

全厂废水零排放系统优化设计

张 惠

中国电建集团河北省电力勘测设计研究院有限公司 河北 石家庄 050000

摘 要: 在日益严格的环保要求下,实现脱硫废水的“零排放”已成为燃煤电厂可持续发展的必然选择。本文系统分析了零排放关键技术路径,提出以“高效絮凝一体化预处理+低温烟气余热浓缩+高温旁路烟道蒸发干燥”为核心的组合工艺。该方案充分利用电厂低品位热源,实现了能量梯级利用,兼具技术可行性与经济合理性。本文以保定某热电厂实际改造项目为例,详细阐述了从工艺流程选择、设备优化配置到智能控制集成的全系统设计,为同类电厂的废水零排放改造提供了具有借鉴意义的工程范例。

关键词: 零排放; 高效絮凝; 烟气余热蒸发; 旁路烟道; 优化设计

引言: 随着我国环保法规日益严格与水资源的紧缺,燃煤电厂作为工业用水与排水大户,实现脱硫废水的“零排放”已成为行业可持续发展的强制性要求与必然趋势^[1]。目前,零排放技术路线通常遵循“预处理-浓缩减量-末端固化”的三段式模式。本文旨在综合分析各环节主流技术的优缺点,提出一种基于能量梯级利用的优化组合工艺,并结合实际工程案例,从技术集成、设备配置和智能控制三个维度进行系统设计,特别是现役机组的零排放改造,提供兼具技术先进性与工程实用性的参考。

1 废水零排放系统技术分析

1.1 预处理技术

废水预处理工艺常用有传统三联箱技术、双碱法技术、电絮凝法、高效絮凝一体化处理技术。传统三联箱加药工艺加药复杂,运行困难,出水水质情况不稳定;双碱法一般配合膜法浓缩工艺,降低硬度离子,减少结垢风险,但运行成本较高;电絮凝法设备投资、运行电耗、药剂成本较高;高效絮凝剂是以多种复合药剂为原料,结合了絮凝、吸附、化学沉淀等多重作用,可高效去除脱硫废水中的污染物,包括重金属和类金属、COD、悬浮物等,出水水质满足《火电厂石灰石-石膏湿法脱硫废水水质控制指标》(DL/T997-2006)的要求。多种材料的复合型药剂在脱硫废水处理设备中,协同作用,克服了传统处理药剂混凝时间长、药剂使用量大等缺点,将混凝时间控制在8分钟以内,沉淀时间控制在30分钟以内。该工艺可在只添加一种药剂的基础上实现废水达标排放,同时可做为旁路烟道蒸发系统的预处理装置,具有运行简单、效果好、占地面积小、运行成本低等优势。

1.2 深度处理技术

根据零排放的要求以及废水量,脱硫废水后续无论是蒸发还是回用,浓缩减量是非常有必要的。现有的浓缩减量工艺可分为膜法、热法两大类^[1]。膜法浓缩减量方法主

要包括:纳滤、高压反渗透、碟管反渗透、电渗析、正渗透、振动膜等。热法浓缩减量方法包括利用烟道气或蒸汽为热源,采用“多效蒸发”、“烟道旁路蒸发”等技术实现浓缩减量。主要包括:压缩蒸汽加热蒸发、多效蒸发^[2-5]、低温烟气余热蒸发浓缩^[6]、低温负压闪蒸等。

热法浓缩减量技术是通过利用热源对废水持续进行加热使得水分子连续蒸发从而使废水不断浓缩并最终得到蒸馏水和浓缩液。蒸馏水回收利用。浓缩液又可通过结晶器或是喷雾干燥进一步蒸发得到固体盐,固体盐通常是混盐,一般难以进行回收。常用热法处理工艺有:低温烟气余热浓缩和低温多效闪蒸浓缩等。

1.3 干燥固化技术

经过浓缩减量的废水,水量减小,但仍然需要进一步处置。目前常用的是旁路烟道喷雾蒸发工艺对浓缩后的废水进行干燥固化^[3-5]。旁路烟道喷雾蒸发^[4]工艺有旋转喷雾蒸发塔和双流体喷雾蒸发塔。与双流体喷雾蒸发塔相比,旋转雾化器可直接对悬浮物浓度小于25%的废水进行雾化,适用范围广;旋转雾化器依靠高速旋转的喷雾盘产生均匀的圆锥形雾区,与烟气混合较充分;无需空压机设备;适于处理较大的水量。

2 全厂废水零排放系统设计原则

全厂废水零排放处理系统设计要求实现自动化控制,有效利用余热,能够适应机组负荷的波动,并保证系统可以安全稳定运行,兼顾经济效益。主要体现在以下方面:

(1) 优化工艺流程

流程简化与效率提升实现流程集约化与运行高效化;对关键参数优化与调整,实现效率与成本的动态平衡;应急处理与备用方案设计,当水质突变、设备故障等突发情况发生时,可以保障系统核心功能不中断。

(2) 设备选型与配置优化

结合处理规模、水质特性等实际需求筛选设备,性能与需求精准匹配,追求适配性与高性价比;根据工艺流程和场地条件,合理规划设备位置、间距与管路,缩短传输路径,优化空间分配,并为维护检修预留充足空间;设备、管道等选择合适的材质,能够耐介质腐蚀,提供使用寿命。

3.全厂废水零排放系统设计实例

本文以保定某热电厂为例进行全厂废水零排放系统设计。保定某热电厂一期建设2台350MW机组,同步建设脱硫废水处理系统,设计处理规模是30m³/h,处理后的废水进行干灰加湿。二期扩建1×660MW超超临界燃煤机组,脱硫废水量为10m³/h。由于在环保要求日益严格的当下,废水零排放成为工业可持续发展的关键目标。因此要求对一期、二期进行综合考虑来实现全厂的废水零排放,因此如何充分利用一期建设的公用系统,降低投资,提高全厂经济效益是全厂废水零排放系统优化设计的关键,也为其他电厂废水零排放的改造项目提供了借鉴。

3.1 现有废水零排放处理系统概述

现有废水处理工艺如下所示:

废水箱→废水输送泵→预沉池→废水缓冲池→一级废水提升泵→一级反应器→一级澄清器→中间水箱→二级废水输送泵→二级反应器→二级澄清器→清水箱→去煤场回用泵→煤场喷洒。

污泥→污泥缓冲罐→污泥给料泵→板框压滤机→污泥外运。

加药装置包括:石灰、碳酸钠、次氯酸钠、盐酸、有机硫、凝聚剂、助凝剂。

根据工艺可以看出废水采用的是预处理+煤场喷洒的方式实现的零排放,但是实际运行中根据水平衡废水量约12t/h,煤场喷洒无法对上述水质进行消纳,后期对此进行了改造,增加了低温烟气浓缩塔的设计,将一级澄清器后的清水送至低温烟气浓缩塔进行浓缩,产生的浓缩液约2t/h再送往板框压滤机进行脱水,但是实际运行由于结晶盐颗粒的形成导致板框压滤机的运行效果不佳,因此本期零排放系统需要考虑2t/h的废水量。

3.2 废水零排放处理工艺流程选择

废水零排放技术工艺流程的选择既要满足环评要求,又要考虑与现有设备的兼容性,并需要考虑运行维护的便利性。由于传统的三联箱工艺,尽管是成熟工艺,在实际应用中也面临一些挑战,流程涉及多个环节和多种化学药剂的精确投

加,系统复杂、运行维护成本较高,并产生大量化学污泥,并且设备占地面积大,因此本期预处理采用高效絮凝一体化处理技术,占地小,运行简单方便,药剂单一,方便维护。

新建机组与现有机组共产生末端废水12t/h,无法直接回用,需要进行零排放深度处理,浓缩减量+干燥固化是现有零排放技术中的常用的技术手段。考虑到期一采用低温烟气浓缩塔进行浓缩减量,为了方便运行人员的维护,选择与现有系统相同的工艺,该技术利用电厂引风机后的低温烟气作为热源进入低温烟气浓缩塔,经过预处理后的废水引至低温烟气浓缩塔与烟气直接接触换热而被蒸发、浓缩,水蒸气进入脱硫系统,浓缩液进入下一处理步骤。由于蒸发浓缩采用的是脱硫前的烟气,烟气热量回收价值已经很低,因此热量消耗对机组效率没有影响。该技术运行成本优势明显。

干燥固化通常分为两种,烟道直喷和高温旁路烟道蒸发干燥固化工艺,烟道直喷虽然投资少,但是易导致主烟道腐蚀、结垢和积灰,喷嘴易堵塞。因此选择高温旁路烟道蒸发干燥固化工艺,避免了对主烟道的直接腐蚀与结垢风险。旁路烟道喷雾蒸发指从空预器前端烟道引接旁路烟道,利用烟气热量使雾化后的废水瞬间蒸发,结晶盐随粉煤灰通过仓泵回收或在除尘系统中被捕获收集,并随灰一起排出。

综上所述:全厂废水零排放选择高效絮凝一体化处理+低温烟气浓缩塔+高温旁路烟道蒸发干燥固化工艺,可以有效利用余热,实现全厂的废水零排放目标。

3.3 废水零排放处理设备配置

(1) 预处理系统设备配置

根据废水量,预处理系统设计出力为10t/h,常规需要配置高效混合反应器、高效旋流澄清器、一体化加药装置、板框压滤机等设备。为了充分利用现有设备,减少投资,本次设计利用一期的板框压滤机和脱硫的真空皮带机取代新增的板框压滤机,新建系统的污泥通过泵送至脱硫和一期的污泥罐,实现现有设备的充分利用。出口设置电动阀门,实现污泥至脱硫系统和一期污泥处置系统的切换,确保系统的安全运行。

(2) 低温烟气浓缩塔系统设备配置

浓缩塔单独布置在室外靠近脱硫塔附近,减少烟道的敷设量,设计出力为10t/h,浓缩5倍,浓缩后的废水经过调制至后续干燥系统,本系统与现有设备独立设置,设备配置如下表所示:

序号	名称	规格	单位	数量	备注
(一)	废水缓冲系统				
1	废水缓冲箱	V = 120m ³ , 碳钢衬玻璃鳞片	台	2	
2	废水缓冲箱搅拌器	顶进式, 材质: 碳钢衬胶	台	2	
3	废水给料泵	离心泵, Q = 10m ³ /h, 扬程: 40m, 过流材质: 2205	台	2	一用一备

续表

序号	名称	规格	单位	数量	备注
(二)	浓缩塔系统				
1	引风机	离心风机, 风量: 400000Nm ³ /h, 变频控制	台	1	
2	低温浓缩塔	喷淋空塔, Ø6.4m×24.3m, 材质: 玻璃钢	台	1	
3	喷淋层	材质: FRP	层	1	2层/塔
4	喷淋层喷嘴	喷嘴角度 90 度; 喷嘴型式: 单头喷嘴; 材质: SiC	批	1	
5	循环泵	离心泵, 500m ³ /h; 扬程: 25m; 过流部件: 碳化硅	台	2	2台/塔
6	循环泵入口滤网	材质: FRP	套	2	
7	扰动泵	渣浆泵, 300m ³ /h; 扬程: 25m; 过流部件: 碳化硅	台	2	一运一备
8	扰动喷嘴	喷嘴流量: 300m ³ /h; 材质: SiC	只	1	
9	扰动管架	吸收塔直径 Ø6.5m, 材质: FRP	套	1	
10	除雾器	两级屋脊式, 材质: PP	台	1	
(三)	浓缩液调质系统				
1	碱液箱	Ø3.5m×4m, 壳体材质: 碳钢衬玻璃鳞片	台	1	
2	卸碱泵	离心泵, Q = 30m ³ /h, H = 15m	台	1	
3	碱加药泵	离心泵, Q = 2m ³ /h, H = 15m, 变频驱动	台	2	一用一备
4	调质箱	Ø2.5m×2.5m, 壳体材质: 碳钢衬玻璃鳞片	台	1	
5	调质箱搅拌机	顶进式, 材质: 碳钢衬胶	台	1	
6	废水提升泵	离心泵, Q = 6m ³ /h, H = 15m, 过流材质: 碳化硅	台	2	一用一备

(3) 高温旁路烟道蒸发干燥固化工艺系统设备配置

本系统的设计出力为4t/h (新建废水2t/h, 原有系统废水有2t/h), 原有系统浓缩后废水通过泵送至新建系统的调质箱内, PH调节后送至干燥固化系统, 系统设备布置在室外临近空预器或除尘器并且方便烟道引接的位置。设备配置如下表:

序号	设备名称	规格型号	单位	数量	备注
1	喷雾水泵	离心泵, Q = 4m ³ /h, H = 100m, 过流材质: 2507	台	2	
2	蒸发塔	尺寸: φ6.18m×12.77m (直段+锥斗)	台	1	
3	旋转雾化器	出力: 4m ³ /h, 变频电机: 12000r/min	台	1	
4	烟气分配器	材质: Q345B	台	1	
5	侧边振打器	CZ50	台	3	
6	输灰系统	输灰仓泵: 0.5m ³	套	1	
7	储气罐	容积: 0.5m ³ /h, 材质: 碳钢, 设计压力: 0.7MPa	台	1	

3.4 系统控制方式

在全厂废水零排放处理系统中, 采用基于远程I/O的DCS集中控制, 是提升系统自动化水平、实现稳定高效运行的关键。在DCS中整合从预处理、浓缩减量到干燥的全流程画面, 关键参数(如温度压力、水质指标)同屏显示。建立分级报警机制(如预警、一般报警、紧急报警), 并设置报警抑制逻辑(如设备启动瞬间的瞬时值

波动), 避免“报警风暴”, 精准定位故障源。进行智能加药, 减少药剂浪费, 降低关键单元能耗。

结束语: 本文提出的脱硫废水零排放优化设计方案, 通过高效絮凝一体化预处理克服了传统工艺的弊端, 通过低温烟气余热浓缩与高温旁路蒸发干燥的梯级组合, 实现了电厂废热资源的最大化利用。该方案在保定某热电厂的设计实践中, 充分体现了“工艺优化、设备利旧、智能控制”的设计原则, 不仅有效解决了现有难题, 而且显著提升了系统的经济性和运行可靠性。

参考文献:

[1]张来豫,李中圣,杨传钧,Ng Kim Choon,陈谦.高盐废水处理技术研究进展[J].水处理技术,2025:1-12

[2]连坤宙.多效蒸发与结晶技术在废水零排放中的应用[J].资源节约与环保,2025,10:43-46

[3]唐国瑞,尤良洲,曹天佑,郑光雨,徐展,兰永龙.强制循环浓缩-高温雾化蒸发用于脱硫废水零排放[J].中国给水排水,2025,41(20):141-146

[4]王兴,邹斯诣,张占文.基于烟气蒸发技术脱硫废水零排放技术研究[J].山西电力,2025,(4):58-63

[5]吉意,陈晓楠,孔繁荣.石灰石-石膏湿法脱硫废水零排放技术在火力发电的应用[J].冶金动力,2025,(4):96-99

[6]衡世权,王仁雷,曹荣,徐展.燃煤电厂末端废水低温烟气余热浓缩-主烟道蒸发干燥系统运行特性研究[J].清洗世界,2022,38(10):9-12

[7]李飞.燃煤电厂脱硫废水零排放技术路线与应用研究进展[J].水处理技术,2020,46(12):23-30.