

Research progress on wet plume control technology in coal-fired power plants

Yan YAN¹, Bo YU², Hao WANG², Xiaokang NIE¹, Huaqiang CHU^{1*}

1. School of Energy and Environment, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243002, China

2. Huatian Engineering & Technology Corporation, Ma'anshan, Anhui 243005, China

Abstract: The wet desulfurization method plays a major role in the desulfurization system of coal-fired power plants in China, among which limestone-gypsum wet desulfurization is the most widely used. The flue gas after wet desulfurization is usually wet saturated flue gas. If the ambient temperature and humidity of the flue gas are low, it will produce a “wet plume” phenomenon at the chimney. Wet plumes generally appear white or gray, which contains a large amount of water vapor and pollutants. The emergence of wet plumes will be harmful to the environment and human health. Therefore, enterprises adopting plume elimination technology to carry out emission transformation will reduce the emission of pollutants in the flue gas, make the flue gas diffuse better. To better understand the phenomenon of wet plume and help the enterprises to be transformed to choose the technical route that suits them, this work first introduces the wet desulfurization process and the causes of the wet plume formation, followed by the relevant policies issued in some parts of China. The research status of wet plume characteristics (including the length, lift height and elimination characteristics of the wet plume) was summarized. There are many control technologies for wet plume. The mainstream technology can be divided into flue gas condensation technology, flue gas reheating technology and flue gas condensation and reheating technology. The article then applies the temperature and humidity diagram to explain the principle of each control technology, according to the classification of control technology. The applications under the category are reviewed. At the end of the work, the possibility of combined use of control technology is proposed. Under the premise of energy-saving and economical permission, enterprises should try more technical routes to broaden the road for the management of wet plumes.

Key learning points:

- (1) The domestic policies about plume were summarized, and the research status of wet plume characteristics was reviewed.
- (2) The types and applications of wet plume control technology in coal-fired power plants were summarized, and the characteristics of each technical route were analyzed.
- (3) The research directions and applications of wet plume control technology were pointed out.

Key words: wet plume; elimination technology; flue gas treatment; hazard of plume

收稿: 2019-09-10, 修回: 2019-11-30, 网络发表: 2019-11-28, Received: 2019-09-10, Revised: 2019-11-30, Published online: 2019-11-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(编号: 2017YFB0601805); 国家自然科学基金资助项目(编号: 51676002)

作者简介: 颜岩(1996-), 男, 汉族, 安徽省亳州市人, 硕士研究生, 动力工程专业; 楚化强, 通讯联系人, E-mail: hqchust@163.com.

引用格式: 颜岩, 余波, 王浩, 等. 燃煤电厂湿烟羽治理技术研究进展. 过程工程学报, 2020, 20(7): 745-756.

Yan Y, Yu B, Wang H, et al. Research progress on wet plume control technology in coal-fired power plants (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2020, 20(7): 745-756, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.219292.

燃煤电厂湿烟羽治理技术研究进展

颜岩¹, 余波², 王浩², 聂晓康¹, 楚化强^{1*}

1. 安徽工业大学能源与环境学院, 安徽 马鞍山 243002

2. 中冶华天工程技术有限公司, 安徽 马鞍山 243005

摘要: 湿法脱硫方式在我国燃煤电厂的脱硫系统中占主要地位, 其中以石灰石-石膏湿法脱硫方式应用最多。湿法脱硫后的烟气通常为湿饱和烟气, 若烟气在排放时环境的温度及湿度较低, 则会在烟囱口产生“湿烟羽”现象。湿烟羽一般呈白色或灰色, 含大量水汽及污染物, 湿烟羽的出现对环境及人体健康产生危害。因此企业在采用脱白技术进行排放改造将会减少烟气中污染物的排放, 使烟气更好地扩散。为了更好地了解湿烟羽现象, 帮助待改造企业选用适合自身的技术路线, 本工作对湿法脱硫工艺及湿烟羽形成原因进行了简单介绍, 对国内部分地区出台的有关政策进行了汇总, 并综述了湿烟羽特性的研究现状(包括湿烟羽的长度、抬升高度及消除特性)。湿烟羽的控制技术较多, 主流技术可分为烟气冷凝技术、烟气加热技术及烟气冷凝再热技术, 应用温湿图对各控制技术的原理进行解释, 根据控制技术的分类对各类别下的应用进行了综述, 提出控制技术复合使用的可能, 在节能及经济性允许的前提下, 各企业应尝试更多技术路线, 为湿烟羽的治理拓宽道路。

要 点:

- (1) 汇总了国内烟羽政策, 综述了湿烟羽特性的研究现状。
- (2) 重点综述了燃煤电厂湿烟羽控制技术的种类及应用, 评论了各技术路线特点。
- (3) 指出了湿烟羽控制技术研发方向, 并给出了应用建议。

关键词: 湿烟羽; 脱白技术; 烟气治理; 烟羽危害

中图分类号: TK16 文献标识码: A 文章编号: 1009-606X(2020)07-0745-12

1 前言

我国化石能源结构为“贫油、少气、富煤”, 从《中国能源发展报告 2018》可知我国能源消耗结构正逐渐优化, 能源行业目前正朝着清洁低碳、安全高效的方向发展, 2018 年全年煤炭消耗量为 39 亿吨, 其中电力行业占据约 21 亿吨^[1]。《BP 世界能源展望》预测我国煤炭消耗量占比将由 2015 年的 64% 降至 2035 年的 42%, 但煤炭的消耗量仍是巨大的, 依然是当前能源消耗的主体^[2]。2019 年出版的《BP 世界能源统计年鉴》指出, 我国在 2018 年实现了 25% 以上的可再生能源增长, 但发电需求增长更大, 仍需更多的煤炭来满足需求^[3]。我国火电和工业锅炉等行业对煤的需求量巨大, 以煤炭为燃料产生了大量污染物, 为了应对使用煤炭带来的环境污染问题, 我国出台了严格的标准, 对烟气中各种污染物的含量都有严格的排放限值。截止 2017 年底, 全国 71% 的燃煤机组已完成了超低排放改造^[4]。2013 年, 全国大面积出现雾霾天气, “雾霾”成为年度关键词。近年来, 部分地区常有雾霾天气出现, 其来源主要有工业排放、汽车尾气、建筑扬尘等。湿法脱硫后高湿烟气的排放和排

烟水分中的溶解性颗粒物被认为是导致雾霾产生的根本原因^[5]。湿烟羽及相应处理技术的研究也成为了行业热点。不同于黄色烟羽、蓝色烟羽及较早的灰黑色烟羽现象, 湿烟羽在燃煤电厂中出现较多, 原因是湿法脱硫装置或湿式电除尘器处理后排放的湿烟气通过烟囱排入大气而产生^[6]。对于湿烟羽特性的研究及相关控制技术在国内的应用, 目前鲜有较详细的综述。查阅了国内近年学者们对湿烟羽现象的研究及处理技术应用等文献资料, 本工作对湿烟羽的特性及其控制技术进行了系统的总结。旨在帮助了解湿烟羽及其特性, 通过已完成排放改造的企业的经验对未改造企业有所启示, 在选择改造路线时提供支持。

2 湿烟羽及其危害

目前我国燃煤电厂 90% 以上机组的脱硫系统采用石灰石-石膏湿法脱硫方式^[7], 该工艺多通过喷淋洗涤以去除 SO_2 。为更好地去除 SO_2 , 湿法脱硫反应控制温度 45~55 °C, 出塔烟气为湿饱和烟气, 此时烟气与水的露点温度接近^[7,8]。图 1 为脱硫吸收塔简图, 烟气从底部进入脱硫塔, 自下而上经喷淋层和除雾层, 从顶部排进出

入下个工艺。在喷淋层, 碱性石灰石浆液自上而下喷淋, 与烟气逆流接触, 使烟气中绝大部分 SO_2 被吸收, 而后除雾层除去烟气携带的部分水分及溶有的硫酸盐等。若烟气以湿饱和状态直接排放至温度低的环境中, 烟气中水蒸气遇冷凝结成小液滴, 液滴对光线产生折射、散射作用, 使烟羽呈白色或灰色的湿烟羽, 俗称“大白烟”^[9]。学者^[10-12]对湿烟羽的产生原因进行了描述。

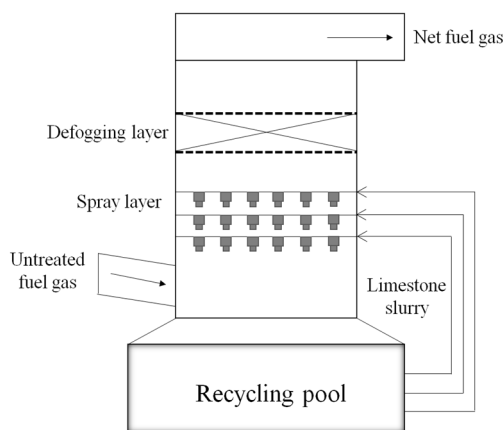


图1 吸收塔内部简图
Fig.1 Internal diagram of absorption tower

烟气直接排放至环境中产生湿烟羽的原理见图2。图中曲线为饱和湿度曲线, A点为烟气状态点, B点为环境状态点, 湿烟气直接排放即图中直线AB, 烟气不经处理排入空气中, 与空气均匀混合, 由于空气含湿量低于烟气, 故烟气中水分向空气扩散, 混合气体的湿度及温度沿线AB变化, 其间经过过饱和区时, 有液滴析出, 产生湿烟羽现象。

由于湿法脱硫中较小的石膏浆液无法通过除雾器去除, 因而会在烟气排放中带出, 对周围环境造成污染。

与干烟气相比, 湿烟气排放时烟羽的抬升高度低, 扩散效果较差, 污染物在烟囱附近的落地浓度增加, 对周围环境造成影响, 加重灰霾现象, 降低空气能见度。在环境温度低时, 湿烟羽现象更加明显, 甚至产生“烟囱雨”现象^[13], 严重腐蚀设备, 损坏周边建筑, 并造成环境污染问题。湿烟气的直接排放被认为是形成雾霾的重要因素^[6,14,15]。烟气饱和水蒸气中携带大量硫酸盐、硝酸盐和气溶胶等, 这些极细微颗粒物主要由脱硫脱硝反应产生。随着我国对环保的重视, 社会环保意识逐渐加强, 及湿烟羽中污染物带来的环境危害, 科研人员已展开相应研究, 环保部门也对湿烟羽的治理提出要求。

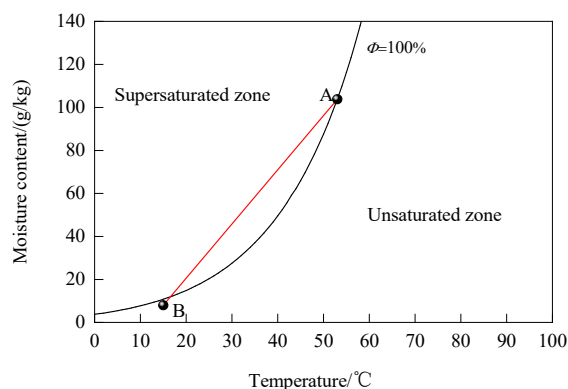


图2 湿烟羽产生原理
Fig.2 Principle of wet plume generation

3 国内烟羽治理政策指标

由于不同地区的环境及天气气候的差异, 目前我国尚无统一的指标规定, 各省市根据当地环境制定了相应的政策, 对烟羽的治理主要有两类要求, 一种是对采用直接加热或冷凝再热工艺限定最低排烟温度, 在特定环

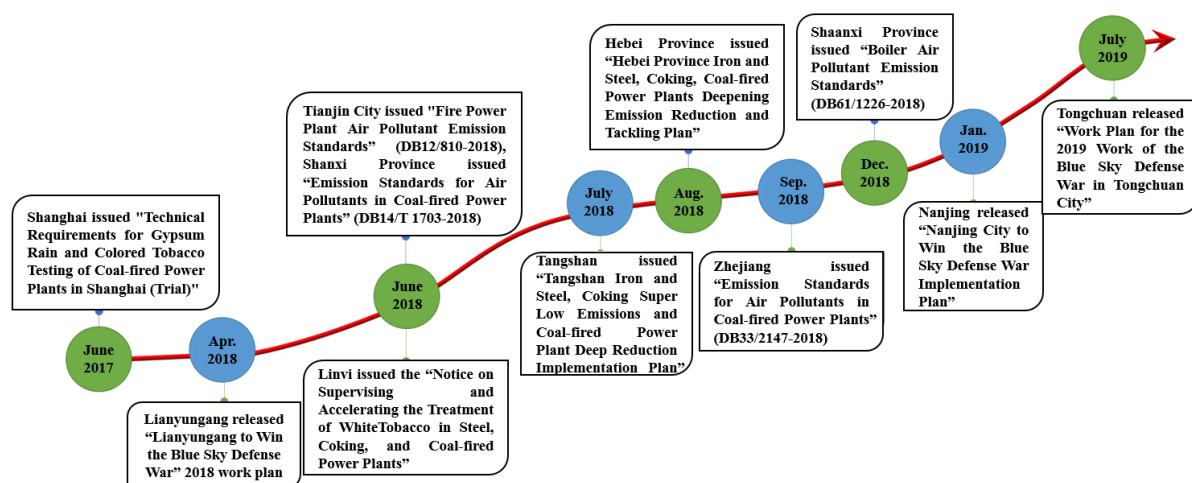


图3 相关标准出台时间
Fig.3 Relevant standards issued time

表 1 政策具体要求

Table 1 Specific requirements of policy

Area	Policy name	Related requirement
Zhejiang	“Emission Standards for Air Pollutants in Coal-fired Power Plants” (DB33/ 2147-2018)	Under normal working conditions, when adopting flue gas heating technology and adopting flue gas condensation and reheating technology, the exhaust gas temperature should be continuously stable above 75 ℃ and above 54 ℃, winter (from November to February) and heavy pollution warning. At the time of starting, the exhaust gas temperature of the two technologies should be continuously stable above 78 ℃ and above 56 ℃.
Shanghai	“Technical Requirements for Gypsum Rain and Colored Tobacco Testing of Coal-fired Power Plants in Shanghai (Trial)”	
Tianjin	“Emission Standards for Air Pollutants in Thermal Power Plants” (DB12/810-2018)	
Linfen	“Notice on Supervising the Acceleration of White Tobacco Treatment in Steel, Coking, and Coal-fired Power Plants”	Coal-fired power generation boilers should adopt corresponding technologies to reduce the temperature and moisture content of flue gas emissions. In the non-heating season (April to October), the flue gas temperature and moisture content reach 48 ℃ and 9.5% respectively, the heating season (November to March) of the following year, the standards are 45 ℃ and 8.5% or less.
Hebei	“Hebei Province Iron and Steel, Coking, Coal-fired Power Plants Deepening Emission Reduction Scheme (Acceptance Criteria)”	
Tangshan	“Tangshan Iron and Steel, Coking Ultra Low Emissions and Implementation Plan for Deep Reduction of Coal-fired Power Plants”	The smoke temperature control of coal-fired power plants adopts the cooling and condensation method. Under normal conditions, the smoke temperature and moisture content in summer (April to October) are below 48 ℃ and 11.0% in winter (November to March). The standards are 45 ℃ and 9.5% or less, respectively.
Shanxi	“Boiler Air Pollutant Emission Standard”(DB/61 1226-2018)	
	“Emission Standards for Air Pollutants in Coal-fired Power Plants” (DB14/T1703-2018)	The temperature of the flue gas emitted by the condensation method should reach 48 ℃ (April to October) and 45 ℃ (November to March). New coal-fired power generation boilers and existing coal-fired power generation boilers located in urban planning areas should take effective measures to eliminate gypsum rain and colored plumes.
Nanjing	“Nanjing City Wins the Blue Sky Defense War Implementation Plan”	
Lianyungang	“Lianyungang Wins the Blue Sky Defense War 2018 Work Plan”	Encourage coal-fired units to implement tobacco plume water vapor recovery and whitening treatment.
Tongchuan	“Tongchuan City Blue Sky Defense War 2019 Work Plan”	
		Thermal power, steel, flat glass enterprises and coal-fired boilers of 65 tons/ton or more are used for flue gas de-whitening.
		Thermal power enterprises completed the treatment of gypsum rain and colored plume according to the newly revised “Boiler Air Pollutant Emission Standard”.

境温度和湿度条件下消除白色烟羽；另一种是采用降温冷凝工艺将排烟温度和含湿量降低到要求值。图 3 给出了部分地区出台相关要求的时间^[16-26]。对有色烟羽及石膏雨现象进行说明并提出控制要求，各省市制定并实行适合各自地区的标准，具体见表 1。

4 湿烟羽特性研究

湿烟羽的特性包括湿烟羽的长度、抬升高度和消除特性等，而对湿烟羽特性的研究主要采用数值分析和 CFD 模拟两种手段。

4.1 数值分析

数值分析在湿烟羽问题上的应用多为数学建模，通过输入烟气及环境的参数，求解得到烟气及环境的临界参数。刘志坦等^[13]采用 Slowson 方法估算湿烟羽的长度，得出湿烟羽长度随环境温度升高而减小，随白烟温度升高而增大。马修元等^[27]计算得出白烟长度随环境相对湿度、环境风速、烟气速度及烟羽半径的变化的规律。姚增权^[9]计算得到环境湿度和烟气温度对白烟长度影响较大，与相同温度的干烟羽相比，湿烟羽在达到最大抬升

高度时下降更快。谭厚章等^[28]联立相关方程得出饱和湿烟气的含湿量与温度的关系，基于切线法对不同技术消除白烟的临界温度进行计算，得出其随烟气温度等条件变化的规律，并对烟气混合热空气的混合当量比进行了计算。张昊等^[29]联立方程得到了烟气温度与含湿量的关系，并做出了不同烟气湿度下的烟气焓湿图。范江等^[30]通过拟合得到饱和湿空气温度与湿度的关系式，基于切线法对不产生白烟时的排烟温度进行了计算，并对西安等三个地区的相关参数进行了计算，为这些地区提供了理论参考。冯殿义等^[31]通过建模提出了一种简单的排烟温度数学模型，该模型联立了大气相对湿度、温度、压力及饱和湿烟气温度，通过确定参数即可求得不会产生白烟的烟气排放温度。裘立春^[32]计算分析了燃料类型、过量空气系数等对燃煤锅炉烟气绝对含湿量的影响，并开发了相应计算模型，通过调节相应参数即可在一定程度上分析判断是否产生白烟。

4.2 CFD 模拟

CFD 模拟可以形象地给出模拟结果，是一种非常重要的研究手段。对湿烟羽特性研究而言，能从 CFD 模

拟图中直观地看到烟气的各物性参数在设备中及排入大气后的分布情况, 对工程设计有着重要的参考意义。通过 CFD 模拟, 李文艳等^[33]对烟囱内流场进行了分析, 发现烟囱内导流板合理的角度布置有利于减小流动阻力; 又分析了在不同烟囱进口速度的情况下, 烟气在烟囱出口的扩散情况, 结果表明烟气出口速度越大则抬升高度越高, 扩散能力越强。邓斌等^[34]基于切线法得到了不产生湿烟羽的临界温度, 然后建立了 300 m×500 m 的二维模型以观测烟气从烟囱排放后的扩散情况, 模拟结果显示, 烟气刚排放时温度高、相对湿度低, 扩散过程中烟气在温度降低时相对湿度变大, 产生湿烟羽现象, 而通过提高烟气温度则发现无湿烟羽现象产生。此外, 他们的模拟结果还证明了采用切线法的结果作为临界温度并不充分。

5 脱白技术路线

上述已经说明湿烟羽产生的原因, 在政策中提到了应用相关技术的排放要求。湿法脱硫烟气的不当排放导致以上现象产生, 究其原因是烟气中较多的水分易遇冷凝结, 脱白要保证排放过程中烟气的相对湿度始终低于

饱和湿度。多位学者^[35-40]对消除白烟的技术进行了分类与总结, 目前消除白烟的主流技术主要可分为三种, 即烟气冷凝技术、烟气再热技术和烟气冷凝再热技术, 三者间的联系如图 4 所示。各技术路线及特点详见表 2。

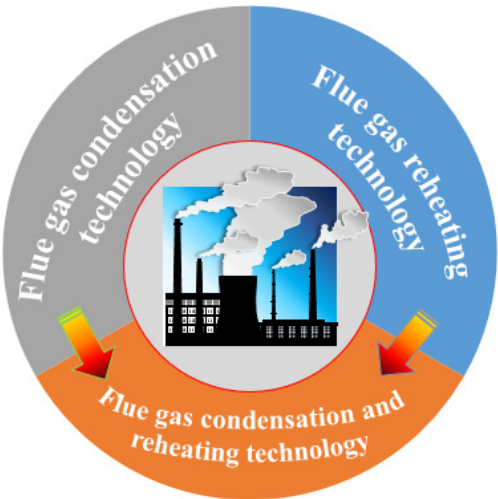


图 4 三种湿烟雨脱白技术
Fig.4 Three wet plume elimination technologies

表 2 脱白技术及特点
Table 2 Elimination technologies and characteristics

Route of technology	Name of technology	Size of unit	Investment operating cost	Emission concentration	Discharge temperature
Flue gas condensation technology	Slurry cooling	Medium	High	Low	Low
	Flue direct spray	Small	Low	Low	Low
	Flue condensation heat exchanger	Medium	High	Low	Low
	Phase change agglomerator	Large	Higher	Low	Low
	Desulfurization system without water supply	Medium	High	Low	Unchanged
	Flue gas waste heat recovery and emission reduction integrated system	Medium	Higher	Low	Low
Flue gas reheating technology	Tubular GGH	Small	Low	Unchanged	Higher
	MGGH	All	Higher	Unchanged	Higher
	Steam heating	Small and medium	High	Unchanged	Higher
	Hot secondary air mixing	Large and medium	High	Unchanged	Higher
Flue gas condensation and reheating technology	Slurry cooling + MGGH	Small and medium	High	Low	High
	Flue condensation heat exchanger + flue gas reheating	All	Higher	Low	High
	Spray heat exchanger + MGGH	Small	Low	Low	High

Note: GGH was Gas–Gas Heater; MGGH was Mitsubishi Gas–Gas Heater.

5.1 烟气冷凝技术

对湿饱和烟气进行冷却时, 烟气沿着饱和湿度曲线降温, 含湿量下降, 析出的水可回收利用, 并能降低烟气中多种污染物的浓度。烟气冷凝技术原理如图 5 所示。过环境点 B 作饱和湿度曲线的切线, 切点为 C, 称为临

界点, 当处理后的烟气状态处于饱和曲线上点 C 右侧时, 再排入环境仍会经历过饱和区, 仍有湿烟羽产生; 当烟气状态点在 C 点左侧时, 排入空气不会产生该现象。A–C–B 即为烟气冷凝技术, 烟气冷凝至点 C 后排入大气与环境空气均匀混合, 将不产生湿烟羽现象。

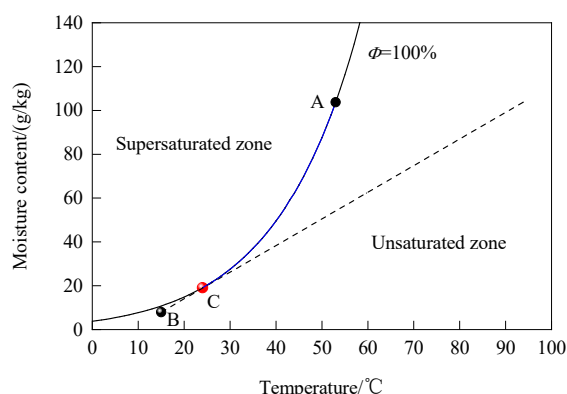


图5 烟气冷凝原理

Fig.5 Principle of flue gas condensation

烟气冷凝技术按换热方式可分为两类,间接换热和直接换热。间接换热主要采用管式换热器换热,烟气与冷媒不直接接触;直接换热采用喷淋方式对烟气进行喷淋,烟气与冷媒直接接触换热。此外,按循环方式可分为开式循环和闭式循环;按冷源可分为水冷、空冷和其他人工冷源,冷源温度越低,换热效果越好。虽然我国的北部地区温度低,冷源温度低,但所需降温幅度也将增大。目前,对冷凝技术的选用仍需综合考虑经济性 & 阻力的影响。

烟气冷凝技术可降低烟气的含湿量,回收烟气中的水分、去除溶于水的污染物等多重效益。上海长兴岛第二发电场采取了一系列技术方案进行超低排放改造,其中包括浆液冷却,顶层浆液循环量略有增加,使其温度从 51.0℃ 降至 47.2℃,改造后在回收水的同时,当环境温度为 15℃ 以上时无白烟产生,夏季无需对烟气进行再热^[41]。熊英莹等^[42]通过中试实验在脱硫塔后加装换热器,在实验条件下可实现 65% 以上水的回收,并对实际工况做出折算,若机组的脱硫补水量为 60~70 t/h 时,则可实现脱硫系统零水耗。上海外高桥第三发电有限公司的 7#, 8# 机组实施了冷凝方案,在脱硫除雾器后增设了烟气冷凝换热器,烟气降低 5℃,成功地得到了消除白色烟羽的工程效果,冷凝后收集的凝结水还可用于脱硫除雾器的冲洗水,节水效果显著^[43]。谭厚章等^[44]在脱硫系统和烟囱间布置了集除尘、节水和汽化潜热回收一体化的湿式相变凝聚系统,除盐水作为冷却介质,应用后实现了浙江巨化热电有限公司 8 号机组 280 t/h 燃煤锅炉粉尘超低排放,颗粒物浓度较低的情况下,最大可回收水 4.32 t/h,回收热量最高为 3.59 MW,降低排放同时还具有节水、热量回收等优点。魏茂林等^[45]提出了一套余热回收系统,将直接接触式换热器和热泵结合,烟气经脱硫处理后进入直接接触式换热器进行换热,低温

循环水由吸收式热泵制取,此系统在某热电厂进行了应用,系统在回收 16 MW 的余热时,排烟温度仅 39℃,锅炉热效率提升 3.2%, SO₂ 及 NO_x 均有所降低,工程总投资 2880 万元,年净收益 740 万元,具有环保及经济等效益。张路涛等^[46]应用浆液冷凝器对某 350 MW 机组进行改造,脱硫塔出口温度从 52℃ 降至 47℃,烟尘含量小于 10 mg/m³,冷凝水量为 35 t/h。王东雷^[47]应用浆液冷却工艺对 320 MW 机组的节水效果进行了分析,节水效果受干球温度影响较大,干球温度越低,节水效果越明显;干球温度为 40℃ 的极端高温天气条件下,节水效率仍高达 49.0%。江苏某电厂 2×330 MW 机组近期进行了排烟消除烟羽项目改造,对烟道冷凝器方案及浆液冷却方案进行了技术经济比较,考虑了初期投资、施工难度等多因素,最终采用了浆液冷却技术^[48]。

5.2 烟气再热技术

烟气再热技术主要适用于我国常年温度较高的南部地区,在烟气温度达 80℃ 时就可基本消除湿烟羽。选用烟气再热技术时,需考虑烟气升温幅度的要求及防止烟气泄露,并尽量采用低品质热源以降低能耗。烟气再热技术原理如图 6 所示。

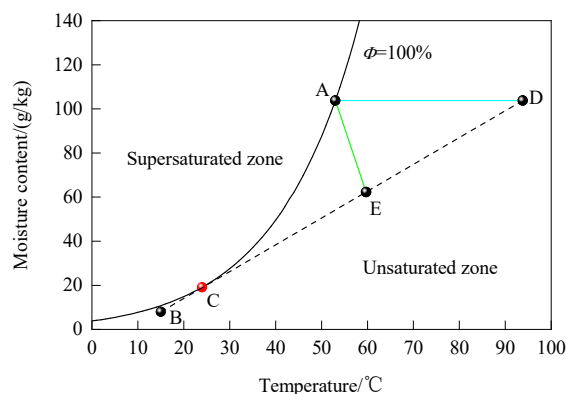


图6 烟气再热原理

Fig.6 Principle of flue gas reheating

目前烟气再热技术可分为两类,一类是烟气换热再热技术,即图 6 中 A-D-B 路线,烟气加热至一定温度后,排入大气与环境空气均匀混合,沿线 D-B 到达环境状态,其间不经历过饱和区,不会产生湿烟羽现象,代表技术有 MGGH(热媒体烟气加热器)、回转式 GGH(烟气换热器)、管式 GGH、热管式 GGH 及蒸汽加热等^[49];另一类是烟气混合再热技术,为图中 A-E-B 路线,如热二次风加热、热空气混合加热等,从图 6 中可看到,其特点是在烟气温度升高的同时,含湿量下降,在混合后到达环境状态过程中实现脱白处理。

5.2.1 烟气换热再热技术

由于存在堵塞、漏风等问题,国内从德国引进的传统回转式 GGH 技术大多已被拆除^[50]。与回转式 GGH 相同,管式 GGH 也是气气换热,净烟气在管外流动,原烟气在管内流动,原烟气与净烟气隔离,不会使净烟气受到污染。蒸汽加热是使蒸汽与饱和烟气在蒸汽-烟气换热器(SGH)里进行热交换,将蒸汽的热量传给饱和烟气,可直接进行消除白烟,也可用作恶劣天气状况,如冬季的辅助加热装置^[51]。MGGH 技术脱白的应用可追溯至 20 世纪 80 年代,日本以水为换热介质对湿烟羽进行治理,水在冷却器和再热器间循环,原烟气和净烟气不直接接触,不存在烟气泄露问题,但设备体积大、投资高。

吴炬等^[52]结合抚顺某热电厂对混合式 GGH 的实施要点进行了介绍,以 300 MW 机组为例,比较了混合式 GGH 与热媒式、回转式 GGH 的经济性及安全性,结果表明混合式 GGH 可消除石膏雨,无堵塞、腐蚀等情况,混合式 GGH 投资费用 450 万元,维护费用 10 万元,远低于其他两种。许静等^[53]针对 1000 MW 电厂,计算了采用管式 GGH 装置使烟囱不产生白烟的排烟温度,分析认为环境温度对结果影响较大,在冬季需额外的热源才能防止白烟产生。李鹏^[54]以 MGGH 在 600 MW 燃煤机组运行中的性能与传统 GGH 在电耗、运行性能、煤耗等多个方面进行了比较,结果表明 MGGH 工艺可有效降低耗能,节省运行成本,还可解决漏风、堵塞等问题。王正峰等^[55]对广东某 660 MW 燃煤电厂进行除尘脱硫一体化设计,并增设 MGGH 装置和电除尘除雾装置,在烟尘和 SO₂ 排放值仅为 2.2 及 16.7 mg/m³ 的情况下,

排烟温度为 80℃,可消除石膏雨现象。国华台山电厂共有 7 台机组,其中包含亚临界 600 MW 机组 5 个,赵文升等^[56]对国华台山电厂进行脱白改造,提出了 3 种改造方案,分别为低温省煤器+MGGH 方案、混合式 MGGH 方案及蒸汽加热式 MGGH 方案。探讨了各方案优缺点及实际条件后,于 1~2 号亚临界 600 MW 机组实行了混合式 MGGH 方案,初投资 4800 万每台,建设周期 70 天;3~5 号机组实行了低温省煤器+MGGH 方案,初投资约 9350 万元,建设周期 70 天。李再亮等^[57]以浙江大唐乌沙山发电厂 4 号 600 MW 机组为例,对 MGGH 的应用进行了探讨,经加热段后烟气温度可提高至 80℃,从而消除白烟、提高烟气抬升高度。张攀等^[58]对蒸汽-烟气换热器从材料耐腐蚀性、换热管的形式进行了研究,并实际验证,将过热蒸汽减温得到饱和蒸汽用于换热,烟气从 50℃ 加热至 82℃,烟囱出口无白雾现象。

5.2.2 烟气混合再热技术

热二次风加热是在脱硫塔净烟道注入锅炉二次风,二次风由空气预热器后的二次风风道中抽取,二次风与烟气混合后提高了烟气温度,但存在二次风携带烟尘的问题^[50]。热空气混合加热是空气加热后与烟气混合,可提升烟气的温度,降低烟气的含湿量,提高烟囱排烟高度,热二次风加热工艺简图见图 7。

国内应用该技术的企业较少。孙栓柱等^[59]研究了二次风加热烟气对机组的影响,对不同负荷、不同抽热风系数与风烟参数进行了试验研究,以实际运行时间较长的负荷为 800 MW 时与 GGH 技术进行对比,虽然年增加费用近 200 万元,但初期投资及维护方面抽热风加热

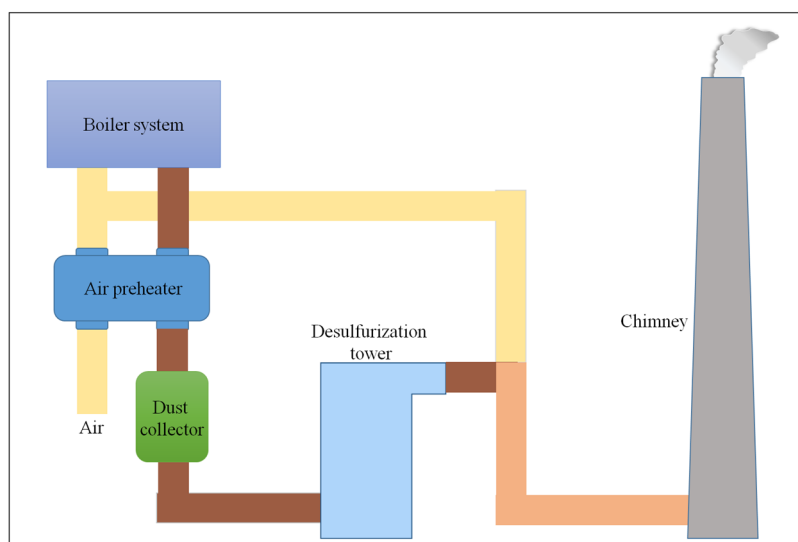


图 7 热二次风加热工艺图

Fig.7 Heating process diagram of hot secondary air

均具有显著优势。倪迎春等^[60]对江苏利港电厂四期机组进行改造分析,因布置GGH有拆除之前烟道及停运的缺陷,故选择了利用热二次风进行净烟气的加热,机组在抽取热二次风后,空气预热器入口烟温稍有下降,吸收塔入口烟温降低12.4℃,每小时可节约工艺水耗13.1 t,脱硫后净烟气比改造前增加20℃,在烟囱下风向500 m甚至更远均无湿烟羽现象,而未改造的三期机组在风向200 m范围有湿烟羽产生,改造效果明显。

5.3 烟气冷凝再热技术

烟气冷凝再热技术即冷凝技术与再热技术的有机整合,因冷凝装置与再热装置是各自独立的,故可根据不同实际条件进行冷热装置的搭配选择。烟气冷凝再热技术兼具了二者的特点,即使烟气温度降低实现污染物去除及节水等,再经烟气再热提高烟气温度后排入环境,综合处理后达到去除白烟的效果,原理见图8。

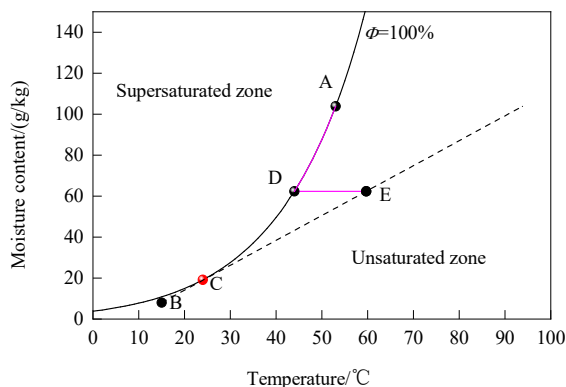


图8 烟气冷凝再热原理

Fig.8 Principle of flue gas condensation and reheating

如图所示,烟气冷凝再热技术沿图中A-D-E-B进行处理,烟气沿饱和湿度曲线降温,绝对含湿量下降,再经加热使烟气相对含湿量降低,而后与环境空气均匀混合,不经历过饱和区直至环境状态,达到消除白烟的效果。应用单一技术时,易出现因环境条件限制而导致冷热幅度过大的情况,在工程上难以实现,烟气冷凝再热技术可有效解决该问题。图9为目前应用较多的MGGH配合烟气冷凝器来消除白烟的简化流程图,高温烟气先经MGGH降温段降温进入脱硫塔,从脱硫塔处理完毕后送入烟气冷凝器,对烟气降温并可回收烟气中的水分,最后从MGGH加热段升温后通入烟囱排放至大气。

汤涛等^[61]对某电厂的两个机组进行烟羽的治理,技术改造采用浆液冷凝及烟气再热技术,具有节水节能、废水排放少、工程简单等特点。舒喜等^[62]以某300 MW机组为例,对常规MGGH技术和冷凝再热复合技术进行了对比分析,后者虽需要增添烟气冷凝器,但同时降低了烟气再热器的换热面积,在总体投资费用和电耗相差无几的情况下(使用常规MGGH技术需投资8200万元,冷凝再热复合技术需投资8500万元),可节水及降低污染物的排放,在冬季低温时也可有效消除湿烟羽。孙尊强等^[63]应用冷凝再热技术对上海外高桥第三发电有限责任公司7#机组(1000 MW)进行了改造,材料的选用主要考虑防锈防腐蚀,技术应用主要为在凝变除湿系统的相变凝聚器内冷却烟气,降低烟气温度,脱硫塔后增设烟气加热器,应用脱硫前原烟气的热量加热净烟气,在小幅度升温的情况下即可达到与传统加热法去除湿烟羽相同的效果。李跃军^[64]对共用一个烟囱的两台

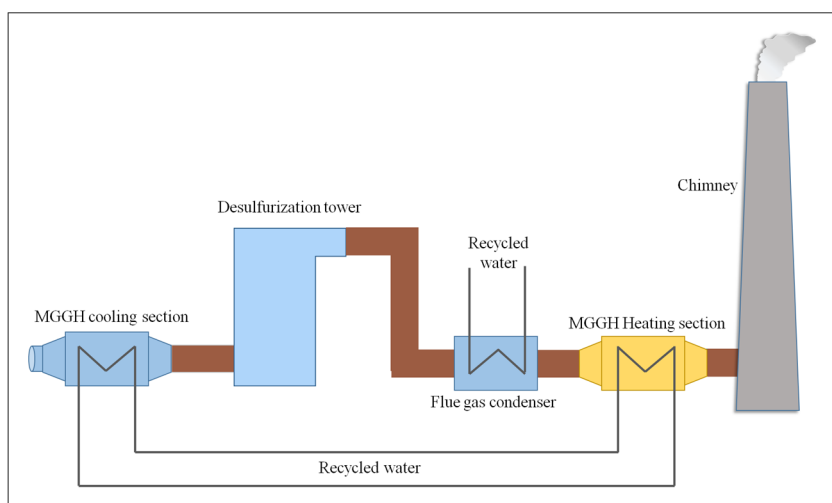


图9 MGGH+烟气冷凝器流程图

Fig.9 Flow chart of MGGH+flue gas condenser

480 t/h 锅炉系统进行设计改造,在原脱硫塔和烟囱间增加了低温烟气冷凝换热器和烟气再热器,均选用非金属材料,改造后单台锅炉凝结水量为 14068 kg/h,脱除了大量的水分及 SO_3 颗粒物,降低了污染物的排放,烟气经加热最终排放温度为 70°C ,烟囱口无白色水雾产生。王争荣等^[65]对某电厂 1000 MW 超临界机组进行设计,该机组烟气加热原设计方案为 MGGH,但为了降低仅依靠 MGGH 加热消除白烟的能耗,又考虑环境温度低时降温段提供的热量无法满足烟气再热,得出冷却降温+间接换热+热二次风混合为最佳方案。陆俊超等^[66]对分别应用了 MGGH 与冷凝再热法的两个厂进行了比较,两厂装机容量均为 $2\times 1000\text{ MW}$,在 MGGH 加热段将脱硫出口的烟气从 50°C 加热至 80°C 排放,冷凝再热法将脱硫出口烟气经冷却器降温至 45°C 再经加热器升温至 60°C ,在春夏秋均无白烟产生。赖建德^[67]对衡水恒兴电厂 3#, 4# 炉采用 MGGH+烟气冷凝换热器的性能进行了测试,测试结果为冷凝后烟温达 42°C ,含湿量在 8.5% 以下,正常运行工况下,烟气经再热后温度为 58°C 以上, SO_3 排放浓度不高于 5 mg/Nm^3 。冯巍^[68]对一台工业自备热电厂 180 t 煤粉锅炉进行设计,在脱硫塔后增加喷淋式换热器并结合 MGGH,此消白余热回收系统不仅可消除白烟,减少污染物的排放,回收的余热还可用于预热锅炉补水及锅炉进风,采暖季又可用于加热网回水,总投资约 1510 万元,静态投资回收期为 3.6 年。在本工作冷凝技术的应用部分提及上海长兴岛第二发电场采用了浆液冷凝技术,在夏季无需烟气加热即可消除白烟,而当环境温度低时对烟气只需加热 $5\sim 8^\circ\text{C}$ 就和仅通过 MGGH 加热 30°C 的效果一样,节能减排效果明显,造价低、工程实施简单^[41]。

5.4 其他技术

除以上技术外,应用半干法或干法脱硫替代湿法脱硫也是较好的方法。此外,关昱等^[69]还提出了在烟囱尾部装设有色烟羽的消除装置,是较新潮的思路,应用真空集热管的材料做出蜂窝结构以储存大量的热量,并将碱性物质充在其中,在光的照射下,集热管吸收大量热量并储存,在烟气通过时,将烟气进行加热,可有效避免烟气在烟囱出口冷凝,同时又可吸附 SO_3 等酸性气体,减少气溶胶的形成,但由于每天的烟量很大,当碱性物质用完后,装置更换的频率较高。

本部分对湿烟羽治理技术及其应用进行了详细地综述,各种技术均有优劣,技术的应用也均有适宜条件,烟气加热技术及烟气冷凝技术的单独使用较适用于我国南方地区,南方地区在夏季时仅使用单种技术即可实

现烟气脱白的效果。而大部分地区在冬季时,由于大气温度低、湿度高,仅使用单种技术难以对烟气进行脱白处理,应用冷凝再热复合技术脱白处理更合理,与应用单种技术相比,虽然投资成本增加,但解决了全年白烟脱除的问题。除了气候等原因,场地所需大小也应纳入考虑范围,在原有设备上改造或增设其他设备,一般而言,应用烟气冷凝再热技术均需增设其他设备。作者研究湿烟羽治理技术时,认为上海长兴岛第二发电场的排放改造方式较佳,据此提出一点建议供其他研究工作者参考,因其改造后在夏季仅需冷凝便达到要求,到冬季再增加运行加热设备实现脱白,故后续工作可借鉴上海长兴岛第二发电场的排放改造,对其他冷凝再热复合技术的应用进行烟道等的特殊布置,以达到与上海长兴岛第二发电场相似的效果,大大节约设备的能耗。

对于湿烟羽的治理,目前仍存在争议,已有多位学者发表了自己的观点^[70-75]。

6 结论与展望

在治理白烟的要求下,研究既经济节能又适合企业自身情况的脱白技术成为行业热点。本工作主要对湿烟羽及相关政策要求进行了介绍,并对其特性研究及消除技术应用进行了综述。脱白方法众多,根据以上各技术路线,得出技术路线可以复合使用。考虑到湿烟羽中的水分为二次粒子生成和低空中累积提供条件,成为雾霾产生的一个因素,因此建议仅采用加热技术的企业可增用冷凝技术以回收水分,减少水分排放,待改造企业建议使用冷凝再热技术进行改造。

由于我国各地区环境状况不同,目前无法制定出统一的规范,各地区企业应根据当地环境情况及烟气参数,采取适合自身的有效脱白路线进行烟气的治理,并敢于开拓新的技术路线,为脱白治理提供更多可能。

参考文献

- [1] 中国能源发展报告 2018 [M/OL]. (2019-05-02)[2019-08-25]. http://www.360doc.com/content/19/0502/20/3059286_832957164.shtml.
- [2] BP 世界能源展望 2019 年版 [M/OL]. (2018-04-09)[2019-08-25]. https://www.bp.com/content/dam/bp-country/zh_cn/Publications/19EOOP.pdf.
- [3] BP 世界能源统计年鉴 2019 年版 [M/OL]. (2019-07-30)[2019-08-25]. https://www.bp.com/content/dam/bp-country/zh_cn/Publications/2019SRbook.pdf.
- [4] 孙琛, 张蕾, 何月峰. 应用于湿法脱硫烟气的脱白工程技术探讨 [J]. 广州化工, 2019, 47(9): 162-163, 199.
Sun C, Zhang L, He Y F. Study on flue gas de-white for wet desulfurization system [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2019, 47(9): 162-163, 199.

- [5] 刘晨. 我国大气雾霾的元凶及对策与机遇探讨 [J]. 冶金动力, 2017, (4): 1-4.
Liu C. A discussion on the cause of domestic atmospheric haze and countermeasures and opportunity [J]. Metallurgical Power, 2017, (4): 1-4.
- [6] 朱法华, 孙尊强, 申智勇. 超低排放燃煤电厂有色烟羽成因及治理技术的经济与环境效益研究 [J/OL]. 中国电力: 1-9 [2019-10-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20190806.1147.002.html>.
- [7] 吴春华, 颜俭, 柏源, 等. 无 GGH 湿法烟气脱硫系统烟囱石膏雨的影响因素及策略研究 [J]. 电力科技与环保, 2013, 29(3): 15-17.
Wu C H, Yan J, Bai Y, et al. Influence factors and strategy research on gypsum rain of wet FGD system without GGH [J]. Electric Power Environmental Protection, 2013, 29(3): 15-17.
- [8] 欧阳丽华, 庄烨, 刘科伟, 等. 燃煤电厂湿烟羽降雨成因分析 [J]. 环境科学, 2015, (6): 1975-1982.
Ouyang L H, Zhuang Y, Liu K W, et al. Analysis on mechanism of rainout carried by wet stack of thermal power plant [J]. Environmental Science, 2015, (6): 1975-1982.
- [9] 姚增权. 湿烟气的抬升与凝结 [J]. 国际电力, 2003, 7(1): 42-46.
Yao Z Q. The rise and condensation of a moist plume [J]. International Electric Power for China, 2003, 7(1): 42-46.
- [10] 周洪光. 如何正确认识火电厂湿烟气排放及白雾现象 [J]. 环境工程, 2015, (S1): 433-437.
Zhou H G. A correct understanding of the wet flue gas emission and white spray phenomenon in coal-fired power plants [J]. Environmental Engineering, 2015, (S1): 433-437.
- [11] 赵萍, 王明浩, 包洪亮, 等. 烟气消白技术的分析研究 [C]//《环境工程》编委会、工业建筑杂志社有限公司.《环境工程》2019 年全国学术年会论文集(下册). 北京:《环境工程》编辑部, 2019: 4.
- [12] 陆生宽, 孟维. 烟气湿烟羽产生机理、影响因素及其解决方法 [J]. 资源节约与环保, 2019, 206(1): 40-41.
- [13] 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.
Liu Z T, Hui R T, Yang A Y, et al. Research on causes and countermeasures of the wet plume in coal-fired power plant [J]. Environment and Development, 2017, 29(10): 43-46.
- [14] 李潮江. 燃煤电厂“湿烟羽”消除措施研讨 [J]. 居舍, 2018, (28): 163.
- [15] 刘晨. 锅炉湿法脱硫系统排烟除湿脱白的技术途径探讨 [C]//中国节能协会热电产业联盟. 2015 清洁高效燃煤发电技术交流研讨会论文集. 北京: 北京中能联创信息咨询有限公司, 2015: 5.
- [16] 浙江省人民政府. 燃煤电厂大气污染物排放标准: DB33/2147-2018 [S]. 浙江: 浙江省人民政府, 2018: 11.
- [17] 上海市环境保护局办公室. 上海市燃煤电厂石膏雨和有色烟羽测试技术要求(试行) [S]. 上海: 上海市环境保护局办公室, 2017: 5.
- [18] 天津市环境保护局, 天津市市场和监督管理委员会. 火电厂大气污染物排放标准: DB12/810—2018 [S]. 天津: 天津市环境保护局, 2018: 3-4.
- [19] 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(验收标准) [S]. 河北: 河北省大气污染防治工作领导小组办公室, 2018: 9.
- [20] 陕西省生态环境厅, 陕西省市场监督管理局. 锅炉大气污染物排放标准: DB/61 1226—2018 [S]. 陕西: 陕西省生态环境厅, 2018: 4.
- [21] 山西省环境保护厅, 山西省质量技术监督局. 燃煤电厂大气污染物排放标准: DB14/ T1703-2018 [S]. 山西: 山西省环境保护厅, 2018: 3.
- [22] 山西临汾: 钢铁、焦化、燃煤电厂白色烟羽治理的相关要求 [S/OL]. (2018-7-2)[2019-8-25]. <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20180702/909577.shtml>.
- [23] 唐山市发布 “钢铁、焦化超低排放和燃煤电厂深度减排方案” [S/OL]. (2018-7-5)[2019-8-25]. <http://www.eserexpo.com/?show-821-2.html>.
- [24] 南京市人民政府. 市政府关于印发南京市打赢蓝天保卫战实施方案的通知 [Z/OL]. (2019-1-10)[2019-8-25]. http://www.nanjing.gov.cn/zdgk/201901/t20190116_1376791.html.
- [25] 连云港市生态环保局. 关于印发连云港市“打赢蓝天保卫战”2018 年工作计划的通知 [Z/OL]. (2018-4-9)[2019-8-25]. <http://www.lyg.gov.cn/lygshbj/tzgg/content/57f3a442-be25-46f7-90a7-8d5b61657f78.html>.
- [26] 铜川市蓝天保卫战 2019 年工作方案 [Z/OL]. (2019-7-16)[2019-8-25]. http://fg.ometal.com/detail/201907_600947.html.
- [27] 马修元, 惠润堂, 杨爱勇, 等. 湿烟羽扩散特性研究 [J]. 工业安全与环保, 2018, 44(9): 1-4.
Ma X Y, Hui R T, Yang A Y, et al. Study on diffusion characteristics of wet plume [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2018, 44(9): 1-4.
- [28] 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.
Tan H Z, Liu X, Wang W H, et al. Research on wet flue gas plume elimination technology in the context of ultra low emission [J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(2): 38-44.
- [29] 张昊, 董勇, 申凯. 燃煤电厂白烟的产生与防治 [C]//中国动力工程学会环保技术与装备专业委员会. 2017 燃煤电厂“石膏雨”、“有色烟羽”深度治理技术交流研讨会论文集. 北京: 北京中能联创信息咨询有限公司, 2017: 6.
- [30] 范江, 黄晨希, 陈伟雄, 等. 燃煤机组“消白”技术排烟温度的理论分析 [J]. 发电技术, 2019, 40(3): 239-245.
Fan J, Huang C X, Chen W X, et al. Theoretical analysis of flue gas exhaust temperature of white smoke elimination technology for coal-fired units [J]. Power Generation Technology, 2019, 40(3): 239-245.
- [31] 冯殿义, 高源. 烟气白烟羽治理排烟温度预测 [J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2019, 39(2): 104-106, 110.
Feng D Y, Gao Y. Prediction of smoke exhaust temperature for white mist control [J]. Journal of Liaoning University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 39(2): 104-106, 110.
- [32] 袁立春. 大型燃煤电站锅炉冒白烟的研究 [J]. 锅炉技术, 2015, 46(3): 26-29.
Qiu L C. The research on stack white fume in large utility boiler burning coal [J]. Boiler Technology, 2015, 46(3): 26-29.
- [33] 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, (14): 36-40.
Li W Y, Wang J X, Che J W. Analysis on corresponding problems of WFGD flue gas wet emission [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2007, (14): 36-40.
- [34] 邓斌, 韩长民, 赵红, 等. CFD 模拟在湿烟羽控制技术中的应用 [J]. 环保科技, 2018, 24(5): 9-13.
Deng B, Han C M, Zhao H, et al. An application of CFD simulation to wet smoke plume control technology [J]. Environmental Protection and Technology, 2018, 24(5): 9-13.

- [35] 薛晓东. 燃煤电厂白色烟羽治理方案 [J]. 节能与环保, 2018, 293(11): 58–59.
Xue X D. Treatment scheme of white plume in coal-fired power plant [J]. Energy Conservation & Environmental Protection, 2018, 293(11): 58–59.
- [36] 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): 1–5.
Lü G, Xiang Y, Lü W H, et al. Application status and research progress on white smoke elimination technology in coal-fired boiler [J]. Coal Chemical Industry, 2019, 47(1): 1–5.
- [37] 王贵彦, 黄素华. 湿法脱硫燃煤机组“白色烟羽”节能治理 [J]. 华电技术, 2016, 38(11): 64–65, 68, 79.
Wang G Y, Huang S H. Wet desulfurization coal-fired unit “white smoke plume” energy saving treatment [J]. Huadian Technology, 2016, 38(11): 64–65, 68, 79.
- [38] 王麒麟. 工业烟气除雾脱白工艺方法综述 [J]. 安徽化工, 2019, 45(2): 25–26, 29.
Wang Q L. Industrial flue gas deodorization and deodorization process method [J]. Anhui Chemical Industry, 2019, 45(2): 25–26, 29.
- [39] 王宗民. 燃煤电厂“湿烟羽”消除措施研讨 [J]. 上海节能, 2018, (5): 328–331.
Wang Z M. Discussion on eliminating of “wet plume” in coal-fired power plants [J]. Shanghai Energy Conservation, 2018, (5): 328–331.
- [40] 叶毅科, 惠润堂, 杨爱勇, 等. 燃煤电厂湿烟羽治理技术研究 [J]. 电力科技与环保, 2017, 33(4): 32–35.
Ye Y K, Hui R T, Yang A Y, et al. Technical research of wet plume control in coal-fired power plant [J]. Electric Power Environmental Protection, 2017, 33(4): 32–35.
- [41] 刘忠华, 郑桥, 徐志松. 上海长兴岛第二发电厂超低排放和烟羽治理中浆液冷却技术的应用 [C]//中国动力工程学会环保技术与装备专委会. 2017 火电厂超低排放脱硫废水零排放技术交流研讨会暨环保技术与装备专委会年会论文集. 北京: 北京中能联创信息咨询有限公司, 2017: 7.
- [42] 熊英莹, 谭厚章, 许伟刚, 等. 火电厂烟气潜热和凝结水回收的试验研究 [J]. 热力发电, 2015, 44(6): 77–81.
Xiong Y Y, Tan H Z, Xu W G, et al. Experimental study on latent heat and condensate recovery from flue gas in coal-fired power plants [J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(6): 77–81.
- [43] 冯伟忠, 施敏, 王利民, 等. 冷凝法烟气除湿减排干烟技术概述 [J]. 电力设备管理, 2018, (2): 51–54.
Feng W Z, Shi M, Wang L M, et al. Summary of dry smoke reduction by condensation method for flue gas dehumidification [J]. Electric Power Equipment Management, 2018, (2): 51–54.
- [44] 谭厚章, 毛双华, 刘亮亮, 等. 新型湿式相变凝聚除尘、节水及烟气余热回收一体化系统性能研究 [J]. 热力发电, 2018, 47(6): 16–22.
Tan H Z, Mao S H, Liu L L, et al. Performance research on the new integrated system of wet phase transition agglomeration dust collector, water saving and flue gas waste heat recovery [J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(6): 16–22.
- [45] 魏茂林, 付林, 赵玺灵, 等. 燃煤烟气余热回收与减排一体化系统应用研究 [J]. 工程热物理学报, 2017, (6): 25–33.
Wei M L, Fu L, Zhao X L, et al. Coal-fired boiler flue gas heat recovery system and its performance study [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, (6): 25–33.
- [46] 张路涛, 程明明, 周瑞, 等. 燃煤机组烟羽治理技术研究 [J]. 节能, 2019, 38(7): 19–21.
Zhang L T, Cheng M M, Zhou R, et al. Technical research of white plume control in coal-fired power plant [J]. Energy Conservation, 2019, 38(7): 19–21.
- [47] 王东雷. 浆液冷却烟气脱白设计影响因素及节水效果分析 [J/OL]. 发电技术: 1–6 [2019–10–20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1405.TH.20190911.0929.006.html>.
- [48] 俞立. 浆液冷却技术在燃煤机组消除烟羽工程上的应用 [C]//《环境工程》编委会、工业建筑杂志社有限公司. 《环境工程》2019 年全国学术年会论文集(下册). 北京: 《环境工程》编辑部, 2019: 5.
- [49] 陈莲芳, 徐夕仁, 马春元, 等. 湿式烟气脱硫过程中白烟的产生及防治 [J]. 发电设备, 2005, 19(5): 326–328.
Chen L F, Xu X R, Ma C Y, et al. Formation of white smoke in wet flue gas desulfurization processes and ways of prevention [J]. Power Equipment, 2005, 19(5): 326–328.
- [50] 孟维. 燃煤电厂烟气湿烟羽消除技术研究 [J]. 资源节约与环保, 2019, 206(1): 44–45.
- [51] 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.
Cao L Y. Research on formation and elimination of white plume in coal-fired plant [J]. Boiler Technology, 2019, 50(3): 60–65.
- [52] 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.
Wu J, Zou T S, Leng J, et al. Elimination of gypsum rain with admixing and heating cleaned flue gas [J]. Electric Power, 2012, 45(12): 26–30.
- [53] 许静, 段钰锋, 冯琰磊, 等. 1000 MW 机组烟卤石膏雨的研究 [J]. 发电设备, 2017, 31(5): 344–347.
Xu J, Duan Y F, Feng Y L, et al. Research on gypsum rain reduction of a 1000 MW coal-fired plant chimney [J]. Power Equipment, 2017, 31(5): 344–347.
- [54] 李鹏. 电厂脱硫系统中 MGGH 技术的应用分析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2017, 37(24): 137–138.
- [55] 王正峰, 邹竟成. 火力发电厂高效脱硫及除尘一体化超洁净技术研究及应用 [J]. 南方能源建设, 2018, 5(S1): 37–44.
Wang Z F, Zou J C. Research and application on integration of high-efficiency desulphurization and ultra-clean dust elimination technology in hermal power plant [J]. Southern Energy Construction, 2018, 5(S1): 37–44.
- [56] 赵文升, 刘英. 国华台山电厂烟卤消除白雾的研究与应用 [J]. 军民两用技术与产品, 2015, (4): 177–180.
- [57] 李再亮, 邢岩岩, 马成龙. 管式热媒水烟气换热器(MGGH)技术在发电厂除尘提效和消除烟羽的研究与应用 [J]. 科学技术创新, 2017, (4): 119.
- [58] 张攀, 范祥子. 蒸汽加热法去除烟气白雾技术 [J]. 洁净煤技术, 2018, 24(4): 131–135.
Zhang P, Fan X Z. Technology of steam heating method to removal gas fog [J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(4): 131–135.
- [59] 孙桂柱, 梁绍华, 孙虹, 等. 1000 MW 机组抽热风加热脱硫出口净烟气的经济性研究 [J]. 电站系统工程, 2016, 32(2): 31–33, 36.
Sun S Z, Liang S H, Sun H, et al. Economy study on hot air heating desulfurization outlet flue gas in 1000 MW unit [J]. Power System Engineering, 2016, 32(2): 31–33, 36.
- [60] 倪迎春, 张东平. 热二次风加热脱硫后净烟气在 600 MW 机组中的应用 [J]. 电力科学与工程, 2013, 29(8): 69–72.

- [61] 汤涛, 胡远涛, 邵海馨, 等. 冷凝除湿再加热技术在烟羽消白中的应用 [C]//中国动力工程学会环保技术与装备专业委员会. 2017 燃煤电厂“石膏雨”、“有色烟羽”深度治理技术交流研讨会论文集. 北京: 北京中能联创信息咨询有限公司, 2017: 5.
- [62] 舒喜, 杨爱勇, 叶毅科, 等. 冷凝再热复合技术应用于燃煤电厂湿烟羽治理的可行性分析 [J]. 环境工程, 2017, (12): 82–85.
Shu X, Yang A Y, Ye Y K, et al. Feasibility analysis of the condensation and reheating composite technology applied to the wet plume control in coal fired power plant [J]. Environmental Engineering, 2017, (12): 82–85.
- [63] 孙尊强, 朱俊. 冷凝再热技术消除湿烟羽在大型燃煤机组中的应用 [C]//北京能源与环境学会. 2018 清洁高效燃煤发电技术交流研讨会论文集. 北京: 北京中能联创信息咨询有限公司, 2018: 6.
- [64] 李跃军. 燃煤电厂烟气脱白可行性分析 [J]. 纯碱工业, 2019, 247(1): 29–31.
Li Y J. Feasibility analysis of flue gas deep treatment in coal-fired power plants [J]. Soda Industry, 2019, 247(1): 29–31.
- [65] 王争荣, 耿宣, 汪洋, 等. 燃煤电厂湿烟羽消除设计方案对比分析 [J]. 华电技术, 2018, 40(9): 8–12, 80.
Wang Z R, Geng X, Wang Y, et al. Comparative analysis of design schemes for wet plume removal in coal-fired power plant [J]. Huadian Technology, 2018, 40(9): 8–12, 80.
- [66] 陆骏超, 陶雷行, 岳春妹, 等. 百万千瓦级燃煤机组烟气脱白技术研究 [J]. 电力与能源, 2018, 39(6): 902–906.
Lu J C, Tao L X, Yue C M, et al. Study on flue gas bleaching technology of one million kilowatt coal-fired units [J]. Power & Energy, 2018, 39(6): 902–906.
- [67] 赖建德. 冷凝再热技术消除湿烟羽在大型燃煤机组中的应用 [J]. 建材与装饰, 2019, (28): 215.
- [68] 冯巍. 一种消除低温高湿烟气白烟的系统 [J]. 应用能源技术, 2018, 250(10): 32–35.
Feng W. A system for eliminating white flue gas of low temperature and high humidity [J]. Applied Energy Technology, 2018, 250(10): 32–35.
- [69] 关昱, 周洋, 吴江. 燃煤电厂“有色烟羽”形成机制与烟羽消白技术研究 [J]. 上海电力学院学报, 2019, 35(1): 63–66.
Guan Y, Zhou Y, Wu J. Study on the formation mechanism of “colored smoke plume” at coal-fired power plants and its elimination technology [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2019, 35(1): 63–66.
- [70] 朱法华. 煤电湿法脱硫是治霾功臣 [N]. 中国能源报, 2017–09–11(005).
- [71] 朱法华. 烟气消白是美容不是治病 [J]. 电力设备管理, 2019, (1): 32–33.
- [72] 于伟静, 汪永威, 吕小林, 等. 燃煤电厂白色烟羽的潜值和控制策略评价 [J]. 化工进展, 2019, 38(3): 1579–1586.
Yu W J, Wang Y W, Lü X L, et al. Evaluation of potential and control strategy of white plume in the coal-fired power plants [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(3): 1579–1586.
- [73] 王志轩. 燃煤电厂脱硫脱硝并未加剧雾霾 [N]. 中国电力报, 2017–01–19(001).
- [74] 曹晋宁. 湿法脱硫技术的应用及对雾霾的影响 [J]. 山西化工, 2017, 37(3): 56–58.
Cao J N. Application of wet desulfurization technology and its influence on fog and haze [J]. Shanxi Chemical Industry, 2017, 37(3): 56–58.
- [75] 何平, 李树生, 朱维群, 等. 湿法脱硫如何导致大面积雾霾 [J]. 科学与管理, 2017, 37(6): 7–11.
He P, Li S S, Zhu W Q, et al. How wet desulfurization cause large area smog [J]. Science and Management, 2017, 37(6): 7–11.