

燃煤电厂脱硫废水烟气蒸发技术进展与应用

柴晋¹, 万忠诚², 武凯¹, 张净瑞², 陈嘉宁¹, 刘其彬², 马双忱¹

(1. 华北电力大学(保定)环境科学与工程系, 河北保定 071003; 2. 盛发环保科技(厦门)有限公司, 福建厦门 361022)

摘要:自“水污染防治行动计划(水十条)”颁布以来,燃煤电厂脱硫废水零排放已逐渐成为电厂深度减排、污染物深度治理的必然要求。脱硫废水烟气蒸发技术具有工艺简单、安全可靠、投资及运行成本低等优势,逐渐成为主流技术。燃煤电厂脱硫废水烟气蒸发技术主要分为3类:低温烟道蒸发、高温旁路烟气蒸发、低温烟气余热浓缩减量,其中高温烟气蒸发又可分为旁路蒸发塔蒸发和旁路烟道蒸发2种技术路线。同时,对电厂烟气蒸发能力进行了核算,论述了脱硫废水烟气蒸发技术的研究进展与应用现状,并深入分析了各烟气蒸发技术的工艺特性、优缺点及其适用范围。研究表明,燃煤电厂的烟气蒸发能力极强,可以作为脱硫废水零排放的热源。另外,低温烟道蒸发因其易受锅炉负荷影响,适用度不高,未来烟气蒸发技术的研究重点是低温烟气余热浓缩结合高温旁路蒸发或低温烟气余热浓缩结合水泥化固定。

关键词:脱硫废水;烟气蒸发;零排放;余热利用

中图分类号:X773

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2019)02-0025-07

Development and application of flue gas evaporation technology for waste water desulfurization in coal-fired power plants

CHAI Jin¹, WAN Zhongcheng², WU Kai¹, ZHANG Jingrui², CHEN Jianing¹, LIU Qibin², MA Shuangchen¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University (Baoding), Baoding 071003, China;

2. Sheng Fa Environment Protection and Technology Co., Ltd., Xiamen 361022, China)

Abstract: Since the “Action Plan for Prevention and Control of Water Pollution” was promulgated, the zero-liquid discharge of desulfurization wastewater from coal-fired power plants has become an inevitable requirement for the deep wastewater treatment in power plants. Due to its simple process, higher safety & reliability and low investment and cost, evaporation technology using flue gas has become a main one in this field. Investigating the existing technologies, the flue gas evaporation technology can be divided into three types: low-temperature flue evaporation, bypass high-temperature flue gas evaporation, and concentration and decrement using flue gas waste heat. The evaporation capacity of flue gas was calculated, the research progress of desulfurization wastewater evaporation technology was reviewed, and the process characteristics, advantages and disadvantages of each evaporation technology were analyzed deeply. It can be seen that flue gas evaporation capacity of coal-fired power plants is extremely strong and can be used as heat source for zero discharge of desulfurization wastewater. What's more, low temperature flue evaporation is not suitable due to its vulnerability of boiler load, the combination of concentration and decrement using flue gas waste heat with high temperature evaporation or solidification is one of research directions in future. This paper responds to the national policy actively, provides a reference for selection of zero-liquid discharge technologies in coal-fired power plants and has important practical significance and application value.

Key words: desulfurization wastewater; flue gas evaporation; zero-liquid discharge; waste heat utilization

0 引言

作为酸雨的主要前体物之一,SO₂的大量排放

是造成我国大面积的酸雨及雾霾的主要原因之一,因此我国不断加大燃煤电厂烟气治理力度。目前我国燃煤电厂多采用湿式石灰石-石膏法烟气脱硫

收稿日期:2018-12-14;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.18121410

基金项目:华北电力大学中央高校基金资助项目(2017XS124)

作者简介:柴晋(1993—),男,河北衡水人,博士研究生,主要研究方向为大气污染与水污染控制。E-mail:947793257@qq.com

引用格式:柴晋,万忠诚,武凯,等.燃煤电厂脱硫废水烟气蒸发技术进展与应用[J].洁净煤技术,2019,25(2):25-31.

CHAI Jin, WAN Zhongcheng, WU Kai, et al. Development and application of flue gas evaporation technology for waste water desulfurization in coal-fired power plants[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(2): 25-31.



移动阅读

(WFGD)控制SO₂的排放^[1-2],此法脱硫效率高、技术成熟、适用煤种广、对锅炉负荷变化的适应性强、吸收剂资源丰富,脱硫副产物(无水石膏)可作为水泥或其他建材的添加剂,便于综合利用。截至2017年底,全国已投运火电厂烟气脱硫机组容量约9.2亿kWh,占全国火电机组容量的83.6%,其中90%以上为湿法脱硫。

为防止脱硫系统腐蚀,维持脱硫系统的正常运行^[3-5],脱硫系统需要定期排出脱硫废水,以控制浆液中氯离子浓度低于20 000 mg/L。在废水零排放背景下,循环水排污水、反渗透浓水、化学车间排水等电厂生产环节废水都汇集到脱硫塔,脱硫废水水质最恶劣。脱硫废水水质的特点有:

1) pH=4.5~6.5,呈弱酸性,且氯离子含量较高,具有较强的腐蚀性;

2) 悬浮物含量较高,一般质量浓度在10 000 mg/L以上,主要成分为石膏颗粒、SiO₂、Al和Fe的氢氧化物,在某些特殊运行工况或煤种条件下,悬浮物质量浓度甚至可达60 000 mg/L;

3) 含盐量较高,且变化范围大,在30 000~60 000 mg/L,主要成分为NaCl、CaSO₄、Na₂SO₄等;

4) 以Ca²⁺和Mg²⁺为指标的硬度较高,Ca²⁺和Mg²⁺含量在500~3 000 mg/L和4 000 mg/L以上;

5) COD、重金属超标,包括我国严格限制排放的第1类污染物,如Cr、As、Cd、Pb、Hg和Cu等。

关于脱硫废水处理,前人研究主要集中于单一污染物脱除及膜法净化将脱硫废水达标排放或回用,Huang等^[6-7]探究了混合零价铁对脱硫废水中重金属的脱除性能,研究表明,混合零价铁对废水中的Se及Hg脱除效率超过99%;Cui等^[8]采用电渗析脱除脱硫废水中的Cl⁻,其脱除效率达83.3%;Na等^[9]探究了UF-NF-RO的全膜法处理脱硫废水并生产硫酸和铵盐工艺的可行性,结果表明,该工艺可将脱硫废水处理至达标排放,且副产物纯度较高。

2015年4月16日,国务院发布了《水污染防治行动计划》^[10],由于脱硫废水为电厂的终端废水,水质恶劣,成分复杂,环保部门鼓励电厂进行脱硫废水零排放。在零排放大背景下,单一污染物脱除及膜法净化技术存在投资费用高、工艺复杂、净化水质难达标回用等风险,由此零排放技术逐渐发展,表1为脱硫废水零排放技术路线对比^[11-16]。

表1 脱硫废水零排放技术路线对比^[11-16]

Table 1 Comparison of zero-liquid discharge technologies for desulfurization wastewater^[11-16]

参数	传统烟气蒸发	蒸发浓缩结晶	机械雾化蒸发	蒸发池
进水要求	需要降低废水固含量	对进水水质要求较高,需要解决蒸发过程结垢问题	雾化机对颗粒杂质敏感,需解决设备结垢、腐蚀问题	无特殊要求
设备投资	中等	高	较低	土建费用高
占地面积	较小	中等	小	需设置废水贮存池、蒸发池,需求面积大
运行费用	中等	高	较低	较低
风险评估	受锅炉负荷影响明显,容易蒸发不彻底	需解决蒸发器结垢问题,提高设备运行可靠性	需考虑风吹损失对灰场周边环境的影响,避免环境风险	需设置足够容量废水贮存池,同时在蒸发量大的季节确保废水的蒸发量
适用条件	适用于负荷稳定,废水量较小的电厂	适用于无灰场、年蒸发量低、无浓缩液出路的电厂	环境影响尚不明确,需经试验评价后供选择	受季节影响,有大面积场地或灰场可用

2017年6月1日,国务院印发《火电厂污染防治最佳可行性技术指南》^[17],明确提出了烟气蒸发干燥、结晶等处理工艺实现电厂脱硫废水近零排放的2种可行性技术路线。烟气蒸发技术因其工艺简单、投运成本低、安全高效,逐渐成为主流的脱硫废水近零排放技术。

本文综述了脱硫废水烟气蒸发技术的研究进展,深入分析了各种烟气蒸发技术的工艺特性及优缺点,指出了未来烟气蒸发技术的研究及发展方向。

1 烟气蒸发能力评估

以某电厂330 MW机组为例,该机组空气预热器后烟气工况数据见表2。

在液气热交换过程中,随着液体的蒸发,烟气温度逐渐降低,但不同温度和压力条件下烟气中所能携带的水蒸气量有限,当烟气中水蒸气量达到饱和状态时,烟气已没有蒸发能力。对应温度下饱和湿烟气携带水蒸气的能力如下:

表2 锅炉B-MCR工况空气预热器后烟气工况

Table 2 B-MCR condition of flue gas after air preheater

烟气量/ (Nm ³ ·h ⁻¹)	空气预热器 后烟温/°C	除尘器后 烟温/°C	体积分数/%				
			N ₂	CO ₂	SO ₂	H ₂ O	O ₂
1 350 068	132	125	75.23	11.61	0.16	6.43	6.57

饱和烟气携带的气态水量 m_s 为

$$m_s = m_{\text{DFG}} d \quad (1)$$

烟气由原始状态至水蒸气饱和状态可蒸发的水量 m_w 为

$$m_w = m_s - m_0 \quad (2)$$

热量平衡等式为

$$m(\text{N}_2) \int_{T_0}^{T_1} C_{P,\text{N}_2} dT + m(\text{CO}_2) \int_{T_0}^{T_1} C_{P,\text{CO}_2} dT + m(\text{O}_2) \int_{T_0}^{T_1} C_{P,\text{O}_2} dT + m(\text{SO}_2) \int_{T_0}^{T_1} C_{P,\text{SO}_2} \times dT + m_v \int_{T_0}^{T_1} C_{P,\text{Vapor}} dT = m_w \left(\int_{T_w}^{T_{\text{PCT}}} C_w dT + \Delta H_{T_{\text{PCT}}} \right) \quad (3)$$

对应温度下饱和湿烟气携带水蒸气的能力推算,出口烟气所携带水蒸气量与出口烟气温度的关系为

$$m_s = m_{\text{DFG}} \frac{18}{m_{\text{DFG}}} \times \frac{13.6 \times 9.8 \times \left(18.3036 - \frac{3816.44}{T_1 - 46.13} \right)}{P - 13.6 \times 9.8 \times \left(18.3036 - \frac{3816.44}{T_1 - 46.13} \right)} \quad (4)$$

式中, m_0 为烟气初始含水量; $m(\text{N}_2)$ 、 $m(\text{CO}_2)$ 、 $m(\text{O}_2)$ 、 $m(\text{SO}_2)$ 为烟气中的 N_2 、 CO_2 、 O_2 、 SO_2 质量; m_v 为烟气中的水蒸气质量; m_{DFG} 为干烟气质量流量, kg/h; d 为绝对湿度, kg 水蒸气/kg 干烟气; C_{P,N_2} 、 C_{P,O_2} 、 C_{P,CO_2} 、 C_{P,SO_2} 、 $C_{P,\text{Vapor}}$ 为 N_2 、 O_2 、 CO_2 、 SO_2 、水蒸气比热容; C_w 为液态水的比热容; $\Delta H_{T_{\text{PCT}}}$ 为当量温度条件下水的汽化潜热, kJ/kg; T_{PCT} 为相变温度, K; T_w 为水的初始温度, K; T_0 为初始烟温, K; T_1 为最终烟温, K; P 为大气压, Pa。

不同温度烟气蒸发能力如图1所示,可见烟气具有很强的蒸发能力,可作为脱硫废水蒸发的热源。

2 脱硫废水烟气蒸发技术

2.1 低温烟道蒸发

低温烟道蒸发工艺如图2所示,在空预器与除尘器之间的烟道内设置气液两相流雾化喷嘴,将脱硫废水泵送到喷嘴内,喷嘴另一端通入压缩空气使废水雾化并分散到 120~140 °C 的低温烟气中,形成

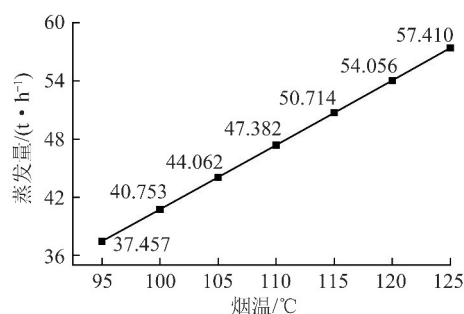


图1 不同温度的烟气蒸发能力

Fig. 1 Evaporation capacity of flue gas in different temperature

的雾化液滴与高温烟气热交换后快速蒸发,随后进入除尘器及后续设备,原废水中的盐分及重金属等物质则形成干灰,并随烟气进入后续除尘设备进而被捕捉。

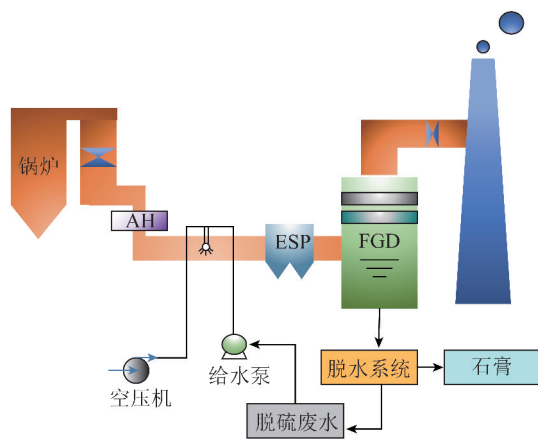


图2 低温烟道蒸发工艺

Fig. 2 Process of low-temperature flue evaporation

该技术仅利用喷嘴及空预器后的烟气废热将脱硫废水进行雾化蒸发处理,相对传统化学处理方法,具有有工艺简单、占地面积小、无需加药等优点,不仅减少了投资运行及维护费用,同时去除了传统化学工艺很难处理的 Cl^- 等溶解性盐分及重金属污染物,在运行初期实现了电厂脱硫废水的零排放,满足了电厂对废水零排放的需要。脱硫废水低温烟道蒸发过程会增加烟气湿度、降低烟气温度,二者均会降低粉尘比电阻,同时,烟气湿度的增大会加强粉尘颗粒之间的碰撞,使难以捕集的亚微米颗粒不断增湿、凝并、长大,有助于提高除尘效率。脱硫废水的

蒸发产物粒径普遍在 $10\ \mu\text{m}$ 以上,大于除尘器四电场粉尘粒径,因此脱硫废水蒸发产物可利用传统的除尘设备去除。

对于低温烟道蒸发技术,现有的研究主要利用 CFD 数值模拟研究烟道内流场变化及关键参数对蒸发特性的影响。冉景煜等^[18]建立了液滴在低温烟气中运动和蒸发过程的数学模型,研究了不同物性液滴在烟气环境中的蒸发特性,结果表明,纯水液滴蒸发最快,其次是酸溶液液滴和盐溶液液滴,碱溶液液滴蒸发最慢;张子敬等^[19]利用数值模拟的方法对影响液滴蒸发特性的喷雾液滴平均粒径、传热传质等影响因素进行分析,研究说明:蒸发的关键推动力为液滴表面蒸汽气相组分浓度与烟气中蒸汽气相组分浓度的浓度差。

但目前燃煤电厂负荷普遍偏低,该工艺受锅炉负荷影响明显,低负荷时,空气预热器后的烟温降至 $110\ \text{℃}$ 以内,难以实现完全蒸干,导致烟道积灰和腐蚀。另外,该技术使用的热源温度较低,蒸发速率较慢,需要较长的蒸发距离。但很多电厂迫于提高除尘效率,在传统电除尘前布置了低温省煤器,使烟道蒸发可利用的有效烟道长度减小,狭窄的空间限制了蒸发的水量及效率。面临多方面环保压力,该技术的推广应用遇到了瓶颈,如何将脱硫废水高效雾化更细小的液滴是该技术应用的关键。

2.2 高温旁路烟气蒸发

为克服传统低温烟道蒸发的缺点,高温旁路烟气蒸发技术逐渐受到关注,该技术建立独立的旁路蒸发器,抽取 SCR 后,空预器前的部分 $300\sim 350\ \text{℃}$ 热烟气作为干燥介质,雾化器雾化的液滴和热烟气在蒸发器内相互接触、混合,进行传热与传质,完成干燥过程;干燥产物与烟气一起返回原烟道进入除尘器,随粉尘一起被捕集。根据雾化器类型和蒸发器外观结构不同,高温旁路烟气蒸发技术可分为“旁路蒸发塔技术”和“旁路烟道蒸发技术”,如图 3 所示。

对于高温旁路烟气蒸发技术的研究,袁伟中等^[20]对某 $300\ \text{MW}$ 机组的旁路蒸发塔技术进行了现场试验,结果表明,3% 的热烟气干燥能力可达到 $4\ \text{t/h}$,蒸发塔运行可靠,对原烟道影响较小;贾绍广等^[21]利用 MATLAB 软件对蒸发塔模型进行了理论分析及热量衡算,实现了烟气与蒸发水量的匹配;崔琳等^[22]对蒸干产物进行表征分析,发现脱硫废水干燥产物主要是 $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ 和 NaCl 等无机盐,颗粒表面粗糙多孔,且平均粒径远大于粉煤灰平均粒径。

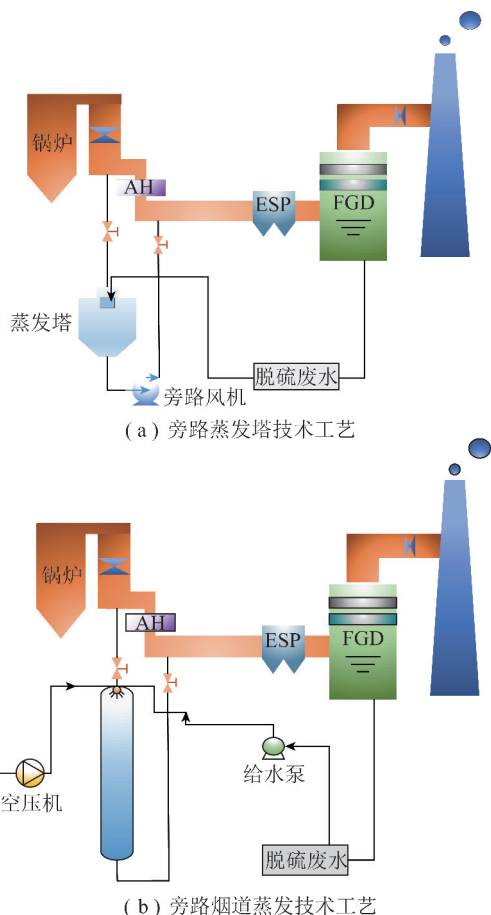


图 3 旁路蒸发塔技术工艺和旁路烟道蒸发技术工艺
Fig. 3 Process of bypass evaporation tower and process of bypass flue evaporation

由于设立单独的蒸发器,旁路蒸发可根据废水处理量的不同,抽取不同比例的热烟气,保证脱硫废水能够完全蒸干,蒸发不受锅炉负荷影响。相比其他零排放技术,该技术投资与运行费用低,可作为电厂废水处理的终端,真正实现电厂废水的零排放。但 2 种旁路技术存在一些差异和共性问题^[23-24](表 3)。

旁路蒸发工艺由于抽取空预器前高级热源会对锅炉热效率产生一定的影响,经核算喷雾后空预器一、二次风温有略微降低,温度降幅 $3\ \text{℃}$ 以内,蒸发 $1\ \text{t/h}$ 废水使热效降低 0.005% ,可见旁路烟气蒸发对锅炉热效影响较小。

2.3 低温烟气余热浓缩减量

在脱硫废水处理低成本化的驱动下,脱硫废水的浓缩减量也逐渐成为研究热点。浓缩减量单元目的是去除水中的溶解性固体,将更高浓度的盐水送至后续蒸发或固化系统,从而减少后续蒸发固化的处理量,降低蒸发固化成本。目前废水的浓缩减量主要通过热浓缩或膜浓缩等技术浓缩预处理后的脱硫废水,使废水量降低^[25]。传统的膜浓缩主要存在以下 4 个问题:

表3 高温旁路烟气蒸发技术对比

Table 3 Comparison of high-temperature bypass flue gas evaporation technology

项目	旁路蒸发器技术	旁路烟道蒸发技术
雾化器选型	旋流雾化器	双流体系雾化器
蒸发器外型	直径较大,占地面积大	直径小,占地面积小
腐蚀结垢特性	旋流雾化器离心力较大,且雾化器直径大,不易堵塞,不易粘壁。但材料选用碳钢存在腐蚀风险	蒸发器直径小,存在粘壁风险,但专业厂商设计可避免。材料选用复合板,无腐蚀风险
进水要求	要求不严格	需降低进水含固量
存在的共性问题	① 运用高品质热源为干燥介质,会较低程度影响锅炉热效率,烟气抽取量不宜过高,一般控制在3%~5%,因此需要预浓缩工艺对脱硫废水减量,降低脱硫废水蒸发总量;② 脱硫废水高温蒸发过程中释放部分气态HCl,影响后续设备的正常运行,因此需要进行水质调节	

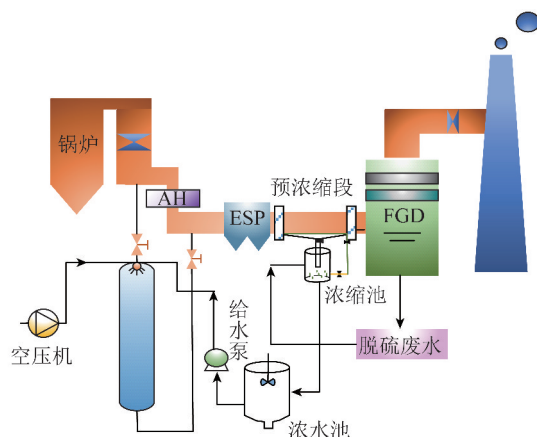


图4 “浓缩-旁路蒸发”工艺路线

Fig. 4 Process of concentration and bypass evaporation

入旁路烟道进行蒸发。该工艺有如下特点:

1) 只需在烟道内进行管道布置,增加浓缩水收集装置,方便改造,投资较小,有效克服了传统膜法浓缩的缺点;

2) 全烟气量用来预浓缩,烟气热值高,浓缩能力强,无需额外的高品位能量输入和另外增加风机,喷淋方式灵活多样,浓缩倍率可控;

3) 降低了脱硫塔入口烟温,减少了脱硫塔内的蒸发水耗;

4) 存在腐蚀问题,设备选材时采用防腐材料, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等硬度离子易在烟道内沉积,需增设在线除垢装置。

与“浓缩-旁路蒸发”不同,“浓缩-固化”工艺将浓缩后的高盐废水通入混合搅拌器,在混合搅拌器内按比例加入水泥、粉煤灰等原材料后,进入养护室定期养护,最终将盐分、重金属等污染物封存在水泥块中再利用,该工艺特点如下:

1) 利用水泥固化脱硫废水中的盐分和重金属离子,将流动性的脱硫废水转化为物化性能稳定、不易弥散的固化体(表4)。由表4可知,在养护龄期后,固化体抗压强度较高,污染物浸出率较低,迁移性较强的氯离子被固定在固化体中,有效避免了二次污染;

表4 固化体产物特性

Table 4 Characteristics of solidification product

参数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
氯离子浓度/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	0	30	40	50	60	70	80	90	100
抗压强度/MPa	32.94	36.97	40.36	40.86	40.50	44.62	42.05	42.84	42.17
氯离子浸出率/%	—	15.60	12.41	12.53	12.02	11.18	11.35	11.54	10.78

2) 利用电厂中的粉煤灰取代部分水泥来固定高盐废水,一方面可提高固化效果,增强对氯离子的

固定能力,另一方面也有利于电厂合理处置粉煤灰,充分利用电厂副产品;

3) 工艺结构简单, 投资及运行成本低, 生产的固化体适用于无钢筋混凝土或路沿石, 固化体的抗压强度及浸出性能均能满足施工需要, 可为企业带来显著经济效益, 并具有良好的环境与社会效益。

2.4 烟气蒸发技术应用现状

目前已建成且正式投运的大型燃煤电厂烟气蒸发脱硫废水项目情况见表5。

3 脱硫废水烟气蒸发研究趋势

随着脱硫废水零排放技术研究的深入, 低投资、低运行成本、多污染物一体化控制、简便高效等为技

术发展提出了更高的要求。图5为国内脱硫废水零排放的技术路线。蒸发塘以自然蒸发为基础, 简单实用, 但是受季节、温度等因素影响显著, 处理量明显不足; 而机械雾化蒸发技术虽然成本低、处理量大, 但风吹损失带来周边环境的盐污染是制约其发展的关键。蒸发浓缩结晶技术利用热蒸汽将废水蒸干, 工艺系统复杂, 投资运行成本高, 且在实际运行过程中发现, 分盐工艺得到的 NaCl 结晶盐品质不高, 含有部分微量有害元素, 有成为危险废物的隐患^[8-9], 该技术应用于燃煤电厂脱硫废水零排放的经济性和适用性需要进一步全面评估。

表5 烟气蒸发技术应用现状

Table 5 Application status of flue gas evaporation technologies

烟气蒸发技术	应用案例	工艺路线	运行效果
低温烟道蒸发	华电内蒙古土右电厂和 华云新材料自备电厂	低温烟道蒸发	投资运行成本低, 系统安全可靠
旁路蒸发塔	临汾热电厂	旁路蒸发塔蒸发	投资与运行费用低, 系统可靠, 不易堵塞, 不会对后续设备造成影响, 废水处理能力达 6 t/h
	焦作万方铝业热电厂	二级沉淀+膜法减量+旁路烟道蒸发	投资运行成本低, 对后续设备、粉煤灰品质等影响较小, 不易结垢
旁路烟道蒸发	国投北海电厂	二级沉淀预处理+RO 浓缩减量+旁路烟道蒸发	投资运行成本低, 对后续设备、粉煤灰品质等影响较小, 不易结垢, 处理量达 10 t/h
低温烟气余热浓缩减量	国电泰州电厂	烟气余热浓缩减量+二次风高温干燥	脱硫废水可浓缩减量 80% ~ 90%, 实现了后续干燥环节的节能降耗, 也降低了脱硫塔的运行水耗

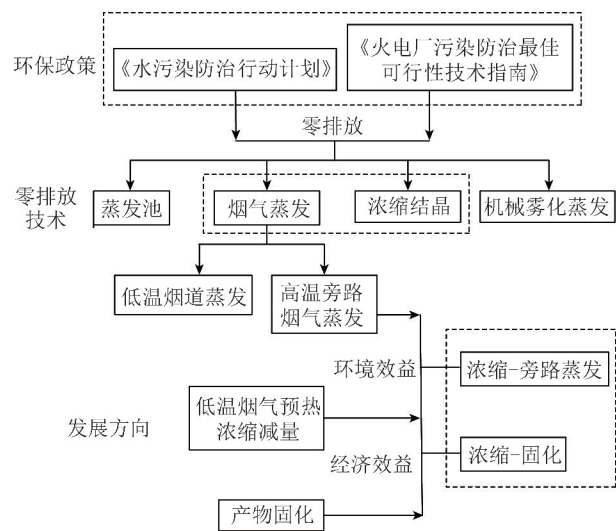


图5 脱硫废水零排放技术展望

Fig. 5 Outlook of zero-liquid discharge technologies of desulfurization wastewater

高温旁路烟气蒸发技术设立了单独的蒸发器, 保证脱硫废水完全蒸干, 可作为电厂废水处理的终端, 真正实现电厂废水的零排放。但蒸发水量不宜过大, 需要一种高效经济的脱硫废水减量方法。低温烟气余热浓缩减量技术克服了传统膜浓缩工艺的

缺点, 成为新的研究热点, 未来烟气蒸发技术的研究方向之一是低温烟气余热浓缩结合高温蒸发或固化, 其面临的关键技术问题, 如结晶与腐蚀等也会在实际应用中逐一被攻克。

4 结 语

本文综述了脱硫废水烟气蒸发技术的研究进展, 对烟气蒸发能力进行了评估, 说明了烟气具有很强的蒸发能力, 可作为脱硫废水的干燥介质; 深入分析了低温烟道蒸发、高温旁路烟气蒸发、低温烟气余热浓缩减量的技术工艺特性及优缺点, 分析认为未来烟气蒸发技术的发展方向之一是低温烟气余热浓缩结合高温蒸发或固化, 在废水零排放趋势下, 具有广阔的应用前景。

参考文献 (References):

- [1] ZHANG H, ZHAO X F, ZHONG W D. Impact analysis of implementation of GB13223 on environmental protection for thermal power plants[J]. Electric Power Survey & Design, 2013, 1(6): 39-44.
- [2] BROGREN C, KARLSSON H T. The impact of the electrical potential gradient on limestone dissolution under wet flue gas desulfurization conditions[J]. Chemical Engineering Science, 1997, 52

- (18):3101-3106.
- [3] US EPA. Pilot plant tests of chloride ion effects on wet FGD system performance[R]. US:USEPA,1984.
- [4] CÓRDOBA P. Status of flue gas desulfurization (FGD) systems from coal-fired power plants: Overview of the physic-chemical control processes of wet limestone FGDs[J]. Fuel,2015,144:274-286.
- [5] KIIL S, NYGAARD H, JOHNSON J E. Simulation studies of the influence of HCl absorption on the performance of a wet flue gas desulfurization pilot plant [J]. Chemical Engineering Science, 2002,57(3):347-354.
- [6] HUANG Y H, PEDDI P K, TANG C, et al. Hybrid zero-valent iron process for removing heavy metals and nitrate from flue-gas-desulfurization wastewater [J]. Separation & Purification Technology, 2013,118:690-698.
- [7] HUANG Y H, PEDDI P K, ZENG H, et al. Pilot-scale demonstration of the hybrid zero-valent iron process for treating flue-gas-desulfurization wastewater: part I [J]. Water Science & Technology, 2013,67(2):239-246.
- [8] CUI L, LI G, LI Y, et al. Electrolysis-electrodialysis process for removing chloride ion in wet flue gas desulfurization wastewater (DW): Influencing factors and energy consumption analysis [J]. Chemical Engineering Research & Design, 2017,123:240-247.
- [9] NA Y, FEI L, ZHONG Z, et al. Integrated membrane process for the treatment of desulfurization wastewater [J]. Ind. Eng. Chem. Res., 2010,49(7):3337-3341.
- [10] 中华人民共和国环境保护部. 国务院关于印发水污染防治行动计划的通知 [EB/OL]. (2015-04-16). http://zfs.mep.gov.cn/fg/gwyw/201504/t20150416_299146.htm.
- [11] HOQUE S, ALEXANDER T, GURIAN P L. Innovative technologies increase evaporation pond efficiency [J]. Ida. Journal of Desalination & Water Reuse, 2010,2(1):72-78.
- [12] 任丹丹, 冯罗澍, 陈颖. 大型燃煤电厂脱硫废水烟气利用技术研究 [J]. 浙江电力, 2018,37(3):82-85.
REN Dandan, FENG Luoshu, CHEN Ying. Large coal-fired power plant flue gas desulfurization wastewater utilization technology research [J]. Zhejiang Electric Power, 2018,37(3):82-85.
- [13] 马双忱, 温佳琪, 万忠诚, 等. 中国燃煤电厂脱硫废水处理技术研究进展及标准修订建议 [J]. 洁净煤技术, 2017,23(4):18-28.
MA Shuangchen, WEN Jiaqi, WAN Zhongcheng, et al. Treatment progress and standard modification suggestion for FGD wastewater from coal-fire power plants in China [J]. Clean Coal Technology, 2017,23(4):18-28.
- [14] HONJO S, UKAI N, KAGAWA S, et al. MHI wet-FGD waste water treatment technologies [C]//Air and Waste Management Association-8th Power Plant Air Pollutant Control, Mega Symposium 2010. Maryland, USA: [s. n.], 2010:1395-1429.
- [15] MOSTI C, CENCI V. ZLD systems applied to ENEL coal-fired power plants [J]. Vgb. Powertech, 2012,92:69-73.
- [16] MA S, CHAI J, CHEN G, et al. Research on desulfurization wastewater evaporation: Present and future perspectives [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016,58:1143-1151.
- [17] 中华人民共和国环境保护部. 火电厂污染防治最佳可行性技术指南 [EB/OL]. (2017-06-01). http://kjs.mep.gov.cn/hjbhbz/bzwb/wrfzjzsc/201706/t20170609_415755.shtml.
- [18] 冉景煜, 张志荣. 不同物性液滴在低温烟气中的蒸发特性数值研究 [J]. 中国电机工程学报, 2010,30(26):62-68.
RAN Jingyu, ZHANG Zhirong. Numerical study on evaporation characteristics of different substance droplet in low temperature flue gas [J]. Proceeding of the CSEE, 2010,30(26):62-68.
- [19] 张子敬, 汪建文, 高艺, 等. 燃煤电厂脱硫废水烟气蒸发特性流场模拟 [J]. 煤炭学报, 2015,40(3):678-683.
ZHANG Zijing, WANG Jianwen, GAO Yi, et al. Flow field simulation of smoke and gas evaporation characteristics of desulfurization wastewater in coal-fired power plant [J]. Journal of China Coal Society, 2015,40(3):678-683.
- [20] 袁伟中, 刘春红, 童小忠, 等. 燃煤锅炉采用烟气旁路干燥技术实现脱硫废水零排放 [J]. 电力科技与环保, 2017,33(3):18-21.
YUAN weizhong, LIU Chunhong, TONG Xiaozhong, et al. Coal-fired boiler flue gas bypass drying technology to achieve zero liquid discharge of desulfurization water [J]. Electric Power Environmental Protection, 2017,33(3):18-21.
- [21] 贾绍广, 黄凯, 吴从越, 等. 蒸发塔处理脱硫废水的热量衡算 [J]. 热力发电, 2017,46(2):61-66.
JIA Shaoguang, HUANG Kai, WU Congyue, et al. Heat balance of evaporation tower for FGD wastewater treatment [J]. Thermal Power Generation, 2017,46(2):61-66.
- [22] 崔琳, 沈鲁光, 杨敦峰, 等. 中温烟气蒸发脱硫废水干燥过程及产物特性分析 [J]. 煤炭学报, 2017,42(7):1877-1883.
CUI Lin, SHEN Luguang, YANG Dunfeng, et al. Drying properties and product characteristics of desulfurization wastewater evaporation by medium-temperature flue gas [J]. Journal of China Coal Society, 2017,42(7):1877-1883.
- [23] 马双忱, 柴晋, 贾绍广, 等. 脱硫废水水质调节对金属腐蚀及高温氯挥发的影响 [J]. 动力工程学报, 2018,38(3):231-236.
MA Shuangchen, CHAI Jin, JIA Shaoguang, et al. Effects of FGD waste water conditioning on metal corrosion and high-temperature chlorine valorization [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2018,38(3):231-236.
- [24] MA Shuangchen, CHAI Jin, WU Kai, et al. Experimental research on bypass evaporation tower technology for zero liquid discharge of desulfurization wastewater [J]. Environmental Technology, 2018,10:1-32.
- [25] 洪永强, 陈桂芳, 马春元, 等. 湿法脱硫废水液柱蒸发特性 [J]. 化工进展, 2017,36(7):2698-2706.
HONG Yongqiang, CHEN Guifang, MA Chunyuan, et al. The evaporation characteristics of wet desulfurization wastewater in liquid column form [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017,36(7):2698-2706.