

# 脱硫废水浓缩滤液烟气旁路蒸发喷枪设计 及系统运行优化

高红龙<sup>1</sup>, 杨文生<sup>1</sup>, 王飞<sup>2</sup>, 刘慧军<sup>1</sup>, 高磊<sup>1</sup>, 刘俊杰<sup>1</sup>

(1.山西华仁通电力科技有限公司, 山西太原 030006; 2.山西大学 国家环境保护煤炭废弃物资源化高效利用技术重点实验室 山西太原 030006)

**摘要:** 烟气旁路蒸发系统在脱硫废水零排放中的应用越来越广泛, 但脱硫废水浓缩滤液含盐量高、腐蚀性强、硬度大, 旁路蒸发处理过程易堵塞喷枪喷嘴。试验确定了喷枪尺寸参数, 解决了滤液堵塞喷枪喷嘴的问题; 根据喷枪喷射特性设计蒸发器尺寸并完成旁路蒸发系统。现场实际运行发现, 高温烟气量约为理论计算的 1.06~1.20 倍, 可通过蒸发器测温系统判断滤液雾化蒸发效果和蒸发器堵塞情况, 当出现积灰时, 启动振打除灰和吹灰系统。投入蒸发器系统后, 除尘器入口烟温平均升高 3.6 °C, 对除尘器除尘效率无影响。

**关键词:** 脱硫废水浓缩滤液; 旁路蒸发系统; 双流体喷枪; 蒸发器

中图分类号: TK229

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2023)S2-0431-05

## Design of flue gas bypass evaporation spray gun and system operation optimization for treating desulfurization concentrated wastewater

GAO Honglong<sup>1</sup>, YANG Wensheng<sup>1</sup>, WANG Fei<sup>2</sup>, LIU Huijun<sup>1</sup>, GAO Lei<sup>1</sup>, LIU Junjie<sup>1</sup>

(1. Shanxi Huarentong Electric Power Technology Co., Ltd., Taiyuan 030006, China; 2. Shanxi University, State Environmental Protection Key Laboratory of Efficient Utilization Technology of Coal Waste Resources, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** The flue gas bypass evaporation system is more and more widely used in the zero discharge of desulfurization wastewater. However, due to the high salt content, strong corrosivity and high hardness of the concentrated filtrate of desulfurization wastewater, the nozzle of the spray gun is easy to be blocked during the bypass evaporation process. The size parameters of the spray gun were determined through experiments, which solved the problem that the filtrate blocked the nozzle of the spray gun. According to the spray characteristics of the spray gun, the evaporator size was determined and the bypass evaporation system was designed. The actual operation on site found that the amount of high-temperature flue gas is about 1.06-1.20 times of the theoretical calculation. The temperature measurement system on the evaporator can be used to judge the effect of filtrate atomization and evaporation and the blockage of the evaporator. When ash deposition occurs, start the rapping ash removal and soot blowing systems. After the evaporator system is put into operation, the flue gas temperature at the inlet of the precipitator increases by 3.6 °C on average, which has no impact on the dedusting efficiency of the precipitator.

**Key words:** concentrated desulfurization wastewater; bypass evaporation system; dual fluid spray gun; evaporator

## 0 引言

我国 85% 左右燃煤电厂采用石灰石-石膏湿法脱硫技术<sup>[1]</sup>, 该技术脱硫效率高, 运行稳定, 技术成熟, 但会产生大量脱硫废水。以山西某电厂 2×330 MW 等级火电机组为例, 全年实际运行 6 000 h,

外排脱硫高盐废水约 6 万 t。由于其汇聚了循环水排污水、反渗透浓水等废水, 导致其水质波动大, 悬浮物高, 腐蚀性强<sup>[2]</sup>, 处理难度极大, 直接排放会造成极大的水资源浪费和环境污染。目前, 国内燃煤电厂脱硫废水主要采用“三联箱工艺”, 脱硫废水经中和箱调至碱性、沉降箱加混凝剂和有机硫降低悬

收稿日期: 2022-02-09; 责任编辑: 常明然 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.22020901

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2020YFB0606203)

作者简介: 高红龙(1990—), 男, 山西临汾人, 中级工程师, 硕士。E-mail: 93047331@qq.com

通讯作者: 杨文生(1977—), 男, 山西阳泉人, 高级工程师。E-mail: yangwensheng7777@163.com

引用格式: 高红龙, 杨文生, 王飞, 等. 脱硫废水浓缩滤液烟气旁路蒸发喷枪设计及系统运行优化[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(S2): 431-435.

GAO Honglong, YANG Wensheng, WANG Fei, et al. Design of flue gas bypass evaporation spray gun and system operation optimization for treating desulfurization concentrated wastewater[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(S2): 431-435.

浮物和重金属、絮凝箱出口加聚丙烯酰胺增强混凝效果、澄清浓缩器完成固液分离后,上清液回用,浓液用压滤机压滤,但该工艺无法去除氯离子等可溶性盐,直接排放会破坏水体及土壤环境<sup>[3]</sup>。低温三效蒸发浓缩工艺是近年来燃煤电厂脱硫废水零排放改造选用的主要工艺之一<sup>[4]</sup>,该工艺以低温烟气或减温减压后的辅助蒸汽为热源,将脱硫废水在负压条件下蒸发浓缩,浓缩废液经压滤机压滤后实现固液分离,泥饼由拉泥车运走,滤液收集至滤液缓冲水箱进行后处理。

目前处理浓缩滤液方式主要有 3 种:滤液回流至三效系统,滤液用作灰库或渣仓抑尘及高温旁路烟道蒸发。① 滤液直接回流至三效闪蒸系统后,氯离子、镁离子等在系统中不断富集,导致系统内废水沸点升高,蒸发效率降低,能耗增加,影响三效设备使用寿命<sup>[5]</sup>。② 电厂粉煤灰及渣最终处置方式为用于建筑材料的原料,喷入滤液后会影响到灰和渣的资源化利用,且灰库和渣仓抑尘用水量不稳定,不能长期消纳滤液<sup>[6]</sup>。③ 高温旁路蒸发工艺是高效处理浓缩滤液的有效方式之一<sup>[7]</sup>,滤液经喷嘴雾化后喷入蒸发器内,与从 SCR 出口烟道引入的高温烟气充分接触混合,液滴中水分快速蒸发,废水中盐分结晶与烟气中灰分结合,形成的颗粒物随烟气进入除尘器内被除尘器捕捉。王可辉等<sup>[8]</sup>通过 170 ℃ 烟气干化时,雾化干燥产品含水率低,蒸发快,粉尘颗粒分散,不易黏结,实现了浓缩废液的安全处置。

高温旁路蒸发工艺可安全处理浓缩滤液,但在实际运行中因滤液含盐量高、硬度大,喷枪喷射雾化过程易发生喷嘴堵塞<sup>[9]</sup>;高温烟气流量和温度与喷射滤液流量不匹配,导致滤液不能完全蒸发、腐蚀蒸发器<sup>[10]</sup>;同时可能会对下游的电除尘系统产生不良影响。因此,笔者拟通过浓缩滤液喷射试验、蒸发器设计及系统实际运行优化,为脱硫废水浓缩滤液烟气旁路蒸发提供理论及技术参考。

## 1 雾化喷枪及蒸发器设计

雾化装置是高温旁路蒸发系统的主要设备,决定了喷射工艺系统是否可以高效稳定运行<sup>[11]</sup>。采用独孔式双流体喷枪,利用压缩空气与滤液之间的摩擦力和剪切力,将滤液瞬间雾化成 50~100 μm 液滴喷入蒸发器中。双流体喷枪雾化特性和参数,如雾化粒径、喷雾距离、最大雾化范围等(图 1)是确定蒸发器规格尺寸的重要依据,需根据滤液高含盐量、易堵塞的特性经试验确定。

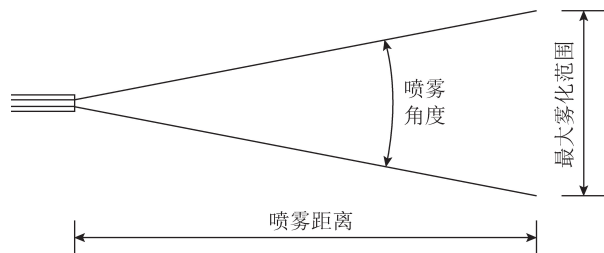


图 1 喷枪喷射参数

### 1.1 喷嘴孔径设计

滤液含盐量高,雾化过程中喷嘴孔径过小滤液中盐易结晶堵塞喷嘴,过大又会影响雾化效果<sup>[12]</sup>。因此在冷态试验条件下,滤液压力  $4 \times 10^5$  Pa,压缩空气压力  $6 \times 10^5$  Pa,使用不同喷嘴孔径进行试验,试验数据见表 1。

表 1 喷嘴孔径试验数据

液体压力/ $10^5$ Pa	喷嘴孔径/mm	堵塞时间/s
4	2.0	10
4	2.5	60
4	3.0	180
4	3.5	250
4	4.0	>600
4	4.5	>600
4	5.0	>600

冷态试验条件下,喷嘴孔径为 2 mm 时,喷射 10 s 后喷嘴堵塞,这可能是由于滤液含盐量大,雾化过程水分蒸发导致局部环境温度下降,温度低盐溶解度降低,导致盐颗粒析出发生堵塞<sup>[13]</sup>。同时,由于溶液成分主要是氯化镁、硫酸镁、氯化钙等,析出过程需结合大量水,导致剩余盐溶液饱和度瞬间增大,大量盐瞬间析出堵塞喷枪<sup>[14]</sup>。随孔径增大,喷射时间延长,喷嘴孔径为 4 mm 时可实现喷枪连续喷射不堵塞。为模拟实际热态工况,将滤液加热至 50 ℃,滤液管路加装伴热带,喷枪前端用电热丝加热至 150 ℃,重复上述试验,结果表明:喷嘴孔径为 2.0、2.5、3.0、3.5 mm 时,持续喷射时间增长,依然会出现堵塞现象。为确保喷嘴连续稳定运行不堵塞,同时实现滤液高效雾化,喷嘴孔径建议为 4.5 mm。

### 1.2 喷雾距离和最大雾化范围研究

喷雾距离和雾化液滴蒸发时间决定蒸发器直管段长度,最大雾化范围决定蒸发器直径。喷枪喷雾距离主要与压缩空气压力有关,压缩空气压力越大,与滤液之间的摩擦力和剪切力越强,雾化粒径越好,喷雾距离变小,试验数据见表 2。

试验表明:压缩空气压力  $2 \times 10^5 \sim 4.5 \times 10^5$  Pa 时,喷

表2 喷雾距离试验数据

压缩空气压力/ $10^5$ Pa	喷雾距离/m	雾化效果
2.0	9.0	极差
3.0	8.0	差
3.5	7.5	较差
4.0	6.5	稍好
4.5	5.5	较好
5.0	5.3	好
6.0	5.0	好

雾距高大,雾化效果不理想,压缩空气压力 $5 \times 10^5 \sim 6 \times 10^5$  Pa时,喷雾距离5.0~5.5 m,雾化效果好,为确保取得持续稳定的雾化效果,压缩空气压力取 $6 \times 10^5$  Pa。杨彬<sup>[15]</sup>发现脱硫废水液滴雾化粒径 $< 150 \mu\text{m}$ ,593 K高温条件下,液滴蒸发时间最大为0.67 s。叶旭润<sup>[16]</sup>研究发现,蒸发器内烟气流速在3~4 m/s能保证液滴在未接触蒸发器侧壁前完全蒸发,且不会出现液滴黏壁现象。综合喷枪喷雾距离、蒸发器内烟气推荐流速、液滴蒸发时间并预留一定余量,蒸发器直管段长度定为12 m。蒸发器直径根据最大雾化范围确定,试验数据见表3,从技术经济方面考虑,蒸发器直径不宜太大,选择喷雾角度为 $15^\circ$ ,最大雾化范围1.8 m,故蒸发器直径确定为2 m。

根据脱硫废水滤液含盐量高,雾化过程易堵塞的特点,通过试验确定喷枪参数:独孔式,液孔孔径

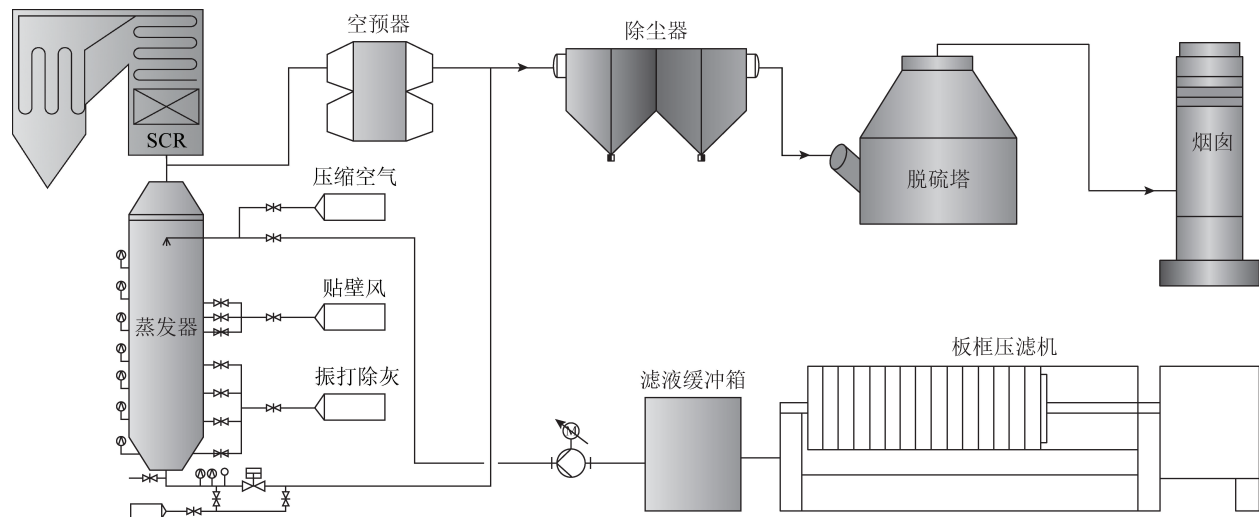


图2 滤液高温旁路蒸发工艺示意

喷枪雾化效果、蒸发器滤液贴壁和蒸发器出口烟道积灰堵塞是系统设计中的关键问题<sup>[17]</sup>,喷枪雾化效果主要由喷枪特性决定,为确保系统长期高效稳定运行,针对可能出现的蒸发器滤液贴壁问题,设置3层沿蒸发器壁面切线方向进入的贴壁风,贴壁风引自热二次风,在蒸发器内壁形成一层保护风,贴壁风风速为8~10 m/s,风膜厚度2~4 mm,不会引

表3 最大雾化范围与喷雾角度关系

喷雾角度/ $^\circ$	最大雾化范围/m
45	4.5
30	3.4
20	2.2
15	1.8

4.5 mm,流量1 000 L/h,压力 $6 \times 10^5$  Pa,雾化角度 $15^\circ$ 。

## 2 滤液高温旁路蒸发器及系统设计

根据喷枪结构参数,选定蒸发器主体长度为12 m,直径为2 m,材质为2205耐腐蚀材料,喷射滤液量1 000 L/h,喷射粒径最大为 $150 \mu\text{m}$ ,最小 $80 \mu\text{m}$ ,平均粒径 $100 \mu\text{m}$ 。

蒸发器安装在SCR出口烟道,系统主要包括:蒸发器主体及进出口烟道、滤液输送系统、杂用压缩空气系统、仪用压缩空气系统、贴壁风系统、振打除灰系统、蒸发器出口管道吹灰系统、测温系统等(图2)。蒸发器抽取约 $8\ 908 \text{ m}^3/\text{h}$ 烟气,滤液通过双流体喷枪雾化为 $100 \mu\text{m}$ 的液滴后喷入蒸发器内,在蒸发器内,高温烟气与雾化液滴充分接触,废水中水分快速蒸发,废水中盐分结晶并与烟气中灰分结合,形成的颗粒物随烟气进入除尘器内被捕集,蒸发器出口烟气温度控制在 $170 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上。

起流场紊乱。贴壁风防止滤液喷至蒸发器内壁,当运行不当出现滤液、灰分贴壁时,启动振打除灰装置进行除灰。

蒸发器出口烟道布置2套测温点,一套设置在烟道最高点,测定蒸发器出口烟气温度,另一套设置在烟道最低点,最低点温度测点伸入烟道内长度为15 mm,当2套温度测点温差 $> 15 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,说明蒸发器

烟道底部出现积灰,此时启动设置在烟道内的压缩空气吹灰系统。

### 3 滤液高温旁路蒸发系统实际运行

#### 3.1 高浓滤液处理量与引高温烟气量的匹配关系

由传热传质理论计算,蒸发器入口温度为315℃时,蒸发1.0 t滤液需高温烟气约8 908 m<sup>3</sup>。现场运行发现,滤液处理量0.83~1.17 t/h时,实际引高温烟气量约为理论计算烟气量的1.06~1.20倍,如图3所示。一方面可能由于蒸发器内部分高温烟气未与雾化后滤液充分接触,发生短流现象,需通过流场模拟对蒸发器结构进行优化。另一方面蒸发器及进口烟道保温层厚度不足,热量损失大也会导致实际烟气量大于理论计算值。

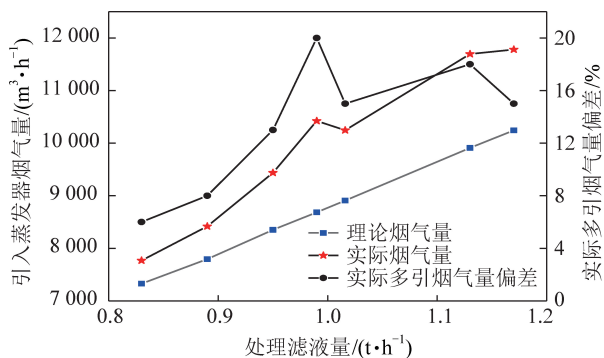


图3 滤液处理量与高温烟气量的关系

#### 3.2 蒸发器内温度梯度变化

蒸发器入口烟道设置1套温度测点,测定蒸发器入口烟气温度。蒸发器罐体上布置7套温度测点,分别在距离蒸发器入口5.0、6.0、7.0、8.0、9.8、11.8、13.5 m处,用于监测蒸发器内温度梯度变化,通过温度变化判断蒸发器内蒸发及贴壁情况,当某处温度测点示数出现异常降低情况,说明该区域可能出现贴壁现象,此时启动振打除灰系统,若振打除灰后温度测点仍异常,需检查测点是否正常。图4表明,蒸发器入口烟气温度315℃,在蒸发器入口5 m处温度降至约190℃,6~15 m温度基本维持在190℃左右,说明滤液喷入蒸发器后雾化效果好,在距离蒸发器入口5 m处滤液基本蒸发干燥完成,未出现废水贴壁现象。

#### 3.3 蒸发器底部吹灰系统

蒸发器出口烟道布置2套测温点,一套设置在烟道最高点,测定蒸发器出口烟气温度,另一套设置在烟道最低点,最低点温度测点伸入烟道内长度为15 mm,当2支温度测点温差>15℃时,说明蒸发器烟道底部出现积灰,出口烟道底部设置杂用压缩空气吹灰系统,出现积灰后启动压缩空气吹灰系统,确

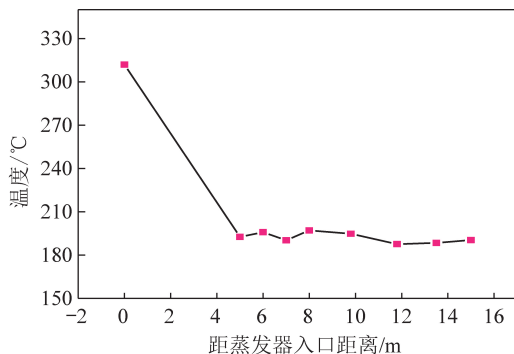


图4 蒸发器内温度梯度变化

保系统正常稳定运行。由图5可知,蒸发器出口烟道最低点温度测点温度在8 h内由189℃持续降低至172℃,2支温度测点温差>15℃,说明底部烟道由于运行不当出现积灰,此时启动压缩空气吹灰系统,由于压缩空气吹灰采用常温压缩空气,吹入蒸发器与烟气、灰分混合后温度降低(9 h时温度降至146℃)。实际运行表明,蒸发器底部吹灰系统设置十分必要,因为运行不当等原因出现积灰时,可通过吹灰系统及时处理,保证系统长期高效稳定运行。

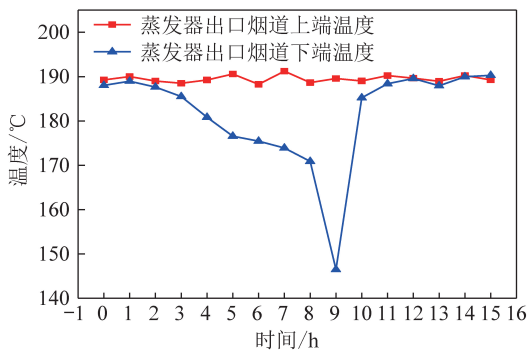


图5 蒸发器出口烟道上下端温度测点

#### 3.4 蒸发系统对除尘器影响

蒸发系统主要影响除尘器入口烟气温度和除尘效率<sup>[18]</sup>,以山西某电厂为例,除尘器入口烟气极限温度为180℃。由图6可知,蒸发器系统运行后,除尘器入口烟气温度升高3.2~3.8℃,平均为3.6℃。检测期间,除尘器入口烟气温度最高为143.8℃,远低于除尘器入口烟气极限温度值,未影响除尘器运行。由图7可知,投入系统前后,除尘器出口粉尘平均浓度分别为2.05和2.03 mg/m<sup>3</sup>,未发生明显波动,均低于5 mg/m<sup>3</sup>的排放要求,说明旁路系统不影响除尘器效率。

#### 3.5 蒸发器系统对粉煤灰影响

在蒸发器内,高温烟气与雾化液滴充分接触混合,废水中水分快速蒸发,废水中盐分结晶并与烟气中灰分结合,形成颗粒物随烟气进入除尘器内被除尘器捕捉<sup>[19]</sup>。以山西某电厂为例,2×330 MW 机组



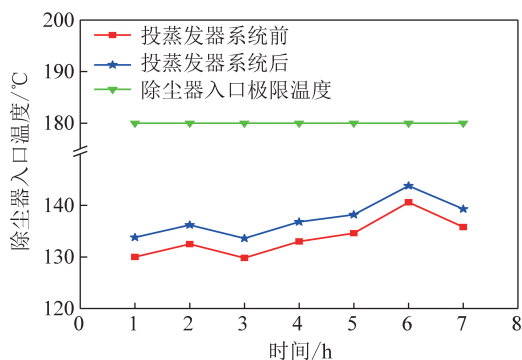


图6 投蒸发器系统前后除尘器入口烟温变化

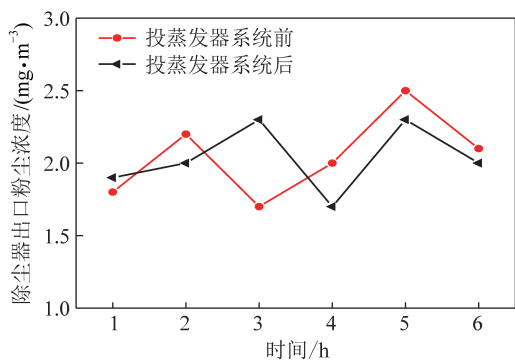


图7 投蒸发器系统前后除尘器出口含尘量变化

废水量 240 t/d, 废水密度  $1\ 100\ \text{kg}/\text{m}^3$ , 原液氯离子浓度为  $15\ 600\ \text{mg}/\text{L}$ , 2 台炉产生氯离子  $2.84\ \text{t}/\text{d}$ , 其中 15% 氯离子由压滤机泥饼携带去除, 进入粉煤灰氯离子  $2.41\ \text{t}/\text{d}$ , 2 台炉产生粉煤灰  $1\ 550\ \text{t}/\text{d}$ , 粉煤灰以 20% 的比例作为原料掺做水泥, 则水泥中氯离子质量分数为 0.031%, 满足 GB 175—2007《通用硅酸盐水泥》要求的水泥中氯离子质量分数小于 0.06% 的要求<sup>[20]</sup>, 不会影响粉煤灰资源化利用。

## 4 结 论

1) 针对脱硫废水浓缩滤液、硬度大、喷射过程易堵塞喷嘴的特点, 通过试验确定喷枪参数: 独孔式、喷嘴孔径 4.5 mm、喷雾角度  $15^\circ$ 、喷雾距离 5 m, 流量  $1.0\ \text{t}/\text{h}$ 。

2) 根据喷枪喷射特性确定蒸发器直管段长度为 12 m, 直径为 2 m, 蒸发器罐体设置贴壁风系统和振打除灰系统, 蒸发器出口烟道设置吹灰系统, 防止蒸发器系统堵塞。

3) 现场运行发现, 高温烟气量约为理论计算的 1.06~1.20 倍。可通过蒸发器上测温系统判断滤液雾化蒸发效果和蒸发器堵塞情况, 当出现积灰时, 启动振打除灰和吹灰系统。投入蒸发器系统后, 除尘器入口烟温平均升高  $3.6\ ^\circ\text{C}$ , 对除尘器除尘效率无影响, 蒸发器系统投运不会影响粉煤

灰资源化利用。

## 参考文献:

- [1] 张卫东. 石灰石-石膏湿法脱硫技术的设计及优化研究[D]. 济南: 山东大学, 2004.
- [2] 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.
- [3] 王晋权, 赵周明, 张志华. 低温余热闪蒸脱硫废水处理系统设计及应用[J]. 中国电力, 2020, 53(8):151-157.
- [4] MA S, JIN C, CHEN G, et al. Research on desulfurization wastewater evaporation: Present and future perspectives[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 58(5):1143-1151.
- [5] 高劲豪, 高原. 烟气蒸发结晶技术在脱硫废水零排中的应用[J]. 硫酸工业, 2017(5):16-18.
- [6] 王思恭. "电厂粉煤灰渣排放与综合利用技术通则"介绍[J]. 粉煤灰综合利用, 1992(3):35-38.
- [7] 晋银佳, 张爱军, 郑长乐. 某 1 000 MW 燃煤机组脱硫废水烟道雾化蒸发系统设计[J]. 综合智慧能源, 2019, 41(10):16-19.
- [8] 王可辉, 蒋芬, 徐志清, 等. 火电厂脱硫废水高温雾化蒸发实验研究[J]. 环境工程, 2015(S1):60-62.
- [9] 王晓培, 耿宣, 罗天翔, 等. 330 MW 机组脱硫废水旁路烟道喷雾干燥技术数值模拟与应用示范[J]. 热力发电, 2019, 48(6):96-101.
- [10] 彭歌亮, 谈智玲, 左蓓萌, 等. 燃煤电厂脱硫废水在烟道中的蒸发及流动特性数值模拟[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2018, 41(11):59-65.
- [11] 余晓利. 燃煤电厂脱硫废水旁路塔雾化蒸发技术研究[D]. 上海: 上海电力大学, 2019.
- [12] 魏俊岭, 王剑栋. 基于旁路烟道蒸发的脱硫废水零排放系统设计与应用[J]. 电力科技与环保, 2022, 38(2):150-156.
- [13] 连鹏, 王凯亮. 脱硫废水烟气蒸发处理技术的分析及应用[J]. 华电技术, 2018, 40(10):4.
- [14] 张娟, 曹兆军, 史海红, 等. 燃煤电厂脱硫废水分型与浓缩过程的盐类析出规律[J]. 动力工程学报, 2022, 42(1):67-74.
- [15] 杨彬. 火电厂脱硫废水在高温旋风蒸发器中的蒸发流动特性数值研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [16] 叶旭润. 燃煤电厂脱硫废水“零排放”工艺技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [17] 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.
- [18] 陈武. 基于旁路烟气的脱硫废水喷雾干燥零排放处理实验研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [19] LIANG Z, CHENG X, ZHANG L, et al. Study of main solutes on evaporation and crystallization processes of the desulfurization wastewater droplet[J]. Energy and Fuels, 2018, 32(5):6119-6129.
- [20] 李礼. 建筑材料绿色性的 6E 综合评价体系研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.