

燃煤机组烟羽治理中温度选择与防腐措施

刘高军,孙亦鹏,姜龙,程亮

(华北电力科学研究院有限责任公司,北京 100045)

摘要:对烟羽治理模型进行研究,并利用数值方法求解不同烟羽治理技术终端确定的温度。研究表明:直接加热法和冷凝再热法确定的终端温度随环境温度升高而降低,近似呈指数分布;直接冷凝法确定的终端温度与环境温度近似呈线性正相关。在给定 25%,50%和 75% 环境相对湿度时,直接加热法确定的终端温度为 7.5,9.5 和 12.4 °C;冷凝再热法确定的终端温度分别为 1.0,2.9 和 5.6 °C 直接冷凝法确定的终端温度分别为 28.7,30.8 和 33.7 °C;在相应的终端温度之上,烟羽治理具有可行性;腐蚀问题贯穿烟羽治理整个过程,设计阶段应充分考虑换热元件耐腐蚀性、烟囱结构形式、烟道正压区腐蚀、烟道经济性和脱硝催化剂选用等;运行阶段应注意煤质管控、燃烧配风和终端温度等;检修阶段应注意检查漏点和涂刷防腐涂料,必要时加装辅助蒸汽加热系统。

关键词:燃煤机组;烟羽治理;环境温度;含湿量;规律;可行性

中图分类号:TK221

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.04.011

[引用本文格式]刘高军,孙亦鹏,姜龙,等.燃煤机组烟羽治理中温度选择与防腐措施[J].热能动力工程,2022,37(4):79-85. LIU Gao-jun,SUN Yi-peng,JIANG Long,et al. Temperature selection and anti-corrosion measures in plume control of coal-fired units [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2022,37(4):79-85.

Temperature Selection and Anti-corrosion Measures in Plume Control of Coal-fired Units

LIU Gao-jun,SUN Yi-peng,JIANG Long,CHENG Liang

(North China Electric Power Research Institute Co.,Ltd.,Beijing,China,Post Code:100045)

Abstract: Based on the study of a plume control model,a numerical method is proposed to solve the terminal temperature determined by different plume control technologies. The research shows the terminal temperature determined by the direct heating method and the condensing reheating method decreases with the increase of ambient temperature,which appears an exponential distribution approximately. The terminal temperature determined by the direct condensation method is approximately linearly correlated with the ambient temperature. Under the relative humidity of 25%,50% and 75%,the terminal temperature determined by the direct heating method is 7.5 °C,9.5 °C and 12.4 °C, respectively. Also,the terminal temperature determined by the condensation reheating method is 1.0 °C,2.9 °C and 5.6 °C, and those determined by the direct condensation method is 28.7 °C,30.8 °C and 33.7 °C, respectively. According to the results,the plume control is technically feasible above the corresponding terminal temperatures. The corrosion problem runs through the whole process of plume treatment. In the design stage,the corrosion resistance of heat exchange elements,the structure of the chimney,the corrosion of the positive pressure zone of the flue,the economy of the flue and the selection of denitration catalyst should be fully considered. During the operation,attention should be paid to coal quality control,combustion air distribution and terminal temperature,etc. During the maintenance,attention should be paid to check the leakage points,paint the anti-corrosion coating,and install the auxiliary steam heating system when necessary.

Key words: coal-fired unit,smoke plume treatment,ambient temperature,moisture content,regulation,

feasibility analysis

引言

我国“富煤贫油少气”的能源结构决定了煤炭在一次能源中占比过半^[1]。中电联《2020年全国电力工业统计快报》^[2]显示:2020年全国发电量76 236亿千瓦时,其中火电发电量51 743亿千瓦时,占比67.87%。为降低环境污染,我国政府部门联合发电企业执行超低排放政策^[3-6]。

湿法脱硫是实现超低排放的有效措施之一,但也存在一些问题^[7-15],如“有色烟羽^[7-9]”、“石膏雨^[9]”、耗水量大^[10-14]和浆液起泡^[15]等。目前,国内一些监管部门已出具针对烟羽治理的政策标准^[16-17],如河北省建议夏季冷凝后烟温低于48℃、含湿量低于11%,冬季对应45℃和9.5%。烟羽治理实施方案主要在脱硫后至烟囱段增加烟气冷凝或加热装置,从而改变烟气温度和含湿量,达到烟气消白效果^[18-22]。同时,由于脱硫出口烟气温度低于酸露点,腐蚀问题贯穿烟羽治理整个过程,涉及设计、运行和检修等阶段。

1 温度计算理论基础

1.1 烟羽治理工艺路线

燃煤机组烟气脱硫后处于饱和湿烟气状态,烟气温度介于45~60℃之间。由于环境温度低于脱硫出口烟气温度,在排烟冷却过程中冷凝析出水蒸气,形成烟羽。烟羽治理主要实现技术路线围绕脱硫出口烟气状态A点到环境状态G点的实现路径,如图1所示^[20,22]。烟羽治理研究,离不开特征温度的选择和判断。对于直接冷凝法,对A点烟气进行降温,降低其绝对含湿量,经过C点逐渐降温至E点,最终消除烟羽,在降温过程中产生冷凝水,可进行回收利用。对于直接加热法,A点烟气加热至B点,使其成为不饱和湿烟气,以满足在后续降温过程中经过D、F点,并且在降温过程中烟气不会出现饱和状态,即无冷凝水析出。对于冷凝再热法,A点烟气先沿饱和湿烟气曲线降温至C点,在此过程产生冷凝水并可回收。之后烟气温度加热至不饱和状态D点,并在降温过程经过F点,在此过程无白色

烟雨形成。理论上,F点位置只与环境状态G点和饱和烟气含湿量有关。

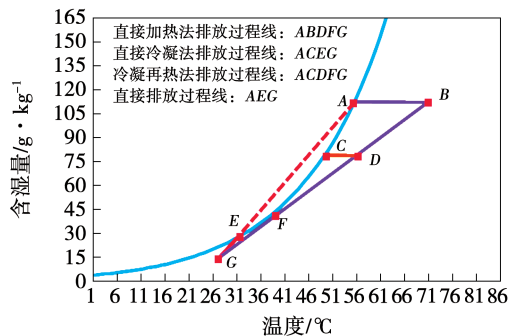


图1 烟羽治理技术路线^[20,22]

Fig. 1 Technical route of plume elimination^[20,22]

1.2 数学模型

根据文献[10],在温度0~200℃范围内饱和水蒸气的分压力由 Antoine 方程可得:

$$p_s = \text{EXP}\left(9.3876 - \frac{3826.36}{T - 45.47}\right) \quad (1)$$

式中: p_s —饱和水蒸气的分压力,MPa; T —烟气温度,K。

根据烟气压力和饱和水蒸气压力计算烟气含湿量。

$$d = 622 \frac{p_s}{p - p_s} \quad (2)$$

式中: p —烟气压力,MPa; d —含湿量,g/kg(干空气)。

对相切温度 T_F 求解。

将公式(1)、(2)联立,得到公式(3)。

$$d = \frac{622}{(p/\text{EXP}(9.3876 - 3826.36/(T - 45.47))) - 1} \quad (3)$$

公式(3)为烟气含湿量与温度的函数,对其求导得到公式(4)。

$$d' = \frac{622}{(p/\text{EXP}(9.3876 - 3826.36/(T - 45.47))) - 1} \cdot \frac{3826.36}{\text{EXP}(9.3876 - 3826.36/(T - 45.47)) \cdot (T - 45.47)^2} \quad (4)$$

对于含湿量曲线上F点对应的曲线斜率为 d'_F 。F点和G点连线的斜率 k 如公式(5)所示。

$$k = \frac{622 / (p / \text{EXP}(9.3876 - 3.82636 / (T_F - 45.47))) - 1} - d_C}{T_F - T_G} \quad (5)$$

对于切点 F 满足公式(6)。

$$d'_F = k_{FG} \quad (6)$$

由此确定相切温度 T_F 。

对直接加热法终端温度 T_B 求解,由线性关系确定升温温度 T_B 。

$$T_B = T_F + \frac{d_A - d_F}{d_F - d_G} \times (T_F - T_G) \quad (7)$$

对冷凝再热法终端温度 T_D 求解:

由于 C 点位置为设计点位或者实际运行点位, C 点参数已知。由线性关系确定终端温度 T_D 。

$$T_D = T_F + \frac{d_D - d_F}{d_F - d_G} (T_F - T_G) \quad (8)$$

对直接冷凝法终端温度 T_E 求解

由于 A 点位置和 G 点位置为设计位置或实际位置,参数已知。据此确定直线 AG 方程。

$$d = \frac{d_A - d_G}{T_A - T_G} \times T + \left(d_A - \frac{d_A - d_G}{T_A - T_G} \times T_A \right) \quad (9)$$

公式(3)、(9)联立,求解可得 T_E 。

综上,由已知环境参数和脱硫出口烟气温度,可确定烟羽治理中不同技术路线的特征温度 T_B 、 T_D 、 T_E 和 T_F ,单位为 K ;对应的摄氏度单位制下特征温度 t_b 、 t_d 、 t_e 、 t_f ,单位为 $^{\circ}C$ 。数学模型中公式(1)为在温度 $0 \sim 200^{\circ}C$ 范围内饱和水蒸气的分压力方程,公式(2)为含湿量计算方程。公式(3)~(9)为基于公式(1)和公式(2)的推导公式,故本数学模型具有可靠性。

2 基于温度计算的路线选择

2.1 环境温度对特征温度的影响

为研究环境温度对特征温度的影响,控制单一变量,令 $p = 93\ 000\ \text{Pa}$ 、 $t_a = 50^{\circ}C$ 、 $d_g = 0.1\ \text{g/kg}$ 、 $t_c = 44^{\circ}C$,计算特征温度,并绘制温度趋势,如图 2 所示。可以发现:(1)直接加热法和冷凝再热法确定的终端温度随环境温度升高而降低,近似指数分布。直接冷凝法终端温度与环境温度近似线性正相关。(2)通过数值计算方法,在给定参数情况下,直接冷

凝曲线和先冷凝再加热曲线交点对于温度约 $27.5^{\circ}C$,即在此环境温度以上可无再热直排大气且无有色烟羽形成。(3)环境温度过低时直接加热法无法脱白。例如在环境温度 $0^{\circ}C$ 下,采用直接加热法确定的最低加热温度为 $124.7^{\circ}C$,超过水的沸腾温度,不具实际实施意义。

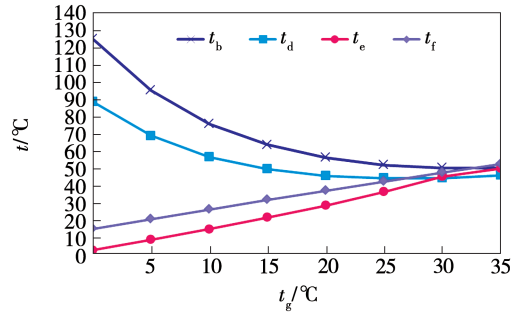


图 2 环境温度对特征温度的影响
Fig. 2 Effect of ambient temperature on characteristic temperature

2.2 特征温度的选择

表 1 为我国典型地区四季环境温度。代表性城市夏季环境温度都在 $10^{\circ}C$ 以上,环境温度较高,由此判断烟气消白具有可行性。其他 3 个季节,尤其是冬季,代表性城市环境温度有明显差别。乌兰察布、锡林浩特和乌鲁木齐历史平均最低温度在 $-18^{\circ}C$ 以下,这种情况烟气消白对应的加热温度势必在 $100^{\circ}C$ 以上,不具可行性。

表 1 我国典型地区四季环境温度 ($^{\circ}C$)

Tab. 1 Seasonal environmental temperatures in typical areas of China ($^{\circ}C$)

城市	春		夏		秋		冬	
	t_h	t_l	t_h	t_l	t_h	t_l	t_h	t_l
天津	18	10	32	24	18	10	1	-7
乌兰察布	16	1	28	15	15	1	-6	-19
锡林浩特	13	-3	30	14	12	-3	-15	-26
乌鲁木齐	18	8	30	20	17	7	-8	-18
成都	23	13	30	22	21	14	10	3
上海	21	12	34	26	23	16	8	2
武汉	24	12	34	25	25	12	11	-3
广州	27	20	34	26	30	22	19	11

注: t_h 、 t_l 分别表示历史统计平均最高、最低温度。

假设具有可行性的终端温度为 90 和 40 °C, 对应的直接加热法、冷凝再热法和直接冷凝法烟气温度变化最大值分别为 40, 46 和 10 °C。令 $p = 93\ 000\ \text{Pa}$ 、 $t_c = 44\ \text{°C}$ 、 $t_a = 50\ \text{°C}$, 环境相对湿度分别为 25%、50% 和 75%, 环境温度分别为 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 和 35 °C, 计算特征温度值。

基于给定参数, 直接加热法特征温度的确定曲线如图 3 所示。图中 A、B 和 C 点为环境相对湿度分别为 25%、50% 和 75% 时理论不出现烟羽的工作点。通过数值计算, 确定对应的最低环境温度分别为 7.5, 9.5 和 12.4 °C, 在此温度之上可达到烟羽治理效果。冷凝再热法特征温度的确定曲线如图 4 所示, 计算确定的环境温度分别为 1.0, 2.9 和 5.6 °C。直接冷凝法特征温度的确定曲线如图 5 所示, 计算确定的环境温度分别为 28.7, 30.8 和 33.7 °C。

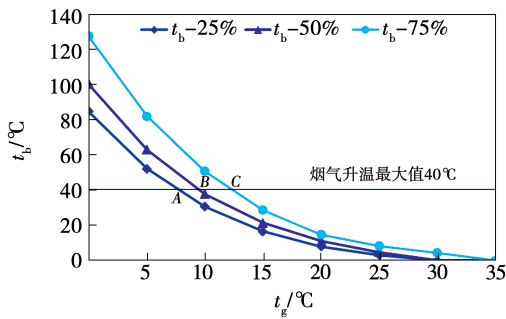


图 3 直接加热法终端温度 t_b 的选择

Fig. 3 Selection of characteristic temperature t_b

by direct heating method

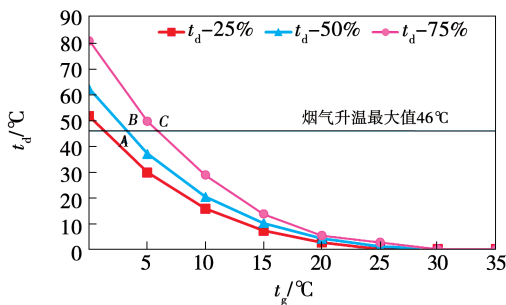


图 4 冷凝再热法终端温度 t_d 的选择

Fig. 4 Selection of characteristic temperature t_d

by condensing reheating method

绘制特征温度随环境相对湿度变化曲线, 如图 6 所示。当环境参数处于区域 1 时, 3 种烟羽治理路

线均可选择。当环境参数处于区域 2 时, 直接冷凝法不能实现烟气消白, 其他两种方式可以。当环境参数处于区域 3 时, 只有冷凝再热法可实现烟气消白。当环境参数处于区域 4 时, 3 种方式都不可行。一天之内不同时间或不同季节同一时间烟羽治理效果也不完全相同。但是, 同一地区烟羽治理效果主要受环境温度和终端温度影响。

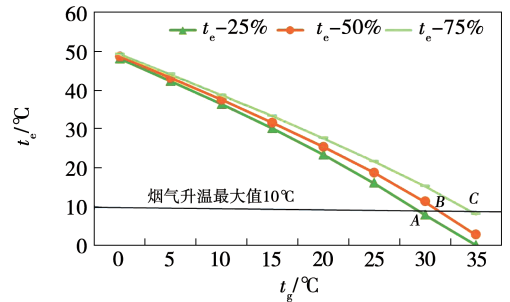


图 5 直接冷凝法终端温度 t_e 的选择

Fig. 5 Selection of characteristic temperature t_e

by direct condensation method

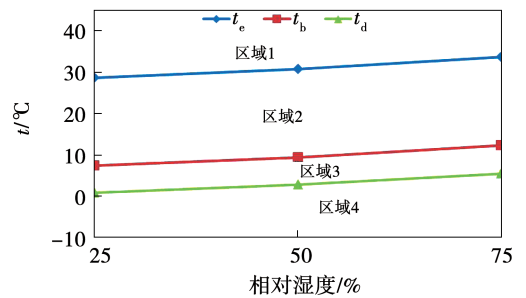


图 6 烟羽治理技术路线选择

Fig. 6 Technical-route selection of plume control

3 防腐措施

脱硫后烟气温度介于 45 ~ 60 °C 之间, 远低于烟气酸露点。烟羽治理后冷凝水 pH 值在 2 ~ 4 之间, 酸性较强, 长期运行势必腐蚀冷凝除湿装置、烟道和烟囱^[23-25]。因此, 有必要在设计、运行和检修阶段考虑脱硫后尾部烟道防腐措施。

3.1 设计阶段

(1) 脱硫后烟气为强腐蚀烟气, 按照 GB50051-2013《烟囱设计规范》要求, 烟囱及烟道建议选用防腐金属内衬钢烟囱、轻质防腐砖内衬钢烟囱和玻

玻璃钢内筒烟囱。表2为烟囱结构形式选用方案。

(2) 脱硫后烟道设计时应充分考虑烟道正压区腐蚀影响,尤其是烟囱部位。按照《火力发电厂烟风煤粉管道设计技术规程》配套设计计算方法,用烟囱静压准则数 R_z 来判断烟囱内是否出现了正压。通常认为其数值大于 1.0 时烟囱内出现了正压区。设计时应在边界范围内寻找最优解。

表2 烟囱结构形式选用方案

Tab. 2 Schemes of chimney structural forms

烟囱类型	内筒类型	方案
砖烟囱	-	×
单筒式钢筋混凝土烟囱	-	×
套筒或多管式烟囱	砖内筒	×
	防腐金属内衬钢内筒	○
	轻质防腐砖内衬钢内筒	○
	防腐涂层内衬钢内筒	□
	耐酸混凝土内衬钢内筒	×
	玻璃钢内筒	○

注:1.“○”建议采用的方案;“□”可采用的方案;“△”不宜采用的方案;“×”不应采用的方案。

(3) 换热元件采用氟塑料管或耐腐蚀性钢材。09CrCuSb (ND 钢) 是目前国内外最理想的“耐硫酸低温露点腐蚀”用钢材。

(4) 尾部烟道在考虑材料自身抗腐蚀性能基础上还要兼顾经济性,尤其是使用寿命和维护成本。王勇强等人^[26]针对某 1 000 MW 机组脱硫后尾部烟道 3 种防腐方案经济性分析,发现整体缠绕玻璃钢烟道内筒造价 4 654 万元,经济性最好。

(5) 调研不同品质的脱硝用催化剂,在确保机械性能和催化性能要求下,选择 SO_2 向 SO_3 的转换比率较低的催化剂。建议对备选脱硝催化剂进行中试试验,确定不同成分下 SO_2 向 SO_3 的转换比率。例如,肖海平等人^[27]研究了 Mn 元素对 Mn/ZSM-5 催化剂 SO_2 氧化性能的影响,随 Mn 元素增加, SO_2 向 SO_3 的转换比率逐步增加。Mn 元素超过一定值后,转换率逐步下降。Mn 催化剂在快速脱硝选择性催化还原 (SCR) 反应中具有最高的 SO_2 氧化率。

3.2 运行阶段

(1) 加强入炉煤管控,合理进行入炉煤掺烧。在条件允许情况下,尽量采购硫分低的煤种。对煤场内已有高硫煤,原则上低负荷工况燃烧高硫煤,高负荷工况燃烧低硫煤,及时补充石灰石浆液,确保脱硫系统满足超低排放控制指标,降低尾部烟道腐蚀机率。

(2) 合理分配风煤比例,在满足经济性和安全可靠条件下低氧燃烧或分级燃烧,降低主燃区温度,间接降低 SO_2 向 SO_3 的转换比率。运行实际操作时可在保证燃烧稳定性前提下适当降低一次风比率 3% ~ 5%,增加二次风比率,尤其是分离燃尽风或紧凑燃尽风比率。

(3) 腐蚀速率随壁温变化的曲线如图 7 所示。尾部设备腐蚀速率随壁温变化有两个严重区,第一区域为温度初次低于酸露点,随壁温降低腐蚀速度升高并逐渐达到最大值(露点温度以下 15 ~ 50 °C)。通常,脱硫后烟气腐蚀位于第一区域^[28]。据此,运行人员可提高烟气出口温度。安装有烟气再热器的 MGGH 系统,尽可能提高出口烟温。

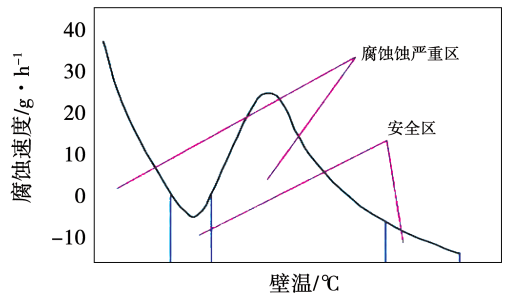


图7 腐蚀速率随壁温变化的曲线^[28]

Fig. 7 Variation curves of corrosion rate with tube temperatures^[28]

3.3 检修阶段

(1) 重点检查换热元件表面是否有腐蚀痕迹,尤其是冷端换热面。如发现漏点,及时修补或更换换热模块。

(2) 检修期间及时涂刷防腐涂料,避免后期局部损坏造成基体腐蚀。

(3) 对于高负荷大烟气量下不能满足烟气再热升温要求的消白装置,检修期间应加装辅助蒸汽加热系统,确保烟囱入口烟温高负荷下满足工艺要求。

4 结 论

烟羽治理主要可分为直接加热法、冷凝再热法和直接冷凝法。通过对烟羽治理模型研究,提出一种数值方法,求解不同烟羽治理技术终端温度。

(1) 直接加热法和冷凝再热法确定的终端温度随环境温度升高而降低,近似指数分布。直接冷凝法终端温度与环境温度近似线性正相关。夏季绝大多数地区能满足烟羽治理温度条件,冬季北方地区由于环境温度较低,脱硫后烟气仅能冷凝除湿,不能烟气消白。

(2) 考虑到工程经济性和可行性,建议选择烟气加热终端温度不超过 90 °C,烟气冷凝终端温度不低于 40 °C。在给定参数下 25%、50% 和 75% 环境相对湿度时,直接加热法终端温度 7.5、9.5 和 12.4 °C,冷凝再热法终端温度分别为 1.0、2.9 和 5.6 °C,直接冷凝法终端温度分别为 28.7、30.8 和 33.7 °C。在相应的终端温度之上,烟羽治理具有可行性,据此分区指导技术路线选择。

(3) 脱硫出口烟气温度低于酸露点,腐蚀问题贯穿烟羽治理整个过程,涉及设计、运行和检修等阶段。设计阶段应充分考虑换热元件耐腐蚀性、烟囱结构形式、烟道正压区腐蚀和烟道经济性。脱硝催化剂选用等。运行阶段应注意煤质管控、燃烧配风和终端温度等。检修阶段应注意检查漏点、涂刷防腐涂料,必要时加装辅助蒸汽加热系统。

参考文献:

[1] 杨英明,孙建东,李全生. 我国能源结构优化研究现状及展望[J]. 煤炭工程,2019,51(2):149-153.
YANG Ying-ming, SUN Jian-dong, LI Quan-sheng. Status and prospect of research on China's energy structure optimization[J]. Coal Engineering,2019,51(2):149-153.

[2] 中国电力企业联合会. 2020年全国电力工业统计快报[R]. 北京:中国电力企业联合会,2020.
China Electricity Council. Statistics bulletin of national power industry in 2020[R]. Beijing: China Electricity Council,2020.

[3] 张 洁,孙卫民,舒泽萍. 发电集团应对燃煤电厂超低排放的思考[J]. 电力科技与环保,2015,31(4):38-40.
ZHANG Jie, SUN Wei-min, SHU Ze-ping. Discussion on technical routes of coal-fired power generation group of ultra-low emission [J]. Electric Power Environmental Protection, 2015, 31(4):

38-40.

[4] 李 庆,姜 龙,郭 玥,等. 燃煤电厂超低排放应用现状及关键问题[J]. 高电压技术,2017,43(8):2630-2637.
LI Qing, JIANG Long, GUO Yue, et al. Current applications and key problems of ultra-low emission for coal-fired power plant[J]. High Voltage Engineering,2017,43(8):2630-2637.

[5] 滕卫明,李清毅,郑成航,等. 煤电超低排放脱硫运行状态及稳定性评估[J]. 动力工程学报,2017,37(12):992-998.
TENG Wei-ming, LI Qing-yi, ZHENG Cheng-hang, et al. Evaluation on operation stability of a flue gas desulfurization system after ultra-low emission retrofit of the coal-fired unit[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2017,37(12):992-998.

[6] 李 博,赵锦洋,吕俊复. 燃煤电厂超低排放技术方案应用[J]. 中国电力,2016,49(8):144-147,153.
LI Bo, ZHAO Jin-yang, LYU Jun-fu. Application of ultra-low emission technical roadmaps of coal-fired power plants[J]. Electric Power,2016,49(8):144-147,153.

[7] 张知翔,李 赞,朱仓海,等. 燃煤电厂烟羽治理系统优化[J]. 热力发电,2020,49(11):70-74.
ZHANG Zhi-xiang, LI Zan, ZHU Cang-hai, et al. Optimization of smoke plume control system in coal-fired power plant[J]. Thermal Power Generation,2020,49(11):70-74.

[8] 徐克涛,马俊飞,张 杨. 水煤式烟气换热装置的运行现状分析与优化措施探讨[J]. 中国电力,2019,52(1):124-129.
XU Ke-tao, MA Jun-fei, ZHANG Yang. Current operation state analysis on WGGH equipment and optimization method exploration [J]. Electric Power,2019,52(1):124-129.

[9] 周洪光,李延兵. 火电厂湿法脱硫石膏雨和白雾治理措施及效果分析[J]. 电力科技与环保,2014,30(6):34-47.
ZHOU Hong-guang, LI Yan-bing. Control measures and effect of gypsum rain and mist in the thermal power plant with FGD[J]. Electric Power Environmental Protection,2014,30(6):34-47.

[10] 聂鹏飞,王 洋,吴学民. 600 MW 机组湿法脱硫装置水耗分析[J]. 热力发电,2012,41(10):35-37.
NIE Peng-fei, WANG Yang, WU Xue-min. Water consumption of wet FGD device for 600 MW units[J]. Thermal Power Generation,2012,41(10):35-37.

[11] 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.
MA Shuang-chen, BIE Xuan, SUN Yao, et al. Research progress on flue gas water recovery technology in wet FGD[J]. Clean Coal Technology,2019,25(1):64-70.

[12] 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.
TIAN Lu-ning, HAN Zhe-nan, DONG Yong, et al. Review of water recovering technologies from flue gas in coal fired power plant

- [J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(5): 105 - 110.
- [13] 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 Ying-ying, TAN Hou-zhang, XU Wei-gang, 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.
- [14] 马双忱, 龚春琴, 辜涛, 等. 烟气回收水水质水量特点及回收水利用[J]. 华电技术, 2020, 42(3): 45 - 50.
MA Shuang-chen, GONG Chun-qin, GU Tao, et al. Characteristics of water quality and quantity of flue gas recovery water from coal-fired power plants and analysis of utilization methods of recycled water[J]. Huadian Technology, 2020, 42(3): 45 - 50.
- [15] 刘高军, 蔡向东, 李晓辉, 等. 浆液中镁离子含量对脱硫反应特性的影响[J]. 动力工程学报, 2020, 40(12): 1008 - 1013.
LIU Gao-jun, CAI Xiang-dong, LI Xiao-hui, et al. Effect of magnesium ion in slurry on flue gas desulfurization reaction[J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2020, 40(12): 1008 - 1013.
- [16] 杨爱勇, 舒喜, 申智勇, 等. 湿烟羽综合治理政策分析及建议[J]. 中国电力, 2020, 53(1): 130 - 139.
YANG Ai-yong, SHU Xi, SHEN Zhi-yong, et al. Policy studies and advice on comprehensive control of wet plume [J]. Electric Power, 2020, 53(1): 130 - 139.
- [17] 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): 67 - 70.
GUAN Yu, ZHOU Yang, WU Jiang. 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): 67 - 70.
- [18] 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.
LYU Gang, Xiang Yi, LYU Wen-hao, et al. Application status and research progress on white smoke elimination technology in coal-fired boiler[J]. Coal Chemical Industry, 2019, 47(1): 4 - 8.
- [19] 梁秀进, 朱文韬, 魏宏鸽, 等. 燃煤机组烟气消白技术路线选择与经济分析[J]. 中国电力, 2019, 52(3): 21 - 27.
LIANG Xiu-jin, ZHU Wen-tao, WEI Hong-ge, et al. Technical route selection and economic analysis on wet plume treatment for coal-fired units[J]. Electric Power, 2019, 52(3): 21 - 27.
- [20] 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 Jiang, HUANG Chen-xi, CHEN Wei-xiong, 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.
- [21] 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 Ling-yan. Research on formation and elimination of white plume in coal-fired plant[J]. Boiler Technology, 2019, 50(3): 60 - 65.
- [22] 贺艳艳. 高湿地区燃煤机组烟气“消白”的计算[J]. 福建师大福清分校学报, 2019, 156(5): 1 - 5.
HE Yan-yan. A computational on eliminating “white plume” from a coal-fired power plant in high-humidity areas[J]. Journal of Fuqing Branch of Fujian Normal University, 2019, 156(5): 1 - 5.
- [23] 杨彦. 火力发电厂湿法烟气脱硫系统烟囱腐蚀与防腐研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
YANG Yan. Corrosive and anticorrosive research on reinforced concrete chimney after wet flue gas desulfurization in power plant [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [24] 张中建, 徐耀兵, 潘军, 等. 烟气酸露点温度计算方法研究现状及进展[J]. 热力发电, 2019(11): 1 - 12.
ZHANG Jian-zhong, XU Yao-bing, PAN Jun, et al. Research status and progress of calculation methods for acid dew point of flue gas[J]. Thermal Power Generation, 2019(11): 1 - 12.
- [25] 齐晓辉, 牛如清, 于洪海. 浅析火力发电厂湿法脱硫后烟囱腐蚀现状及防护[J]. 全面腐蚀控制, 2016, 30(6): 55 - 57.
QI Xiao-hui, NIU Ru-qing, YU Hong-hai. Analysis on corrosion status and protection of chimney after wet FGD in thermal power plants[J]. Total Corrosion Control, 2016, 30(6): 55 - 57.
- [26] 王勇强, 张凌伟, 李兴利, 等. 湿法脱硫烟囱防腐方案选择[J]. 热力发电, 2014, 43(2): 5 - 8.
WANG Yong-qiang, ZHANG Ling-wei, LI Xing-li, et al. Selection of anticorrosion scheme for chimney in power stations [J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(2): 5 - 8.
- [27] 肖海平, 李建, 蒋炎飞, 等. Mn含量对Mn/ZSM-5催化剂脱硝和SO₂氧化性能的影响[J]. 环境科学研究, 2021, 34(2): 272 - 278.
XIAO Hai-ping, LI Jian, JIANG Yan-fei, et al. Effect of Mn content on denitration and SO₂ oxidation performance of Mn/ZSM-5 catalyst[J]. Research of Environmental Science, 2021, 34(2): 272 - 278.
- [28] 何雅玲, 汤松臻, 王飞龙, 等. 中低温烟气换热器气侧积灰、磨损及腐蚀的研究[J]. 科学通报, 2016(17): 1858 - 1876.
HE Ya-ling, TANG Song-zhen, WANG Fei-long, et al. Gas-side fouling, erosion and corrosion of heat exchanger for middle and low temperature flue gas waste heat recovery[J]. Chinese Science Bulletin, 2016(17): 1858 - 1876.