



移动扫码阅读

武广龙,赵静,何海军.烟羽消白技术在40 t/h燃煤工业锅炉上的应用[J].能源环境保护,2021,35(2):63-68.

WU Guanglong, ZHAO Jing, HE Haijun. Application of technology of flue gas off-whitening to 40 t/h coal-fired industrial boilers[J]. Energy Environmental Protection, 2021, 35(2): 63-68.

烟羽消白技术在40 t/h燃煤工业锅炉上的应用

武广龙,赵静*,何海军

(中煤科工清洁能源股份有限公司,北京100013)

摘要:以某供热中心2×40 t/h燃煤工业锅炉烟羽消白改造项目为例,介绍了烟羽消白的技术原理和发展现状,分析了“喷淋冷凝+烟气-蒸汽换热”烟羽消白系统的运行效果。结果表明:烟气冷凝温度为30~42℃,烟气湿度为4.5%~7%,出口烟气温度大于80℃;烟气的粉尘排放浓度由10 mg/Nm³降至4 mg/Nm³,协同除尘效率为60%;烟气SO₂平均排放浓度为19.4 mg/Nm³左右,协同脱硫效率为35%;该系统运行稳定,烟气排放参数达到了超低排放标准要求(烟尘≤10 mg/Nm³、SO₂≤35 mg/Nm³、NO_x≤50 mg/Nm³),满足烟羽消白技术的设计要求。

关键词:燃煤工业锅炉;烟羽消白技术;协同净化

中图分类号:X701

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2021)02-0063-06

Application of technology of flue gas off-whitening to 40 t/h coal-fired industrial boilers

WU Guanglong, ZHAO Jing*, HE Haijun

(China Coal Technology & Engineering Clean Energy Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: A renovation project of flue gas off-whitening technology for two 40 t/h coal-fired industrial boilers in a heating center was selected as an example. The technical principle and development status of flue gas off-whitening technology were introduced. The operation effect of flue gas off-whitening system with "spray condensation + flue gas-steam heat exchange" was analyzed. The results showed that the condensing temperature of flue gas was 30~42℃, and the humidity of flue gas was 4.5%~7%. The outlet flue gas temperature was higher than 80℃. In addition, the dust concentration in flue gas was reduced from 10 mg/Nm³ to 4 mg/Nm³, and the collaborative dust removal efficiency was 60%. The average concentration of SO₂ in flue gas was 19.4 mg/Nm³, and the synergistic desulfurization efficiency was 35%. The system operates stably, and the flue gas emission meets the standard for ultra-low emission, which requires the concentration of dust ≤10 mg/Nm³, SO₂ ≤35 mg/Nm³, and NO_x ≤50 mg/Nm³. It also meets the design requirements of flue gas off-whitening technology.

Key Words: Coal-fired industrial boiler; Technology of flue gas off-whitening; Collaborative purification

0 引言

自2017年上海开始进行烟羽消白治理以来,浙江、天津、河北和陕西等地也陆续颁布了烟羽消

白治理的政策文件。根据《河北省大气污染防治工作领导小组办公室文件》以及《保定市打赢蓝天保卫战三年行动方案》等文件要求:“2019年底,全省35蒸吨/小时以上燃煤锅炉全部达到超

收稿日期:2020-12-22;责任编辑:蒋雯婷

基金项目:中国煤炭科工集团有限公司科技创新创业资金专项项目(2018-2-MS034)

第一作者简介:武广龙(1991-),男,山东临沂人,助理工程师,主要研究方向为大气污染防治技术。E-mail:wuguanglong@cctegce.com

通讯作者简介:赵静(1974-),女,辽宁锦州人,高级工程师,主要研究方向为煤炭清洁高效利用技术。E-mail:zhaojing@cctegce.com

低排放标准要求(烟尘 $\leq 10\text{ mg/Nm}^3$ 、 $\text{SO}_2 \leq 35\text{ mg/Nm}^3$ 、 $\text{NO}_x \leq 50\text{ mg/Nm}^3$),同时开展湿法脱硫有色烟羽和石膏雨脱除治理工程,基本消除冒“白烟”现象。”^[1]

白色烟羽出现的主要原因是燃煤锅炉大都采用成熟的湿法脱硫工艺来对烟气进行脱硫以满足锅炉烟气超低排放标准的要求,在脱硫塔中,烟气由脱硫前温度 120~130℃、水蒸气体积分数 6%~8% 的状态变为脱硫后温度 55~60℃、水蒸气体积分数 11%~13% 的湿饱和状态,烟气携带的大量水分在通过烟囱排入大气之后凝结成雾滴,在光的折射和散射作用下在烟囱附近形成白烟现象,同时烟气中携带的可溶性盐类、粉尘等物质也会在白烟形成过程中被雾滴捕集进而形成有色烟羽和石膏雨(采用石灰石-石膏脱硫工艺)^[2-6]。

在烟羽消白技术的实际应用中,由于现场情况复杂、消白技术的影响因素较多,故在具体工艺和技术上并没有统一标准,一般都需要根据实际情况进行针对性地设计^[7-8]。本文主要对某供热中心 2×40 t/h 燃煤工业锅炉的烟羽消白改造项目的工艺方案设计、系统运行效果以及存在的问题等内容进行介绍和讨论分析,为后期同类型的改造项目提供工程解决方案和数据支撑。

1 烟羽消白技术

1.1 烟羽消白原理

对于达到超低排放的锅炉来讲,白色烟羽的主要成分主要是水雾,其中还有部分被水雾捕集下来的细微粉尘、可溶性盐类。因此,烟羽消白的机理就是消除水雾,也就是将脱硫塔出口的湿饱和烟气变为不饱和烟气,使得烟气在排入大气后受冷也不会出现雾滴,造成白烟现象。

1.2 烟羽消白技术发展现状

目前,烟羽消白技术有烟气加热、烟气冷却、烟气冷凝再热、旋流除湿、溶液除湿、陶瓷膜法除湿等^[9-11]。烟气加热法是对脱硫后的湿饱和烟气直接加热,具体的工艺如 MGGH、GGH 等,由于烟气中水分含量高使得该种方法的运行成本较高;烟气冷却法则是对利用低温冷源对脱硫后的烟气进行冷却,在冷却过程中,烟气中的水分会凝结成冷凝水从烟气中分离出来达到烟羽消白的效果,但是由于该方法会使得烟气温度降低,同时也降低了烟气在烟囱中的抬升力,烟气的扩散效果变

差,而且该方法还需要足够低温的冷源才能达到完全的消白效果。为解决上述问题,在烟气冷却法的基础上发展了烟气冷凝再热法,烟气经过冷却,其中的水分冷凝分离后,再将烟气进行加热,达到一定温度后再进入烟囱排入大气,该技术可以达到完全消白的效果。溶液吸收法、旋流除湿法、陶瓷膜法除湿法等技术则是利用吸收或机械作用,使得烟气中的水蒸气、水雾凝聚,从而降低烟气的含湿量,但是该类技术目前只能减弱白烟现象,当大气环境温度比较低时,无法保证完全烟羽消白^[12-16]。

2 烟羽消白技术的选择

某供热中心现有 2×40 t/h 燃煤工业蒸汽锅炉,配套“SCR 脱硝+布袋除尘+湿法脱硫”的环保工艺达到烟气污染物的超低排放要求。根据政府主管单位相关要求,该供热中心需要在现有超低排放的基础上进行烟羽消白改造,消除烟囱冒“白烟”现象。

2.1 工艺选择

为满足“快速提高烟囱入口烟温至 80℃ 以上,夏季(4~10 月)冷凝后出口烟温应达到 48℃ 以下,烟气含湿量 11.0% 以下;冬季(11 月~次年 3 月)冷凝后烟温达到 45℃ 以下,烟气含湿量 9.5% 以下”的要求,本次改造选择烟气冷凝再热技术^[17]。在冷凝阶段可采用的方法有换热器间接冷凝、喷淋冷凝,再热阶段可采用的方法有气-气换热、气-蒸汽换热和气-水换热。该供热中心的锅炉负荷由下游用汽企业决定,不能长时间停炉,而且负荷变化大,蒸汽量有富裕;厂区现场空间有限,采用换热系数小、温差小的方法,换热设备体积大,一方面现场空间满足不了安装和施工要求,另一方面改造成本也会有所提高^[12,18-21]。因此,基于上述分析,本次改造最终决定采用“喷淋冷凝+气-汽换热”的烟羽消白技术工艺。

工艺具体流程如图 1 所示,新建一座消白塔和循环水降温系统,消白塔内设有喷淋降温层、除雾器以及蒸汽再热器。喷淋用水为厂区工艺水,通过循环泵从清水池泵送至消白塔内,然后在从消白塔自流回清水池。清水池上设有一通风冷却塔用于给喷淋水降温,保障烟气的降温冷凝。蒸汽再热器用的蒸汽引自锅炉蒸汽分汽缸,经过换热后的蒸汽引到锅炉的软水箱,进行二次利用。

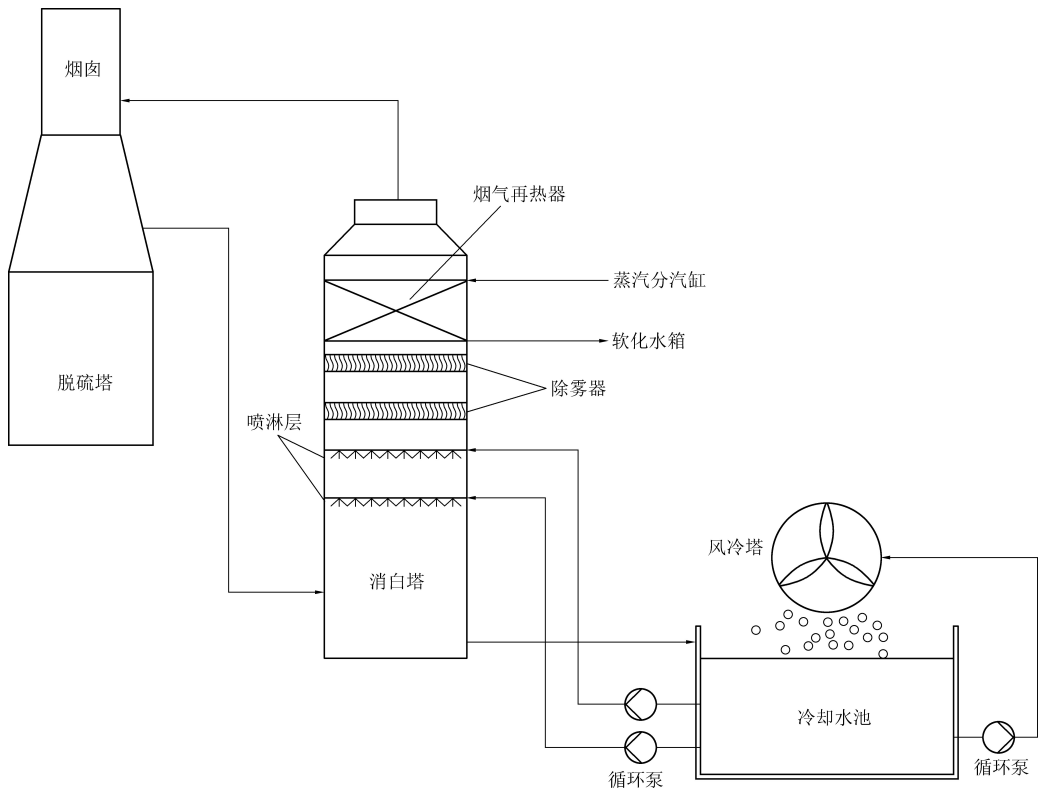


图 1 烟羽消白技术工艺流程图

Fig.1 The process flow of flue gas off-whitening technology

2.2 方案设计

该供热中心原有的脱硫塔采用“两炉一塔”设计,因此在消白设计时也延续了该设计方法。消白具体设计参数的选取如下表 1 所示。消白塔的工艺设计参数(塔内烟气流速、喷嘴类型、喷嘴角度、喷淋层覆盖率等)基本参照湿法脱硫工艺进行选取。根据相关研究,在脱硫塔内烟气降温变化最大的位置在最底层喷淋层所在位置,消白塔喷

淋降温层共设计两层,一用一备。在选取液气比时,由于消白塔主要是用来对烟气进行降温,因此液气比值要比脱硫塔的液气比小很多。根据热量守恒定律(喷淋水吸收的热量=烟气的显热降+冷凝水潜热)并考虑一定的裕量,液气比选取为 2.5 L/Nm³[22]。烟羽消白系统辅机配置为新增一台风冷却塔、三台循环泵(两台用于消白塔,一台用于风冷却塔)。现场施工完成后的实际照片如图 2 所示。

表 1 烟羽消白塔设计参数

Table 1 Design parameters of towers for flue gas off-whitening

序号	项 目	数值	备注
1	锅炉类型	煤粉锅炉	
2	运行状态/台	1	一用一备
3	锅炉烟气量/(Nm ³ ·h ⁻¹)	42 000	
4	消白塔入口烟温/℃	55~60	
5	消白塔入口粉尘浓度(mg·Nm ⁻³)	<10	
6	消白塔入口二氧化硫浓度(mg·Nm ⁻³)	<30	
7	消白塔出口烟温/℃	>80	
8	消白塔出口粉尘浓度(mg·Nm ⁻³)	<10	干基,9%O ₂
9	消白塔出口二氧化硫浓度(mg·Nm ⁻³)	<30	干基,9%O ₂
10	消白塔内再热前烟温(4~10月)/℃	<48	
11	消白塔内再热前烟气含湿量(4~10月)/%	<11.0	干基,9%O ₂
12	消白塔内再热前烟温(11~次年3月)/℃	<45	
13	消白塔内再热前烟气含湿量(11~次年3月)/%	<9.5	干基,9%O ₂
14	负荷适应性范围/%	30~110	
15	消白塔直径/m	3	
16	消白塔液气比/(L·Nm ⁻³)	2.5	



图 2 烟羽消白塔

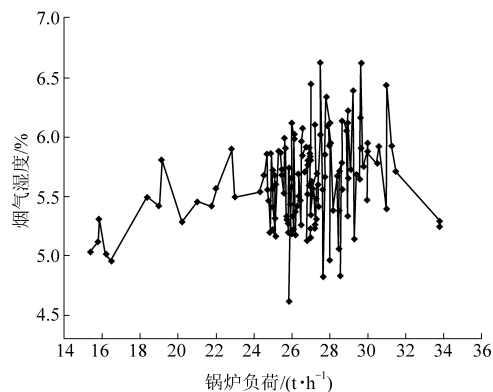
Fig.2 Towers for flue gas off-whitening

为防止设备腐蚀,消白塔和水池做了玻璃鳞片防腐处理,烟气再热器采用 2205 材质,喷淋降温水管道选用玻璃钢材质,循环水泵过流面采用全金属^[22-23]。

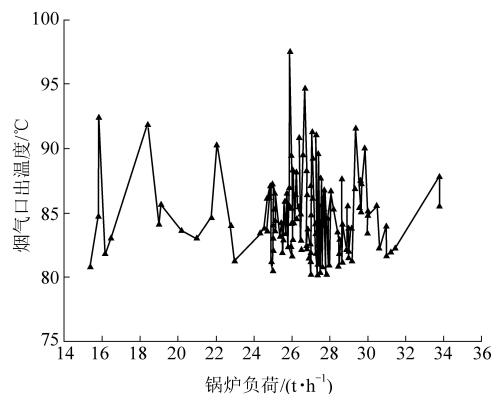
2.3 改造效果

项目改造完成后,2×40 t/h 燃煤锅炉都实现了烟羽消白的目标。如图 2 所示,消白系统投入使用后,烟囱出口无视觉白烟,解决了“冒白烟”的现象。消白系统中的烟气冷凝温度、出口温度和湿度以及蒸汽流量情况如图 3 所示。在较宽的锅炉负荷范围内,烟气的冷凝温度为 30~42 °C,烟气湿度则在 4.5%~7% 范围内;出口烟气温度(即烟气再热温度)大于 80 °C,用于烟气再热的蒸汽流量根据锅炉负荷在 0.1~0.3 t/h 范围变化,各项技术参数都满足了烟羽消白的排放指标。

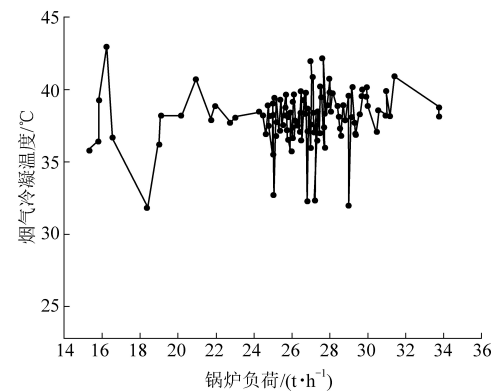
在消白系统中,喷淋冷凝水会对脱硫后的烟气进行二次洗涤净化。在系统刚投运时,由于喷淋冷凝水比较纯净并呈弱酸性,此时,烟气的 SO_2 排放浓度可以达到零排放,粉尘浓度可以达到 0~2 mg/Nm^3 。当消白系统运行一段时间后,脱硫后烟气中携带的水份、 SO_2 、可溶性盐、粉尘等物质会逐渐转移到喷淋冷凝水中,因此,冷凝水循环一段时间后会逐渐变浑浊、pH 也越来越低,此时喷淋冷凝水的洗涤净化作用会有所降低^[17]。在系统达到稳定状态时,锅炉烟气的粉尘、 SO_2 排放浓度情况如下图 4 所示。从图 4 中可以看出,颗粒物的排放浓度在 1.5~4 mg/Nm^3 ,而 SO_2 的排放浓度变化幅度较大,在 2~28 mg/Nm^3 范围内。在超低排放的基础上,经过消白系统,粉尘的排放浓度由 <10 mg/Nm^3 降低至 <4 mg/Nm^3 ,协同除尘的效率为 60%; SO_2 的排放浓度影响较多,且出于运行经济性考虑,其平均排放浓度值控制在 19.4 mg/Nm^3 左右,因此消白系统的协同脱硫效率为 35%,低于协同除尘效率。



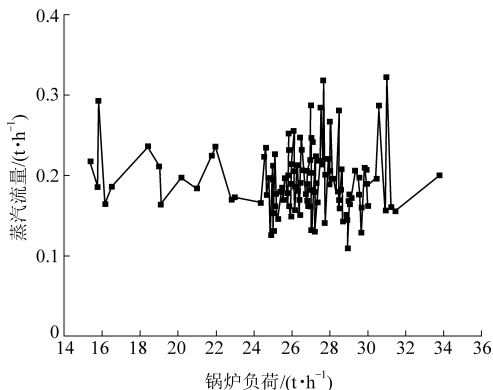
(a) 烟气湿度情况



(b) 烟气出口温度情况



(c) 烟气冷凝温度情况



(d) 蒸汽流量情况

图 3 消白塔内烟气参数

Fig.3 Parameters of flue gas in the tower for flue gas off-whitening

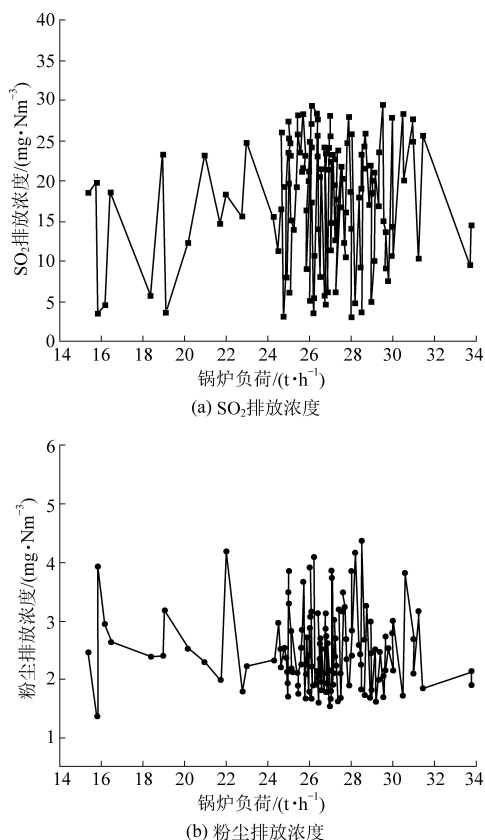


图 4 消白塔出口烟气粉尘、二氧化硫排放浓度
Fig.4 Emission concentrations of dust and SO₂
at the outlet of tower for flue gas off-whitening

2.4 投资成本分析

本烟羽消白系统包含的主要设备有消白塔(包含其内部的喷淋层、除雾器、烟气再热器)、循环冷却水泵、风冷塔及其循环水池,系统相对简单。烟气蒸汽再热器费用约 55 万元、消白塔费用约 110 万元,循环冷却系统(风冷塔、循环泵)及其附属设备费用约 65 万元,整个烟羽消白系统投资费用合计约 230 万元,折合成本约 2.875 万元/t 蒸汽,设备投资较小。

3 运行问题

(1)烟气冷凝水处理问题。脱硫后在消白塔降温冷凝过程中,烟气中的水份会冷凝下来进入喷淋降温水系统。对于 40 t/h 燃煤锅炉,大约有 1~2 t/h 烟气冷凝水,冷凝水中含有协同净化下来的 SO₂、HCl 等酸类物质、粉尘、可溶性盐等,因此随着投运时间的增加,喷淋降温水的 pH 会逐渐降低至 2~3 左右,为防止喷淋降温水池外溢,在消白塔底部开设了一旁通水路,当水池液位过高时,系统自动打开阀门,将部分喷淋降温水旁通到脱硫池中,通过脱硫的废水处理系统对喷淋降温水

进行处理,维持脱硫和消白系统的水平衡。

(2)脱硫-消白系统水平衡问题。脱硫、消白系统虽然看似独立地两个系统,但是在系统实际运行过程中却是一个连接非常紧密的整体。脱硫浆液中的水分在脱硫塔内被烟气加热蒸发并携带出脱硫塔,然后在消白塔内该部分水分大部分被冷凝下来最终又回到入脱硫浆液中,形成了一个循环。但是在补水量不变的情况下,失水量大幅度降低,脱硫池的水位逐渐上升,最终会导致系统的水平衡遭到破坏。为解决上述问题,一方面严格控制补水量,各类水泵的冷却水、锅炉排污水等不再排入脱硫池,同时优化脱硫塔、消白塔除雾器反冲洗,降低反冲洗频率和时间;另一方面,增加脱硫废水处理系统的废水处理能力,将脱硫池的液位控制在合适的范围内。

(3)软化水箱振动和噪音问题。饱和蒸汽经过在消白塔烟气再热器内换热后变为高压的冷凝水,该冷凝水通过管道引至软化水箱进行二次利用。为避免该高压冷凝水在软化水混合过程中引起软化水箱振动和噪音问题,将带压管道在进入水箱后设计成盘管型式,在盘管末端加装消音措施,在系统投运后,通过长期观察发现效果良好,水箱未出现振动和噪音问题。

4 结论

(1)某供热中心燃煤工业锅炉烟气烟羽消白改造完成后,烟气的冷凝温度基本为 30~42 ℃,出口烟气温度大于 80 ℃,烟气湿度为 4.5%~7%,各项技术参数都满足了烟羽消白的排放指标要求,烟囱出口无视觉白烟,消白系统运行稳定。

(2)在烟气协同脱硫除尘方面,烟羽消白系统的协同除尘效率约 60%;由于考虑到运行经济性的原因,二氧化硫排放浓度控制较高,因此烟羽消白系统的协同脱硫效率相对除尘效率较低,约 35%。

(3)在运行过程中,烟羽消白系统带来的最大问题就是对原有脱硫系统水平衡的影响,需要综合考虑各方面因素来维持脱硫系统的水平衡。

参考文献

- [1] 河北省大气污染防治工作领导小组办公室. 河北省钢铁、焦化、燃煤电厂深度减排攻坚方案 [EB/OL]. (2018-06-26) [2020-12-20]. <http://www.hb.cangzhou.gov.cn/zwsx/dqwrjc/540093.shtml>.
- [2] 马双忱, 别璇, 孙尧, 等. 湿法脱硫烟气水回收技术研究

- 进展 [J]. 洁净煤技术, 2019, 25 (1): 64-70.
- [3] Nie P F, Zhang H Y, Wang Y. Causes analysis of wet flue gas desulphurization stack rainout for the thermal powerplant without GGH and its countermeasures [J]. Advanced Materials Research, 2013, 724-725: 1306-1309.
- [4] 郭彦鹏, 潘丹萍, 杨林军. 湿法烟气脱硫中石膏雨的形成及其控制措施 [J]. 中国电力, 2014, 47 (3): 152-154.
- [5] 程永新. 湿法烟气脱硫系统中“石膏雨”问题的分析及对策 [J]. 华中电力, 2010, 23 (5): 27-30.
- [6] 欧阳丽华, 庄烨, 刘科伟, 等. 燃煤电厂湿烟囱降雨成因分析 [J]. 环境科学, 2015 (6): 1975-1982.
- [7] 郭小虎, 张小龙, 李军民, 等. 空气特性对湿烟羽治理技术的影响 [J]. 环境工程技术学报, 2019, 9 (5): 531-537.
- [8] 刘志坦, 惠润堂, 杨爱勇, 等. 燃煤电厂湿烟羽成因及对策研究 [J]. 环境与发展, 2017, 29 (10): 43-46.
- [9] 杨晓阳, 王飞, 杨凤玲, 等. 燃煤电厂白色烟羽消除技术现状与展望 [J]. 洁净煤技术, 2020, 26 (6): 109-117.
- [10] 胡鑫, 潘响明, 李啸, 等. 湿法脱硫烟气“消白”工艺探索 [J]. 气体净化, 2018, 18 (8): 20-24.
- [11] 曹凌燕. 燃煤电厂白色烟羽的形成与消除研究 [J]. 锅炉技术, 2019, 50 (3): 60-65.
- [12] 吕刚, 向轶, 吕文豪, 等. 燃煤锅炉烟气消白技术的应用现状及研究进展 [J]. 煤化工, 2019, 47 (1): 4-8.
- [13] 颜岩, 余波, 王浩, 等. 燃煤电厂湿烟羽治理技术研究进展 [J]. 过程工程学报, 2020, 20 (7): 745-756.
- [14] 姚增权. 湿烟气的抬升与凝结 [J]. 国际电力, 2003 (1): 42-46.
- [15] 田路泞, 韩哲楠, 董勇, 等. 燃煤电厂湿烟气余热及水分回收技术研究 [J]. 洁净煤技术, 2017, 23 (5): 105-110.
- [16] 谭厚章, 刘兴, 王文慧, 等. 超低排放背景下烟气消白技术路线研究 [J]. 洁净煤技术, 2019, 25 (2): 38-44.
- [17] 谭鑫波, 胡亮. 喷淋冷凝再升温技术在铅锌冶炼烟气治理中的研究 [J]. 环境科学导刊, 2020 (S1): 61-64.
- [18] 翟尚鹏, 黄丽娜, 曾艳. 湿法脱硫净烟气再热技术的应用 [J]. 环境工程, 2015 (8): 52-55.
- [19] 陈文理. MGGH 技术在 1 000 MW 机组中应用的技术、经济型分析 [J]. 电力建设, 2014, 35 (5): 103-107.
- [20] 董勇, 宋德升, 马春元, 等. 湿法烟气脱硫工艺中烟气再热方式的选择 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2005, 6 (3): 75-78.
- [21] 吴炬, 邹天舒, 冷杰, 等. 采用混合式烟气再热技术治理火电厂“石膏雨” [J]. 中国电力, 2012, 45 (12): 26-30.
- [22] 李璐璐, 姚宣, 张缙, 等. 脱硫湿烟气喷淋冷凝过程数值模拟研究 [J]. 洁净煤技术, 2020, 26 (3): 82-89.
- [23] 李文艳, 王冀星, 车建伟. 湿法脱硫烟气湿排问题分析 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (14): 36-40.
- [24] 潘佩媛, 陈衡, 焦健, 等. 湿法脱硫后烟气腐蚀现场实验研究 [J]. 化工学报, 2019, 70 (1): 161-169.