

# 凝变湿电复合烟气污染物协同控制技术与应用\*

许芸<sup>1</sup> 谭厚章<sup>2</sup> 申智勇<sup>1</sup> 熊英莹<sup>3</sup> 杨根生<sup>1</sup>

(1. 国电环境保护研究院 南京 210031; 2. 西安交通大学能源与动力工程学院 西安 710049;  
3. 山西大学动力工程系 太原 030006)

**摘要** 将凝变技术与湿式电除尘器技术进行有机结合,集成凝变湿电复合烟气污染物协同控制技术,研究该技术对 $2\ \mu\text{m}$ 以下可过滤性颗粒物和可凝结颗粒物的团聚、凝并、收集效果。凝变湿电复合烟气污染物协同控制技术在630 MW大型燃煤机组上的工程应用结果表明,该复合技术可显著提高烟气中微细颗粒物的脱除,使机组稳定实现颗粒物排放小于 $5\ \text{mg}/\text{m}^3$ ;脱除烟气中70%以上的可溶性盐分,实现烟气污染物的协同控制;降温 $2\ ^\circ\text{C}$ ,每小时回收15 t的水,可减缓烟囱“白烟”现象。

**关键词** 凝变 湿电 协同控制 烟气污染物 白烟

## Application of Flue Gas Pollutants Synergistic Control Technology Combined with Condensation Technology and Wet Electrostatic Precipitator

XU Yun<sup>1</sup> TAN Houzhang<sup>2</sup> SHEN Zhiyong<sup>1</sup> XIONG Yingying<sup>3</sup> YANG Gensheng<sup>1</sup>

(1. State Power Environmental Protection Research Institute Nanjing 210031)

**Abstract** A synergistic control technology of flue gas pollutants was obtained by combining condensation technology and WESP, to study the reunion, coagulation and collection effects of this technology on filterable and condensable particles below  $2\ \mu\text{m}$ . The synergistic control technology was applied in a 630 MW large-scale coal-fired unit. Results showed that this technology could significantly improve the removal efficiency of fine particles in flue gas, to make particulate matters discharged from the chimney of the unit less than  $5\ \text{mg}/\text{m}^3$ . More than 70% of the soluble salt in the flue gas was removed, to achieve synergistic control of flue gas pollutants. About 15 tons of water was recovered per hour when the flue gas was cooled  $2\ ^\circ\text{C}$ , and the “white smoke” could be slowed down.

**Key Words** condensation technology wet electrostatic precipitator synergistic control flue gas pollutants white smoke

## 0 引言

目前,湿式电除尘器已成为燃煤电厂烟气超低排放治理的主要环保设备之一,湿式电除尘器在有效降低微细颗粒物排放的同时,对液滴、 $\text{SO}_3$ 和重金属也有一定的脱除效果<sup>[1-5]</sup>。然而,湿式电除尘器对烟气中 $2\ \mu\text{m}$ 以下的微细颗粒物,包括固态颗粒物、液态可溶解颗粒物(如 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 等)及气态可凝结颗粒物(如 $\text{SO}_3$ 、 $\text{HCl}$ 等)的捕集能力仍然有限。此类污染物为 $\text{PM}_{2.5}$ 的重要前体物,会在大气中发生化学反应生成二次颗粒物,与直接排放的一次颗粒物共同成为大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的最主要来源,造成大气污染<sup>[6-9]</sup>。

近几年,我国在对环保技术开发的推进过程中,逐渐形成一个技术共识,即在现有设施基础上集中地开展微细颗粒物团聚和长大技术的开发,进一步提高 $\text{PM}_{2.5}$ 的脱除效率,实现真正的超低排放<sup>[10-12]</sup>。

本研究提出将凝变技术与湿式电除尘器技术有机结合,将凝变和捕集功能融为一体,促进烟气中微细颗粒物凝聚长大并高效收集,实现多种技术一体化,并于2014年在某630 MW燃煤机组上进行了工程示范研究,取得良好的运用效果。

## 1 技术原理

湿法脱硫系统出口烟气湿度近于饱和,因此可以通过相变的方式,促使水汽在细颗粒物表面凝结,实现颗粒物聚并、长大。凝变技术是通过将湿法脱硫后的低温烟气降温,促进水汽和污染物的协同凝结,有效脱除烟气中的微细颗粒物。凝变器内部布置数量众多的柔性毛细冷凝管,冷凝管由改性氟塑料制成,有较好的耐腐蚀、耐磨损特性,可在脱硫吸收塔后的低温湿烟气环境中长期运行。同时,利用改性氟塑料良好的拉伸性,可将冷凝管的管壁厚度做到1 mm及以下,大大提高了其整体传热性能。

\* 基金项目: 国家科技支撑计划(2015BAA05B01)。

该装置的颗粒凝变脱除原理如图 1 所示,脱硫后的饱和湿烟气进入凝变器后,烟气中的较大颗粒物由于惯性碰撞及毛细冷凝管的拦截而被脱除。同时,毛细管内的冷煤介质与外部湿烟气进行热交换,使得饱和湿烟气降温,水蒸气发生相变,由气态转变为众多的液态微小雾滴,增加了微细颗粒物的碰撞概率,促使微细颗粒物成核、凝并、长大与脱除。颗粒物脱除过程中,通过调节凝变器的工艺运行条件来控制饱和湿烟气的相变度,以达到不同程度的颗粒物脱除效果。

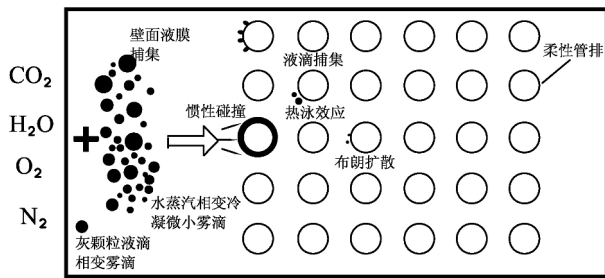


图 1 凝变器颗粒物脱除原理

凝变湿电复合烟气污染物协同控制技术是将凝变技术与湿式电除尘器技术进行耦合。在本研究

中,将凝变器布置于湿式电除尘器收尘区前端,使烟气中的颗粒物在凝变器中凝变、长大,部分较大颗粒在凝变器中被拦截脱除,剩余颗粒进入湿式电除尘器被进一步捕集,从而实现烟气深度净化。两种技术的耦合并非简单的技术叠加,在各自的工艺上需要进行相应调整,如:凝变器需要根据湿式电除尘器的性能结合烟气条件进行相变度的调整;湿式电除尘器在加装凝变器后,由于进入收尘区域的烟气组成物质特性的变化,其极配形式也需进行调整,以满足颗粒物的高效捕集。

## 2 工程应用

### 2.1 工程概况

某 630 MW 燃煤机组作为国家煤电机组环保改造示范项目,要求投运期间实现烟囱出口粉尘全时段、全工况稳定排放(排放质量浓度 < 5 mg/m<sup>3</sup>)。结合场地情况,将凝变湿电复合装置布置在湿法脱硫后。锅炉为超临界参数变压直流炉,单炉膛、一次再热、平衡通风、固态排渣 II 型锅炉。电厂设计煤种为神华煤,校核煤种 1 为晋北煤,校核煤种 2 为兖州煤,煤质分析如表 1 所示。

表 1 燃煤煤质分析

	全水分/%	收到基灰分/%	可燃基挥发分/%	收到基全硫分/%	低位发热量/(kJ·kg <sup>-1</sup> )
设计煤种	15.00	8.50	36.44	0.45	23 500
校核煤种	10.72	19.77	32.31	0.63	22 476
近半年平均煤种	7.20	21.39	38.27	0.55	22 760

根据上述煤种以及摸底测试中锅炉、电除尘器等装置的实际运行参数,最终确定凝变湿电复合装置的主要设计参数,具体参数见表 2。

表 2 凝变湿电复合装置的主要设计参数

项目	主要技术参数
处理烟气流/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	278 066 6
入口烟气含尘浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	< 15
出口烟气含尘浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	< 5
入口烟气温度/℃	50 ~ 57
实现烟气温降/℃	约 2
系统阻力/Pa	< 100(相变), < 250(湿除)
凝结水量/(t·h <sup>-1</sup> )	10 ~ 15
烟气流通截面积/m <sup>2</sup>	259
烟气流速/(m·s <sup>-1</sup> )	< 3
烟气流经时间/s	> 1(相变), ~ 2(湿除)

### 2.2 系统组成及方案

凝变湿电复合装置里面布置如图 2 所示,根据场地布置,烟气采用下进上出的形式。凝变器布置于湿式电除尘器收尘区的前端。

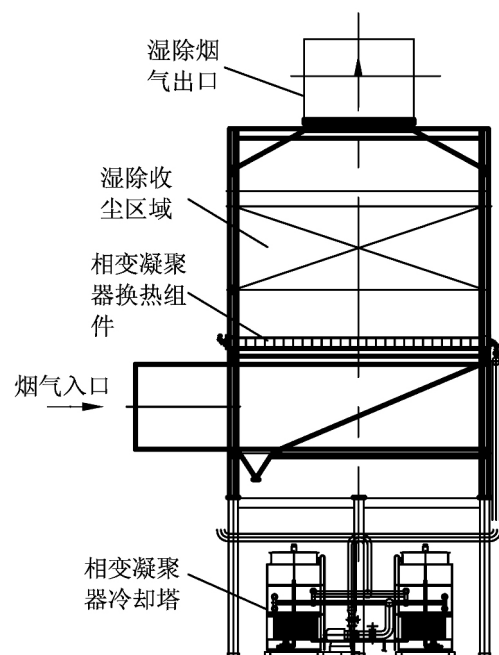


图 2 凝变湿电复合系统的结构布置

#### 2.2.1 凝变器

凝变器由换热组件本体、循环水系统、冷却系统

和补水系统组成。换热组件本体根据湿式电除尘器电场分区分为4组,每组7个模块4组模块并联运行。循环水系统设有循环水泵,通过循环水泵将低温除盐水送入换热组件本体中循环换热,换热完毕后的除盐水再送至冷却系统中完成降温。冷却系统主要由4台闭式冷却塔构成,冷却塔采用空冷及喷淋水冷却方式对吸热后的除盐水进行冷却降温。补水系统通过补水泵对循环水系统进行首次运行充水及管道损耗补水。

### 2.2.2 湿式电除尘器

湿式电除尘器采用柔性立式结构形式,由壳体、导流装置、阴阳极系统、冲洗系统和供排水系统等部分组成。由于凝变器的毛细管均匀布置在湿式电除尘器本体断面,起到了很好的整流效果。阳极采用柔性织物,具有很好的浸润性及疏水性,烟气中凝结水易于在其表面形成均匀水膜,实现粉尘收集,同时烟尘随水膜在重力作用下自流,实现在线清灰,不需要连续喷淋系统和复杂的水处理系统。结合柔性湿式电除尘器的工艺特性,将凝变器布置在收尘区域前端,可有效提高烟气中液态雾滴含量,使阳极表面湿润度提高,更易形成均匀水膜,进一步提高收尘效果。

### 3 效果分析

项目实施过程中重点考察凝变湿电复合装置对烟气微细颗粒物凝聚、收集能力、凝水能力以及对多污染物的脱除能力等。

#### 3.1 凝聚指数测试

根据现场条件和测试要求,在凝变器入口与出口、湿式电除尘器出口布置3个测点,测点位置如图3所示。在系统负荷稳定、设备正常运行的条件下,采用低压撞击器(Dekati Low Pressure Impactor,简称DLPI)对不同测点的颗粒物取样,得到颗粒物的分布情况和分级脱除效率。为了便于描述装置的凝聚特性,试验中定义凝聚指数 $\eta$ ,如式(1)所示。

$$\eta = \frac{D_{v1}}{D_{v0}} \quad (1)$$

式中 $D_{v1}$ 为凝聚后颗粒物的体积平均粒径, $D_{v0}$ 为原始颗粒物的体积平均粒径。 $\eta$ 值越大,表示颗粒物的凝聚性越好,当 $\eta \geq 2$ 时,认为凝聚性能优异。

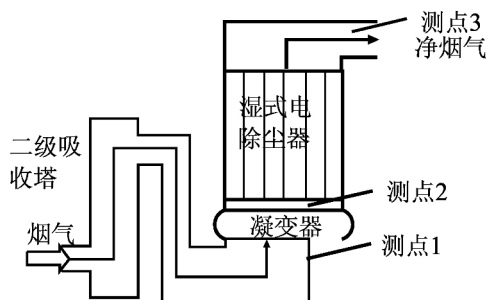


图3 试验测点布置

在测点1及测点2处进行取样进行粒度分析,得到凝变器进、出口处的粉尘粒度分布,见图4。

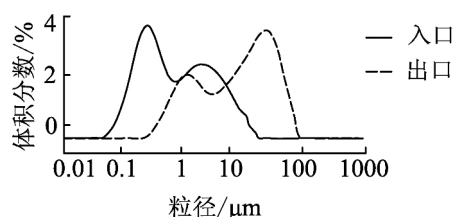


图4 凝变器出口和入口粒度分布对比

从图中可以看出,进入凝变器之前,颗粒物的粒度分布呈现峰值在 $0.25 \mu\text{m}$ 和 $2 \mu\text{m}$ 处的双峰分布,且前者的体积分数远大于后者,也就是说脱硫塔出口烟气中颗粒物质量浓度虽然不大,但是由于颗粒物的体积非常微小,颗粒物的数量巨大;经过凝变器之后,颗粒物粒度分布仍然呈现双峰分布,但是峰值移动到 $1 \mu\text{m}$ 和 $25 \mu\text{m}$ 附近,且大颗粒的峰值远大于小颗粒,结果表明,微细颗粒物经过凝变器后,大粒径颗粒物的体积分数显著升高,凝变器对微细颗粒物有较好的凝聚效果,经过相变凝并过程后,成为易于脱除的大颗粒,很好地解决了湿式电除尘器应对微细颗粒物的难题。

凝变器表面积平均粒径为 $1.34 \mu\text{m}$ ,出口的体积平均粒径为 $4.25 \mu\text{m}$ ,得到此时的凝聚指数3.17。从结果可以看出,凝变器对亚微米级颗粒物的凝聚效果良好。

#### 3.2 微细颗粒物脱除性能

##### 3.2.1 粉尘颗粒物脱除粒径分布

研究中,采用低压撞击器(DLPI)在凝变湿电复合系统出口采集的颗粒物样品进行称重并作相应的数据处理,得到不同运行条件下系统出口的颗粒物质量粒径分布。

测试选用机组负荷600 MW工况。湿式静电除尘二次电压为60 kV时,DLPI测得凝变湿电复合系统出口颗粒物质量粒径分布如图5所示。

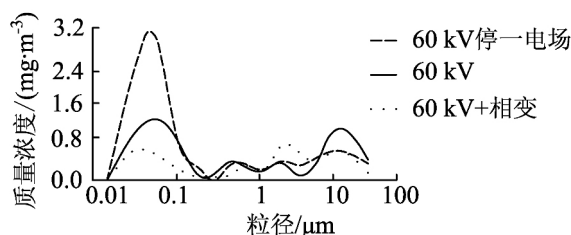


图5 600 MW出口颗粒物粒径分布

图5为负荷600 MW、二次电压60 kV时凝变器开、关状态下系统出口的颗粒物质量粒径分布,该运行条件下系统出口微细颗粒物排放的质量浓度最大值出现在 $0.05 \mu\text{m}$ ;由图5可知,运行凝变器可以明

显增强粒径在 0.01 ~ 0.3 μm 的微细颗粒物的脱除能力。此外,在负荷 600 MW 时湿式电除尘器 1 个电场关闭状态下,凝变湿电系统出口的颗粒物质量浓度在 0.05 μm 处明显升高,说明湿式电除尘器电场二次电压对于系统出口颗粒质量粒径分布也存在一定影响。

### 3.2.2 粉尘颗粒物分级脱除效率

分级脱除效率用来量化表征凝变湿电系统对

表 3 600 MW 时湿除分级脱除效率

	入口质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )		出口质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )		脱除效率%	
	凝变器关	凝变器开	凝变器关	凝变器开	凝变器关	凝变器开
PM <sub>1</sub>	3.15	3.15	0.99	0.52	68.66	83.61
PM <sub>2.5</sub>	6.21	6.21	1.07	0.76	82.75	87.69
TSP	13.59	13.59	1.59	1.04	88.30	92.32

### 3.3 多污染物脱除性能

对于凝变湿电复合装置对烟气中多污染物的脱除性能,我们通过采用对收集水水质化验分析的方法进行研究及总结。收集水取样分为 2 个工况:关闭凝变器和开启凝变器。采用烟气冷凝法(冰浴)

不同粒径颗粒物的脱除效果,根据试验结果计算得到锅炉负荷在 600 MW,二次电压 60 kV 时,系统对 PM<sub>1</sub>、PM<sub>2.5</sub>和 TSP 的脱除效率。凝变器开、关时结果如表 3 所示。

对比 600 MW 负荷下颗粒物分级脱除效率可以发现,在湿式电除尘器运行基础上,增开凝变器对 PM<sub>1</sub>、PM<sub>2.5</sub>和 TSP 的脱除能力进一步提升,分级脱除效率显著提高。

在湿式电除尘器烟气出口处(图 3 测点 3)取样,机组负荷保持在 460 MW。关闭凝变器取样时长约 12 h,取水量 1.7 L;开启凝变器取样时长约 22 h,取水量 2.3 L,结果如表 4 所示。

表 4 全水质分析结果

检测项目	mg/L (Hg <sup>2+</sup> 、pH 和电导率除外)										
	F <sup>-</sup>	CL <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Hg <sup>2+</sup> / (μg·L <sup>-1</sup> )	电导率 / (S·cm <sup>-1</sup> )	
出口水质 凝变器关	0.08	4.38	56.84	1.76	0.60	0.37	0.68	10.11	1.82	2.97	505
凝变器开	0.03	0.70	17.31	0.90	0.01	0.22	0	1.96	0.65	3.59	105

试验结果表明,凝变湿电复合装置对烟气中可溶性盐类颗粒物有较强的脱除能力,出口烟气中此类物质的排放量明显下降,下降量达到 71.58%,收集水中的电导率也下降 79.21%,复合装置在高效除尘的同时也实现了烟气多污染物脱除。

### 3.4 凝水量分析

凝变湿电复合技术是采用对饱和湿烟气降温冷凝的原理,烟气在降温后将凝结出大量的水分,烟气降低不同温度时,对应不同机组可以回收相应的水量。在本工程中,系统设有收集水箱,以便对收集水量进行测试。机组运行负荷在 390 ~ 600 MW 条件下,分别对凝变器进出口温度及收集水量进行测试,结果表明:随着机组负荷的增加,凝变器进出口温度相应地提高,收水量也在不断增加。在 600 MW 负荷时,烟气平均温度降低约 2.61 °C,收集水量约 14.74 t/h,达到要求设计值。本工程在设计初期,充分考虑到水资源的回收利用问题,设置一个 60 m<sup>3</sup> 的水箱,回收水在水箱沉淀处理后,直接回脱硫系统参与循环,减少了脱硫的耗水量。

## 4 结语

(1) 凝变湿电复合技术是一种可协同控制脱硫

后烟气污染物排放的新技术,通过烟气降温原理,可促进烟气中微细颗粒物(包含粉尘、可溶性及气态颗粒物)的凝变、长大及脱除。凝变湿电复合技术将凝变技术与湿式电除尘器技术有机整合,有效提高了湿式电除尘器对烟气中微细颗粒物的捕集能力。

(2) 凝变湿电复合技术可凝结析出脱硫后烟气中携带的部分水汽,回收烟气中的水分,降低排放烟气的含湿量,有效减缓烟囱“白烟”现象。

(3) 凝变湿电复合技术在 600 MW 机组上的工程示范应用及检测结果表明:可稳定实现颗粒物排放小于 5 mg/m<sup>3</sup>;降温 2 °C 每小时回收约 15 t 的水资源,减缓烟囱“白烟”现象;可高效脱除烟气中 PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>3</sub>、可溶性盐、Hg 等多种污染物,降低烟气中携带的 70% 以上可溶性盐分。

#### 参考文献

- [1]常景彩. 柔性集尘极应用于燃煤脱硫烟气深度净化的试验研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.
- [2]廖大兵. 湿式电除尘器的发展及其在火电厂的应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [3]金定强, 舒喜, 申智勇, 等. 湿式静电除尘器在火电厂大型机组中的应用[J]. 环境工程, 2015(3): 65-68, 72.

(下转第 106 页)

境,并实行低碳招商,全面谋求开发区低碳转型。

对于东湖新技术开发区光谷光电子信息产业园,应结合其现代装备制造、新能源环保、消费电子及软件与金融服务业为主导的高新技术产业构架,着力在基础设施配套、低碳运营管理、宜业宜居生态建设等方面进行低碳建设,可借鉴天津、杭州和深圳经验,大力推广工业厂房绿色建筑,推进太阳能光热建筑一体化应用、太阳能发电、土壤热泵技术应用等可再生能源应用,在有条件区域规划建设“共同管沟”在新建路段建设低冲击雨水开发示范项目(海绵城市建设示范),大力引进节能环保产业和新能源制造业,建设“开发区低碳促进中心”等。

针对东湖新技术开发区光谷现代服务业园,根据其以商贸流通业、软件服务业为主导,金融总部和港口物流为辅的现代服务业园区定位,可借鉴深圳国际低碳城经验,夯实低碳基础设施,着力在绿色建筑、绿色物流、低碳交通、低碳社区、低碳管理等方面,建设有服务业特色的低碳园区。

武汉市政府应制定有效的环境政策和财政政策,引导企业的低碳发展,实现政府与企业、民众的目标相协同。优化政府管理模式,加大和强化低碳相关

政策和制度的支持力度,健全激励机制,着力培养企业和民众的低碳意识和社会责任感。加强低碳化国际合作,强调技术创新,推进低碳技术的开发与应用,着力建设和推广低碳示范,如低碳园区示范、绿色建筑示范、低碳交通示范、低碳服务平台示范等。

参考文献

[1] 秦耀辰,张丽君,鲁丰先,等. 国外低碳城市研究进展[J]. 地理科学进展, 2010, 29(12): 1459-1469.

[2] 吴志强,王效俐,孙靖文. 低碳产业园建设策略研究[J]. 经济论坛, 2010(11): 157-159.

[3] 吕斌,熊小平,康艳兵,等. 我国产业园区低碳发展思路初探[J]. 能源与环境, 2014, 36(12): 31-35.

[4] 冯昱,汲奕君,朱坦,等. 我国低碳产业园区的建设路径与支撑体系研究[J]. 未来与发展, 2014(2): 6-9.

作者简介 吴雪莲,女,1985年生,硕士,工程师,主要从事低碳经济、低碳产业和环境保护等方面研究。

鲍仁冬,男,1987年生,硕士,工程师,主要从事循环经济和环境保护研究。

万迎峰,男,1971年生,硕士,教授级高级工程师,主要从事循环经济、应对气候变化等方面研究。

(收稿日期:2017-03-21)

(上接第72页)

[4] 尹连庆,唐志鹏. 国内燃煤电厂湿式电除尘器应用前景分析[J]. 电力科技与环保, 2016(2): 29-31.

[5] 胡志光,李丽,徐劲. 新排放标准下燃煤电厂湿式电除尘器应用分析[J]. 电力科学与工程, 2016(8): 70-74.

[6] 段雷,马子轸,李振,等. 燃煤电厂排放细颗粒物的水溶性无机离子特征综述[J]. 环境科学, 2015(3): 1117-1122.

[7] 杨卫芬,银燕,魏玉香,等. 霾天气下南京PM<sub>2.5</sub>中金属元素污染特征及来源分析[J]. 中国环境科学, 2010, 30(1): 12-17.

[8] 贺克斌,杨复沫,段凤魁,等. 大气颗粒物与区域复合污染[M]. 北京:科学出版社, 2011: 45-51.

[9] 郝吉明,马广大,王书肖,等. 大气污染控制工程[M]. 第三版. 北京:高等教育出版社, 2010: 378-411.

[10] 熊桂龙,李水清,陈晟,等. 增强PM<sub>2.5</sub>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): 2217-2223.

[11] 王东歌,朱法华,易玉萍,等. 凝聚器与电除尘器新技术对颗粒物去除效果的试验研究[J]. 中国电力, 2015(8): 8-12.

[12] WATANABE T, SUDA T. Submicron size carbonic particles agglomeration by an electrostatic agglomeration apparatus [C]//Proceedings of the Third International Aerosol Conference. Kyoto, 1990: 749-752.

作者简介 许芸,女,1981年生,硕士,工程师,主要研究方向为电力环保设备技术研究及应用。

(收稿日期:2017-03-12)