

DOI: 10.3969/j.issn.1674-1951.2020.01.005

# 湿式电除尘器与氨法脱硫协同脱除多种 污染物效果研究

Study on synergistic removal effect on multiple pollutants made  
by WESP and ammonia desulfurization system

高正来<sup>1</sup>,周国山<sup>1</sup>,沈东<sup>1</sup>,潘正琪<sup>1</sup>,周威<sup>1</sup>,信晓颖<sup>2</sup>,李艳<sup>2</sup>  
GAO Zhenglai<sup>1</sup>,ZHOU Guoshan<sup>1</sup>,SHEN Dong<sup>1</sup>,PAN Zhengqi<sup>1</sup>,  
ZHOU Wei<sup>1</sup>,XIN Xiaoying<sup>2</sup>,LI Yan<sup>2</sup>

(1. 中国联合工程有限公司,杭州 310052; 2. 华电电力科学研究院有限公司,杭州 310030)

(1. China United Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310052, China; 2. Huadian  
Electric Power Research Institute Company Limited, Hangzhou 310030, China)

**摘 要:**氨法脱硫具有脱硫效率高,运行操作简便等优点,但存在氨逃逸、气溶胶现象。通过测试氨法脱硫装置+湿式电除尘前后烟气中 $\text{NO}_x$ 、烟尘、 $\text{NH}_3$ 、雾滴、 $\text{SO}_3$ 等污染物浓度的变化,系统研究了氨法脱硫+湿式电除尘器的协同脱除作用,得出湿式电除尘器出口烟尘质量浓度可控制在 $10\text{ mg/m}^3$ 以下,对 $\text{NO}_x$ 有30%~40%的脱除效率,对 $\text{SO}_3$ 有90%左右的脱除效率,对雾滴具有80%以上的脱除效率,仅能脱除50%左右的 $\text{NH}_3$ 。因此,氨法脱硫+湿式电除尘器可基本实现烟尘、 $\text{NO}_x$ 超低排放,对缓解氨法脱硫气溶胶现象也有显著效果,对 $\text{NH}_3$ 逃逸控制仍需考虑其他方法。

**关键词:**氨法脱硫;湿式电除尘器;氨逃逸;硫酸气溶胶;超低排放;协同脱硫

**中图分类号:**X 701 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2020)01-0025-04

**Abstract:** Ammonia desulfurization is of high desulfurization efficiency, and easy to operate. But it has disadvantages such as ammonia escaping and  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  aerosol forming. By analysis the removal efficiency on  $\text{NO}_x$ , dust,  $\text{NH}_3$ , droplets,  $\text{SO}_3$  and other pollutants made by ammonia desulfurization system and wet electrostatic precipitator (WESP), their synergistic removal effect on typical pollutants above were systematically studied. The results show that the mass concentration of dust at the outlet of WESP is less than  $10\text{ mg/m}^3$ , and 30%~40%  $\text{NO}_x$ , 90%  $\text{SO}_3$  and 80% droplets can be shrugged off, but only about 50%  $\text{NH}_3$  can be removed by the WESP and ammonia desulfurization system. Therefore, ultra-low emission of dust and  $\text{NO}_x$  can be achieved by WESPs and ammonia desulfurization systems, which has a significant effect on preventing aerosol forming caused by ammonia desulfurization. But their effect on ammonia escaping control still needs to be updated.

**Keywords:** ammonia desulfurization; WESP; ammonia escaping;  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  aerosol; ultra-low emission; synergistic desulfurization

## 0 引言

氨法烟气脱硫是以氨水为脱硫剂脱除烟气中 $\text{SO}_2$ 的脱硫工艺,经过多年的发展和实践,氨法脱硫目前已成为仅次于石灰石-石膏湿法脱硫的脱硫工艺,广泛应用于化工企业。随着环保排放标准的提高,氨法脱硫正以其高效、副产品可资源化、对烟气条件适应性强等优势逐步得到推广应用<sup>[1-2]</sup>。与石

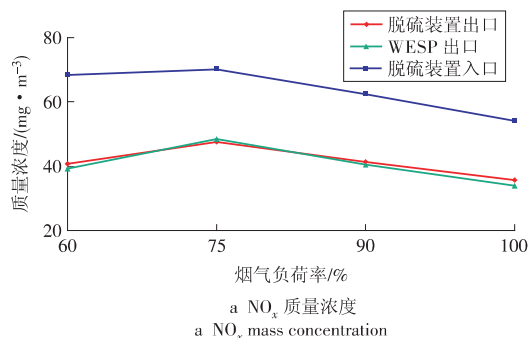
灰石-石膏湿法脱硫技术相比,氨法脱硫技术具有以下优点:(1)反应速率快,脱硫效率高,吸收剂利用率高;(2)煤种适用范围广,对机组负荷变化适应性强;(3)设备少,阻力低,且系统结垢现象少,易于操作和维护;(4)副产物硫酸铵可资源化;(5)对 $\text{NO}_x$ 也有一定的脱除作用;(6)脱硫过程不产生废水、废气、废渣,环境效益好<sup>[3-6]</sup>。同时,氨法脱硫也有一些缺点:(1)脱硫剂氨水价格高,且运输麻烦;(2)设备易腐蚀;(3)有氨逃逸、硫酸气溶胶拖尾现象<sup>[7-9]</sup>。

收稿日期:2019-04-30;修回日期:2019-11-17

湿式电除尘器(WESP)具有除尘效率高、压力损失小、无二次扬尘、可工作于烟气露点温度以下、结构紧凑而可与其他烟气治理设备相互结合、设计形式多样化等优点,是除去含湿气体中烟尘、气溶胶等污染物的可靠设施<sup>[10-11]</sup>。杜振<sup>[12]</sup>等研究表明,燃煤电厂增设 WESP 可协同脱除粉尘、雾滴、SO<sub>3</sub> 和 PM<sub>2.5</sub>,是实现超低排放的有效装置。蔡晶等研究了氨法脱硫后增设 WESP 对烟尘排放的影响<sup>[13-15]</sup>,表明 WESP 的除尘效率可高达 85%。本文通过研究某化肥厂氨法脱硫装置及其配套的 WESP 对粉尘、NO<sub>x</sub>、雾滴、SO<sub>3</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 等污染物的协同脱除作用,分析其实现超低排放的可行性,为其他类似工程提供借鉴。

## 1 研究方法

某化工企业 130 t/h 循环流化床锅炉烟气脱硫采用氨法工艺,烟塔合一技术,并在脱硫塔除雾器出口加 WESP,锅炉烟气经过氨法脱硫、WESP 净化处理后经塔顶烟囱直排。WESP 设置在氨法脱硫塔内,采用立式结构,阳极材料为导电玻璃钢,顶部设置冲洗系统。按超低排放标准设计建设,要求出口 SO<sub>2</sub> 排放质量浓度 ≤ 35.0 mg/m<sup>3</sup>,出口烟气总固体排放质量浓度 ≤ 5.0 mg/m<sup>3</sup>,出口烟气氨质量浓度 ≤ 3.0 mg/m<sup>3</sup>。



本文通过对比氨法脱硫吸收塔进出口及 WESP 出口等几个位置 NO<sub>x</sub>、烟尘、NH<sub>3</sub>、雾滴、SO<sub>3</sub> 等污染物排放质量浓度的变化趋势,分析了 60% (最低稳定运行负荷率), 75%, 90%, 100% 烟气负荷率条件下氨法脱硫及湿式电除尘器对各污染物的协同脱除作用,并根据测试结果进行了必要的补测,文中所用污染物质量浓度均为稳定负荷下连续 1 h 的平均值。

## 2 结果分析

### 2.1 NO<sub>x</sub> 脱除效果分析

在不同试验条件下,NO<sub>x</sub> 质量浓度采用西门子 ULTRAMAT 23 多组分气体分析仪连续测定,测试结果如图 1 所示。

由图 1 可以看出: NO<sub>x</sub> 经过氨法脱硫装置后,排放质量浓度都有一定的降低,脱除效率在 32.0% ~ 40.4% 之间,入口烟气中最高 NO<sub>x</sub> 质量浓度在 70.2 mg/m<sup>3</sup> 时,出口 NO<sub>x</sub> 排放质量浓度仍可控制在 50.0 mg/m<sup>3</sup> 以下,可达到超低排放的要求。但 NO<sub>x</sub> 排放质量浓度在湿式电除尘器前后并没有明显变化,由此可见,湿式电除尘器对 NO<sub>x</sub> 基本没有脱除作用。

### 2.2 烟尘脱除效果分析

烟尘浓度测试根据 GB 5468—1991《锅炉烟尘测试方法》,采用等速采样过滤计重法测定。此次测试采用 SHC-502 烟尘采样仪采样测定,测试结果如图 2 所示。

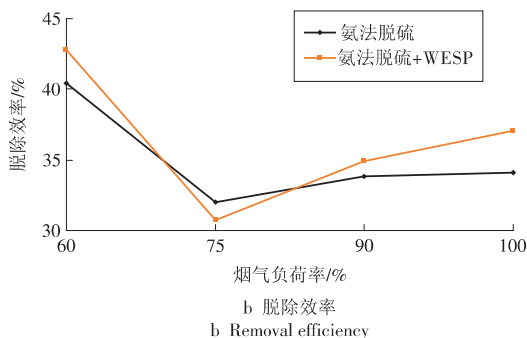


图 1 NO<sub>x</sub> 质量浓度及脱除效率

Fig. 1 NO<sub>x</sub> mass concentration and removal efficiency

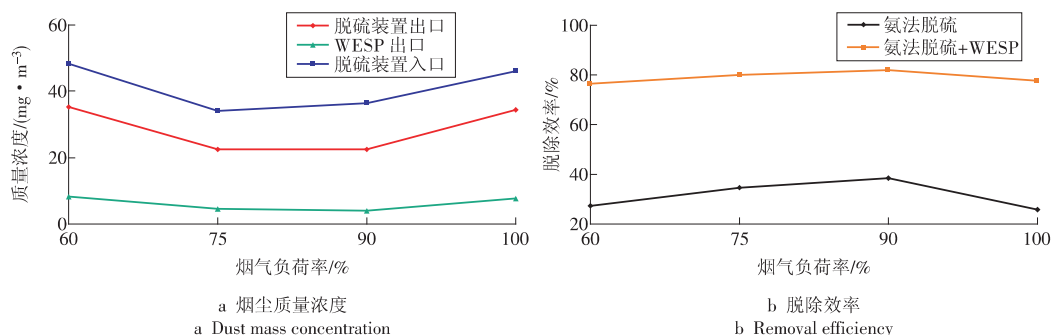


图 2 烟尘质量浓度及脱除效率

Fig. 2 Dust mass concentration and removal efficiency

由图2可以看出:氨法脱硫装置对烟气中烟尘的脱除效率在27.3%~38.4%之间,证明氨法脱硫装置本身对烟尘具有一定的脱除效率,但氨法脱硫装置出口烟尘质量浓度基本都在 $20.0\text{ mg/m}^3$ 以上,不能实现烟尘超低排放。WESP可进一步脱除烟尘,氨法脱硫+WESP对烟尘的协同脱除效率最高可达81.8%,且WESP出口烟尘质量浓度都控制在 $10.0\text{ mg/m}^3$ 以下,其中WESP入口烟尘质量浓度控制在 $20.0\text{ mg/m}^3$ 以下时,WESP出口烟尘排放质量浓度可低于 $5.0\text{ mg/m}^3$ 。因此,如控制WESP出口烟尘质量浓度在 $20.0\text{ mg/m}^3$ 以下,可实现烟尘超低排放。

### 2.3 $\text{NH}_3$ 脱除效果分析

氨逃逸采用DR-650- $\text{NH}_3$ 气体检测仪连续测定,测试结果如图3所示。

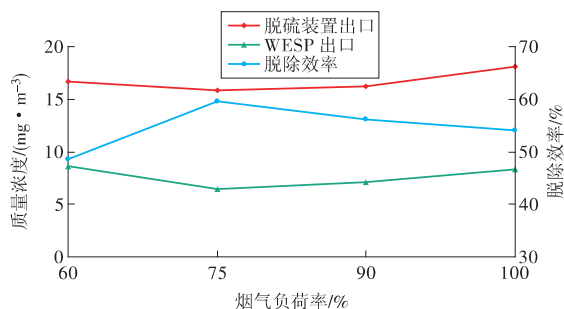


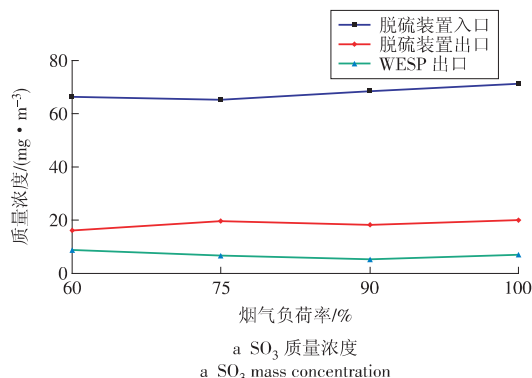
图3  $\text{NH}_3$  质量浓度及脱除效率

Fig.3  $\text{NH}_3$  mass concentration and removal efficiency

由图3可以看出:氨法脱硫装置出口 $\text{NH}_3$ 排放质量浓度在 $15.8\sim 18.1\text{ mg/m}^3$ 之间,超出技术协议的要求范围,经过WESP后, $\text{NH}_3$ 脱除效率约50.0%左右,出口 $\text{NH}_3$ 排放质量浓度都控制在 $8.6\text{ mg/m}^3$ 以下,但仍无法达到技术协议要求的 $3.0\text{ mg/m}^3$ 。由此可见,WESP并不能保证氨逃逸达标,氨法脱硫氨逃逸问题仍是个亟待解决的难题。

### 2.4 $\text{SO}_3$ 脱除效果分析

$\text{SO}_3$ 测试根据GB/T 21508—2008《燃煤烟气脱



硫设备性能测试方法》,采用冷凝采样后滴定法测定,测试结果如图4所示。

由图4可以看出:氨法脱硫装置对烟气中 $\text{SO}_3$ 的脱除效果明显,脱除效率在70.0%以上,氨法脱硫装置出口 $\text{SO}_3$ 质量浓度可控制在 $20.0\text{ mg/m}^3$ 以下。WESP可进一步脱除烟气中的 $\text{SO}_3$ ,氨法脱硫+WESP对 $\text{SO}_3$ 的协同脱除效率在87.0%~90.0%之间,WESP出口 $\text{SO}_3$ 质量浓度可控制在 $10.0\text{ mg/m}^3$ 以下,但是相比一些地方标准要求的低于 $5.0\text{ mg/m}^3$ 仍有一定差距。

### 2.5 雾滴脱除效果分析

雾滴测试根据GB/T 21508—2008《燃煤烟气脱硫设备性能测试方法》,采用采样称重法测定,测试结果如图5所示。

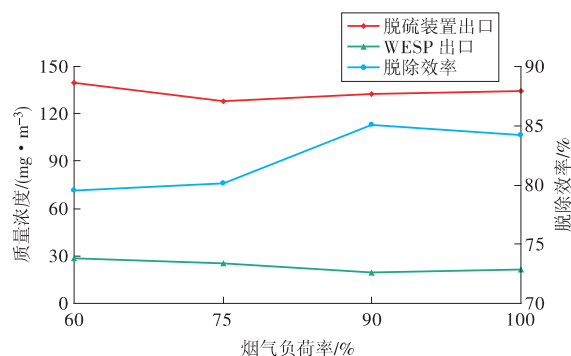


图5 雾滴质量浓度及脱除效率

Fig.5 Droplet mass concentration and removal efficiency

由图5可以看出:氨法脱硫装置出口雾滴浓度基本在 $120.0\text{ mg/m}^3$ 以上,WESP对雾滴的脱除率基本在80.0%以上,出口雾滴质量浓度基本都控制在 $30.0\text{ mg/m}^3$ 以下。与HJ/T 179—2005《火电厂烟气脱硫工程技术规范石灰石-石膏湿法脱硫》中规定的出口雾滴质量浓度低于 $75.0\text{ mg/m}^3$ 相比,远小于规范值。因此,WESP可有效控制氨法脱硫后的“硫铵雨”现象。

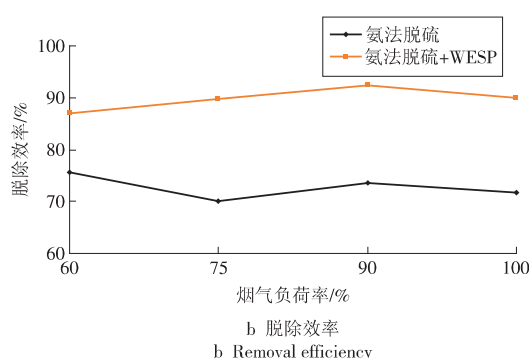


图4  $\text{SO}_3$  质量浓度及脱除效率

Fig.4  $\text{SO}_3$  mass concentration and removal efficiency

### 3 结果与讨论

总体来说,氨法脱硫效率较高,脱硫产物可资源化,相比石灰石-石膏湿法脱硫具有一定的优势,但同时易带来硫酸铵雨、氨逃逸等新的问题,影响其大规模应用。本文通过研究氨法脱硫与 WESP 对部分污染物的协同脱除作用,分析氨法脱硫+WESP 系统不足的地方,希望给下一步烟气消除有色烟羽、控制  $PM_{2.5}$  等工作提供参考。综上所述,可得出以下结论:

(1) 氨法脱硫装置脱除  $SO_3$  效果较明显,脱除率基本在 70.0% 以上,对  $NO_x$ 、烟尘也具有一定的脱除效率,经过氨法脱硫装置后, $NO_x$  基本达到超低排放要求。

(2) WESP 作为氨法脱硫装置的补充,可有效脱除氨法脱硫装置后的烟尘、 $SO_3$  及  $NH_3$  等污染物,并能有效脱除雾滴,能有效控制氨法脱硫后的“硫酸铵雨”。

(3) WESP 入口烟尘质量浓度高于  $20.0\text{ mg/m}^3$  时,无法实现烟尘的超低排放,因此,运行过程中应控制氨法脱硫装置进出口烟尘质量浓度,以达到烟尘超低排放的目标。

(4) WESP 对  $SO_3$ 、 $NH_3$  的脱除效果明显,是后续控制  $SO_3$ 、 $NH_3$  排放的有效措施,但  $SO_3$ 、 $NH_3$  排放质量浓度仍高于行业标准,仍需优化氨法脱硫及 WESP 运行方式,控制 WESP 入口  $SO_3$ 、 $NH_3$  质量浓度。

#### 参考文献:

- [1] 高璐阳,郑磊,陈宏坤,等. 锅炉烟气氨法脱硫联产硫酸铵清洁生产[J]. 磷肥与复肥, 2015, 30 (10): 35-37.
- [2] 颜金培,杨林军,鲍静静,等. 氨法脱硫过程烟气中细颗粒物的变化特性[J]. 中国机电工程学报, 2009, 29 (5): 21-29.
- [3] 李承泉,肖婷. 氨法脱硫烟气治理技术[J]. 煤炭加工与综合利用, 2017 (2): 59-61.
- [4] 李强. 淄博热电 WESP 水系统优化实践[J]. 华电技术, 2019, 41 (4): 71-73.
- [5] 张红彬,赵晓鹏,程子剑,等. 冷凝湿膜离心除尘除雾技术在湿法脱硫系统中的应用[J]. 华电技术, 2018, 40 (10): 65-68.
- [6] 岳勇,陈雷,姚强,等. 燃煤锅炉颗粒物粒径分布和痕量元素富集特性实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (18): 74-79.
- [7] 鲍静静,印华斌,杨林军,等. 湿式氨法脱硫中气溶胶的形成特性研究[J]. 高校化学工程学报, 2010, 24 (2): 325-330.
- [8] 夏怀鹏,汪洋,赵冰. 脱硫塔顶部放置湿式电除尘器的 ANSYS 分析[J]. 华电技术, 2018, 40 (9): 10-14.
- [9] 徐威,刘丰,高李璟,等. 燃煤锅炉烟气氨法脱硫工艺模拟及氨逃逸分析研究[J]. 化工时刊, 2017, 31 (11): 30-33.
- [10] 莫华,朱法华,王圣,等. 湿式电除尘器在燃煤电厂的应用及其对  $PM_{2.5}$  的减排作用[J]. 中国电力, 2013, 46 (11): 62-65.
- [11] 胡小吐. 氨法烟气脱硫湿式电除尘技术的工业应用[J]. 环境工程, 2015, 17 (2): 80-83.
- [12] LI Qiang. Zibo Thermoelectric WESP water system optimization [J]. Huadian Technology, 2019, 41 (4): 71-73.
- [13] ZHANG Hongbin, ZHAO Xiaokun, CHENG Zijian, et al. Application of centrifugal dust removal and demisting technology with condensation wet film in WFGD system [J]. Huadian Technology, 2018, 40 (10): 65-68.
- [14] YUE Yong, CHEN Lei, YAO Qiang, et al. Experimental study on characteristics of particulate matter size distribution and trace elements enrichment in emission from a pulverized coal-fired boiler [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (18): 74-79.
- [15] BAO Jingjing, YIN Huabin, YANG Linjun, et al. Formation characteristics of aerosols in wet ammonia-based desulphurization process [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2010, 24 (2): 325-330.
- [16] XIA HuaiPeng, WANG Yang, ZHAO Bing. ANSYS analysis of wet electrostatic precipitator placed on top of desulfurization tower [J]. Huadian Technology, 2018, 40 (9): 10-14.
- [17] XU Wei, LIU Feng, GAO Lijing, et al. Simulation and ammonia escape analysis of ammonia flue gas desulphurization for coal-fired boiler [J]. Chemical Industry Times, 2017, 31 (11): 30-33.
- [18] MO Hua, ZHU Fahua, WANG Sheng, et al. Application of WESP in coal-fired power plants and its effect on emission reduction of  $PM_{2.5}$  [J]. Electric Power, 2013, 46 (11): 62-65.
- [19] HU Xiaotu. The industrial application of wesp in ammonia FGD [J]. Environmental Engineering, 2015, 17 (2): 80-83.

(下转第 40 页)

- [7] 黄元生, 李孝宇. 基于序列最小化算法的周负荷预测研究[J]. 山东电力高等专科学校学报, 2013, 16(4): 22-23, 32.  
HUANG Yuansheng, LI Xiaoyu. The research on week load forecasting based on sequential minimal optimization[J]. Journal of Shandong Electric Power College, 2013, 16(4): 22-23, 32.
- [8] 广东省经济和信息化委, 广东省发展改革委, 南方能源监管局. 南方(以广东起步)电力现货市场建设实施方案(征求意见稿)[EB/OL]. (2018-08-28) [2019-09-27]. [http://gdii.gd.gov.cn/wsdcc2169/content/post\\_2188735.html](http://gdii.gd.gov.cn/wsdcc2169/content/post_2188735.html).
- [9] 刘明, 李红, 伏祥运, 等. 连云港短期电量预测研究[C]. 智慧城市电力科技论坛论文集, 2014.
- [10] 刘烨. 基于分时预测法的电量预测模型研究及其应用[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [11] 吕锐, 姜帅, 沈瑾, 等. 惠州城区供电量与气象要素的关系及其预测模型[J]. 广东气象, 2019, 41(4): 51-53.  
LÜ Kun, JIANG Shuai, SHENG Jin, et al. Relationship between electricity supply and meteorological factors in Huizhou city and its forecasting model[J]. Guangdong Meteorology, 2019, 41(4): 51-53.
- [12] 张春焰. 层次多标签分类算法研究与应用[D]. 南京: 南京邮电大学, 2018.
- [13] 丁世飞, 齐丙娟, 谭红艳. 支持向量机理论与算法研究综述[J]. 电子科技大学学报, 2011, 40(1): 2-10.  
DING Shifei, QI Bingjuan, TAN Hongyan. An overview on theory and algorithm of support vector machines[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2011, 40(1): 2-10.
- [14] 王恺, 关少卿, 汪令祥, 等. 基于模糊信息粒化和最小二乘支持向量机的风电功率联合预测建模[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 26-32.  
WANG Kai, GUAN Shaoqing, WANG Lingxiang et al. A combined forecasting model for wind power predication based on fuzzy information granulation and least squares support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 26-32.
- [15] 曾鸣, 吕春泉, 田廓, 等. 基于细菌群落趋药性优化的最小二乘支持向量机短期负荷预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 93-99.  
ZENG Ming, LÜ Chunquan, TIAN Kuo et al. Least squares-support vector machine based on bacterial colony chemotaxis optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 93-99.
- [16] 高攀. 基于LVS的负载均衡改进算法在DRC集群中的应用[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- [17] 陈永刚. 基于最小二乘支持向量机的PG9171E型燃气轮机气耗特性建模研究[J]. 华电技术, 2010, 32(5): 14-17.  
CHEN Yonggang. The characteristic simulated study of gas consumption for PG9171E gas turbine based on LS-SVM[J]. Huadian Technology, 2010, 32(5): 14-17.
- [18] 李小燕. 考虑气象因素的电力系统短期负荷预测研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [19] 陶莉, 朱小光. 数据预处理对电力负荷预测精度的影响[J]. 华电技术, 2015, 37(9): 8-10.  
TAO Li, ZHU Xiaoguang. Research on data pre-processing to improve the accuracy of load forecasting[J]. Huadian Technology, 2015, 37(9): 8-10.

(本文责编: 齐琳)

## 作者简介:

陈涛(1971—), 男, 贵州贵阳人, 工程师, 从事电力生产管理、经济运行、电力市场研究等方面的工作(E-mail: 734425503@qq.com)。

(上接第 28 页)

- [12] 杜振, 王丰吉, 刘强, 等. 湿式除尘器多种污染物协同脱除效果分析[J]. 环境工程, 2018, 36(5): 100-103.  
DU Zhen, WANG Fengji, LIU Qiang, et al. Analysis on synergistic removal of multiple pollutants in wet electrostatic precipitators[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(5): 100-103.
- [13] 蔡晶, 李尾阳. 湿式电除尘器在氨法脱硫后的工程应用案例分析[J]. 环境保护科学, 2018, 44(2): 75-77.  
CAI Jing, LI Weiyang. Application analysis of wet electrostatic precipitator after ammonia desulfurization[J]. Environmental Protection Science, 2018, 44(2): 75-77.
- [14] 杨翮, 刘芳芳, 席琳. 液柱喷射与雾化喷淋协同脱硫节能方案探讨[J]. 华电技术, 2019, 41(9): 49-52.  
YANG He, LIU Fangfang, XI Lin. Discussion on energy-saving scheme for cooperative desulfurization with liquid column injection and atomization spray[J]. Huadian Technology, 2019, 41(9): 49-52.
- [15] 谈智玲, 彭歌亮, 陈全喜, 等. 燃煤电厂烟尘超低排放协同脱硫废水零排放改造实践探索[J]. 华电技术, 2019, 41(5): 52-55.  
TAN Zhiling, PENG Geliang, CHEN Quanxi, et al. Exploration on gas flue ultra-low emission and desulfurization waste water zero discharge transformation in coal-fired power plants[J]. Huadian Technology, 2019, 41(5): 52-55.

(本文责编: 白银雷)

## 作者简介:

高正来(1985—), 男, 江苏盐城人, 工程师, 硕士, 从事垃圾焚烧发电方面的研究(E-mail: gaozl@chinacuc.com)。