

燃煤电厂粉尘超净排放控制技术 研究现状与进展

郭凯岳, 苏伟*, 宋存义, 童震松, 吴雪娜

(北京科技大学能源与环境工程学院, 北京 100083)

摘要:介绍了电除尘技术、电袋复合除尘技术、覆膜滤料布袋除尘技术、团聚技术及其在燃煤电厂粉尘超净排放控制中的应用,并结合国内外研究现状对今后的研究方向进行了展望,指出了粉尘超净排放控制技术的发展趋势。

关键词:粉尘;超净排放;电除尘技术;覆膜滤料;团聚

中图分类号:X513

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2017)01-0014-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2017.01.004

Research status and progress of ultraclean dust emission control technology from coal-fired power plant

GUO Kai-yue, SU Wei*, SONG Cun-yi, TONG Zhen-song, WU Xue-na

(School of Energy and Environmental Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The electrostatic precipitation technology, electrostatic fabric filter technology, membrane filter media bag filter and aggregate technology are introduced. Their applications in the ultraclean dust emission control of coal-fired power plant are also described. The research directions in the future are proposed. The development trends of ultraclean dust emission control technology are put forward as well.

Key words: dust; ultra-clean emission; electro-dust removal technology; membrane filter; agglomeration

近年来我国多地常常发生雾霾天气,且覆盖范围广持续时间长,严重危害了社会环境和人们的身体健康。引起雾霾的PM_{2.5}等细颗粒物中常常富集各种重金属元素和多环芳烃类、二噁英等有机污染物是诱发呼吸系统疾病的“罪魁祸首”^[1]。在我国燃煤电厂仍然是大气污染物的主要排放源,据统计大约70%的粉尘排放来自燃煤电厂,而截至2014年底全国火电装机达到9.1亿kW^[2],可见燃煤电厂若实现粉尘减排对于环境的贡献无疑将是巨大的。环保部颁布的最新《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011)要求火力发电锅炉烟尘浓度限值达到30 mg/m³,重点地区达到20 mg/m³^[3]。在2015年底国家发布了《关于实行燃煤电厂超低排放电价支持政策有关问题的通知》和《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》,要求到2020年,我国具有改造条件的燃煤电厂力争完成超净排放,烟尘排放浓度不高于10 mg/m³。如此严苛的粉尘超净排放条件要求,对我国烟尘治理技术提出了严峻的考验。

目前,传统的烟气处理工艺已经无法满足超净排放的需求,现在主要采用提效改造除尘和新式除尘技术实现烟尘治理。研究应用较多的是电除尘技术、电袋复合除尘技术、覆膜滤料布袋除尘技术、团聚技术等。

1 电除尘技术

1.1 低低温静电除尘技术

低低温静电除尘技术是在传统除尘器基础上改进而来的,该技术在日本应用较成熟,它是通过在电除尘器前增加烟气换热器或低温省煤器来使除尘器入口烟气温度和粉尘的比电阻降低,防止反电晕现象出现,从而提高除尘效果的技术。研究表明,采用低温省煤器时大约可节省5%左右的能耗^[4]。Xiong等^[5]测试表明,当烟气温度由150℃降低到100℃左右时,烟尘的比电阻可降低1~2个数量级,使飞灰比电阻值降至10¹¹ Ω·cm以下,产生反电晕的概率极大降低,提高了收尘效率。低低温静电除尘技术具有良好的细颗粒物脱除效果,除尘效率可

收稿日期:2016-04-18

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRE-TP-15-051A1)

作者简介:郭凯岳(1990-),男,硕士生;苏伟(1982-),男,博士,讲师,主要从事大气污染控制方向研究,通讯联系人,010-62333434, suwei3007@163.com。

达 99.5%,又兼有余热利用节能的特点,可以去除烟气中大部分的 SO_3 ,有利于防止酸雨的发生。

粉尘比电阻的降低会减弱捕集到阳极板上粉尘的静电黏附力,造成二次扬尘现象的发生。对于低低温静电除尘技术的二次扬尘问题何毓忠等^[6]研究认为,采用旋转阳极和清灰刷的除尘方式有效避免了阳极板的振打,可解决二次扬尘问题;采用离线振打技术可以将振打电场隔离,使振打气流减小、电压降低,也能有效解决二次扬尘问题。然而燃煤电厂煤种变化大和高硫煤的使用都可能带来灰斗腐蚀、堵灰、阴极线材料和入口门附近的腐蚀问题。郦建国等^[7]对于灰斗的设计提出灰斗板材宜采用 ND 钢或厚度大于 2 mm 内衬不锈钢板,卸灰角度大于 65° 。可以解决由于 SO_3 黏附在粉尘上使收集下来的灰流动性差、腐蚀严重的问题。何毓忠等^[8]根据灰硫比定义和 SO_3 在粉尘表面黏附的规律,推导出了燃煤电厂低低温电除尘技术烟气处理的灰硫比估算公式和 SO_3 流量的估算公式。为合理控制灰硫比、防止除尘器腐蚀和设计提供了重要参数。Menéndez 等^[9]为了达到增加绝缘体抗腐蚀等性能的目的,使用高强度电瓷和高铝瓷绝缘体,其性能极好,能够满足所有静电除尘工作环境,抗老化腐蚀性能优越,具有良好的经济效益。

1.2 旋转电极除尘技术

旋转电极除尘技术最早研发应用是在 1979 年日本的日立公司,经过 30 多年的发展,日本已广泛应用于 150~1 000 MW 级的燃煤机组上,近年来由于其对细颗粒物良好的去除效果在国内也开始得到开发应用。旋转电极除尘技术是常规电除尘技术改造的一种,不同的是二者的清灰方式有着极大的区别,常规电除尘采用振打、喷吹等方式来达到清灰的目的,而旋转电极除尘技术是阳极板在驱动轮的带动下缓慢地上下转动,通过转动刷将灰尘清理落入灰斗。赵永水^[10]、赵海宝等^[11]认为旋转电极除尘技术使用旋转钢刷清灰,根本上避免了振打清灰导致的“二次扬尘”问题,而且还能避免出现高比电阻粉尘的“反电晕”现象,不仅可以提高除尘效率还可减少 PM_{2.5} 的排放,是实现粉尘超净排放的有力武器。

旋转电极除尘技术能够大幅度地提高细颗粒物的捕集效率,王磊^[12]研究发现,电除尘器的末电场由旋转电极代替固定电极,除尘效率可以提高 20% 左右,电场中粉尘的趋近速度也提高了 2~3 倍。此外他还指出,为了保证除尘器能带上足够高的工作

电压,阴、阳极间距误差应该控制在 10 mm 之内。姚宇平等^[13]设计并搭建了一种用于旋转电极式电除尘器清灰刷的实验装置,对实验 1 个月的数据进行分析,得出某国产清灰刷的失效形式为磨损,原因是磨料磨损。为了解清灰刷失效机理和影响因素及清灰刷的优化设计奠定了基础。现阶段的研究依然没能解决旋转电极除尘器机构复杂、对设备工艺安装要求高的问题,以及由于旋转极板和清灰刷转动带来的漏风率大的影响,所以后续的研究应该围绕这个方向深入进行。

1.3 高频电源技术

高频电源技术最早由美国学者 Liberati Guglielmo 在 1993 年开发研究,至今发展日趋成熟。高频电源技术是将三相工频电源直接整流变成直流电,经过逆变电路产生高频交流电,再由整流变压器升压整流后变成高频脉动电流,高频电源工作频率最高可达 50 kHz。高频电源是新型除尘器供电电源,其宽度、频率脉冲高度均可以调整,控制方法灵活,能够针对不同工况条件为电除尘器提供最适合的电压波形。国内研究表明,高频电源电能转换效率可达 90% 以上,极大增加了粉尘的荷电能力,具有广阔的市场空间^[14]。

高频电源技术效率高、节能显著,非常适合当下节能减排的趋势,崔明等^[15]研究表明,电除尘器配高频电源供电条件下,电除尘器能够将烟尘排放浓度有效降低 40%~60%,和工频电源相比能够节约电耗 40%~80%。孙虹等^[16]也证明高频电源采用逆变方式,可以输出脉冲宽度为微秒级的脉冲电流供给电除尘器,提高粉尘的荷电能力,极大增加了电除尘器的除尘效率,可降低粉尘排放 40%~70%。刘宏伟^[17]研究认为,高频电源转换效率可达 94% 以上,在相同除尘效率情况下,相较于工频整流变压器电源,高频电源节能约 20% 以上。同时针对三河电厂的 4 号机组采用 HFR-II 型综合控制高频电源系统改造效果考察,显示出口烟尘浓度为 17 mg/m^3 ,满足新的环保要求。高频电源技术实现的关键在于其控制系统的研究,孙建平等^[18]在变频调压闭环控制策略的基础上引入了模糊自适应 PID 控制算法。该控制与常规 PID 控制比较有更好的动态性能,控制精度高,过渡时间短,抗干扰能力强,能较好地适应非线性负载,有利于高频电源操控系统实现优化控制。

由于高频电源输出电压高于常规除尘器,对高频电源的控制程序及其元器件等提出了更高的

要求。

1.4 湿式电除尘技术

湿式电除尘技术是一种富有成效的细颗粒物脱除技术,其工作原理与一般静电除尘器类似,不同的是湿电除尘技术采用水流冲洗电极的方式来完成清灰过程,无二次扬尘,适合处理湿烟气,对酸雾、PM10、重金属,特别是 PM2.5 有良好的脱除能力。Chen 等^[19]在 15 kV 的电场中分别对有无细水雾 2 种情况下对纳米粒子进行脱除实验,结果在没有喷洒细水雾的条件下纳米粒子的去除率是 67.9% ~ 92.9%,当有细水雾喷洒时湿电除尘器效率提高到了 99.2% ~ 99.7%,对纳米粒子的捕集可以达到超净排放的标准。可见湿电除尘技术可以控制电厂微细粉尘和 SO₃ 酸雾的排放,并且还具有联合脱除重金属^[20]的优点。湿式静电除尘器由于烟气中含有 SO₃ 等酸性液滴,所以电极和极板在工作中存在一定的腐蚀问题。

湿式电除尘技术是现阶段研究广泛的一种除尘技术,Moser 等^[21]通过对电厂除尘系统 28 000 h 的监测运行指出,湿式电除尘器对控制气溶胶酸雾的发生是非常理想的选择,但他还认为空气在高压电场的作用下生成臭氧会使烟气中部分 SO₂ 氧化成 SO₃,使酸性气溶胶细颗粒物增加。D'Addio 等^[22]研究发现,湿式静电除尘器对燃烧产生的亚微米级的粒子也能有效地去除作用。实验采用一种新的装置来代替传统喷雾模式,来评估对不同粒径和电荷的粒子脱除效果,该模型的建立可以为湿式静电除尘器设计提供参考。丁志江等^[23]选取 480C 型板配 RS 芒刺电晕线的极配形式,在不同的试验条件下,对湿式电除尘器的电晕放电特性和收尘进行了研究,表明伏安特性曲线随喷水量增大逐渐向上偏移变陡。起晕电压受喷水量的影响变化较小,火花放电电压随着喷水量的增大先增大后减小。且当电场风速为 1.0 m/s,相同收尘面积电除尘器的收尘效率湿式比干式的高出 4% 左右。

湿电除尘技术研究进展迅速,通过一系列的研究将会为湿电除尘器优化参数设计、克服自身缺点和未来电厂的推广应用提供很大的帮助。

2 其他除尘技术

2.1 电袋复合除尘技术

电袋复合除尘技术是结合了电除尘和袋式除尘的优点而研发的一种新式除尘技术,近年来,由于其具有高效减排可满足新标准的要求的突出优点而引

起关注。1970 年电袋复合除尘技术在美国研发成功,我国燃煤电厂在 2000 年之后开始进行工程应用,到现在已有 400 多套投入使用,运行效果较好。徐少波等^[24]通过对沙角某电厂 2 号炉电除尘器改造实例的研究表明,电袋复合除尘器出口烟尘浓度为 3.70 mg/m³,提效显著,实现了小于 5 mg/m³ 的超低排放。孙超凡等^[25]通过对珠海电厂电袋复合除尘器除尘效果监测表明,电袋除尘器出口烟尘排放浓度保持在 2.4 ~ 10.0 mg/m³,PM2.5 的捕集效率达到了 99.89% ~ 99.96%,排放质量浓度低,满足新的环保要求。

电袋复合除尘技术因为其具备简化工艺、节约占地面积、降低投资、运行费用低等优点成为近年来学者们的研究重点。丁奇岨等^[26]在电袋除尘器静电区 45 kV 电压下通过对粒径为 0.5、1.5、2.5 μm 粒子在电场中的运动轨迹进行数值模拟,认为粒子在静电区停留时间为 4.2 s,速度为 1.376 m/s 时捕集效率最高。蔡晨阳等^[27]采用一种独特的线筒式电晕放电来模拟其电场,通过不同因素影响下电场伏安特性的变化绘制曲线,发现放电电流和功率大小与圆筒个数和圆筒直径的变化呈正相关,与线筒间距及电晕线曲率半径的变化呈负相关,为电袋除尘器电场研究提供了可参考的模型。

2.2 覆膜滤料布袋除尘技术

布袋除尘技术是一种应用广泛的高效除尘技术,但是由于超净排放的提出,传统布袋除尘器已然不能达到新的排放标准,而随着聚四氟乙烯(PTFE)覆膜滤料的出现使布袋除尘效率有了极大的提高。覆膜滤料薄膜孔径为 0.3 ~ 0.5 μm,能拦截很细的颗粒,仅仅依靠表面过滤就可达到极高的除尘效率,而且薄膜表面光滑,粉尘能自然剥落,不会形成较厚的粉尘层,清灰次数大大减少。

近年来,众多学者通过研究证明了 PTFE 覆膜滤料在达到超净排放方面有着很好的应用价值。薛婷婷等^[28]对 PPS 纤维表面做 PTFE 覆膜处理后对 PM2.5 在常温下的过滤情况进行了研究,发现过滤风速为 1 m/min 时 PPS 纤维滤料表面做覆膜处理后过滤效率提高了 29%。在 0.5 ~ 3.0 m/min 的范围内 PM2.5 排放量下降了 56%。聂雪丽等^[29]进行覆膜滤料动态除尘性能测试,发现覆膜滤料清洁阶段过滤效率达到 99.9% 以上,穿透率为 0.004%,稳定阶段的过滤效率达到 99.99% 以上,穿透率为 0.000 3%。王国华等^[30]发现烟气经传统滤料除尘后其出口粉尘浓度为 25 mg/m³,而经过 ePTFE 膜除

尘后出口浓度为 2 mg/m^3 , 远远低于传统滤料的出口粉尘浓度, 非常适合超净排放的要求。

目前来看 PTFE 覆膜滤料的工程应用案例还不多见, 主要原因是覆膜滤料过滤阻力大导致压力损失较高, 如果能在如何降低压力损失方面取得突破, 覆膜滤料的应用必会更加广泛。

2.3 团聚技术实现超净排放

团聚技术是通过一定的理化作用使细颗粒物团聚成较大颗粒物后, 利用现有的除尘技术加以清除, 从而达到细颗粒物的超净排放的技术。现阶段研究较广的有化学团聚技术、电凝并技术、水汽相变团聚技术、声凝并技术、磁凝并等技术, 并且取得了较好处理效果。刘勇等^[31]研究发现添加化学团聚剂后, 脱硫液细颗粒物粒径变大, 浆液中小于 $2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物从 6.65% 降低到 4.12%, 相对数量浓度降低 38%, 处理效果明显提高。潘丹萍等^[32]表明添加适量蒸汽及湿空气均可以使亚微米级细颗粒迅速长大到 $2 \sim 3 \mu\text{m}$, 能促进湿法脱硫烟气中 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_3 酸雾的有效脱除。马德刚等^[33]研究了声凝并联合雾化预处理的除尘效果。结果表明, 在中等强度声场和合适的加湿浓度及雾粉比的条件下, 对 $\text{PM}_{2.5}$ 范围内细颗粒物有较好的凝并去除效果, 而且在一定范围内声压级越高, 加湿量越高, 去除效率越高。竹涛等^[34]指出电凝并技术作为预处理技术能使 $\text{PM}_{2.5}$ 等细颗粒物粒径增大数倍, 使其较容易捕集, 并且电凝并技术有处理气体量大、适应性好等特点, 具有广阔的市场前景。

团聚技术虽然在处理超细粉尘的研究中取得了一定的进展, 但是仍然存在很多问题。在团聚技术控制机理上研究薄弱, 不确定因素较多, 工程应用上有很多不足, 如何保证除尘系统稳定, 控制投资运行成本依然是亟待解决的问题。

3 总结及展望

在控制燃煤电厂粉尘的超净排放上, 新式的电除尘技术、电袋复合除尘技术、团聚技术等已经显示出了高效的处理效果, 为解决当下“雾霾”问题提供了可靠的技术保障。然而每种技术都有其特有的优缺点, 需要根据现场实际情况合理运用, 根据现阶段的研究情况提出以下几点建议。

(1) 除尘器改造部分仍然处在实验研究阶段, 工业化问题有待进一步验证, 需加强除尘机理研究, 建立相关的反应动力学模型, 为除尘器改造奠定理论基础。

(2) 面对日益苛刻的环保标准, 应该开发多种技术路线并用, 联合协同治理烟尘, 实现超净排放。例如开发高效电袋除尘 + 湿法脱硫 + 湿电除尘技术的协同脱硫除尘技术路线能更加有效地实现多种污染物的超净排放。

(3) 现阶段实现超低排放技术改造难度大、一次投资成本高、运行维护费用高、稳定性难以保证是制约其发展的很重要因素, 因此如何从技术研发上解决上述问题是今后研究的一个重要方向。

参考文献

- [1] 高永华, 宏哲. 燃煤电厂超细粉尘的危害及控制[J]. 能源环境保护, 2010, 24(3): 5-8.
- [2] 赵永椿, 马斯鸣, 杨建平, 等. 燃煤电厂污染物超净排放的发展及现状[J]. 煤炭学报, 2015, (11): 2629-2640.
- [3] GB 13223—2011. 火电厂大气污染物排放标准[S].
- [4] 赵海宝, 郦建国, 何毓忠, 等. 低低温电除尘关键技术研究与应用[J]. 中国电力, 2014, (10): 117-121.
- [5] Xiong G, Li S, Chen S, et al. Development of advanced electrostatic precipitation technologies for reducing $\text{PM}_{2.5}$ emissions from coal-fired power plants[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2015, 35(9): 2217-2223.
- [6] 何毓忠, 赵海宝, 郦建国, 等. 低低温电除尘器二次扬尘分析及解决措施[J]. 环境工程, 2016, (1): 65-68.
- [7] 郦建国, 郦祝海, 何毓忠, 等. 低低温电除尘技术的研究及应用[J]. 中国环保产业, 2014, (3): 28-34.
- [8] 何毓忠, 赵海宝, 郦建国, 等. 低低温电除尘器灰硫比计算及中国煤种分析[J]. 环境工程, 201, (2): 76-79.
- [9] Menéndez F, Gómez A, Voces F, et al. Porcelain insulators in electrostatic precipitator[J]. Journal of Electrostatics, 2015, 76: 188-193.
- [10] 赵永水. 燃煤电厂 $\text{PM}_{2.5}$ 微细颗粒物控制新技术——转电极式电除尘性能特点及安装技术[J]. 能源环境保护, 2012, 26(4): 1-5.
- [11] 赵海宝, 王贤明, 姚宇平, 等. 旋转电极式电除尘布置方式研究及应用[J]. 浙江电力, 2015, (12): 51-54.
- [12] 王磊. 旋转极板电除尘器与电袋除尘器技术经济分析[J]. 华电技术, 2014, 36(6): 73-76.
- [13] 姚宇平, 赵海宝, 何毓忠, 等. 旋转电极式电除尘器清灰刷寿命实验方法设计[J]. 环境工程学报, 2015, (10): 4971-4976.
- [14] 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): 26-32.
- [15] 崔明, 左明, 宋伟. 火电企业大气污染物排放对环境危害及减排对策[J]. 科技与企业, 2016, (2): 93-95.
- [16] 孙虹, 王伟, 祁建民, 等. 火电厂电除尘用高频高压电源的研究[J]. 现代电子技术, 2015, (2): 149-151, 157.
- [17] 刘宏伟. 机组不停机条件下的电除尘器高频电源改造[J]. 华北电力技术, 2015, (2): 45-49.
- [18] 孙建平, 郭曼利. 基于模糊自适应 PID 的 ESP 高频电源控制系统研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2015, (8): 160-162.

水蒸汽等气体在 700 ~ 1 000℃ 高温下,通过氧化反应将炭化物进一步气化^[4]。水蒸汽比二氧化碳具有更强的氧化作用,因此制备的活性炭比二氧化碳活化含有更多的含氧官能团,常用于重金属阳离子去除^[5]。González 等^[6]用水蒸汽活化法制备竹基活性炭吸附 Hg^{2+} 、 Cd^{2+} 。结果表明,当活性炭比表面积、总孔容、微孔孔容、表面酸性含氧官能团分别为 608 m^2/g 、0.69 cm^3/g 、0.11 cm^3/g 、1.25 meq/g 时;孔隙结构以中孔为主, Hg^{2+} 、 Cd^{2+} 的最大吸附容量分别为 248.05、239.45 mg/g 。

生物质中含有硫、氮、氧、氢、磷、氯等杂原子,在炭化过程中形成包括碳在内的活性位点,具有一定的酸碱性,有利于对重金属离子的吸附。但由于物理活化温度较高、反应时间较长,绝大多数官能团在活化过程中被分解,制备的活性炭表面往往呈现弱酸性或弱碱性^[7]。Anoop 等^[8]降低活化温度、缩短活化时间(活化温度为 600℃,活化时间为 2 h),用水蒸汽活化制备甘蔗渣基活性炭吸附 Ni^{2+} ,制备的活性炭比表面积、阳离子交换能力、表面酸性含氧官能团、灰分分别为 536.5 m^2/g 、3.96 meq/g 、2.30 meq/g 、5.22%, Ni^{2+} 的最大吸附容量 140.85 mg/g 。甘蔗渣为软壳类木质纤维素,灰分(K、Na、Ca等)含量较高,不利于制备较大比表面积的活性炭,但表面酸性

含氧官能团含量较高,提高了阳离子交换能力,同样增加活性炭对 Ni^{2+} 的吸附量。

1.2 化学活化法

化学活化法是通过活化剂与炭化料或原材料之间的一系列交联、缩聚反应,再经过化学药品洗脱步骤而产生丰富的孔隙结构^[9]。目前应用较多、较成熟的活化方法有 H_3PO_4 活化法、 ZnCl_2 活化法等^[10]。

H_3PO_4 活化法包括浸渍和活化 2 个阶段。通过浸渍阶段的脱水和酸催化作用,使大量纤维发生水解,形成纤维磷脂;活化阶段在磷酸促和下发生缩聚反应而芳构化,形成含有丰富孔隙的类似石墨的微晶结构^[10]。Alexander 等^[11]以杏核和桃核混合为原料,活化温度 400 ~ 1 000℃,浸渍比 0.63 ~ 1.02,采用 H_3PO_4 活化法制备的活性炭均具有较大的阳离子交换能力(CEC),最大的 CEC(2.2 mmol/g) 在 800℃ 获得,这主要与形成的含磷稳定官能团(主要为多磷酸盐与碳形成的 P—O—C 键)有关,除此之外还有少量的羧基、内酯基和酚基。因此, H_3PO_4 活化法制备活性炭用于重金属阳离子的吸附具有明显的优越性。然而,活性炭对重金属离子的吸附效果不仅取决于表面官能团的种类和数量,还受孔隙结构分布的影响。研究表明,活性炭吸附利用率最高

(上接第 17 页)

- [19] Chen T, Tsai C, Yan S, *et al.* An efficient wet electrostatic precipitator for removing nanoparticles, submicron and micron-sized particles [J]. *Separation and Purification Technology*, 2014, 136: 27 - 35.
- [20] Dang H, Liao Y, Ng T W, *et al.* The simultaneous centralized control of elemental mercury emission and deep desulfurization from the flue gas using magnetic Mn-Fe spinel as a co-benefit of the wet electrostatic precipitator [J]. *Fuel Processing Technology*, 2016, 142: 345 - 351.
- [21] Moser P, Schmidt S, Stahl K, *et al.* The wet electrostatic precipitator as a cause of mist formation—Results from the amine-based post-combustion capture pilot plant at Niederaussem [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 41: 229 - 238.
- [22] D'Addio L, Carotenuto C, Balachandran W, *et al.* Experimental analysis on the capture of submicron particles (PM_{0.5}) by wet electrostatic scrubbing [J]. *Chemical Engineering Science*, 2014, 106: 222 - 230.
- [23] 丁志江, 杨志燕, 肖立春, 等. 线板极配湿式电除尘器电晕放电及收尘性能试验研究 [J]. *燕山大学学报*, 2015, (2): 177 - 181.
- [24] 徐少波, 伍宇鹏, 陈奎统, 等. 超净电袋复合除尘技术在燃煤电厂中的应用 [J]. *中国环保产业*, 2015, (12): 61 - 63.
- [25] 孙超凡, 张渭添, 彭泽宏, 等. 大型电袋复合除尘器细颗粒物测试技术应用 [J]. *广东电力*, 2015, (1): 12 - 15.
- [26] 丁奇岖, 董冰岩, 陈祖云, 等. 电袋除尘器静电区内静电场及荷电粒子的数值模拟 [J]. *有色金属科学与工程*, 2015, (3): 111 - 115.
- [27] 蔡晨阳, 王祖武, 叶寅. ESFF 复合式电袋除尘器形式的电场特性研究 [J]. *环境科学与技术*, 2015, (6): 187 - 191.
- [28] 薛婷婷, 沈恒根, 梁珍, 等. 不同织物构造 PPS 滤料对 PM_{2.5} 的过滤特性影响分析 [J]. *安全与环境学报*, 2015, 15 (3): 275 - 278.
- [29] 聂雪丽, 沈恒根, 薛婷婷, 等. 织物特性对聚苯硫醚滤料动态过滤性能的影响 [J]. *环境工程*, 2015, (4): 86 - 91.
- [30] 王国华, 陈留平, 张峰, 等. 膜技术在燃煤电厂烟气除尘中的应用 [J]. *盐业与化工*, 2015, 44 (2): 50 - 53.
- [31] 刘勇, 杨林军, 潘丹萍, 等. 化学团聚降低 WFGD 系统 PM_{2.5} 排放的试验研究 [J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2015, 45 (2): 320 - 327.
- [32] 潘丹萍, 吴昊, 姜业正, 等. 应用水汽相变促进湿法脱硫净烟气中 PM_{2.5} 和 SO₃ 酸雾脱除的研究 [J]. *燃料化学学报*, 2016, 44 (1): 113 - 119.
- [33] 马德刚, 林伟强, 郑琪琪, 等. 声凝并联合雾化预处理及其在过滤除尘中的应用 [J]. *环境工程学报*, 2015, 9 (5): 2353 - 2358.
- [34] 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. ■