



某电厂脱硫废水零排放处理系统运行性能分析

李亚娟, 刘 勇, 刘贵栋, 余耀宏, 杨 阳, 杨 永

(西安西热水务环保有限公司, 陕西西安 710018)

[摘要] 由于燃煤电厂脱硫废水成分复杂, 具有含盐量高、腐蚀性强、易结垢等特点, 自从“水污染防治行动计划”颁布以后, 脱硫废水零排放已逐渐成为电厂污染物深度治理的必然趋势。燃煤电厂脱硫废水零排放处理采用旁路烟道蒸发处理工艺, 其具有占地面积小、投资和运行成本低、运维方便、不产生新的固废等优点, 已逐渐成为脱硫废水零排放的主流技术。某 2×350 MW 燃煤电厂采用旁路烟道喷雾干燥蒸发技术对脱硫废水进行零排放处理, 每台机组配置 2 台 2 m³/h 双向流体雾化蒸发塔。对该工艺系统进行性能试验研究, 结果表明蒸发塔喷水量满足设计要求, 入口烟气温度为 333~347 ℃, 出口烟气温度为 152~167 ℃, 蒸发 1 m³ 废水抽取高温烟气平均约 10 275 Nm³/h。单台机组喷水量为 3.1~3.9 m³/h 时, 蒸发塔入口烟气体积占机组总烟气体积的 3.2%~3.7%, 锅炉热效率下降约为 0.29%~0.33%, 处理吨水发电煤耗增加值为 0.27~0.31 g/(kW·h), 运行成本为 67.56~71.36 元/(m³·h), 各项性能指标满足设计要求, 实现了脱硫废水高效低成本零排放, 系统运行效果良好。

[关键词] 燃煤电厂; 脱硫废水; 零排放; 旁路烟道; 喷雾干燥

[中图分类号] X773 **[文献标识码]** B **[文章编号]** 1005-829X(2022)01-0175-04

Analysis of zero discharge system performance for desulfurization wastewater in a power plant

LI Yajuan, LIU Yong, LIU Guidong, YU Yaohong, YANG Yang, YANG Yong

(Xi'an TPRI Water Treatment & Environmental Protection Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

Abstract: Desulfurization wastewater from coal power plants is characterized by complex compositions, high salinity, strong corrosiveness and easy to cause scaling. Since the “Action Plan for Prevention and Control of Water Pollution” was promulgated, zero discharge of desulfurization wastewater has become an inevitable trend of deep treatment of pollutants from power plants. The bypass flue evaporation treatment process for desulfurization wastewater from coal-fired power plants is of small area, low cost in investment and operation, convenient operation, no secondary solid-waste and so on. Bypass flue gas evaporation has gradually become the mainstream technology of zero discharge of desulfurization wastewater. The flue bypass rotating spray drying method on the desulfurization wastewater zero discharge treatment was involved in a coal-fired power plant of 2×350 MW. Each unit was equipped with two 2.0 m³/h two-phase flow evaporation towers. The system running performance was tested, and the results showed that the spray water volume of evaporation tower met the design requirements. The inlet flue gas temperature was between 333–347 ℃, and the outlet flue gas temperature was between 152–167 ℃. Evaporating 1 m³ wastewater needed average 10 275 Nm³/h high temperature flue gas. When the spray water volume of a single unit was between 3.1–3.9 m³/h, the inlet flue gas volume of evaporation tower accounted for 3.2%–3.7% of the total flue gas volume of the unit. The boiler thermal efficiency decreased between 0.29%–0.33%, and the increased value of coal consumption for power generation by processing 1 m³ wastewater was between 0.27–0.31 g/(kW·h). The operating cost was between 67.56–71.36 yuan/(m³·h). The performance indexes of the system met the design requirements. The bypass flue gas drying technology had high efficiency, low cost and good operation effect for realizing zero discharge of the desulfurization wastewater.

Key words: coal-fired power plant; desulfurization wastewater; zero discharge; bypass flue; spray drying

电力行业属于我国高耗水行业之一^[1], 其用水量约占全国工业用水总量的 40%^[2]。近年来随着废

水梯级使用、循环水高浓缩倍率运行控制技术、膜法水处理技术等的应用,火电厂节水减排工作取得了显著成效,2019年全国火电厂每千瓦时发电量耗水量降至1.21 kg,每千瓦时发电量废水排放量降至0.054 kg^[3]。同时部分环保敏感地区要求火电厂实现全厂废水零排放,其涉及的脱硫废水浓缩减量及固化处理技术难度最大,投资和运行费用最高,是废水零排放电厂面临的重大难题^[4]。

目前,河源、三水恒益、华能长兴、国电汉川、华能黄台等电厂均已实施了废水零排放工程。其中,河源电厂为国内首个实现废水零排放的电厂,脱硫废水零排放处理采用“两级软化+强制循环蒸发结晶”工艺,结晶盐达到二级工业盐标准。三水恒益电厂采用“两级卧式MVR+两级卧式强制循环蒸发+结晶干燥”工艺,由于未设置预处理单元,其产品为混合盐,送专业固体废弃物处理中心处置,而且蒸发器结垢严重、清洗频繁。华能长兴电厂采用“两级软化+离子交换+反渗透+正渗透+蒸发结晶”工艺实现了脱硫废水零排放,是国内首个将正渗透用于废水处理的电厂^[5-6]。国电汉川电厂脱硫废水处理采用“化学软化+管式微滤+纳滤+碟管式反渗透+蒸发结晶”工艺,采用纳滤分盐及蒸发结晶获得了高品质的结晶盐^[7]。华能黄台电厂脱硫废水处理采用“两级软化+超滤+海水反渗透+旁路烟道干燥”工艺,蒸发器热源取自空预器前的330℃热烟气,废水析出的盐分和飞灰混合后以粉煤灰的形式实现综合利用^[8-10]。旁路烟道干燥技术投资低、运维简单,目前已在浙能长兴电厂、华能铜川电厂、临汾热电等多家电厂得到了应用。

某电厂设有2台350 MW国产燃煤机组,排污许可证要求电厂生产废水和生活污水须经处理后全部回用,不得排放。电厂设置了脱硫废水零排放处理系统,工程于2020年5月投入运行。笔者主要对脱硫废水零排放处理工程投运后的运行性能进行分析。

1 系统概况

1.1 水量及水质

夏季满负荷工况条件下,2台机组脱硫废水水量合计为7 m³/h,考虑到系统余量,零排放工程处理能力按2×4 m³/h设计。脱硫废水三联箱处理出水水

质见表1。三联箱出水为高硬度、高盐分、强腐蚀性废水,但镉、铅、砷等重金属含量以及COD、氟化物、硫化物、悬浮物均满足《火电厂石灰石-石膏湿法脱硫废水水质控制指标》(DLT 997—2006)的相关要求。

表1 三联箱处理后的脱硫废水水质分析

Table 1 Effluent water quality of the three categories of desulfurization wastewater treatment

项目	数值	项目	数值
pH	8.61	氨氮	2.75 mg/L
电导率	24 300 μS/cm	总磷	0.24 mg/L
含盐量	34 080 mg/L	氟化物	12.50 mg/L
悬浮物	38 mg/L	硫化物	0.12 mg/L
浊度	8.34 NTU	总镉	0.69 mg/L
Cl ⁻	5 507 mg/L	总汞	0.049 mg/L
SO ₄ ²⁻	11 098 mg/L	总镍	0.23 mg/L
Ca ²⁺	32.10 mmol/L	总铅	0.017 mg/L
Mg ²⁺	90.57 mmol/L	总锌	0.23 mg/L
硬度	1 729 mg/L	总铬	0.096 mg/L
COD	84 mg/L	总砷	0.003 7 mg/L

1.2 工艺流程

脱硫废水零排放处理工艺流程见图1。

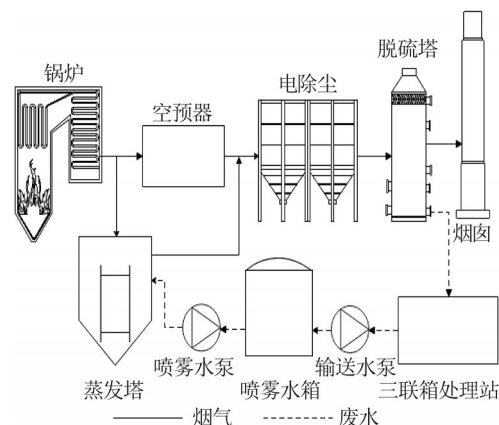


图1 脱硫废水零排放处理系统工艺流程

Fig. 1 Zero discharge treatment process of desulfurization wastewater

2台机组各配置2台2 m³/h的蒸发塔。经过三联箱处理达标的脱硫废水通过废水输送泵送至喷雾水箱,通过4台喷雾水泵输送至蒸发塔;蒸发塔采用双流体雾化技术,废水在压缩空气的作用下,在喷枪上形成D₃₂为50 μm的液滴,每台蒸发塔布置2支1 m³/h的喷枪。高温烟气从空预器入口引入蒸发塔,与喷枪雾化后的废水顺流而下,高温烟气与废水充分接触完成传热传质过程,将废水蒸发后排入除尘器入口烟道。脱硫废水中的盐析出后随飞灰被烟气带入除尘器内,在蒸发塔底部沉积的飞灰通过蒸

发器底部的仓泵送入除尘器灰斗。

2 试验部分

2.1 试验仪器

试验仪器:F601型便携式超声波液体流量计,德国弗莱克森;FLUKE 52-2型手持式数字温度计,配合K型铠装热电偶,中国福禄克;EMP3500型便携式多功能电子微压计,配合L型标准皮托管,瑞典斯威玛;SX-4型马弗炉,北京科伟;ME-204型分析天平,美国梅特勒。

2.2 分析方法

水量测试:采用便携式超声波流量计测试蒸发塔入口水量。

烟气温、压力、流量测试:在蒸发塔入口、出口烟道截面上采用网格法进行烟气温度和压力的测试,并依据《电除尘器性能测试方法》(GB/T 13931—2017)规定的方法,计算得到标准烟气量。

灰样分析:氯元素含量测试采用高温燃烧水解-电位滴定法^[11],氧化镁测试采用EDTA络合滴定法,氧化钙测试采用EDTA络合滴定法,三氧化硫采用硫酸钡质量法^[12]。

运行成本分析:主要包括电耗费用和煤耗增加费用。采用电能表测量废水处理系统用电功率,并根据厂用电价核算电耗成本。根据运行过程中燃煤量、喷水量、炉效降低值以及标煤价格核算煤耗增加量和煤耗增加费用。

3 分析结果

3.1 水量测试结果

2020年12月16日—18日对2[#]机组脱硫废水零排放处理系统进行了连续72 h的性能测试。其中,蒸发塔喷水量和机组负荷测试结果见图2。

设计要求在单台机组负荷为262 MW时蒸发塔喷水量达到3 m³/h,机组满负荷时喷水量为4 m³/h。根据图2的结果,2[#]号机组负荷率为75%~90%时,单侧蒸发塔喷水量为1.5~2.0 m³/h,总喷水量为3.1~3.9 m³/h,喷水量随着机组负荷的升高而增加,达到了设计要求,实现了脱硫废水零外排。

3.2 蒸发塔进出口烟气测试结果

2[#]号机组A、B侧蒸发塔抽气量监测结果见图3。

由图3可见,2[#]号机组两侧蒸发塔在喷水量均

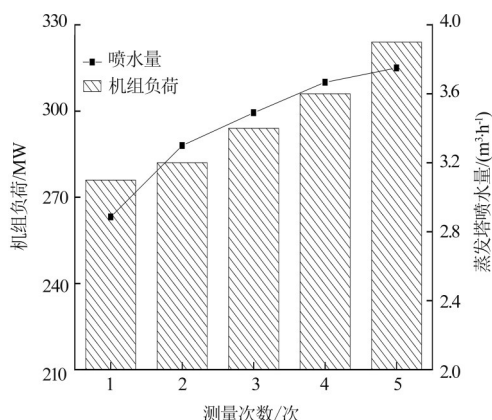


图2 2[#]机组旁路干燥蒸发塔喷水量测试结果

Fig. 2 Test results of water injection rate for bypass drying evaporation tower of unit 2[#]

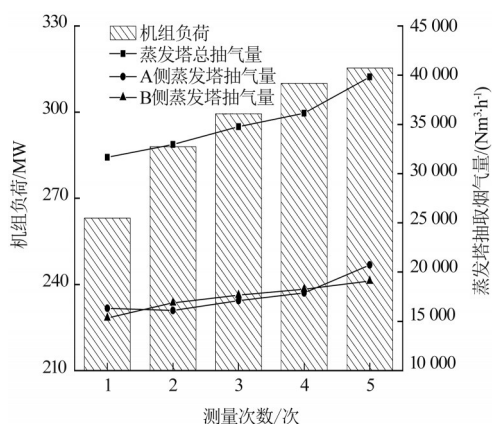


图3 2[#]机组旁路干燥蒸发塔抽气量测试结果

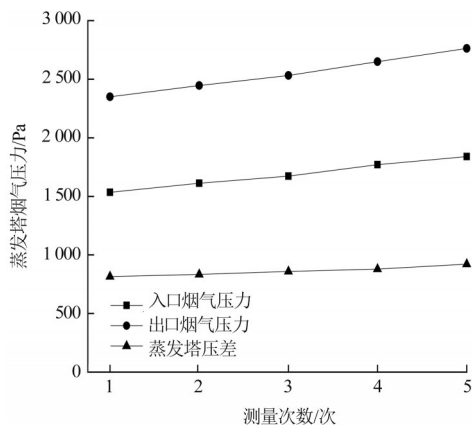
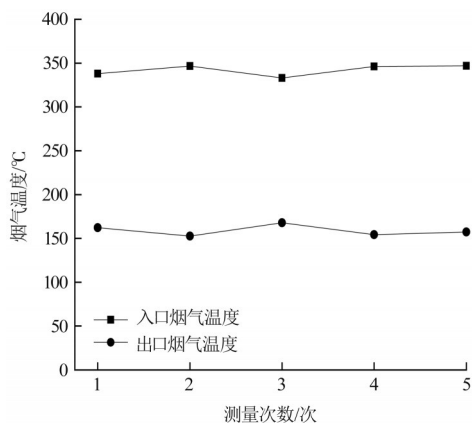
Fig. 3 Test results of air extraction capacity of bypass drying and evaporating tower for unit 2[#]

为1.5~2.0 m³/h、机组负荷为75%~90%的条件下,两侧蒸发塔抽气量基本一致,均在15 300~20 700 Nm³/h之间,单台机组抽气量合计为31 600~39 800 Nm³/h,占机组总烟气量的3.2%~3.7%,满足抽取烟气量不得高于机组烟气总量5%的设计要求。高温烟气的抽取量随着蒸发塔喷水量的增加而增大,根据核算蒸发1 m³废水平均抽取高温烟气约10 275 Nm³/h。

2[#]号机组蒸发塔烟气压力测试结果见图4。

由图4可知,蒸发塔入口压力为1 535~1 840 Pa,出口烟气阻力为2 350~2 762 Pa,蒸发塔运行压力随喷水量的增加而增大。蒸发塔进出口压差为815~922 Pa,空预器两侧压差约为1.40 kPa。由此可见,蒸发器进出口压差小于空预器两侧压差,不影响烟气的正常流通。

2[#]号机组蒸发塔烟气温度测试结果见图5。

图4 2[#]机组旁路干燥蒸发塔烟气压力测试结果Fig. 4 Test result of flue gas pressure of bypass drying and evaporating tower of unit 2[#]图5 2[#]机组旁路干燥蒸发塔烟气温度测试结果Fig. 5 Flue gas temperature test results of bypass drying and evaporating tower of unit 2[#]

由图5可知,蒸发塔入口烟气温度在333~347℃之间波动,出口烟气温度在152~167℃之间波动,喷雾前后烟温下降约为180℃。而且蒸发塔出口烟温>150℃,远大于酸露点温度(98~100℃),不会导致烟道和电除尘器设备腐蚀。

3.3 炉效影响分析结果

根据蒸发塔抽取的烟气量和温度、原煤消耗量、喷水量等核算烟气侧放热量及锅炉热效率降低值,核算结果见表2。

脱硫废水旁路烟气蒸发处理系统抽取的330℃热烟气,当机组负荷为75%、喷水量为3.1 m³/h时,烟气侧放热量为8 126 MJ/h,引起锅炉效率降低值为0.29%;当机组负荷为90%、喷水量为3.9 m³/h时,烟气侧放热量为10 948 MJ/h,锅炉效率降低值为

表2 旁路烟气处理系统炉效分析结果

Table 2 Results of furnace efficiency analysis of bypass flue gas treatment system

工况编号	工况1	工况2
机组负荷/MW	263.1	315.0
入口烟气流/(Nm ³ ·h ⁻¹)	31 657.5	39 317.6
入口烟气温度/℃	337.85	346.2
入口烟气焓值/(kJ·Nm ⁻³)	474.3	486.7
出口烟气流/(Nm ³ ·h ⁻¹)	53 445.2	65 781.3
出口烟气温度/℃	162.3	154.3
出口烟气焓值/(kJ·Nm ⁻³)	217.6	206.1
喷水量/(m ³ ·h ⁻¹)	3.1	3.9
原煤消耗量/(t·h ⁻¹)	132.3	154.6
原煤热值/(kJ·kg ⁻¹)	21 230	21 230
原煤输入热量/(MJ·h ⁻¹)	2 808 729	3 281 158
烟气侧放热量/(MJ·h ⁻¹)	8 126	10 948
锅炉热效率降低值/%	0.29	0.33

0.33%。由此可见,脱硫废水零排放处理系统对电厂锅炉热效的影响较小。

3.4 运行成本分析结果

脱硫废水零排放处理系统新增用电功率包括两部分,一部分是水泵及喷雾器新增用电功率为30 kW,一部分是输灰和雾化装置新增用电功率为150 kW,新增用电功率合计为180 kW,厂用电价为0.38元/(kW·h),处理吨水新增耗电成本为8.55元/h。2[#]机组负荷为75%~90%、蒸发塔喷水量为3.1~3.9 m³/h时,通过燃煤量、原煤发热量以及锅炉热效率降低值核算,处理吨水发电煤耗增加值为0.27~0.31 g/(kW·h),电厂标煤价格为670元/t,吨水煤耗增加费用为58.13~61.93元/h。

综上所述,脱硫废水零排放处理系统运行成本为66.68~70.48元/(m³·h),相对于蒸发结晶运行成本150~180元/(m³·h)^[5],旁路烟气蒸发技术运行成本仅为蒸发结晶的40%左右,而且盐分跟粉煤灰混合后可以实现综合利用,省去了结晶盐的处置费用,具有明显的优势。

4 结论

(1)采用旁路烟道喷雾干燥蒸发技术对脱硫废水进行零排放处理,350 MW机组设置2台2 m³/h的蒸发塔,蒸发塔采用双流体雾化技术,系统流程简单,运行稳定,喷水量满足设计要求。

(2)蒸发塔入口烟气温度为333~347℃,出口烟气温度为152~167℃,蒸发1 m³废水平均抽取高温

(下转第186页)