

燃煤电厂末端高盐度废水零排放工艺研究及应用

姬晓慧

中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司

摘要:针对广东某百万燃煤电厂全厂废水零排放要求,提出了“低温烟气旁路浓缩+热二次风蒸发”和“烟道旁路旋转雾化喷雾蒸发”两种烟道旁路蒸发的废水零排放处理工艺,研究了对锅炉效率及热力系统的影响。通过技术经济比较,指出“低温烟气旁路浓缩+热二次风蒸发”工艺系统流程简单、废水蒸发效率高、检修维护及运行工作量少、综合运行成本低,对机组负荷变化的适应性强。研究成果将对类似工程高盐度废水零排放工艺的选择提供借鉴作用。

关键词:燃煤电厂;高盐度废水;零排放;锅炉效率

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.11.063

一、概述

随着国家碳达峰及碳中和发展目标的提出,推动了煤炭的清洁高效利用,尤其燃煤电厂各项污染物的排放标准不断提高,对环境保护的要求日益严格。目前国内约有85%的燃煤电厂采用石灰石-石膏湿法脱硫技术脱除烟气中的二氧化硫^[1]。作为燃煤电厂全厂水平衡的末端排水,脱硫废水水质差、含盐量高、成分复杂,对环境危害大。随着国家对火电行业提出清洁高效、超低排放的要求,燃煤电厂环境影响报告书的批复往往要求全厂废水实现零排放。因此优化全厂水平衡,针对全厂末端高盐度废水选择技术经济性好的零排放处理工艺非常重要。

广东某百万燃煤电厂同步安装建设烟气脱硫、脱硝装置,采用国际领先的超超临界二次再热、十级回热结合疏水泵、冷端优化、超大型玻璃钢收水槽式高位收水冷却塔、TGGH和烟气协同治理,以及全封闭煤场等先进技术,实现全厂废水零排放、烟气超洁净排放、固废全部综合利用。该工程烟气脱硫系统采用石灰石-石膏湿法脱硫工艺,脱硫废水进行零排放处理,实现全厂废水零排放的要求,打造“高效、节能、环保、生态、智慧型”燃煤示范电厂。

二、末端废水水质及水量

(一)末端废水水质

1. 成分组成

广东某百万燃煤电厂全厂各工艺系统产生的各类工艺排水,根据水质不同分别加以回收直接利用或经处理后回用,以降低系统水耗、节约水资源。对于凝结水精处理再生系统按照再生步序分别进行各类排水的分类收集,分质回用;其中再生、置换步序产生的高含盐废水送至脱硫废水零排放处理系统进行处理;正洗、反洗步序产生的冲洗排水送到工业废水集中处理系统经处理后进行回用。所以全厂各种排水经分类收集、分质回用后,产生的末端废水主要由脱硫废水和锅炉补给水处理系统(指离子交换处理工艺系统)、凝结水精处理再生时排出的高盐度废水组成。

2. 成分分析

石灰石-石膏湿法烟气脱硫技术由于具有脱硫效率高、技术成熟、设备布置紧凑和对水质变化适应性强等优点,已成为我国当前电厂烟气脱硫的主流处理工艺。在湿法烟气脱硫工艺中,由于烟气中的F和Cl的溶解,会使浆液中这两种离子浓度逐渐升高。为了维持系统稳定运行、保证石膏产品质量和保证脱硫效率,需要控制浆液中Cl⁻浓度,一般要求低于20g/L,因此需排出部分浆液,这部分浆液就是脱硫废水。

脱硫废水的水质与脱硫工艺、烟气成分、脱硫剂和脱硫工艺水、灰及吸附剂等多种因素有关。脱硫废水的主要超标项目为悬浮物、PH值、汞、铜、铅、镍、锌、砷、氟、钙、镁、铝、铁以及氯根、硫酸根、亚硫酸根、碳酸根等,其水质成分和浓度随煤种、脱硫剂纯度和工艺水质的不同,变化范围很大。锅炉补给水处理系统及凝结水精处理再生时排出的高盐度废水中主要含有钠离子、氯离子及钙离子、镁离子、硫酸根离子,相对脱硫废水水质简单,水质与锅炉补给水水源水质及再生周期相关,初步估算废水中氯离子在3000~5000 mg/L之间,远小于脱硫废水中氯离子含量。

3. 水质特点

脱硫废水的水质呈弱酸性,一般pH值为4~6;废水浊度和悬浮物含量高,质量浓度可达几万mg/L;大部分的颗粒物黏性低;氟化物、COD、重金属超标如Cr、As、Cd、Pb、Hg、Cu等;硬度离子含量高,含有大量的镁、钙等离子;盐分含量高,含有大量的F⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、SO₃²⁻、Ca²⁺、Mg²⁺等离子,其中氯离子Cl⁻浓度12000~20000mg/L;氨氮含量超标。

脱硫废水对脱硫系统管道、各种金属材料及相关动力设备有很强的腐蚀性,导致脱硫高含盐量废水的处理及回收利用非常困难。

(二)末端废水水量

广东某两台百万燃煤电厂脱硫废水水量为22m³/h,此部分水未经脱硫废水常规预处理,直接从脱硫岛废水旋流器出水来;凝结水精处理再生时排出的高盐废水水量为2m³/h(折合成连续平均小时用水量),故广东某百万燃煤电厂末端废水总量为24 m³/h。

1. 末端废水回用概况

由于末端废水水质较差,在电厂内的回用仅限于以下系统:冲灰用水、湿除渣系统、干灰调湿、灰场和煤场喷洒。广东某百万燃煤电厂采用的是干除灰及干排渣方案,所以无法回用消纳脱硫废水。如果采用末端废水将一部分干灰调湿,会损失部分干灰销售的经济效益,煤场喷淋采用末端废水会对锅炉炉膛带来腐蚀隐患,广东某百万燃煤电厂不考虑这两种消纳方案。综上,广东某百万燃煤电厂脱硫废水等末端废水没有厂内回用点,需要将末端废水进行零排放处理。

2. 末端废水零排放处理技术工艺介绍

目前国内燃煤电厂脱硫废水零排放处理工艺主要包括蒸发结晶和烟道余热蒸发两种主流工艺路线,具体方案包括预处理+多效蒸发结晶工艺、预处理+膜浓缩+MVR蒸发结晶工艺、烟道旁路蒸发工艺、烟道直喷蒸发工艺等。其中烟道旁路蒸发工艺按照抽取不同温度烟气以及不同处理设备组合,又细分为低温烟气旁路蒸发工艺、低温烟气旁路浓缩+热二次风蒸发工艺、预处理+膜浓缩+烟道旁路喷雾蒸发工艺、烟道旁路旋转雾化喷雾蒸发工艺等。上述处理方案在国内均有实际工程业绩。

广东某百万燃煤电厂经过工程调研选取了运行效果良好的低温烟气旁路浓缩+热二次风蒸发、烟道旁路旋转雾化喷雾蒸发这两种工艺,根据该工程实际参数分别进行测算,对锅炉和烟气系统设备的影响以及运行可靠性、经济性等多方面进行技术经济研究分析。

(三) 低温烟气旁路浓缩+热二次风蒸发工艺

1. 工艺流程

该工艺系统废水不需要进行三联箱化学沉淀处理,利用脱硫塔前高温烟气余热对脱硫废水进行浓缩减量,浓缩倍数可以达到10倍及以上。该工艺系统从空预器风道出口抽取一定量的热二次风进入干燥床进行蒸发,通过高温热二次风使得浆液进行彻底干燥,干燥后的粉尘通过气力输送进入烟道均匀掺混,最后由除尘器收集。为了克服系统阻力,该系统干燥塔及浓缩塔需要分别单独配置增压风机。该工艺系统回风温度按照150℃进行设计,实际运行可根据主烟道烟温适当降低,灵活调节。浓缩塔系统所取烟气为引风机后低温烟气。其工艺流程如图1所示^[2]。

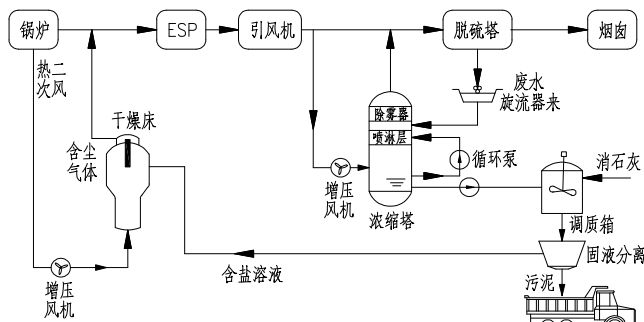


图1 低温烟气旁路浓缩+热二次风蒸发工艺流程示意图

2. 工艺特点

- (1) 脱硫废水不需要进行预处理,一般设置预沉池即可满足要求;
- (2) 充分利用电除尘后的低温烟气进行废水浓缩减量,减少热风量、最大限度降低对锅炉效率和煤耗的影响,提高废水处理的经济性;
- (3) 占地面积较小,约为400平方米左右;
- (4) 调质单元可以多台机组共用,仅消耗少量消石灰作为药剂,调质产生的污泥约为400~500吨/年;
- (5) 引用的烟气和热二次风均设置有隔离门,方便该系统检修,不影响主机运行安全;
- (6) 进入粉煤灰之中的氯离子含量满足粉煤灰综合利用的标准,不影响粉煤灰的销售;
- (7) 对电除尘器的安全运行没有影响。

3. 系统计算结果

按照广东某两台百万机组工程实际参数,低温烟气旁路浓缩+热二次风蒸发工艺系统主要计算结果见表1。

表1 低温烟气旁路浓缩+热二次风蒸发工艺主要计算结果

项目	单位	THA	75% THA	50% THA	30% BMCR
热二次风温度	℃	345	342	325	305
引风机出口烟气温度	℃	90	90	85	85
处理废水量	t/h	12	9	6	3.6
干燥床抽取的热二次风量	Nm ³ /h	8100	8250	9050	10000
热二次风回风温度	℃	150	150	150	150
风量按回风150℃进行设计,可根据实际情况进行调整					
低温烟气耗量	Nm ³ /h (STP, wet, Act-02)	580000	435000	313000	185000
脱硫入口烟温	℃	83	83	79	80
效率影响估算值	%	-0.05	-0.06	-0.09	-0.14
煤耗变化	g/kW·h	0.14	0.17	0.26	0.43

4. 对热力系统的影响

(1) 该工艺需要抽取引风机后烟道的烟气进行浓缩减量,并抽取热二次风进行干燥蒸发。其中抽取引风机后的烟气热量占绝大部分比例,这部分热量为锅炉废热,因此对机组的经济性影响较小;THA工况下抽取的热二次风量占比热二次风总量的约0.48%,占比虽然较小,但降低了锅炉的输入热量,对机组的经济运行有一定影响。

(2) 该工艺方案处理后的含尘气体排入了TGGH冷器前烟道,最后由电除尘器吸附脱除,含尘气体进入烟道后,会对烟气的酸露点产生一定的影响,本方案由于回至TGGH前烟道水量较小,仅为1t/h,因此对后续系统影响较低。

(3) 低温烟气旁路浓缩+热二次风蒸发工艺采用抽高温烟气蒸干脱硫废水,会影响MGGH系统的热平衡,导致MGGH烟气放热端能量减少,相应MGGH出口的烟气吸热量会下降,导致烟囱排放温度下降,为保证烟囱排放满足不冒白烟要求,相应抽烟气损失的能量需要由辅汽来补充,对机组运行的经济性较为不利。

(四) 烟道旁路旋转雾化喷雾蒸发工艺

1. 工艺流程

旋转喷雾干燥技术是一种利用旋转雾化器的离心力,使得溶液在旋转表面上伸展为薄膜,并以不断增长的速度向雾化盘的边缘运动,实现溶液转化成小雾滴,烟气流被分布成绕雾化盘的运动及绕雾化盘边缘的向下流动,向下压向雾滴并形成伞状云形态,达到烟气与雾滴的充分混合。通过控制气体分布、液体流速、雾滴直径等,使雾化后的雾滴到达干燥塔壁之前被干燥^[3]。

该工艺系统基本原理就是利用从空预器前引出的较高温度的烟气热量在干燥塔内将通过旋转雾化器雾化后的废水快速蒸干。从每台机组SCR反应器出口烟道引出

一部分烟气进入干燥塔作为蒸发脱硫废水的热烟气，脱硫废水直接喷入以旁路方式设置在空气预热器之前的脱硫废水烟气蒸发系统的干燥塔内，经由旋转雾化器后，在干燥塔内进行干燥蒸发处理，水蒸气随烟气返回到空气预热器与电除尘器之间的主烟道内，脱硫废水中的固体盐类最终形成粉末状干燥产物，干燥产物随烟气灰尘一起进入电除尘器进行收集处理。其工艺流程如图2所示。

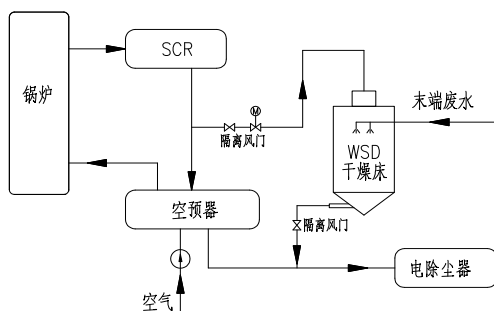


图2 烟道旁路旋转雾化喷雾蒸发工艺流程示意图

2. 工艺特点

(1) 脱硫废水不需要进行预处理，可以直接进入WSD干燥塔内；

(2) 被蒸发的水蒸气随着烟气一起进入脱硫系统，经过喷淋冷却后可以凝结到脱硫系统的循环浆液中，从而降低脱硫工艺的水耗；

(3) 利用空预器前后的压差实现干燥塔内烟气的流通，无增压风机，能耗较低；

(4) 对电除尘器的安全运行没有影响；

(5) 流程简单，操作方便，占地较小；

(6) 出口烟气布置在电除尘器入口母烟道正中间，不影响原电除尘器的流场和除尘效果、结晶盐均匀分布在灰尘中，便于粉煤灰综合利用；

(7) 进入粉煤灰之中的氯离子含量满足粉煤灰综合利用的标准，不影响粉煤灰的销售。

3. 系统计算结果

按照广东某两台百万机组工程实际参数，采用烟道旁路旋转雾化喷雾蒸发工艺具体配置为：每台机组设置1套WSD处理系统，单套WSD系统处理能力为12m³/h。该工程机组带基本负荷，并具有一定的调峰能力，其调峰范围为35%~100%机组额定出力。脱硫废水水量按照机组负荷按比例调整。系统主要计算结果见表2。

表2 烟道旁路旋转雾化喷雾蒸发工艺主要计算结果

项目	单位	THA	75%THA	50%THA	30%BMCR
空预器入口烟气流量	Nm ³ /h	2426881	1855954	1485454	1082660
空预器入口烟气流量	kg/h	3199428	2446758	1950453	1419354
空预器入口烟气温度	℃	367	359	342	319
单台炉处理水量	t/h	12	9	6	3.6
单台炉需要的烟气体积	Nm ³ /h	106240	82733	60050	40951
抽取烟气体积占比	%	4.38	4.46	4.04	3.78
效率影响估算值	%	-0.510	-0.500	-0.500	-0.450
煤耗变化	g/kW·h	1.40	1.39	1.45	1.37

4. 对热力系统的影响

烟道旁路旋转雾化喷雾蒸发工艺，脱硫废水需从空预器入口引出高温烟气对废水进行雾化干燥，此部分能量本应为锅炉输入能量，因此对锅炉效率有较大的影响。本方案脱硫废水经处理后全部排入到TGGH烟冷器前烟道，然后由电除尘器吸附脱除，导致烟气酸露点升高，提高约3℃；导致烟气中水分增加，运行烟温提高，会导致运行烟气体量增大，阻力升高，除尘器以及引风机运行阻力增大，电耗增加；导致空预器出口烟温降低，相应烟冷器换热量较小，TGGH系统辅助蒸汽消耗量增加。

三、技术经济对比

两种烟道旁路蒸发法脱硫废水零排放处理工艺的技术经济对比详见表3。

表3 两种烟道旁路蒸发法脱硫废水零排放处理工艺的技术经济对比表

项目	低温烟气旁路浓缩+热二次风蒸发工艺	烟道旁路旋转雾化喷雾蒸发工艺
系统配置	一机一套，系统出力2×12t/h	一机一套，系统出力2×12t/h
烟气引出位置	空预器风道出口引热二次风 引风机后引烟气	空预器前
烟气回流位置	脱硫塔前	电除尘器前
烟温下降值（脱硫吸收塔入口）	约7℃	约6-10℃
蒸发器蒸发水量（以废水处理量24t/h计）	~1m ³ /h	24m ³ /h
处理每吨废水对锅炉效率的影响值（%）	0.0042%（煤耗合0.0117g/kW·h）	0.042%（煤耗合0.117g/kW·h）
每吨水运行费用	39元/吨	113元/吨
年运行费用（以废水处理量24t/h计）	419.68万元	1226.4万元

四、结论

综上所述，低温烟气旁路浓缩+热二次风蒸发工艺和烟道旁路旋转雾化喷雾蒸发工艺均能满足广东某百万燃煤电厂实现脱硫废水零排放的技术要求。虽然烟道旁路旋转雾化喷雾蒸发工艺系统流程简单，调节控制方便，检修维护工作量少，投资费用低，但该工艺对锅炉效率及煤耗影响较大，综合运行费用较高。低温烟气旁路浓缩+热二次风蒸发工艺系统流程也比较简单，废水蒸发效率高，运行工作量小，且综合运行成本低，对机组负荷变化的适应性强。因此广东某百万燃煤电厂推荐采用低温烟气旁路浓缩+热二次风蒸发工艺作为末端废水零排放处理工艺。

参考文献

[1] 李飞. 燃煤电厂脱硫废水零排放技术应用与研究进展[J]. 水处理技术, 2020, 35(2): 1-8.
 [2] 段威, 姚宣, 王冬生. 燃煤电厂脱硫废水零排放处理技术对比及经济性分析[J]. 工业水处理, 2021-03, 41(3): 129-136.
 [3] 杜艳玲, 柴启华, 员在斌. 旋转喷雾干燥法在火电厂脱硫废水零排放改造中的应用[J]. 内蒙古电力技术, 2018, 36(2): 1479-1806.