

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0717

甘晨浩, 郑成航, 杨正大, 等. 2016. 蜂窝湿式静电除尘脱除燃煤细颗粒物实验研究[J]. 环境科学学报, 36(7): 2369-2374

Gan C H, Zheng C H, Yang Z D, et al. 2016. Experimental study of honeycomb experimental-scale wet electrostatic precipitator removing coal-fired fine particulate matter[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 36(7): 2369-2374

蜂窝湿式静电除尘脱除燃煤细颗粒物实验研究

甘晨浩^{1,2}, 郑成航², 杨正大², 高翔^{2,*}, 徐鸿¹

1. 中国计量大学计量测试工程学院, 杭州 310018

2. 浙江大学热能工程研究所, 能源清洁利用国家重点实验室, 杭州 310027

收稿日期: 2015-08-24

修回日期: 2015-10-11

录用日期: 2015-10-27

摘要: 搭建了蜂窝湿式静电除尘实验台, 研究了不同清灰方式下湿式静电除尘的放电特性、除尘效率、分级效率。结果发现, 喷淋清灰方式对颗粒物脱除效率最高, 溢流清灰方式其次。为了避免喷淋产生的水雾对除尘效率的不稳定影响, 着重研究了溢流清灰方式下, 湿式静电除尘器比收尘面积、运行电压、烟气初始浓度对除尘效率的影响。研究表明, 提高比收尘面积和运行电压均可使除尘效率增加, 通过观察颗粒物分级脱除效率发现, 粒径段在 0.5~1 μm 之间的颗粒物脱除效率较低。当烟气含尘浓度达到较高值 (442.85 mg·m⁻³) 时, 除尘器仍可保持较高的除尘效率。

关键词: 湿式静电除尘; 细颗粒物; 除尘效率; 溢流

文章编号: 0253-2468(2016)07-2369-06

中图分类号: X701

文献标识码: A

Experimental study of honeycomb experimental-scale wet electrostatic precipitator removing coal-fired fine particulate matter

GAN Chenhao^{1,2}, ZHENG Chenghang², YANG Zhengda², GAO Xiang^{2,*}, XU Hong¹

1. College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018

2. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Institute for Thermal Power Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027

Received 24 August 2015;

received in revised form 11 October 2015;

accepted 27 October 2015

Abstract: A honeycomb experimental-scale wet electrostatic precipitator (WESP) was built and the characteristics of corona discharge, particle collection efficiency, and particle grade efficiency were investigated and compared with different dust cleaning methods. It was found that the particle collection efficiency on spray cleaning method was the highest, followed by the overflow cleaning method. The influence of specific collecting area, applied voltage and inlet particle concentration in the flue gas on the particle collection efficiency was studied under overflow cleaning method in order to avoid the influence of spray droplets on particle collection efficiency. The results showed that increasing specific collection area and applied voltage can both improve the particle collection efficiency and particles of size 0.5~1 μm diameter were removed less efficiently by observing the particle grade efficiency. When the particle concentration in the flue gas reached a high value (442.85 mg·m⁻³), the wet electrostatic precipitator still showed an excellent collection performance.

Keywords: wet electrostatic precipitator; fine particulate matter; collection efficiency; overflow

1 引言 (Introduction)

以煤炭为主的能源结构在不断促进我国经济快速发展的同时, 也时刻影响着生态环境的友好与和谐。据统计, 截至 2013 年底, 全国发电装机总量和

发电量分别达到 12.58 亿 kW 和 5.37 亿 kWh, 其中, 火电总发电量占 70% 以上 (中国电力企业联合会, 2014), 火电机组以燃煤机组为主。随着工业的发展, 2014 年 7 月 1 日, 《火电厂大气污染物排放标准》(GB13223-2011) 开始全面执行, 该标准明确所有

基金项目: 浙江省自然科学基金 (No. LY13E060007); 浙江省重点科技创新团队项目 (No. 2011R50017)

Supported by the Natural Science Foundation of Zhejiang Province (No. LY13E060007) and the Key Scientific and Technological Innovation Team Project of Zhejiang Province (No. 2011R50017)

作者简介: 甘晨浩 (1991—), 男, E-mail: 527615975@qq.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: xgao1@zju.edu.cn

Biography: GAN Chenhao (1991—), male, E-mail: 527615975@qq.com; * Corresponding author, E-mail: xgao1@zju.edu.cn

新建燃煤电站的烟尘排放量实行 $30 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的排放标准,重点地区更要执行 $20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的特别排放限值(中国环境科学研究院,2011).目前,由于静电除尘器除尘成本较低,且对于粒径较大的颗粒脱除效果较好,因而现有的燃煤电厂普遍采用该技术,但静电除尘器对于 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 等细微颗粒物的收尘效率并不高(Bayless *et al.*, 2004; Bologna *et al.*, 2009; 杨林军, 2011),难以达到现排放标准.

湿式静电除尘技术拥有控制多种污染物的强大功能,它对细微的、粘性的、高比电阻的颗粒物和酸雾等具有理想的捕集作用(Chang *et al.*, 2011; Anderlohr *et al.*, 2015; Liton *et al.*, 2012; Saiyasitpanich *et al.*, 2006).现有燃煤电厂湿式静电除尘器清灰方式大多采用喷淋水冲刷代替干式静电除尘器采用的振打方式,这有效地避免了“二次扬尘”与“反电晕”现象.诸多学者做了大量有关除尘机理的研究,例如, Bayless 等(2001)提出了一种基于碳纤维膜的湿式静电除尘器,这种湿式静电除尘器以纤维膜代替了传统的钢板作为收尘板,较好地解决了湿式静电除尘中的腐蚀问题;韩国韩瑞大学的 Kim 等(2012)研究了一种用溢流清灰方式的湿式静电除尘器,实验发现,该除尘器在较小的比收尘面积下可达到较高的除尘效率;美国辛辛那提大学的 Saiyasitpanich 等(2006)研究了喷淋清灰方式下影响湿式静电除尘器对细微颗粒的脱除效率的因素,实验结果发现,电晕功率和停留时间对细微颗粒的质量浓度和数量浓度的脱除效率有重要影响.湿式静电除尘与干式静电除尘对于颗粒物脱除机理区别较大,特别是湿式静电除尘器的清灰方式对其脱除细微颗粒物的影响还需进一步研究.

因此,本文搭建了湿式静电除尘实验台,通过实验的方法研究不同清灰方式下湿式静电除尘的放电特性、除尘效率、分级效率.同时,为了避免喷淋产生的水雾对除尘效率的不稳定影响及漏电现象,着重研究溢流清灰方式下湿式静电除尘的运行参数、电源参数对除尘效率的影响,以期为湿式静电除尘器的实际工程应用提供基础数据.

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 实验原料

本实验所用粉尘取自于浙江省某燃煤电厂布袋除尘器收集的飞灰,实验前将粉尘干燥至恒重,

经马尔文粒径分析仪检测,其粒径分析结果如图 1 所示.中值粒径约为 $16 \mu\text{m}$,分散性较好,符合本次实验要求.

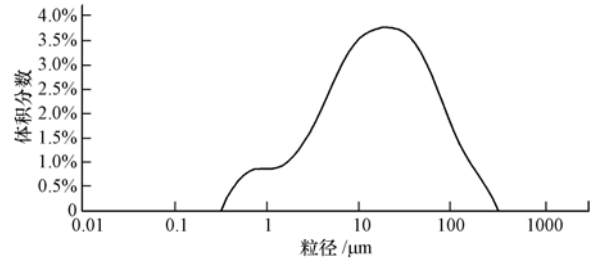


图 1 颗粒粒径分布图

Fig.1 Particle size distribution

2.2 实验装置与测试方法

图 2 为蜂窝湿式静电除尘系统示意图.该系统可分为以下几个部分:颗粒给料机、蜂窝湿式静电除尘器本体、风路系统、水路系统、高压供电系统、采样系统.湿式静电除尘器本体收尘板为蜂窝管状,蜂窝管内切圆直径为 150 mm ,收尘板长度为 1000 mm ,设有一定数量的星形阴极线位于蜂窝管状收尘板正中心,保证了阴极线对收尘板各个方向上均匀放电,阴极线长度为 1000 mm .其中,风路系统设有引风机、流量计,在湿式静电除尘器入口处形成负压,这样颗粒给料机得以稳定给料至烟道中,与气体充分混合形成模拟烟气.湿式静电除尘器本体底部设有水箱,水箱接有水泵,经管道分流,一方面,在蜂窝管侧端设有溢流进水口,其中,蜂窝管外围设置溢流槽,水从溢流槽底端进入充满至顶部在蜂窝管每个收尘板面上形成均匀稳定的水膜;另一方面,在蜂窝管正上方设有实心锥喷嘴,形成喷淋系统.高压供电系统采用大连泰思曼科技有限公司制

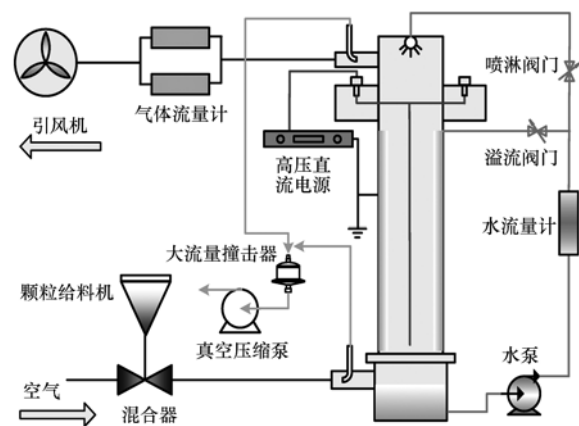


图 2 实验系统图

Fig.2 Scheme of experimental system

造的直流负电晕高压高频电源,最大输出功率为 100 W,高压输出端与阴极线相连,为避免电源被击穿,在高压输出端串联一个 5 MΩ 的电阻。

实验采用大流量撞击器(DGI)对目标气体进行采样,采样系统主要包括:等速采样枪、保温设备、DGI、转子流量计、真空泵。DGI 用于对粉尘分级,级数分为 5 级,在标准流量 70 L·min⁻¹下各级粒径段分别为:>2.5 μm、1~2.5 μm、0.5~1 μm、0.2~0.5 μm 和 <0.2 μm,前 4 级通过锡纸收集颗粒,最后一级由滤纸过滤收集。取样时,等速采样枪抽取的烟气体量为 70 L·min⁻¹,颗粒经过 DGI 被分级并捕集下来,实验中数据取前 4 级,从图 1 颗粒质量粒径分布图中可知,<0.2 μm 的颗粒量太少,故不做分析,脱除颗粒物的烟气经真空泵排出收集系统。另外,为了防止水蒸气凝结在 DGI 内,在采样枪端至 DGI 出口都设置了保温层,温度设定在 130 ℃。在湿式静电除尘器烟气进出口均设置了相同的采样口,并且将采样口置于烟道中心。采样前,前 4 级锡纸经恒温试验箱(温度设定为 105 ℃)烘干 1 h 后再冷却至常温,用电子天平(分辨率为 0.1 mg)对锡纸称重,记录质量大小并依次放置 DGI 内。采样完成后将 DGI 内 4 级锡纸取出,用相同烘干方法得到采样后锡纸的质量,两者之差即可得到前 4 级捕集颗粒物质量,通过采样的流量计算出颗粒物浓度。另外,为保证数据的可靠性,每一组数据均测量 3 次,取平均值。除尘效率 η 可根据以下公式计算:

$$\eta = \left(1 - \frac{c_1}{c_2}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中, c_1 、 c_2 分别代表除尘器出口、除尘器进口颗粒物质量浓度($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)。

分级效率 η' 为设定粒径段颗粒物的脱除效率,可根据以下公式计算:

$$\eta' = \left(1 - \frac{c'_1}{c'_2}\right) \times 100\% \quad (2)$$

式中, c'_1 、 c'_2 分别代表除尘器出口、除尘器进口设定粒径段颗粒物质量浓度($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)。

3 结果与讨论(Results and discussion)

3.1 湿式静电除尘器放电特性

放电特性对除尘器的除尘效率有重要的影响,湿式静电除尘器运行过程中其放电特性与干式静电除尘器有着明显的不同,本实验中采用干式、溢流水冲刷方式与喷淋冲刷方式作为对比。

图 3a 为静电除尘器在干式和溢流下的放电特性,通过曲线可以观察到,溢流下放电特性略往上移,但两者差别并不明显。图 3b 为静电除尘器在干式与喷淋下的放电特性,可以看出,在相同的电压下,喷淋量的增加在一定程度上使电晕电流增大。分析原因主要为:增加喷淋量能增加除尘器内部水雾数量,水雾在强电场的作用下发生剧烈畸变,使强电场的局部电晕区域碰撞电离加剧,电子的迁移率随着加强的电场而加快,在局部电晕区域最先放电,到达极板的电子数量增加(杨长河, 2005)。

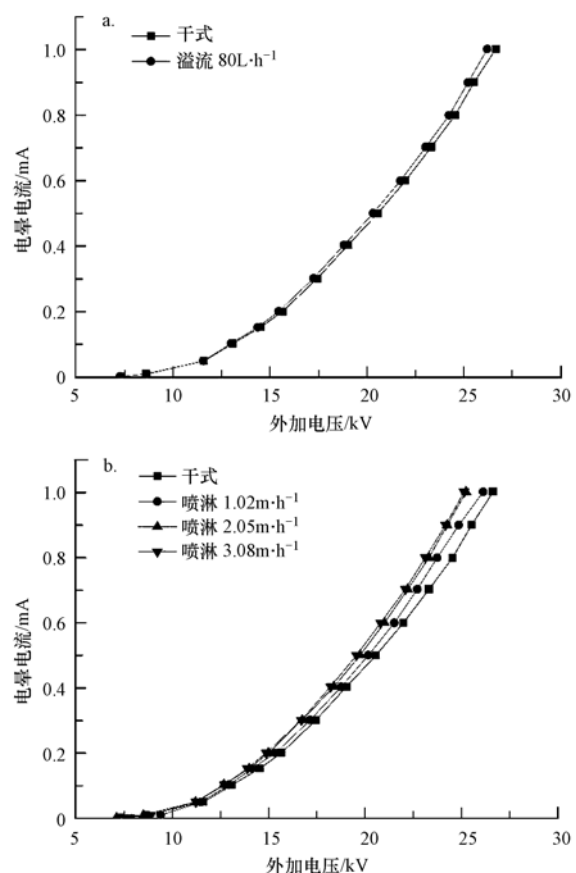


图 3 干式与溢流下(a)及干式与喷淋下(b)的放电特性
Fig.3 Comparison of discharge characteristics between dry and overflow (a) and between dry and spray (b)

3.2 湿式静电除尘器脱除细颗粒物实验

3.2.1 不同清灰方式对除尘效率与分级效率的影响 清灰方式作为影响最终除尘效率的关键一步,是干式与湿式电除尘的显著区别。在烟气流速 1.1 m·s⁻¹、运行电压 17.5 kV 下,3 种清灰方式(干式、溢流、喷淋)的除尘效率如图 4a 所示,可见喷淋方式下效率最高,干式的效率最低。这是由于干式下随着除尘器的运行,沉积在收尘板上的飞灰没有得到及时

的清除导致“二次扬尘”现象,影响了除尘器的放电及最终收尘.溢流清灰方式下均匀的水膜能保证沉积在收尘板上的飞灰及时清除.图4b为3种清灰方式的分级效率图,可以观察到喷淋清灰方式下各粒径段的分级效率基本优于其他两种清灰方式.这是由于喷淋清灰方式可以有效增加烟气中的湿度及水雾的数量,另外,除尘器内部强电场的存在能使水雾荷电,并增加与粉尘粒子的碰撞、扩散、截留几率(陈宜华, 2013; 彭泽宏等, 2015; Kim *et al.*, 2010),提高对粉尘特别是细微粉尘的除尘效率.

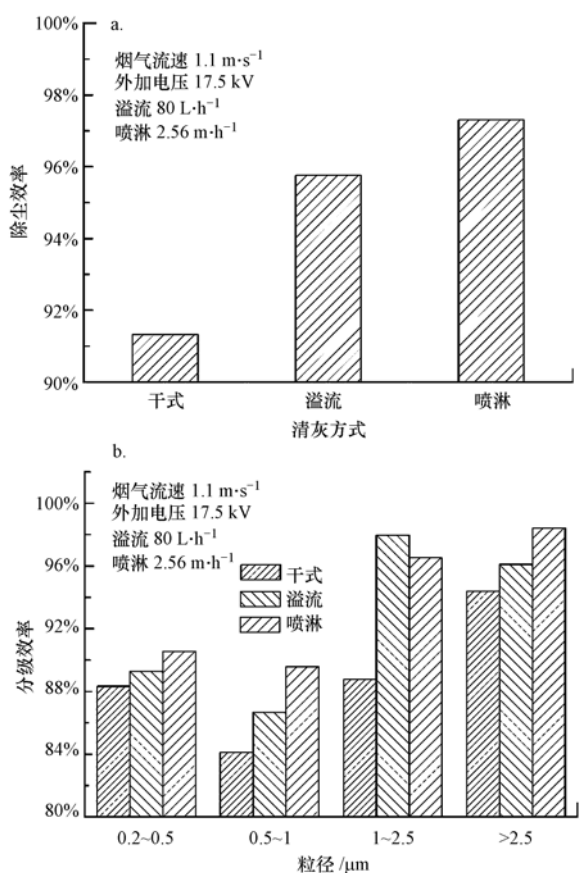


图4 不同清灰方式下除尘效率(a)和分级效率(b)对比

Fig.4 Comparison of cleaning methods in collection efficiency (a) and grade efficiency (b)

3.2.2 SCA对除尘效率与分级效率的影响 比收尘面积(SCA)为单位流量的烟气所分配到的收尘面积,是电除尘器的重要结构参数之一,受电除尘器尺寸影响较大.采用溢流清灰方式可以避免因喷淋不稳定,产生水雾数量不均匀对除尘效率的干扰,图5a为采用溢流清灰方式,湿式静电除尘器在不同电压下除尘效率随比收尘面积变化的曲线.从图中可知,除尘效率随着比收尘面积的增加而增大,随

着电压的增加而增大.采用DGI得到的除尘分级效率如图5b所示,在相同电压下,4个粒径段的颗粒物分级效率随着比收尘面积的增加而增大.增加比收尘面积意味着细颗粒物在除尘器内停留的时间更长,这样受到电场的荷电时间更长,使细颗粒物荷电更充分,最终在电场力的作用下向收尘板移动,被水膜冲刷下来.

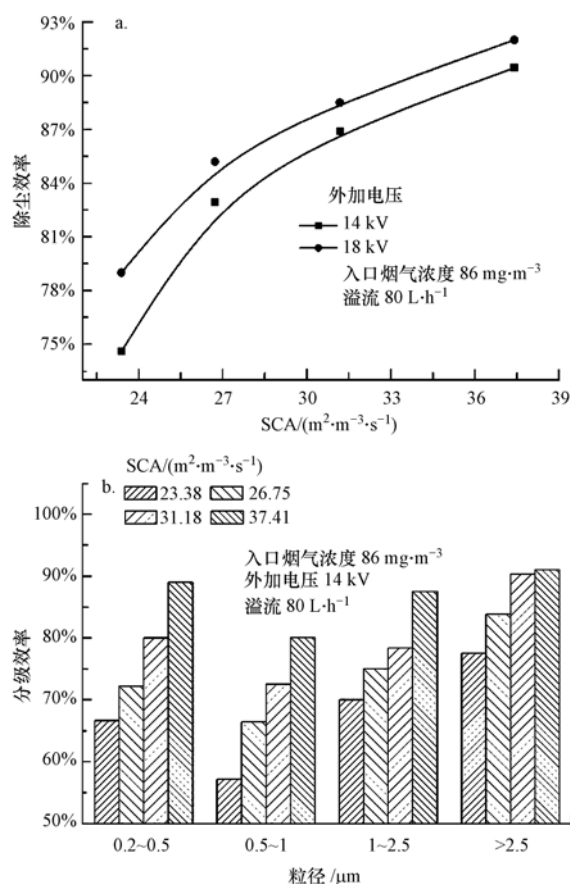


图5 不同电压下SCA对除尘效率(a)和分级效率(b)的影响
 Fig.5 Collection efficiency (a) and grade efficiency (b) at different SCA under various applied voltages

从图5b可以观察到在相同的比收尘面积下,粒径在 $0.5-1 \mu\text{m}$ 的颗粒物分级效率较低,粒径大于 $1 \mu\text{m}$ 的颗粒物分级效率逐渐增大.静电分级效率与颗粒粒径的这种特殊关系是由颗粒荷电和流体曳力相互作用形成的.在静电除尘器中,颗粒荷电主要可分为两种形式:扩散荷电和电场荷电.

电场荷电是指在除尘器内部阴极线产生的强电场使颗粒带电.颗粒进入荷电电场 t 秒,所获得的荷电量由下式(Cooperman, 1971)计算:

$$q(t) = \pi \left(\frac{3 \varepsilon_1}{\varepsilon_1 + 2} \right) \varepsilon_0 E_0 d_p^2 \left(\frac{1}{1 + t_0/t} \right) \quad (3)$$

式中, q 为颗粒物的荷电量 (C); ε_0 是真空介电常数, $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$, ε_1 为粒子相对介电常数; d_p 为颗粒物直径 (m); E_0 为粒子所在位置的电场强度 ($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$); t_0 为荷电时间常数 (s), 同时 $t_0 = 4\varepsilon_0 / N_0 e b$, 其中, N_0 为离子浓度 ($\text{个} \cdot \text{m}^{-3}$), e 为单位电荷电量 (C), b 为电荷载体 (离子) 的迁移率 ($\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$). 从公式 (3) 可以看出, 电场荷电量与颗粒直径的平方成正比, 随着颗粒直径的增大, 颗粒电场荷电量迅速增大. 对于直径大于 $1 \mu\text{m}$ 的颗粒电场荷电占主导地位.

由于离子的热运动, 与气体中的颗粒相互碰撞使颗粒带电称为扩散荷电, 它与有无外电场没有关系. 扩散荷电可由下式 (Cooperman, 1971) 计算:

$$n = \frac{2\pi \varepsilon_0 k T d}{e^2} \ln \left(1 + \frac{e^2 \bar{u} d_p N_0 t}{8 \varepsilon_0 k t} \right) \quad (4)$$

式中, k 为波尔兹曼常数, 取值为 $1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$; T 为气体绝对温度 (K); N_0 为离子密度 ($\text{个} \cdot \text{m}^{-3}$); e 为电子电量, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$; \bar{u} 为气体离子的平均热运动速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$). 从公式 (4) 可以看出, 扩散荷电与颗粒直径的一次方近似成正比. 当颗粒直径较小时, 如颗粒直径小于 $0.5 \mu\text{m}$ 时, 颗粒的荷电量以扩散荷电为主. 当颗粒直径在 $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ 时, 需要同时考虑电场荷电和扩散荷电两种机理, 故此时颗粒的脱除效率比较低.

3.2.3 电压对除尘效率和驱进速度的影响 图 6 显示了电压对除尘效率及颗粒物驱进速度的影响, 采用溢流清灰方式, 烟气初始浓度为 $155 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. 从图 6 可以看到, 工作电压升高, 湿式静电除尘器内的平均电场强度和空间电荷密度均有一定的增大, 颗粒脱除效率显著提高. 从另外一个角度上影响除尘

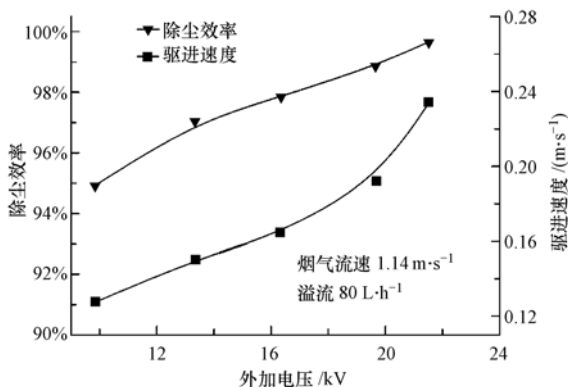


图 6 电压对除尘效率与驱进速度的影响

Fig.6 Collection efficiency and particle migration velocities at different applied voltages

效率的高低便是驱进速度, 驱进速度为荷电颗粒向电极的运动速度. 从图 6 中可知, 驱进速度随着电压的升高而升高, 电晕放电强度提高, 颗粒荷电增加, 受到的电场力越大, 加速度越大, 到达收尘板的时间缩短.

3.2.4 烟气含尘浓度对除尘效率的影响 目前, 湿式静电除尘器在燃煤电厂中的应用往往是安装于脱硫塔之后, 作为污染物的最终处理设备, 湿式静电除尘器处理不同含尘浓度烟气的效率高低影响最终的排放. 图 7a 为低粉尘质量浓度条件下, 采用溢流清灰方式, 湿式静电除尘器的除尘效率曲线与其出口烟气质量浓度的关系. 可以看到, 随着入口烟气质量浓度的提高, 除尘效率也随之提高, 并且出口烟气质量浓度同比增加. 当入口烟气质量浓度从 $18.25 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 增加至 $76.45 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 出口烟气质量浓度也从 $1.86 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 增加至 $5.08 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. 出现这种结果的原因有两点: 一是粉尘浓度增加, 一定空间内颗粒数量增加, 这使颗粒之间的碰撞几率增加, 小颗粒凝并成大颗粒几率同比增加; 二是高浓度粉尘条件下, 在电场力的作用下向收尘板移动的

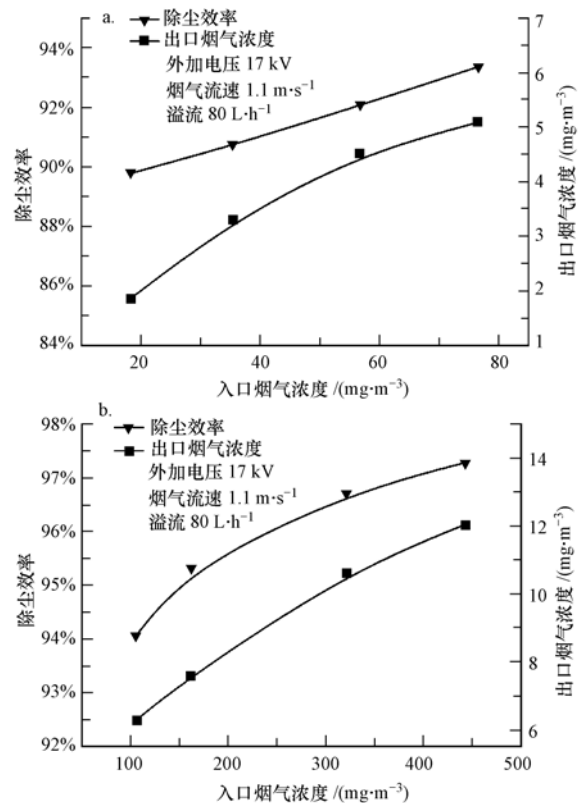


图 7 低烟气 (a) 和高烟气 (b) 含尘浓度对除尘效率的影响

Fig.7 Collection efficiency at low inlet mass concentration (a) and high inlet mass concentration (b)

颗粒数量增加,越靠近电极表面的颗粒得到更大的驱进速度,颗粒脱除效率增加.如图 7b 所示,当入口烟气质量浓度为 $442.85 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,出口烟气质量浓度仅为 $12.04 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,这说明湿式静电除尘器对于高浓度含尘烟气的控制效果较好.

4 结论(Conclusions)

本文搭建了喷淋、溢流清灰方式的湿式电除尘器,通过实验研究了干式、喷淋、溢流清灰方式下的放电特性、除尘效率及分级效率,着重研究了溢流清灰方式下比收尘面积、电压、烟气初始浓度对除尘效率的影响,并得出以下结论:

1) 喷淋清灰方式比溢流清灰方式除尘效率更好,这主要是由于喷淋下水雾对烟气起到调质作用,溢流清灰方式相比干式也可保持较高的除尘效率.

2) 增加比收尘面积和运行电压可以有效提高除尘器的除尘效率,在除尘器实际运行中,降低烟气流速和提高运行电压均可使除尘效率提高.

3) 随着烟气含尘浓度的增加,除尘效率升高,当烟气含尘浓度达到较高值($442.85 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$)时,除尘器仍可保持较高的除尘效率.

责任作者简介:高翔,男,博士,博士生导师,教育部“长江学者奖励计划”特聘教授,主要从事洁净煤及大气污染控制理论与产业化研究.

参考文献(References):

Anderlohr C, Brachert L, Mertens J, *et al.* 2015. Collection and generation of sulfuric acid aerosols in a wet electrostatic precipitator[J]. *Aerosol Science and Technology*, 49(3): 144-151

Bayless D J, Alam M K, Radcliff R, *et al.* 2004. Membrane-based wet electrostatic precipitation [J]. *Fuel Processing Technology*, 85(6/7): 781-798

Bayless D J, Pasic H, Alam M K, *et al.* 2001. Use of membrane collectors in electrostatic precipitators [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 51(10): 1401-1407

Bologa A, Paur H R, Seifert H, *et al.* 2009. Novel wet electrostatic precipitator for collection of fine aerosol [J]. *Journal of Electrostatics*, 67(2/3): 150-153

Chang J C, Dong Y, Wang Z Q, *et al.* 2011. Removal of sulfuric acid aerosol in a wet electrostatic precipitator with single terylene or polypropylene collection electrodes [J]. *Journal of Aerosol Science*, 42(8): 544-554

陈宜华. 2013. 荷电水雾除尘技术试验[J]. *现代矿业*, (8): 105-106

Cooperman P. 1971. A new theory of precipitator efficiency [J]. *Atmospheric Environment*, 5(7): 541-551

Kim H J, Han B, Kim Y J, *et al.* 2012. Integration of a nonmetallic electrostatic precipitator and a wet scrubber for improved removal of particles and corrosive gas cleaning in semiconductor manufacturing industries [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 62(8): 905-915

Kim J H, Lee H S, Kim H H, *et al.* 2010. Electrostatic precipitator enhances fine particles collection efficiency [J]. *Journal of Electrostatics*, 68(4): 305-310

Liton D, Chandra V. 2012. A wet electrostatic precipitator (WESP) for soft nanoparticle collection [J]. *Aerosol Science and Technology*, 46(7): 750-759

彭泽宏, 楼波, 孙超凡. 2015. 含湿量对电除尘器内 $\text{PM}_{2.5}$ 除尘效率的影响规律研究 [J]. *电站系统工程*, 31(2): 41-43

Saiyasitpanich P, Keener T C, Lu M, *et al.* 2006. Collection of ultrafine diesel particulate matter (DPM) in cylindrical single-stage wet electrostatic precipitators [J]. *Environmental Science & Technology*, 40(24): 7890-7895

杨林军. 2011. 燃烧源细颗粒物污染控制技术 [M]. 北京: 化学工业出版社. 3-6

杨长河. 2005. 气水混合两相体放电现象及机制的理论与实验研究 [D]. 武汉: 华中科技大学

中国电力企业联合会. 2014. 中国电力减排研究 [OL]. <http://www.cet.net.cn/web/getdetailnews.action?id=2424>

中国环境科学研究院, 国电环境保护研究院. 2011. GB13223—2011 火电厂大气污染物排放标准 [S]. 北京: 环境保护部