧科学与技术, 1999, 5(2): 168~174.
- [11] 魏凤, 张军营, 王春梅, 郑楚光. 煤燃烧超细颗粒物团聚促进技术的研究进展. 煤炭转化, 2003, 26(3): 27~31.