

# 脉冲电源对静电除尘性能影响的实验与理论研究

陆 洋,王宏成,顾中铸,席剑飞,宋先平,蔡 杰

(南京师范大学能源与机械工程学院,江苏 南京 210023)

**[摘要]** 以国内某燃煤电厂 320 MW 机组双室五电场干式静电除尘系统为对象,对 4 组不同电源工况条件下的除尘特性进行了实验研究. 探讨了脉冲电源对静电除尘性能的影响,进一步深入分析了不同电源工况对分级除尘效率的影响. 结果表明,4 种电源工况下的实验的静电除尘系统对于燃煤电厂飞灰的除尘效率均可超过 99.79%. 对比实验发现,高压脉冲电源不仅大大降低能耗,而且可显著提高对微细粉尘的捕集效率,颗粒越小差异越显著. 适当提高工作电压,增大荷电强度,使飞灰颗粒荷电充分,提高了电场驱进力,飞灰的捕集效率提高.

**[关键词]** 阴极放电,除尘效率,静电除尘,脉冲电源

**[中图分类号]** X513 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2022)03-0015-06

## Experimental and Theoretical Study on the Influence of Pulse Power Supply on Electrostatic Precipitator Performance

Lu Yang, Wang Hongcheng, Gu Zhongzhu, Xi Jianfei, Song Xianping, Cai Jie

(School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Taking the dual-chamber five-electric field dry electrostatic precipitator system of a coal-burning power station 320 MW unit as the object, we test the characteristics of dust collection under 4 groups of different types of power conditions, and discuss the influence of pulse power on the dust removal performance. The influence of different types of power on the grading efficiency of dust collection each electric field are further analyzed. The result shows that the efficiency of the dust cleaning system tested can be more than 99.79% under four power operation conditions. The comparative tests show that pulse power supply can not only reduce energy consumption greatly, but also increase the removal efficiency of fine particles significantly. Especially, the difference of efficiency of dust collection is more significant with the dust particle size smaller. The dust particles are charged fully in the electric field of increased charging intensity with the rise of working voltage appropriately to improve the dust capture efficiency.

**Key words:** cathode discharge, dust removal efficiency, electrostatic dust removal, pulse power supply

烟气除尘是冶金、水泥、建筑等领域中的重要问题,其中微细颗粒物的脱除是难点<sup>[1-2]</sup>. 静电除尘技术优点包括能耗低、易维修、占地小、阻力损失小,重量轻等<sup>[3-5]</sup>,已被广泛应用于电力、钢铁、化工等多个工业部门. 虽然工频电源静电除尘器对粒径较大的粉尘捕集能力很强,但由于电源放电电压及阴极放电强度的限制,其对微细颗粒物捕集效果并不理想,尤其是  $PM_{2.5}$  的脱除效率较低<sup>[6-8]</sup>. 为了提高除尘器对微细颗粒物的捕集能力,可行的方法是:尽可能提高工作电压及阴极的放电强度,增大荷电区场强和电流密度,从而提高微细粉尘的荷电量和电场驱进力.

继工频、高频电源之后,脉冲电源作为静电除尘器的电源越来越得到人们的关注<sup>[4]</sup>. 高压脉冲电源可在微秒级甚至纳秒级的时间内达到很高的电压,产生大量的低温等离子体,从而促进粉尘颗粒的荷电,同时显著提高工作电压<sup>[9-10]</sup>. Kirk<sup>[11]</sup>将可以发射微秒级的脉冲电源系统加装到直流静电除尘器上,使除尘器既节能又提高了除尘效率. Beckers 等<sup>[12]</sup>在直流电压的基础上加装脉冲电压,发现阴极的电晕放电强度明显提高. 江建平<sup>[13]</sup>对脉冲电晕放电特性及不同电场颗粒物的荷电特性进行了实验研究,发现脉冲放电

收稿日期:2022-03-24.

基金项目:国家自然科学基金项目(51878356)、江苏省高校自然科学研究面上项目(22KJB610018).

通讯作者:席剑飞,博士,副教授,研究方向:挥发性有机物控制、高温除尘、燃烧污染物控制. E-mail: jianfeixi@njnu.edu.cn

可产生高密度、高能量的等离子体,这是由于电子崩形成的流光通道可以贯穿正负极,其内部存有高密度的高能电子和正负离子.

文献[14–17]采用理论与实验相结合的方法系统研究脉冲电源对静电除尘性能影响的研究. 本文对某电厂静电除尘器供电电源进行升级改造,在不同电源工况条件下进行除尘特性的实验研究,探讨了脉冲电源对除尘效果的影响. 进一步深入分析不同电源工况参数对分级除尘效率的影响,旨在为脉冲电源静电除尘器在实际燃煤电厂的应用与运行参数优化提供依据.

1 静电除尘器改造介绍

国内某电厂 320 MW 机组采用的是双室五电场干式静电除尘器,对燃煤锅炉进行烟气除尘试验. 本实验在原静电除尘器供电电源的基础上进行升级改造,通过使用高频高压电源来替代原 1、2、3 电场供电电源,并在 4、5 电场加装脉冲电源,如图 1 所示. 该系统最大处理烟气量为 1 944 000 m<sup>3</sup>/h,平均烟气流速为 1.01 m/s,入口含尘浓度为 21.73 g/m<sup>3</sup>.

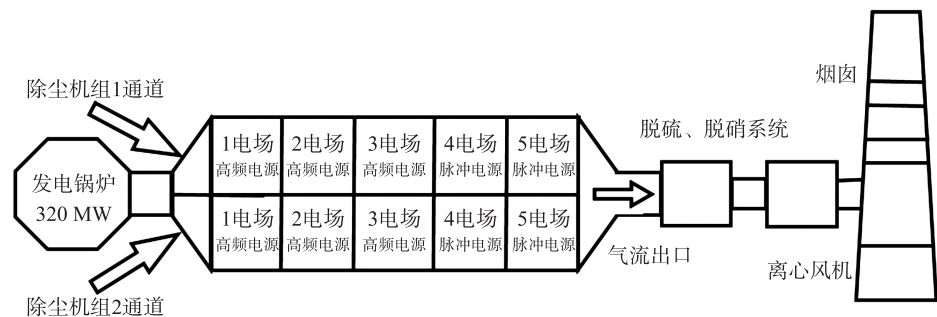


图 1 电厂静电除尘实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a power plant electrostatic precipitator test system

2 实验研究与分析

2.1 粉尘性质

粉尘的粒径分布对静电除尘性能影响很大. 运用激光粒度仪对该电厂的飞灰试样进行了测试分析,获得粒径分布特性,如图 2 所示. 其中实验电厂飞灰的中位径  $d_{50}=9.8\text{ }\mu\text{m}$ .

2.2 实验工况

在实验过程中,为了更好地比较脉冲电源和高频高压电源对除尘性能的影响,分别对静电除尘系统的电源运行方式进行调节,开展变工况动态除尘实验. 各变工况条件和实验过程中运行数据分别见表 1 和表 2.

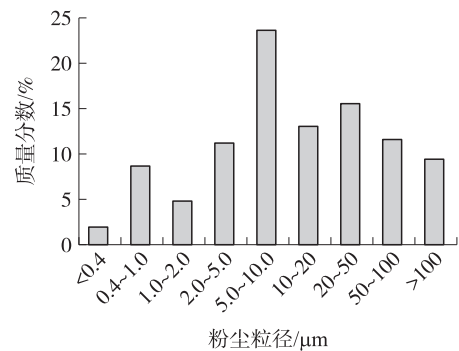


图 2 电厂飞灰粒径分布

Fig. 2 Particle size distribution of power plant fly ash

表 1 变工况实验列表

Table 1 List of variable condition tests

工况序号	静电除尘器中五电场电源运行方式
I	1、2、3 电场为高频电源,4、5 电场加装脉冲电源
II	1、2、3、4 电场为高频电源,5 电场加装脉冲电源
III	1、2、3、4、5 电场为高频电源(脉冲控制模式)
IV	1、2、3、4、5 电场为高频电源(4、5 电场手动控制,其余脉冲控制模式)

表 2 各工况下每个电场对应的电压和电流值

Table 2 Voltage and current corresponding to each electric field under each working condition

序号	电源运行工况	I	II	III	IV
1 电场	电压值/kV	47	47	46	48
	电流值/mA	125	128	123	122
2 电场	电压值/kV	41	41	39	39
	电流值/mA	169	162	177	182
3 电场	电压值/kV	38	38	37	38
	电流值/mA	209	209	209	212
4 电场	电压值/kV	基础 47/脉冲 45	47	37	61
	电流值/mA	416	416	178	811
5 电场	电压值/kV	基础 39/脉冲 33	基础 39/脉冲 33	34	58
	电流值/mA	247	247	192	821

2.3 结果分析

在机组近满额定负荷运行条件下,计算各个实验工况下的总除尘效率,

$$\eta = \frac{c_i - c_o}{c_i} \cdot 100\%$$
 (1)

式中, $\eta$  代表静电除尘器的捕集效率,%。 $C_i$ 、 $C_o$  分别为静电除尘器进、出粉尘浓度, $\text{mg}/\text{N}\cdot\text{m}^3$ 。结果如表 3 所示。

由表 3 知,工况 I ~ IV 条件下的总除尘效率依次为 99.91%、99.89%、99.79%、99.82%。电源运行工况 I (双脉冲电源)和电源运行工况 II (单脉冲电源)比电源运行工况 III (高频电源)的除尘效率分别高出约 0.12%、0.10%,反映出脉冲电源比高频高压电源对亚微米级的飞灰颗粒捕集能力更强。烟气中大质量份额的粉尘颗粒( $>1.0\ \mu\text{m}$ )可以在装载高频、单(双)脉冲电源的电场中被完全捕集,而剩余小部分质量份额的亚微米粉尘却难以在装载高频电源的电场中被捕集,但可以在装载单(双)脉冲电源的电场中进一步被捕集。

图 3 为 4 种电源运行工况下 4、5 电场共同对细微粉尘除尘效率的对比图。由图可见,电源工况 I (双脉冲电源)的除尘效率值最大,电源工况 II (单脉冲电源)的除尘效率值次之,这是因为高压脉冲电源产生的高密度低温等离子体促进了粉尘的荷电,且双脉冲电源比单脉冲电源在荷电区内产生的高密度低温等离子体数量更多。此外脉冲电源间断供电的特性可有效抑制反电晕的形成,从而有利于飞灰颗粒(尤其是对亚微米飞灰颗粒)的荷电与收集,故使用双脉冲电源时粉尘颗粒在荷电区内荷电更充分,提高了亚微米粉尘的捕集效率。

图 3 中,电源工况 I、II 与电源工况 III 的除尘效率差值随着粒径的增大而减小,颗粒粒径越小差异越显著。例如,电源工况 I、II 与电源工况 III 在粒径为  $0.4\ \mu\text{m}$  与  $2.0\ \mu\text{m}$  的情况下,除尘效率值之差分别为 19%、15%与 10%、9%。说明脉冲电源有助于提高细颗粒粉尘的捕集效率。

基于现场测试数据和计算可以获得不同电源模式下的供电功率,表 4 给出了电源工况 I、IV 下 4、5 电场的供电功率对比情况。从表 4 可知,电源运行工况 I 中采用脉冲电源的 4、5 电场的供电功率依次为 20.5 kW 和 10.1 kW,而电源运行工况 IV 中采用高频电源的 4、5 电场的供电功率依次为 49.5 kW 和 47.6 kW。这是由于脉冲电源电晕放电可产生高能电

表 3 试验得到的电厂静电除尘器除尘效率

Table 3 The dust removal efficiency of electrostatic precipitator in power plant is obtained by experiment %

工况序号	I	II	III	IV
除尘效率	99.91	99.89	99.79	99.82

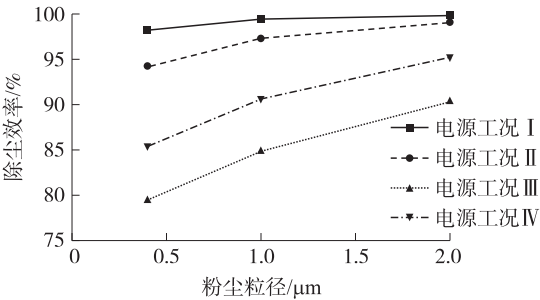


图 3 4 种工况下 4、5 电场对微细粉尘的总除尘效率

Fig. 3 Total dust removal efficiency of 4 and 5 electric fields for fine dust under four working conditions

表 4 高频电源与脉冲电源输出功率值对比

Table 4 Comparison of output power between high frequency power supply and pulse power supply

工况序号	电场编号	电源输出功率/kW
I	4	20.5
	5	10.1
IV	4	49.5
	5	47.6

子使气体分子不断电离,产生大量高能电子与离子. 相比较离子和气体分子的扩散系数和迁移率之比,这些高能电子的扩散系数和迁移率之比要高出至少 2 个数量级. 因此,在极短的(微秒级甚至纳秒级)脉冲放电期内,高能电子的荷电能力远大于离子,使粉尘充分荷电,而离子基本保持不动,节省了能量. 故在工况条件不变情况下,静电除尘器 4、5 电场加装脉冲电源比 4、5 电场不加装脉冲电源更节能<sup>[18]</sup>.

### 3 理论计算与分析

#### 3.1 粉尘荷电量计算

粉尘荷电可分为电场荷电和扩散荷电两种方式,对于粒径大于 0.5  $\mu\text{m}$  的粉尘,在静电除尘器的中电场荷电量远大于扩散荷电量,可以忽略扩散荷电量<sup>[19]</sup>.

在一定时间  $t$  内电场荷电量计算公式为:

$$q_f = 3\pi\varepsilon_0 E d_p^2 \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon + 2} \right) \frac{t}{t + \frac{4\varepsilon_0}{\varepsilon N_0 k}} \quad (2)$$

式中,  $q_f$  代表粉尘电场荷电量, C.  $\varepsilon_0$  代表真空介电常数,  $8.85 \times 10^{-12}$  F/m.  $N_0$  代表荷电区离子密度, 个/ $\text{m}^3$ .  $E$  代表电场强度, V/m.  $d_p$  代表粉尘直径, m.  $\varepsilon$  代表粒子相对介电常数.  $k$  代表波尔兹曼常数,  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K.

电场荷电达到饱和所需时间很短,一般用电场饱和荷电量近似计算,

$$q_f = 3\pi\varepsilon_0 E d_p^2 \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon + 2} \right) \quad (3)$$

式中,计算电场荷电量时  $\varepsilon$  取 6<sup>[20]</sup>.

对于粒径小于 0.2  $\mu\text{m}$  的粉尘,在静电除尘器中扩散荷电量远大于电场荷电量,可以忽略电场荷电量,扩散荷电量的理论计算为

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

式中,  $q_k$  代表粉尘扩散荷电量, C.  $e$  代表电子电量,  $1.6 \times 10^{-19}$  C.  $T$  代表烟气温度, K.  $n$  代表离子质量,  $5.3 \times 10^{-26}$  kg.  $t$  代表粒子的荷电时间, s.

对于粒径在 0.2~0.5  $\mu\text{m}$  范围的尘粒,在静电除尘器中电场荷电量和扩散荷电量相差不大,则需共同考虑<sup>[21]</sup>,即:

$$q = q_f + q_k \quad (5)$$

#### 3.2 分级除尘效率理论计算

对多依奇公式进行修正,取修正系数  $f=0.6$ <sup>[18]</sup>,得到计算公式,

$$\eta = 1 - \exp \left( -0.6 \frac{A\omega}{Q} \right) \quad (6)$$

式中,  $\omega$  代表驱进速度, m/s.  $A$  代表收尘极板面积,  $\text{m}^2$ .  $Q$  代表烟气流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ .

驱进速度  $w$  计算公式为

$$w = \frac{qE}{3\pi\mu d_p} \quad (7)$$

当温度不同时气体黏度也随着变化,影响气体黏度最大的因素是温度,一般气体黏度  $\mu$  计算公式为,

$$\mu = \mu_0 \frac{273 + 120}{T + 120} \left( \frac{T}{273} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (8)$$

式中,  $\mu$  代表烟气黏度,  $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ .  $\mu_0$  代表温度为  $T_0 = 273$  K 时烟气黏度,  $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ .

表 5 给出了除尘效率理论值与试验值的对比数据,由图可知,除尘效率理论计算结果接近机组实际运行时的除尘效率值,两者之间数值差值极小 ( $<0.2\%$ ),表明本文除尘效率理论计算结果具有较高的可靠性.

表 5 理论除尘效率与实际除尘效率对比

工况序号	I	II	III	IV
理论除尘效率	99.91	99.89	99.79	99.82
实际除尘效率	99.90	99.87	99.79	99.80



图 4(a)~图 4(d) 依次给出了在电源运行工况 I~IV 下 5 个电场分级除尘效率曲线. 由图 4(a)~图 4(d) 可知, 分级除尘效率随着颗粒粒径的增大而升高. 当飞灰颗粒粒径增大时, 该粒径范围的飞灰颗粒在荷电区中因电场而荷电的电场荷电量与因离子热运动而荷电的扩散荷电量随之增大, 飞灰颗粒的总荷电量增大, 驱进速度变大, 颗粒的捕集效率增大.

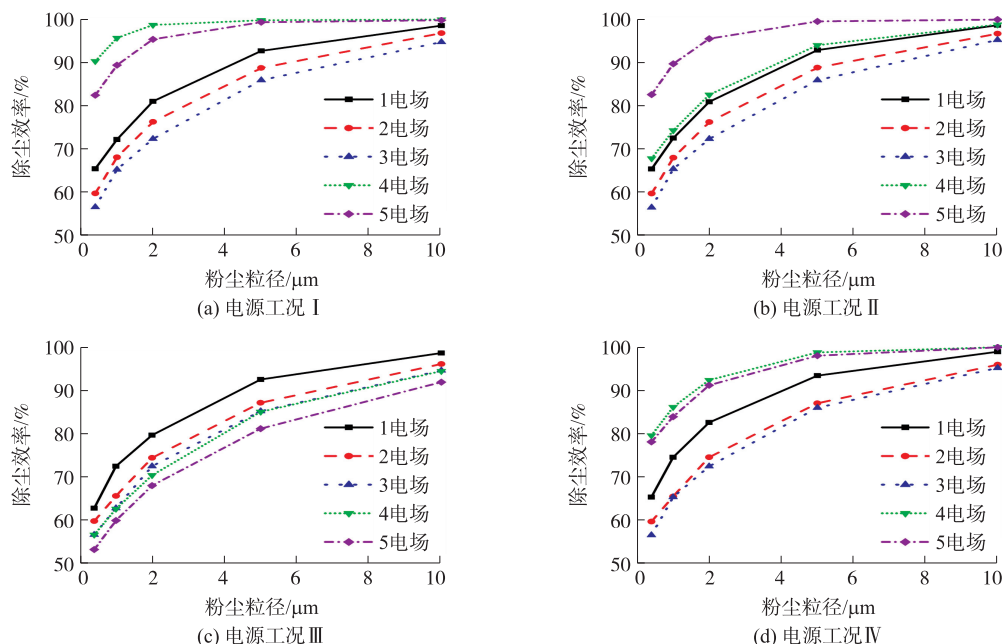


图 4 4 种电源运行工况下的各级粉尘捕集效率

Fig. 4 Grade efficiency of dust under four power supply operating conditions

从图 4(a) 知, 4、5 电场的除尘效率一直高于 1、2、3 电场的除尘效率, 且 4 电场的除尘效率最高, 5 电场的除尘效率次之. 这是由于脉冲电源可在荷电区内产生的高密度、均匀的低温等离子体, 且双脉冲电源比单脉冲电源在荷电区内产生的高密度低温等离子体数量更多, 为微细颗粒荷电的创造优化了环境. 这是因为脉冲电源在极短时间内可产较大的电流 (见表 2), 生成高密度的自由电子, 自由电子在较高的电场中易加速至高能电子. 在电场作用下, 高能电子不断电离气体分子, 形成更多的电子和离子, 从而引发电子崩现象, 形成高密度的低温等离子体. 同理, 在电源运行工况 II 条件下, 5 电场 (脉冲电源供电) 除尘效率明显高于 1、2、3、4 电场 (高频电源供电) 的除尘效率, 见图 4(b).

从图 4(c) 可知, 1~5 电场的电源均采用高频高压电源, 所对应的分级除尘效率依次降低, 且 1 与 5 电场的除尘效率值之差最大约 13%. 这主要是因为, 在电源运行工况 III 条件下, 随着电场序号的增加, 所加电压逐渐减小. 如图 4(d) 所示, 工况 IV 与工况 I 的粉尘捕集情况相似. 4、5 电场的除尘效率一直高于 1、2、3 电场的除尘效率, 且 4 电场的除尘效率最高, 5 电场的除尘效率次之. 因为静电除尘器中的 4、5 电场使用大功率模式的高频电源时, 电压升高 (见表 2), 场强也随之增大, 粉尘荷电充分, 颗粒的捕集效率提高.

## 4 结论

经实验研究, 得出以下结论:

- (1) 无论是采用高频电源, 还是脉冲电源供电, 所试验的静电除尘系统对于燃煤电厂飞灰的除尘效率均可超过 99.79%. 不同电源运行工况下, 分级除尘效率随着粉尘颗粒粒径的增大而升高.
- (2) 与高频电源供电相比, 采用脉冲电源供电, 可显著提高对微细粉尘的捕集效率, 颗粒越小差异越显著.
- (3) 在工况条件不变的情况下, 静电除尘器加装脉冲电源比不加装脉冲电源更节能.
- (4) 适当提高工作电压, 增大电场强度, 可使荷电粉尘受到较大的电场力, 驱进速度增大, 除尘效率提高.

## [参考文献] (References)

- [1] ZOUAGHI A, MEKHALDI A. Analysis of nanosecond pulsed and square AC dielectric barrier discharges in planar configura-

- tion: Application to electrostatic precipitation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(4): 2314–2324.
- [2] WANG J N, HUANG W J, XU H M, et al. Coagulation and capture of fine particles in the coupling system of corona discharge and embedded turbulence[J]. Powder Technology, 2021, 382: 85–94.
- [3] GAO M X, ZHU Y, XIN Y, et al. Dust removal performance of two-stage electrostatic precipitators and its influencing factors[J]. Powder Technology, 2019, 348: 13–23.
- [4] 邓艳梅. 电除尘器的脉冲电源研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [5] ZHOU W N, JIANG R B, SUN Y F, et al. Study on multi-physical field characteristics of electrostatic precipitator with different collecting electrodes[J]. Powder Technology, 2021, 381: 412–420.
- [6] FIGUEROA-LARA J J, MURCIA-GONZÁLEZ J M, GARTÍNEZ R, et al. Effect of platform subway depth on the presence of airborne PM<sub>2.5</sub>, metals, and toxic organic species[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 377: 427–436.
- [7] XIANG J B, WESCHLER C J, WANG Q Q, et al. Reducing indoor levels of “Outdoor PM<sub>2.5</sub>” in urban China: impact on mortalities[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(6): 3119–3127.
- [8] RAÍSSA G S A A, VÁDILA G G. Discharge electrode influence on electrostatic precipitation of nanoparticles[J]. Powder Technology, 2021, 379: 417–427.
- [9] DU C, GONG X, LIN Y C. Decomposition of volatile organic compounds using corona discharge plasma technology[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2019, 69(8): 879–899.
- [10] LUO Z Y, CHEN H, WANG T, et al. Agglomeration and capture of fine particles in the coupling effect of pulsed corona discharge and acoustic wave enhanced by spray droplets[J]. Powder Technology, 2017, 312: 21–28.
- [11] KIRK L M. Upgrading of electrostatic precipitators for sinter plants with pulse energization[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
- [12] BECKERS F J C M, HOEBEN W F LM, HUISKAMP T, et al. Pulsed corona demonstrator for semi-industrial scale air purification[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(10): 2920–2925.
- [13] 江建平. 细颗粒物脉冲荷电机理及凝并脱除方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [14] 张晓青, 韩戈奇. 不同电控方式对电除尘器的提效特性及能耗分析[J]. 环境工程, 2020, 38(3): 135–141.
- [15] LAN Y, KE L, XIANG Z, et al. Nitric oxide removal from flue gas using dielectric barrier discharge coupled with negative pulse corona[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2019, 143: 170–179.
- [16] SONG K, WANG H, JIAO Z, et al. Inactivation efficacy and mechanism of pulsed corona discharge plasma on virus in water[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 422: 126906.
- [17] 赵磊, 周洪光. 近零排放机组不同湿式电除尘器除尘效果[J]. 动力工程学报, 2016, 36(1): 53–58.
- [18] 王宏成. 基于高压脉冲电源阴极放电的静电除尘器除尘特性研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2020.
- [19] 余旭平, 代维敏, 席剑飞, 等. 线管式热电子发射高温静电除尘器的数值研究[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2017, 17(2): 42–48.
- [20] 张佳鹏. 线管式高温静电除尘特性实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [21] 张先鹏. 基于低逸出功阴极放电的静电强化颗粒层高温除尘器性能研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2018.

[责任编辑: 陈 庆]