

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2019.10.004

某1000 MW燃煤机组脱硫废水烟道 雾化蒸发系统设计

Design of a desulfurization wastewater evaporation system in flue
gas duct for a 1000 MW coal-fired power plant

晋银佳¹, 张爱军², 郑长乐³

JIN Yinjia¹, ZHANG Aijun², ZHENG Changle³

(1. 华电电力科学研究院有限公司, 杭州 310030; 2. 华电潍坊发电有限公司, 山东 潍坊 261204;
3. 华电龙口发电股份有限公司, 山东 烟台 264000)

(1. Huadian Electric Power Research Institute Company Limited, Hangzhou 310030, China; 2. Huadian
Weifang Power Generation Company Limited, Weifang, 261204, China; 3. Huadian Longkou
Power Generation Company Limited, Yantai, 264000, China)

摘要:燃煤电厂脱硫废水采用烟道雾化蒸发处理技术进行处理,该技术具有投资运行成本低、系统简单等优点,近年来得到了大量关注。根据某1000 MW燃煤机组烟气参数和除尘器入口前烟道布置情况,通过流场模拟对脱硫废水烟道雾化蒸发系统进行了优化设计,在除尘器入口前的烟道内加装导流板能够显著优化烟道内的烟气流场工况,有效避免粉煤灰的积灰和结垢,提高系统运行的安全性和稳定性。通过对除尘器运行参数及粉煤灰成分的分析,脱硫废水烟道雾化蒸发系统的运行不影响除尘器的运行和粉煤灰的品质。

关键词:脱硫废水;1000 MW燃煤机组;烟道雾化蒸发;除尘器

中图分类号:X 511;TM 621.9 文献标志码:A 文章编号:1674-1951(2019)10-0016-04

Abstract: Desulfurization wastewater evaporation technology in flue gas duct is taken by coal-fired power plants and gains a lot of attention for its lower investment and operation cost, and simple structure. Based on the flue gas parameters and arrangement of flue duct in front of the precipitator inlet of a 1000MW coal-fired power plant, the optimization design was made on the desulfurization wastewater evaporation system in flue gas duct by flow field simulation. The deflectors installed in the flue duct in front of the precipitator inlet could significantly optimize the flue gas field in the flue duct, effectively alleviate the fly ash accumulation and fouling, and improve the safety and stability of the system. Analyzing the operating parameters of the precipitator and the composition of the fly ash, the operation of the desulfurization wastewater evaporation system in flue gas duct does not affect the operation of the precipitator and the quality of the fly ash.

Keywords: desulfurization wastewater; 1000 MW coal-fired power plant; evaporation system in flue gas duct; precipitator

0 引言

随着燃煤电厂烟气处理超低排放改造工程的推进,对烟气中SO₂排放质量浓度要求进一步严格,对石灰石-石膏湿法脱硫系统的运行产生了重要影响^[1]。为了保证湿法脱硫系统能够稳定达标运行,脱硫浆液的品质控制更为严格,由此也使得部分电厂湿法脱硫系统的脱硫废水排放量有所增加。2015

年4月,国务院《水污染防治行动计划》正式发布,对各类排污废水的处理提出了更高的要求。此外,河北、山东、北京等地方政府相继出台系列地方标准,对外排废水的含盐量做出严格要求。如河北省发布DB 13/831—2006《氯化物排放标准》要求外排废水排放Cl⁻质量浓度不超过350 mg/L^[2];DB 37/599—2006《山东省南水北调沿线水污染物综合排放标准》等规定,外排水全盐量指标限制执行1600 mg/L^[3];北京市DB 11/307—2013《水污染物综合排放标准》,规定排入地表水体的水污染物中可溶性固体总量小于1600 mg/L^[4]。伴随着燃煤电厂石灰石-石膏湿法脱硫系统运行产生的脱硫废水具有含固量

收稿日期:2019-09-23;修回日期:2019-09-30

基金项目:国家重点研发计划资助项目(高灰煤超低排放技术与装备集成应用,2016YFC0203704)

高、重金属离子超标、含盐量高、水质复杂等特点(含盐量通常 $> 20\,000\text{ mg/L}$),常规的“中和-絮凝-沉淀”等工艺仅能够去除固体悬浮物、重金属离子等,无法去除溶解性盐,仍然难以达到排放标准,只能进行蒸发处理^[5-8]。

烟道雾化蒸发处理技术具有系统简单、投资运行成本低、无结晶盐处理处置等优点,近年来得到大量关注^[9-11]。脱硫废水烟道雾化蒸发系统的设计直接关系到系统运行的安全性和稳定性,需要根据机组烟气参数、烟道布置情况、水质水量条件等进行深入论证,确保脱硫废水烟道雾化蒸发处理系统安全、稳定运行^[12-15]。目前,脱硫废水烟道雾化蒸发处理技术已经在 300 MW, 600 MW 燃煤机组得到了应用,但是在 1 000 MW 燃煤机组尚无应用案例。本文依托某 1 000 MW 燃煤机组脱硫废水烟道雾化蒸发改造工程,对脱硫废水烟道雾化蒸发系统设计进行了论证,并根据实际工程情况对系统设计进行了优化。

1 脱硫废水水质水量情况

脱硫废水水量的确定与燃煤煤质、工艺水水质、烟气温度以及脱硫系统运行等多个因素有关。根据现场试验,在燃煤煤质稳定、脱硫工艺水水质稳定的(Cl^- 质量浓度在 200 mg/L 左右)情况下,脱硫塔内浆液 Cl^- 质量浓度控制在 $15\,000\text{ mg/L}$ 且脱硫系统能够正常稳定运行工况下,脱硫废水水量约为 $10\text{ m}^3/\text{h}$ 。脱硫废水经三联箱系统处理后的出水水质情况见表 1。

水质分析结果显示,脱硫废水经过三联箱处理后重金属离子基本被去除,固体悬浮物含量显著降低,不过依然含有高浓度的溶解性盐和钙镁离子,水质较为复杂。

2 机组烟气烟道情况

某 1 000 MW 机组空气预热器(以下简称空预器)出口至除尘器入口段烟道结构示意图如图 1 所示,在机组设计满负荷运行工况参数下,对空预器出口至除尘器入口段烟道内烟气流场情况进行模拟计算,得到未经流场优化前烟道内烟气流速如图 2 所示。

由图 2 可以看出,烟道内部存在大范围涡流区和高速区。在涡流区,雾化后的废水液滴在紊乱的烟气流场作用下极易与烟道本体接触而沾湿烟道壁,长期运行时不仅会导致烟道壁产生积灰结垢(烟气中含有高浓度的飞灰),而且由于脱硫废水中含有高质量浓度的 Cl^- 会导致烟道壁的腐蚀;在高

表 1 脱硫废水经三联箱系统处理后水质情况
Tab.1 Water quality of desulfurization wastewater treated by triple box system

项目	数值
pH 值	6.23
悬浮物质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	218.00
总溶解固体质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	44 200.00
Cl^- 质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	15 320.00
F^- 质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	126.00
SO_4^{2-} 质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	11 648.00
Ca^{2+} 质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	654.00
Mg^{2+} 质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	886.00
Na^+ 质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	9 936.00
K^+ 质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	160.00
Ni^{2+} 质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	1.04
Pb^{2+} 质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.40
Hg^{2+} 质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.30
Cd^{2+} 质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.29
CrO_4^{2-} 质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	未检出
AsO_4^{3-} 质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	未检出

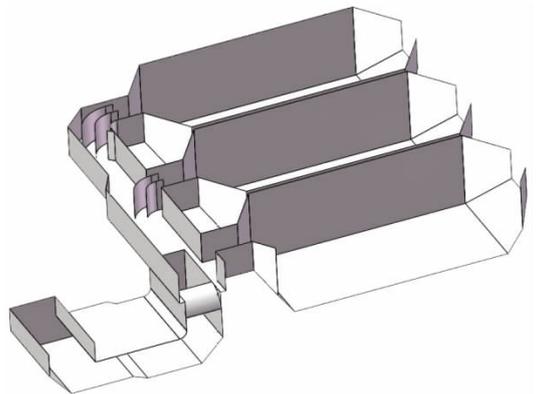


图 1 空预器出口至除尘器入口烟道结构

Fig.1 Flue duct structure from air pre-heater outlet to precipitator inlet

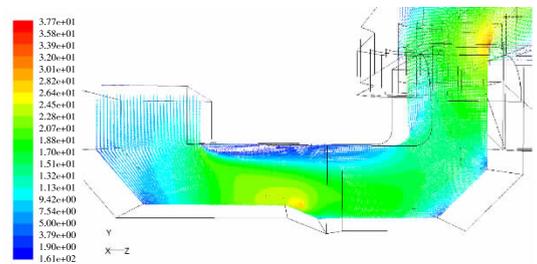


图 2 空预器出口至除尘器入口烟道内烟气流速

Fig.2 Flue gas in the duct from air pre-heater outlet to precipitator inlet

速区,烟气流速过高,将会使雾化后的脱硫废水完全蒸发需要的烟道距离增长或在设计的烟道距离内不

能完全蒸发,由此导致烟道积灰结垢甚至影响除尘系统的正常运行。

为了确保脱硫废水在烟道内雾化后能够及时蒸发、系统运行不影响主烟道系统的安全稳定运行,需要对烟道流场进行优化,尽可能避免或缩小烟气流场出现涡流区和高速区,提高脱硫废水烟道雾化蒸发系统运行的稳定性和安全性。通过对烟道的局部改造,优化烟道内部流场,使烟道内部烟气的速度、压力、温度分布趋于平稳,避免废水喷入后由于烟道内烟气流场的紊流导致废水雾滴触碰烟道内壁,消除烟道内腐蚀、积灰和结垢的风险。根据机组空预器至除尘器入口前烟道布置情况,在空预器出口烟道变向位置处加装导流板,提高下游水平烟道内烟气流场的均匀性。改造后烟道布置如图 3 所示。

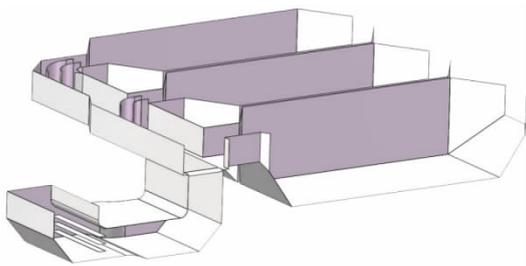


图 3 流场优化后空预器出口至除尘器入口烟道结构

Fig. 3 Optimized structure of duct from air pre-heater outlet to precipitator inlet

空预器出口烟道变向位置处加装导流板后,烟道内流场均匀性显著提高,烟气流速如图 4 所示。经过流场优化后,烟道内流场的涡流区和高速区基本消失,烟气流场基本呈层状分布,有利于脱硫废水在烟道内的雾化蒸发处理,显著提高系统运行的安全、稳定性。

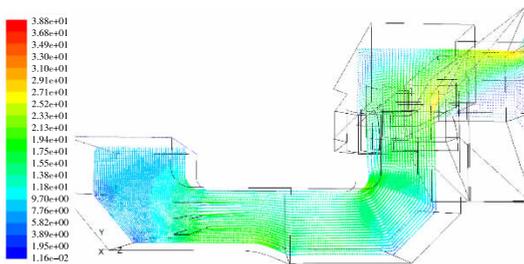


图 4 流场优化后空预器出口至除尘器入口烟道内烟气流速

Fig. 4 Optimized of the flue gas in the duct from air pre-heater outlet to precipitator inlet

3 脱硫废水烟道雾化蒸发系统设计

脱硫废水烟道雾化蒸发系统设计需要科学合理地确定雾化装置的选型、布置位置、安装方式以及吹灰器的布置位置。通过对废水喷入烟道后,烟气与

废水雾滴在烟道内的速度矢量进行分析,得出烟气与废水液滴之间的运动关系,模拟废水液滴在烟道内部运动轨迹,以此确定雾化设备安装位置、数量、喷入角度、速度和喷雾量,确保雾化后的废水雾滴在烟道内的整个行程中不会碰壁或触底(即使在烟道变径、弯头处),避免对烟道造成腐蚀或造成结垢。根据某 1000 MW 机组烟气温度、烟气流速等参数,对脱硫废水烟道雾化蒸发系统的设计通过程序模拟计算进行迭代优化、调整,并以机组低负荷(50% 负荷)运行工况下的烟气温度和烟气流速参数进行校核,确保系统的安全、稳定运行。

在机组 50% 机组负荷工况下,除尘器入口前烟气温度为 127.0℃,烟气流速约为 10.3 m/s,烟气含尘质量浓度为 28.0 g/m³。每支空预器出口烟道设置 5 支雾化装置,单支雾化装置的雾化负荷为 0.3 ~ 1.0 m³/h。计算和模拟结果表明,烟气温度随着雾化蒸发水量的升高而降低。50% 机组负荷工况下,在单支雾化装置处理水量为 0.3 m³/h 时,烟气温度下降 2.1 ~ 125.0℃;在单支雾化装置处理水量为 0.5 m³/h 时,烟气温度下降 3.6 ~ 123.4℃;在单支雾化装置处理水量为 1 m³/h 时,烟气温度下降 8.0 ~ 119.0℃。此外,随着雾化蒸发废水量的增加,废水完全蒸发需要的距离也变长(废水液滴直径恒定)。控制废水雾化粒径为 50 μm 时,在单支雾化装置处理水量分别为 0.3, 0.5 和 1.0 m³/h 的工况下,废水蒸发距离分别约为 7.6, 8.4 和 11.2 m。为了确保脱硫废水烟道雾化蒸发装置运行的安全、稳定性,综合考虑机组运行情况 and 烟道布置情况,单支空预器出口烟道内布置 5 支雾化装置,雾化装置的处理水量控制在 0.5 m³/h 以内。在单支雾化装置的处理水量控制在 0.5 m³/h 时,50% 机组负荷下,脱硫废水烟道雾化蒸发处理系统运行的模拟结果如图 5 和图 6 所示。脱硫废水能够在烟道内及时蒸发,废水液滴在进入除尘器入口前能够完全蒸发,不影响除尘器的运行。

为了有效去除烟道支架、烟道壁上的积灰,需要在废水烟道雾化蒸发处理系统内设置吹灰器,在系统设计是需要对吹灰器的布置位置进行论证。根据烟道内烟气流场的模拟结果,易积灰位置位于烟道转弯处,因此吹灰器的安装位置应布置在烟道转弯处。安装位置如图 7 所示。

4 脱硫废水烟道雾化蒸发系统运行情况

脱硫废水烟道雾化蒸发系统的运行对除尘器运行和粉煤灰品质的影响进行了监测和分析,具体数据见表 2。表中数据显示,在 50% 机组负荷(500 MW) 工况下,蒸发水量为 5 m³/h 时,烟气温度由

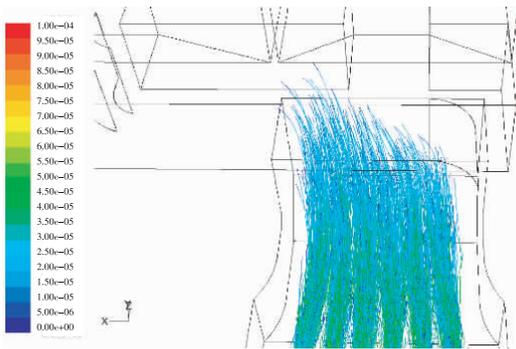


图 5 脱硫废水烟道雾化蒸发系统运行模拟图(蒸发完全)

Fig. 5 Simulated diagram of desulfurization wastewater evaporation system operated in flue duct (evaporated completely)

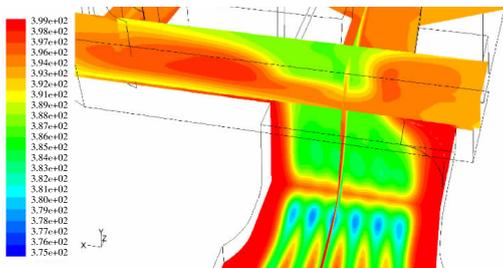


图 6 脱硫废水烟道雾化蒸发系统运行模拟图(喷嘴出口)

Fig. 6 Simulated diagram of desulfurization wastewater evaporation system operated in flue duct (at nozzle outlet)

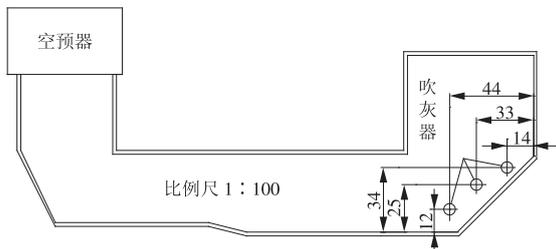


图 7 烟道雾化蒸发系统吹灰器安装位置示意
Fig. 7 Installation sites of soot blowers in the wastewater evaporation system

127.0℃降低至 123.4℃,系统运行不会造成电除尘系统运行参数的变化,不影响电除尘系统的运行,粉煤灰中氯元素的增加比例约为 0.16%。在 100% 机组负荷(1 000 MW)工况下,蒸发水量为 10 m³/h 时,烟气温度由 132.0℃降低至 128.0℃,系统运行不会造成电除尘系统运行参数的变化,不影响电除尘系统的运行,粉煤灰中氯元素约增加 0.16%。根据 GB 175—2007《通用硅酸盐水泥》,硅酸盐水泥中不允许掺入粉煤灰,普通硅酸盐水泥中粉煤灰掺入量≤20%。根据 GB 50164—2011《混凝土质量控制标准》,混凝土拌合物中水溶性 Cl⁻质量分数不得大于 0.060%。因此,以粉煤灰的掺配比例上限 20%

计算,粉煤灰用于制混凝土时,Cl⁻质量分数约为 0.032%,低于 0.060% 的要求,不影响粉煤灰的综合利用。

表 2 脱硫废水烟道雾化蒸发系统运行对烟气参数和粉煤灰品质的影响

Tab. 2 Effect of wastewater evaporation system on flue gas parameters and fly ash

项目	机组负荷	
	500 MW	1 000 MW
蒸发水量/(m ³ ·h ⁻¹)	5	10
雾化装置上游烟气温度/℃	127.0	132.0
除尘器入口烟气温度/℃	123.4	128.0
电除尘系统电压及电流变化	无	无
氯元素增量/(kg·h ⁻¹)	76.5	153.2
粉煤灰量/(t·h ⁻¹)	47	93
氯元素增量比例/%	0.16	0.16

在脱硫废水烟道雾化蒸发系统运行过程中,通过在烟道壁面加设观测孔可以监测烟道系统的积灰和结垢情况。另外,由于烟道内部为负压,通过设置测试杆也可以直观测试烟道内是否存在结垢情况;同时可在测试杆上悬挂设腐蚀部件,直观测试烟道的腐蚀情况。在烟道转弯位置设置蒸汽吹灰装置,防止转弯死角难以消除的局部紊流造成的区域结垢。根据观测孔、测试杆的测试情况,在脱硫废水烟道雾化蒸发系统运行过程中,未发现烟道积灰结垢和腐蚀情况。

5 结束语

脱硫废水排放量的确定是一个系统性的论证过程,需要多方面考虑、论证,在实际操作中,需要从全厂整体着眼,统筹考虑,既要保证脱硫系统的安全稳定运行,又要考虑到废水处理的投资和运行成本,尽可能减少脱硫废水排放量。通常,建议将脱硫浆液中 Cl⁻质量浓度控制在 15 000 mg/L 左右,可以通过使用消泡剂调节浆液品质,减少浆液和脱硫废水排放量。

此外,建议测量脱硫系统入口烟气中氯元素含量,从而准确确定由烟气携带的氯元素对浆液氯离子含量的贡献。

参考文献:

- [1] 应春华,刘柏辉,戴豪波,等. 脱硫废水排放的控制项目及标准探讨[J]. 热力发电,2005,34(9):69-71.
- [2] 氯化物排放标准:DB 13/831—2006[S].
- [3] 山东省南水北调沿线水污染物综合排放标准:DB 37/599—2006[S].

程中,如果出现泄漏,要及时处理,清理泄漏出的燃油,避免此类事故再次发生。

参考文献:

- [1] KELLEY A P, JOMAAS G, LAW C K, et al. Critical radius for sustained propagation of spark-ignited spherical flames [J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(5): 1006 - 1013.
- [2] PETERSEN E L, DAVIDSON D F, HANSON, R K. Kinetics modeling of shock-induced ignition in low - dilution CH₄/O₂ mixtures at high pressures and intermediate temperatures [J]. *Combustion & Flame*, 1999, 117(1 - 2): 272 - 290.
- [3] HAN J, YAMASHITA H, HAYASHI N. Numerical study on the spark ignition characteristics of a methane-air mixture using detailed chemical kinetics Effect of equivalence ratio, electrode gap distance, and electrode radius on MIE, quenching distance, and ignition delay [J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(7): 1414 - 1421.
- [4] DAGAUT P, VOISIN D, CATHONNET M. The ignition and oxidation of allene and propyne: Experiments and kinetic modeling [J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1996, 26(1): 613 - 620.
- [5] 程国俊. 高等传热学 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1991: 118.
- [6] 李格升, 郭庆平, 刘春晓. 大平板第一类边界条件下的非稳态换热 [J]. *武汉理工大学学报 (交通科学与工程版)*, 2002, 26(4): 432 - 434.
- [7] 杨明. FeS 热自燃临界温升及自燃延滞时间预测 [J]. *内蒙古石油化工*, 2015(20): 52 - 53.
- [8] 袁义东, 张金功, 全可佳, 等. 超高压气藏天然气拟对比

压缩系数的数值解法 [J]. *地质科学情报*, 2018, 37(4): 190 - 195.

- [9] 肖保国, 钱炜祺, 杨顺华, 等. 甲烷点火燃烧的简化化学反应动力学模型 [J]. *推进技术*, 2006, 27(2): 101 - 105.
- [10] 姜正候. 天然气工程技术手册 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1993: 247.
- [11] 阳建平, 肖香姣, 张峰, 等. 几种天然气偏差因子计算方法的适用性评价 [J]. *天然气地球科学*, 2008, 18(1): 154 - 157.
- [12] HALL K R, YARBOROUGH L. A new equation-of-state for Z-factor calculations [J]. *The Oil and Gas Journal*, 1973, 71(25): 82 - 93.
- [13] 邵建新, 刘云虎, 张子英, 等. 空气绝热指数的计算 [J]. *科学技术与工程*, 2009, 9(3): 673 - 674.
- [14] 闫扬义, 苏智剑, 朱惠玉, 等. 斜盘式空气压缩机压缩与膨胀热力过程的数值分析 [J]. *流体机械*, 2016, 44(9): 31 - 35.
- [15] LESCHEVICH V V, MARTYNNENKO O G, SEVROUK K L, et al. Auto-ignitions of a methane/air mixture at high and aintermediate temperatures [J]. *Shock Waves*, 2016, 26(5): 657 - 672.
- [16] 马秋菊, 张奇, 庞磊. 甲烷 - 空气最小点火能量预测理论模型 [J]. *高压物理学报*. 2012, 26(3): 301 - 305.
- [17] 傅维廉. 燃烧学 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1989: 129.

(本文责编: 白银雷)

作者简介:

葛鹏(1983—), 男, 陕西黄陵人, 高级工程师, 从事汽机系统运行优化及故障诊断方面的工作 (E-mail: pge0310@ceec.net.cn)。

(上接第 19 页)

- [4] 水污染物综合排放标准: DB 11/307—2013 [S].
- [5] 刘国平. 火电厂废水零排放技术国内外现状综述 [C] // 第四届全国火力发电技术学术年会论文集. 中国电机工程学会, 西安热工研究院, 2003.
- [6] 朱跃. 火电厂“厂界环保岛”改造与运维关键技术 [J]. *发电技术*, 2018, 39(1): 1 - 12.
- [7] 晋银佳, 孙海峰, 王丰吉, 等. 燃煤电厂高盐废水“零排放”处理工艺及技术经济分析 [J]. *华电技术*, 2017, 39(12): 46 - 49.
- [8] 张江涛, 曹红梅, 董娟, 等. 火电厂废水零排放技术路线比较及影响因素分析 [J]. *中国电力*, 2017, 50(6): 120 - 124.
- [9] 晋银佳, 王帅, 姬海宏, 等. 深度过滤 - 烟道蒸发处理脱硫废水的数值模拟 [J]. *中国电力*, 2016, 49(12): 174 - 179.
- [10] 晋银佳, 梁秀进, 孙海峰, 等. 某 660 MW 机组脱硫废水烟道蒸发系统设计及运行情况 [J]. *中国电力*, 2018, 51(12): 158 - 162.
- [11] 张爱军, 晋银佳, 喻江, 等. 电化学技术处理火电厂循环

水的试验研究 [J]. *华电技术*, 2019, 41(8): 53 - 56.

- [12] 晋银佳, 李壮, 唐国瑞, 等. 废水“零排放”下燃煤电厂脱硫废水水量的确定 [J]. *华电技术*, 2019, 41(2): 73 - 75.
- [13] 康梅强, 邓佳佳, 陈德奇, 等. 脱硫废水烟道蒸发零排放处理的可行性分析 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2013, 35(6): 238 - 240.
- [14] 张志荣, 冉景煜. 废水液滴在低温烟气中的蒸发特性数值研究 [J]. *环境工程学报*, 2011, 5(9): 2048 - 2053.
- [15] 禾志强, 祁利明. 火力发电厂烟气脱硫废水处理工艺 [J]. *水处理技术*, 2010, 36(3): 133 - 135.

(本文责编: 齐琳)

作者简介:

晋银佳(1986—), 男, 河南偃师人, 高级工程师, 博士, 从事火电厂给水及废水处理技术研究与应用方面的工作 (E-mail: 757107023@qq.com)。

郑长乐(1984—), 男, 山东龙口人, 工程师, 硕士, 从事火电化水及水处理系统运行维护管理方面的工作。

张爱军(1974—), 男, 山东潍坊人, 工程师, 从事火电化水及水处理系统运行维护管理方面的工作。