

# 燃煤电厂电除尘 $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ 的排放控制 II: 电除尘电源改造与 $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ 的排放(以 660 MW 机组为例)

王仕龙

神华国能集团有限公司, 北京 100033

**摘要** 通过对比 660 MW 燃煤锅炉电除尘改造前后细颗粒物( $PM_{2.5}$ )和颗粒物( $PM_{10}$ )的排放, 讨论电除尘改造的必要性及可行性。四电场电除尘器在常规单相电源供电下,  $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ 的排放浓度分别在 63 和 23  $mg/m^3$ 左右, 总排放在 75  $mg/m^3$ 左右; 采用三相高压电源时 $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ 的排放可控制在 15 和 2.5  $mg/m^3$ 以下, 总排放在 18  $mg/m^3$ 左右,  $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ 的排放分别减排 76%和 89%以上。

**关键词** 电除尘; 细颗粒物; 颗粒物; 电源改造

**中图分类号** X513

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.33.003

## $PM_{10}$ and $PM_{2.5}$ Emission Control by Electrostatic Precipitator (ESP) for Coal-fired Power Plants II: Evaluation of ESP Upgrading in Terms of $PM_{10}$ and $PM_{2.5}$ Emission Reduction with A 660 MW Generator

WANG Shilong

Shenhua Guoneng Energy Group Corporation Limited, Beijing 100033, China

**Abstract** This paper discusses  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  emission reduction by upgrading four-filed electrostatic precipitators (ESPs) with a 660 MW coal-fired power generator. By using a traditional single-phase high-voltage rectifier transformer (T/R), the PM,  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  emissions are around 75, 63 and 23  $mg/m^3$ , respectively. After upgrading the T/R by using a three-phase T/R, the PM,  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  emissions drop below about 18, 15 and 2.5  $mg/m^3$ , respectively. Their reduction efficiencies are around 76%, 76% and 89%, respectively.

**Keywords** electrostatic precipitation;  $PM_{2.5}$ ;  $PM_{10}$ ; power source retrofitting

自 2014 年 7 月 1 日, 国家执行《GB 13223—2011 火电厂大气污染物排放标准》, 现有火力发电燃煤锅炉烟囱出口烟尘排放限值一般地区为 30  $mg/m^3$ , 重点地区特别排放限值为 20  $mg/m^3$ 。尽管目前国家尚未对  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  的排放进行特别要求, 但严格控制燃煤锅炉  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  排放是实现绿色发电的关键。开展现役电除尘改造, 降低  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  的排放, 是电力行业面临的重大技术和经济课题。国家高技术研究

发展计划(863 计划)资源环境技术领域重大项目“重点行业  $PM_{2.5}$  过程控制与减排技术与装备”(2013—2015)主要开展燃煤锅炉  $PM_{2.5}$  排放不高于 10  $mg/m^3$  的关键技术和示范研究<sup>[1]</sup>。

电除尘技术因处理烟气量大、除尘效率高、设备阻力低、使用简单可靠、运行维护费用低且无二次污染等优点, 是电力行业的首选除尘技术<sup>[2-5]</sup>, 但目前对大型燃煤锅炉电除尘细颗粒物排放控制的研究报道较少<sup>[6]</sup>, 从控制  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  排放

收稿日期: 2014-07-17; 修回日期: 2014-10-27

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2013AA065000)

作者简介: 王仕龙, 高级工程师, 研究方向为燃煤电厂复合污染控制和管理, 电子邮箱: wangshilong@shenhua.cc

引用格式: 王仕龙. 燃煤电厂电除尘  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  的排放控制 II: 电除尘电源改造与  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  的排放(以 660 MW 机组为例)[J]. 科技导报, 2014, 32(33): 34-38.

角度,开展电除尘本体和电源的设计及选型也未见报道。本文通过对比660 MW燃煤机组,电除尘电源改造前后PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>的排放,讨论电除尘改造的必要性及可行性。旨在为大型燃煤锅炉电除尘改造方案提供应用案例,引导电力和除尘行业实现PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>的排放控制。

## 1 燃煤锅炉及电除尘主要特点

示范实验所采用的660 MW燃煤锅炉为超临界压力直流

锅炉(SG-2141/25.4-M978),最大连续蒸发量为2141 t/h。每台锅炉配备2台双室四电场卧式电除尘器,处理烟气量为3818617 m<sup>3</sup>/h(设计煤种)和4007761 m<sup>3</sup>/h(校核煤种)。设计电除尘入口烟气温度为142℃(设计煤种)和149℃(校核煤种),目前夏季满负荷时最高烟温在165℃左右。在不同混煤掺烧下,除尘器的入口浓度值在45~60 g/m<sup>3</sup>之间,电厂难以满足20 mg/m<sup>3</sup>或30 mg/m<sup>3</sup>的排放要求。电除尘设计和校核煤种的煤质成分分析如表1和表2所示。

表1 电除尘的主要参数  
Table 1 Operating parameters of ESP

序号	名称	技术参数及要求
1	每台炉所配台数	2台
2	每台除尘器电场数	4电场
3	每台除尘器进、出口数	2个/2个
4	气流均布系数	≤0.2
5	电除尘器的电场数/电场长度	4/17 m
6	电除尘器有效截断面积	2×517 m <sup>2</sup>
7	烟气流速	0.91 m/s
8	烟气处理时间	18.68 s
9	比集尘面积/一个供电区停供的比集尘面积	98.27/ 92.41 m <sup>2</sup> ·(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup>
10	同极间距	400 mm
11	极板型式及材质	大C型/SPCC
12	极板规格	16240 mm×480 mm×50 mm(板厚1.5 mm)
13	阳极板 每电场的极板块数,有效面积	1476块,23270.4 m <sup>2</sup>
14	辅助电极面积	2×2089.2 m <sup>2</sup>
15	槽板收尘面积	4557.6 m <sup>2</sup>
16	每炉停一个供电区集尘面积	86333.25 m <sup>2</sup>
17	型式	下侧部振打
18	阳极振打 每台ESP振打装置数量	2×8套
19	最小振打加速度	150 G
20	每台电除尘器放电极总长度/根数	59149.6 m / 15360 根
21	沿气流方向阴极线间距	500/250 mm
22	阴极线 垂直气流方向阴极同极间距	400 mm
23	阴极线材料/型式	锯齿线:SPCC/鱼骨针:Q235
24	放电极设计高度	15.44 m
25	振打装置的型式	中侧部振打
26	阴极振打 振打装置的总数	2×16套
	振打位置	侧中部
27	振打操作方式	手动/自动
	最小振打加速度	50 G

表2 电除尘的主要参数

Table 2 Operating parameters of ESP

项目	符号	单位	设计煤种	校核煤种
全水分	$M_t$	%	20.2	22.78
干燥基水分	$M_{ad}$	%	10.17	14.86
收到基灰分	$A_{ar}$	%	12.61	14.86
干燥无灰基挥发分	$V_{daf}$	%	32.59	30.14
收到基低位发热量	$Q_{net,ar}$	kJ/kg	19250	17650
收到基碳	$C_{ar}$	%	53.78	48.86
收到基氢	$H_{ar}$	%	2.71	2.81
收到基氧	$O_{ar}$	%	9.58	9.25
收到基氮	$N_{ar}$	%	0.52	0.52
收到基硫	$S_{ar}$	%	0.60	0.92
可磨性指数	$H_{GI}$		71	65

## 2 电除尘改造原理和方法

电除尘改造主要包括两大部分:1)在原电除尘烟气进口烟道处布置低温省煤器;2)采用16台三相高压电源对原16台单相高压电源进行改造,电除尘本体和其他设备保持不变。低温省煤器可将排烟温度从140℃降到110℃,冷却放出的热量可用于提高烟气凝结水的温度。

16台高压电源改造前后设计参数对比见表3。三相电源输入供电平衡,与单相电源相比,相同电压条件下二次电流小,而在相同电流条件下二次电压高,可满足不同电场电压电流的特性要求,另外三相电源具有运行稳定、工作可靠、性能优异和使用维护方便等特点<sup>[7]</sup>。采用高效电源对电除尘改造的原理和方法参见文献[8]。

表3 高压电源改造前后对比(一台炉)

Table 3 Comparison of high-voltage power supply parameters before and after the upgrading

序号	电场	改造前	改造后	单位	数量
		电流电压参数	电流电压参数		
1	一	2.1 A & 72 kV	2.2 A & 82 kV	套	4
2	二	2.1 A & 72 kV	2.2 A & 82 kV		4
3	三	2.0 A & 72 kV	2.0 A & 82 kV		4
4	四	2.0 A & 72 kV	2.0 A & 82 kV		4

## 3 结果和讨论

### 3.1 电除尘二次电流电压参数优化

图1比较4个电场电除尘的平均二次电压、二次电流和输出功率。三相电源烟温110℃,单相电源烟温130℃。采用三相电源改造后,第一、第二和第三电场的二次电压、二次电流及输出功率都得到了较大提高,电源基本工作在电流极限

附近。值得注意的是,第四电场采用小电流或小功率运行,以控制由于离子风引起的细颗粒物二次飞扬<sup>[9-11]</sup>。

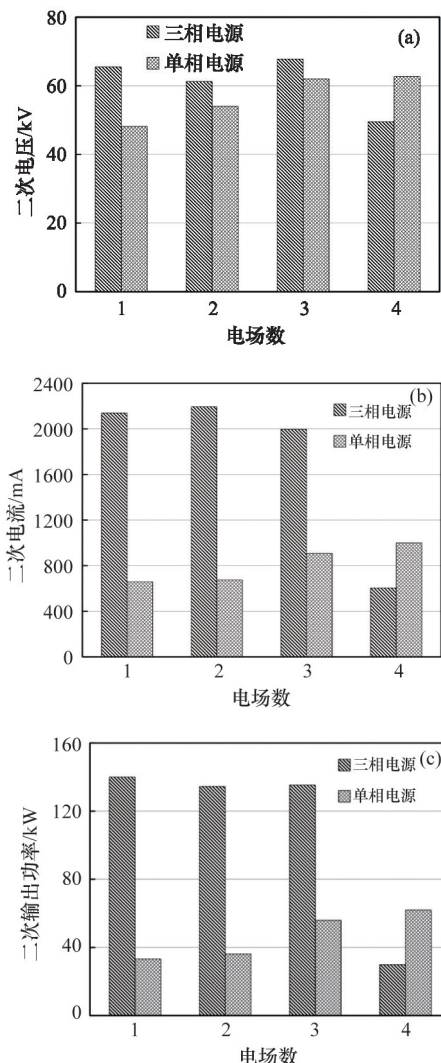


图1 电除尘改造前后各电场的二次电压(a)、二次电流(b)及二次输出功率(c)

Fig. 1 The secondary outputs of voltage (a), currents (b) and discharge powers (c)

原单相电源因二次电压纹波系数大,第一、二和三电场电源工作在火花电压极限下,第四电场单相电源的电流及注入功率比三相电源高。由于单相和三相电源的功率系数分别为55%和93%左右,尽管采用三相电源时电除尘的注入功率大幅度提高,但电除尘高压电源的一次输入功率增加不多,也即能耗并未明显升高。图2和图3为比较三相和单相电源在相同二次电流和二次输出电流或功率下高压电源的一次输入电流,采用三相电源的一次电流是原单相电源的一半左右,即其可大幅度改善电除尘运行的安全性。采用单相电源时电除尘的阳极板电流密度一般都小于0.2 mA/m<sup>2</sup>,采用三相电源电流密度则可达0.4 mA/m<sup>2</sup>,运行平均电场强度在3.3 kV/cm左右。

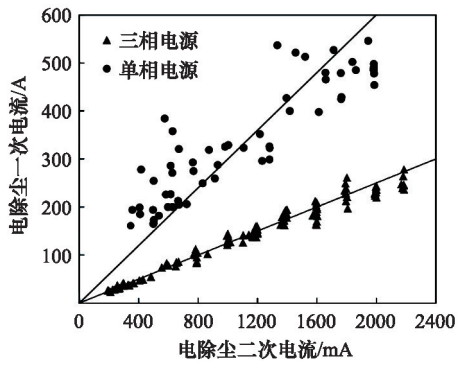


图2 相同输出二次电流时单相与三相电源的一次电流  
Fig. 2 Primary currents of three-phase and single-phase power sources for a given output current

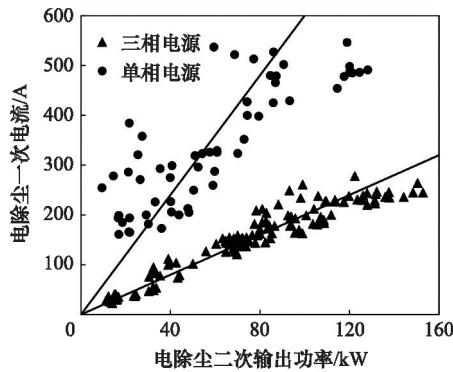


图3 相同二次输出功率时单相与三相电源的一次电流  
Fig. 3 Primary currents of three-phase and single-phase power sources for a given output power

### 3.2 PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>减排

烟气中PM<sub>10</sub>及PM<sub>2.5</sub>的测试采用由芬兰 Dekati 公司生产的颗粒物在线测试仪器(ELPI),通过十二级颗粒物采集器实时测试 28 nm~10 μm 粒径的颗粒物分布、重量及带电量等。仪器的详细试用和应用见参考文献[6]、[12]、[13]。

如图4所示,传统的电除尘对PM<sub>10</sub>收集效率不高,PM、PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>的排放在75、63和23 mg/m<sup>3</sup>左右,PM<sub>2.5</sub>在PM<sub>10</sub>中的平均比例约为36%,同以往报道的28.0%~52.5%范围基本一致<sup>[6]</sup>。图5是采用ZH系列三相电源电除尘改造后典型的电除尘出口PM<sub>10</sub>的排放特性,PM、PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>的排放在16、14和2.0 mg/m<sup>3</sup>左右。图6比较了电除尘改造前后电除尘出口PM<sub>2.5</sub>与PM<sub>10</sub>的动态比例关系,改造前PM<sub>10</sub>在25与125 mg/m<sup>3</sup>之间变化,对应的PM<sub>2.5</sub>在16与32 mg/m<sup>3</sup>之间变化。在低浓度排放情况下,PM<sub>2.5</sub>占PM<sub>10</sub>的比例约为50%,在高浓度排放情况下,PM<sub>2.5</sub>占PM<sub>10</sub>的比例约为24%。改造后PM<sub>10</sub>在3与50 mg/m<sup>3</sup>之间变化,对应的PM<sub>2.5</sub>在0.5与5 mg/m<sup>3</sup>之间变化,PM<sub>2.5</sub>占PM<sub>10</sub>的比例约为11%。图7比较了改造前后电除尘出口

PM<sub>10</sub>的颗粒物个数分布,图8比较了电除尘出口颗粒物质量积分分布。同原单相电源比较,采用高功率三相电源不仅可大幅度降低PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>排放的质量浓度,还能够显著降低PM<sub>2.5</sub>排放的颗粒物数量。颗粒物的荷电有场致和扩散荷电<sup>[14-16]</sup>两类原理,比较图1所示的放电电压、电流及放电功率,易得细颗粒物PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>的减排主要是由于采用了高功率的三相电源。

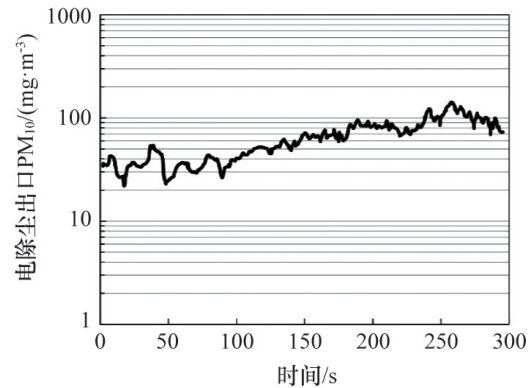


图4 改造前典型的PM<sub>10</sub>排放  
Fig. 4 PM<sub>10</sub> emission with the single-phase T/R

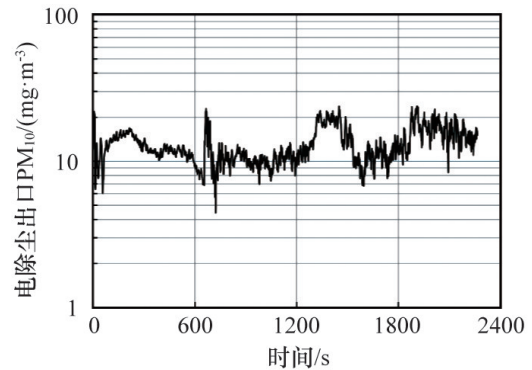


图5 改造后典型的PM<sub>10</sub>排放  
Fig. 5 PM<sub>10</sub> emission with the three-phase T/R

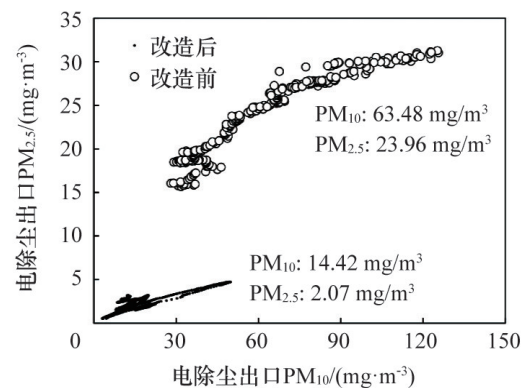


图6 改造前后电除尘出口PM<sub>2.5</sub>与PM<sub>10</sub>  
Fig. 6 PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> before and after the ESP upgrading

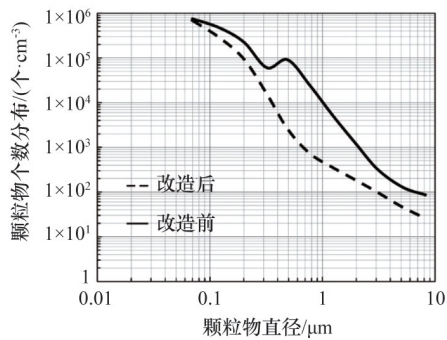


图7 比较改造前后电除尘出口细颗粒物的分布  
Fig. 7 Particle number concentration distributions

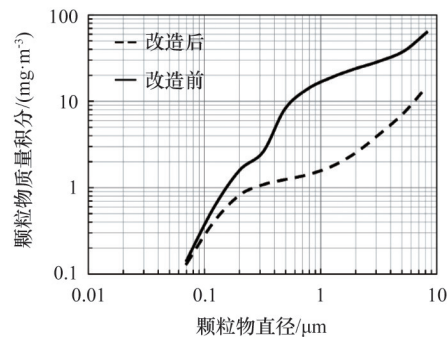


图8 比较改造前后电除尘出口细颗粒物的质量积分分布  
Fig. 8 Integrations of particle mass distributions

#### 4 结论

比较了电除尘在不同高压电源运行条件下,  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  排放控制效果: 1) 传统单相电源供电下的电除尘  $PM_{2.5}$  占  $PM_{10}$  的排放约为 36%,  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  的排放浓度在  $63 \text{ mg/m}^3$  和  $20 \text{ mg/m}^3$  左右, 采用高效三相电源供电下的电除尘  $PM_{2.5}$  占  $PM_{10}$  的排放约为 11%,  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  的排放浓度在  $15 \text{ mg/m}^3$  和  $2.5 \text{ mg/m}^3$  以下; 2) 电除尘改造不仅可满足新的  $20 \text{ mg/m}^3$  或  $30 \text{ mg/m}^3$  的排放标准, 对于  $PM_{10}$  及  $PM_{2.5}$  控制而言, 采用高电流密度的三相高压电源改造, 不仅可降低细颗粒物的排放, 而且改造工程量小、工期短, 改造和运维费用低; 3) 电除尘应用高效三相电源, 替代传统单相电源供电的方式, 提高了电除尘对煤种的适应性和除尘效率, 调节方式灵活, 不仅可应用于电除尘达标排放改造, 还能为大幅度降低  $PM_{2.5}$  排放奠定基础。

致谢: 浙江大学闫克平研究团队在  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  测试方面提供合作, 神华国能宁夏煤电有限公司鸳鸯湖电厂在实验方面给予支持。

#### 参考文献 (References)

[1] 闫克平. 电除尘改造原理和应用[C]. 科技部 863 计划资源环境技术领域“重点行业  $PM_{2.5}$  过程控制与减排技术与装备”主题项目启动及学术交流会议, 杭州, 4-29, 2013.  
Yan Keping. Theory and application of electric-dust extractor[C]. Inception Conference and Academic Conference for "Technology and Equipment for Control of  $PM_{2.5}$  Emission from Key Industrial Processes", Hangzhou, 4-29, 2013.

[2] Yan K P. Electrostatic precipitation[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2008.  
Yan K P. Electrostatic precipitation[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2008.

[3] 中国环境保护产业协会电除尘委员会. 电除尘器选型设计指导书[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.  
Committee of Electrical Dust Removal, CAEPI. Guide book of ESP design[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.

[4] 郇建国, 刘云. 中国煤种成分对电除尘器性能影响及电除尘器适应性评价[J]. 科技导报, 2010, 28(7): 104-107.  
Li Jianguo, Liu Yun. The effect of compositions of domestic coal on the performance of ESP and an evaluation of ESP adaptability[J]. Science and Technology Review, 2010, 28(7): 104-109.

[5] 陈国策. 适应新排放标准的火电厂除尘技术[J]. 科技导报, 2010, 28(3): 90-95.  
Chen Guoqu. Dust control technologies under the new emission standard for thermal power plants[J]. Science & Technology Review, 2010, 28(3): 90-95.

[6] 郝吉明, 段雷, 易红宏, 等. 燃烧源可吸入颗粒物的物理化学特征[M]. 北京: 科学出版社, 2008.  
Hao Jiming, Duan Lei, Yi Honghong, et al. Physical and chemical characteristics of particulate matter from combustion source[M]. Beijing: Science Press, 2008.

[7] Zhu J, Zhao Q, Yao Y, et al. Effects of high-voltage power sources on fine particle collection efficiency with an industrial electrostatic precipitator[J]. Journal of Electrostatics, 2012, 70(3): 285-291.

[8] 王仕龙, 陈英, 韩平, 等. 燃煤电厂电除尘  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  的排放控制 I: 电除尘选型及工业应用[J]. 科技导报, 2014, 32(33): 23-33.  
Wang Shilong, Chen Ying, Han Ping, et al.  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  emission control by electrostatic precipitator (ESP) for coal-fired power plants I: ESP sizing and applications[J]. Science and Technology Review, 2014, 32(33): 23-33.

[9] Niewulis A, Podliński J, Mizeraczyk J. Electrohydrodynamic flow patterns in a narrow electrostatic precipitator with longitudinal or transverse wire electrode[J]. Journal of Electrostatics, 2009, 67(2): 123-127.

[10] 沈欣军, 王仕龙, 韩平, 等. 电除尘器内亚微米细颗粒物动态的可视化测试[J]. 浙江大学学报: 工学版. (待发表)  
Shen Xinjun, Wang Shilong, Han Ping, et al. Visualization measurements of submicron particles motion in electrostatic precipitator[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science. (in press)

[11] 曾宇翔, 沈欣军, 章旭明, 等. 电除尘器中离子风的实验研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2013, 47(12): 2208-2211.  
Zeng Yuxuan, Shen Xinjun, Zhang Xuming, et al. Experimental study of ionic wind in an electrostatic precipitator[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2013, 47(12): 2208-2211.

[12] Moisio M, Keskinen J, Pietarinen K, et al. Real-time measurement of the net charge of particles as a function of diameter[C]. Proceedings of 4th International Aerosol Conference, Los Angeles, USA, August 29-September 2, 1994.

[13] Zhu 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.

[14] Oglesby S. Electrostatic precipitation[M]. New York: Marcel dekker INC Press, 1978.

[15] Marquard A, Meyer J, Kasper G. Characterization of unipolar electrical aerosol chargers—Part I: A review of charger performance criteria[J]. Journal of Aerosol Science, 2006, 37(9): 1052-1068.

[16] Marquard A, Kasper G. Characterization of uni-polar electrical aerosol chargers—Part II: Application of comparison criteria to various types of nano-aerosol charging devices[J]. Journal of Aerosol Science, 2006, 37(9): 1069-1080.

(编辑 田恬)