《火力发电厂高盐废水零排放工程技术指南》

（征求意见稿）

编制说明

《火力发电厂高盐废水零排放工程技术指南》编制组

二〇二三年九月

目　次

1 任务来源 1
2 标准制定必要性、编制依据、编制原则 1
3 主要工作过程 4
4 国内外相关标准研究 4
5 同类工程现状调研 5
6 主要技术内容及说明 5
7 标准实施的环境效益与经济技术分析 18
8 标准实施建议 18
9 征求意见处理情况说明（送审稿） 18
10 技术审查工作情况说明（报批稿） 18

《火力发电厂高盐废水零排放工程技术指南》编制说明

1 任务来源

2022 年 6 月，受中华环保联合会水环境治理专业委员会邀请，华北电力大学、华电郑州机械设计研究院开展《火力发电厂高盐废水零排放工程技术指南》立项申报的准备工作，并承担该标准的编制工作。

2 标准制定必要性、编制依据、编制原则

2.1 制定必要性和重要意义

随着国家对环境保护的日益重视，火电行业正在大规模开展废水综合治理改造。火电厂排污许可证一般不允许脱硫废水外排，脱硫废水由于含盐量、氯离子、硬度等浓度高，厂内无法直接综合利用，火电厂需建设废水零排放装置满足环保要求，火电厂废水零排放是火电厂废水综合治理改造的难点。

近几年来已有上百家火电厂完成全厂节水与废水综合治理改造可行性研究，多数电厂均按废水零排放规划，已建设完成的废水零排放系统也快速增长。废水零排放系统多采用膜法浓缩、热法浓缩、蒸发结晶固化、烟气余热干燥等新技术，缺乏统一的性能验收标准，不利于工程项目的验收和评估。火电厂废水零排放装置性能验收导则可为废水零排放装置的性能验收提供指导，满足当前脱硫废水深度治理的需求。因此，编制火电厂脱硫废水零排放处理装置验收导则是十分必要的。

2.2 编制依据

2.2.1 政策法律依据

国家对环境保护的有关法律、法规，如《中华人民共和国环境保护法》、《十三五水资源消耗总量和强度双控行动方案》、《排污许可证管理暂行规定》、《控制污染物排放许可制实施方案》等。

2.2.2 技术依据

GBZ 1　　工业企业设计卫生标准

GBZ 2.1　　工作场所有害因素职业接触限值第 2 部分 化学有害因素

GBZ 2.2　　工作场所有害因素职业接触限值 第 2 部分：物理因素

GBJ 22　　厂矿道路设计规范

GBZ/T 194　工作场所防止职业中毒卫生工程防护措施规范

GB 2893　安全色

GB 2894　安全标志及其使用导则

GB/T 4272　设备及管道绝热技术通则

GB 5083　生产设备安全防护设计总则

GB 7231　工业管道的基本识别色、识别符号和安全标识

GB 12801　生产过程安全卫生要求总则

GB 12348　工业企业厂界环境噪声排放标准

GB/T 13148　不锈钢复合钢板焊接技术要求

GB/T 13869　用电安全导则

GB 18241.1　橡胶衬里第 1 部分设备防腐衬里

GB 50009　建筑结构荷载规范

GB 50011　建筑抗震设计规范

GB 50013　室外给水设计标准

GB 50014　室外给水设计标准

GB 50016　建筑设计防火规范

GB 50019　工业建筑供暖通风与空气调节设计规范

GB 50033　建筑采光设计标准

GB 50046　工业建筑防腐蚀设计标准

GB 50052　供配电系统设计规范

GB 50054　低压配电设计规范

GB 50087　工业企业噪声控制设计规范

GB 50093　自动化仪表工程施工及验收规范

GB 50187　工业企业总平面设计规范

GB 50194　建设工程施工现场供用电安全规范

GB 50204　混凝土结构工程施工质量验收规范

GB 50222　建筑内部装修设计防火规范

GB 50231　机械设备安装工程施工及验收

GB 50254　电气装置安装工程施工及验收规范

GB 50259　电气照明的施工验收规范

GB 50300　建筑工程施工质量验收统一标准

GB 50660　大中型火力发电厂设计规范

GB 50755　钢结构工程施工规范

GB 51245　工业建筑节能设计统一标准

AQ 3009　危险场所电气防爆安全规范

AQ/T 3052　危险化学品事故应急救援指挥导则

AQ/T 9002　生产经营单位安全生产事故应急预案编制导则

DL 5190.6　电力建设施工技术规范 第 6 部分：水处理及制氢设备和系统

DL/T 838　燃煤火力发电企业设备检修导则

DL/T 870　火力发电企业点检定修管理导则

DL/T 2299　火力发电厂设备缺陷管理导则

DL/T 2300　火力发电厂设备检修管理导则

DL/T 5046　发电厂废水治理设计规范

DL 5190.6　电力建设施工技术规范 第 6 部分：水处理及制氢设备和系统

HG/T 2640　玻璃磷片衬里施工技术条件

HG/T 2451　设备防腐橡胶衬里

HG/T 2640　玻璃鳞片施工技术条件

SY/T 0326　钢制储罐内衬环氧玻璃钢技术标准

2.3 编制原则

1）规范性原则

本标准按照 GB/T 1.1-2020 有关规定，确定标准的结构和内在关系，标准条文层次的划分符合 GB/T 1.1 的规定。

2）统一性原则

本标准的编写和表达方式在三个方面实现统一：一是标准结构的统一，即标准中的章、条、段、表、图和附录的排列顺序与 GB/T1.1 的要求统一；二是文体的统一，即类似的条款由类似的措辞来表达，相同的条款由相同的措辞来表达；三是术语的统一，即同一个概念使用同一个术语，每一个术语尽可能只有唯一的含义。

3）协调性原则

本标准的协调性主要体现在三个方面：

普遍协调：即与标准化原理和方法的协调，与标准化术语的协调，量、单位及符号的协调等；

3　主要工作过程

3.1 组建编制技术组和研究启动

2022 年 6 月，在中华环保联合会水环境治理专业委会员的组织协助下，由华北电力大学、华电郑州机械设计研究院等单位成立了标准编制组，并启动标准编制工作。

3.2 重点问题研究

2022 年 12 月，规范编制技术组召开了第二次工作会议。对火力发电厂高盐废水零排放技术等重点问题进行了专题研讨。12 月 25 日，形成了重点问题的研究初稿。

3.3 规范初稿的编制

2023 年 03 月 15 日，规范编制技术组召开了第三次工作会议。对技蒸发结晶技术等问题进行了专题研讨。03 月 24 日，形成了《火力发电厂高盐废水零排放工程技术指南》第一版初稿。

3.4 专家咨询和规范第二版初稿的编制

2023 年 04 月 12 日，中华环保联合会水环境治理专业委员会牵头组织召开了指南初稿的专家咨询会，就规范格式和重点技术内容进行了重点咨询。会后经修改完善后形成了《火力发电厂高盐废水零排放工程技术指南》第二版初稿。

3.5 专家咨询和征求意见稿的编制

2023 年 7 月 28 日，中华环保联合会水环境治理专业委员会组织召开标准技术审查会，会议邀请技术审查专家浙江工商大学、华东理工大学、河北省水利水电勘测设计研究院集团有限公司、新疆大学、华北电力大学等 5 位专家对标准内容和格式进行了逐条讨论，经修改完善后于 9 月初形成了《火力发电厂高盐废水零排放工程技术指南》（征求意见稿）。

3.4　公开征求意见并修改完善

2023 年 9 月 11 日，《火力发电厂高盐废水零排放工程技术指南》（征求意见稿）及编制说明面向社会公开征求意见。

4　国内外相关标准研究

与 DL/T 5046《发电厂废水治理设计规范》、DL 5068《发电厂化学设计规范》等标准相匹配。

DL/T 5046《发电厂废水治理设计规范》主要规定了化学废水、脱硫废水、灰水、含油废水、生活污水、含煤废水等废水处理系统的系统设计、设备选择、布置要求；DL 5068《发电厂化学设计规范》规定了常规水处理设备主要的设计要求和设计参数。

国外火电厂废水零排放项目相对较少，美国、意大利、日本等国分别建有少量采用蒸发

结晶、烟气余热干燥等技术的废水零排放系统，但未见相关性能验收技术标准公布。各大电力集团已建成的废水零排放工程，性能验收基本还在摸索阶段，均为业主与试验单位自行拟定，尚未形成统一的标准。

根据初步调研结果，属创新性标准制定内容。

5 同类工程现状调研

经过全厂节水改造后，火电厂废水零排放工艺路线可为：预处理-浓缩减量-固化。其中，预处理和浓缩减量是可选工艺。典型技术路线见图 1。

图 1 废水零排放处理典型技术路线

1）预处理工艺

废水零排放预处理工艺主要采用投加药剂软化、弱酸离子交换等技术，脱除废水中的硬度，软化水质。典型的预处理工艺有石灰-Na_2CO_3 软化、NaOH-Na_2CO_3 软化、石灰-Na_2SO_4 软化、离子交换、管式微滤/超滤等。

2）浓缩减量工艺

废水零排放浓缩减量工艺主要包括热法浓缩和膜法浓缩，其中膜法浓缩工艺主要包括反渗透、电渗析、纳滤等；热法浓缩工艺主要包括蒸发浓缩、烟气余热闪蒸、低温烟气蒸发浓缩等。

3）固化工艺

废水零排放固化工艺主要包括蒸发结晶固化和烟气蒸发干燥固化，其中烟气蒸发干燥固化工艺包括旁路烟气蒸发干燥和直接烟道蒸发干燥。

5.1 废水零排放工程典型案例汇总

编制组对国内废水零排放工程进行了广泛调研，并对典型项目的参数选择、系统配置等进行了重点梳理。结果如表 1 所示。

表 1　废水零排放项目工艺路线对比

序号	电厂名称	系统规模	工艺路线
1	广东河源电厂	20m³/h	两级软化澄清+四效立管强制循环蒸发低温多效（MED）蒸发结晶
2	焦作万方电厂	20m³/h	双碱法软化处理+超滤+反渗透（海水淡化膜）+旁路烟道蒸发
3	国家电投集团（商丘）民生热电厂	30m³/h	低温闪蒸浓缩+旁路烟道蒸发
4	国家能源集团湖北公司汉川发电厂	36m³/h	预处理软化+膜浓缩+MVR 蒸发结晶工艺
5	湖北能源集团鄂州电厂	20m³/h	低温烟气余热蒸发

5.2 广东河源电厂 2×600MW 机组废水零排放工程

5.2.1 项目概况

广东河源电厂位于河源市埔前镇，在河源市区南面 25 公里。本期工程烟气脱硫系统采用石灰石-石膏湿法脱硫工艺，根据国家环保局环评批复要求，需对其工艺产生的脱硫废水进行零排放处理，正常情况下不外排。另外为满足全厂废水零排放的要求，凝结水精处理再生酸碱废水需送至脱硫废水处理系统，与脱硫废水混合后一并处理后进入末端蒸发结晶处理系统，结晶盐类成品打包外销。

5.2.2 工艺介绍

本工程脱硫废水等高盐废水采用两级软化澄清+四效立管强制循环蒸发低温多效（MED）蒸发结晶。

1）预处理

预处理需要处理的为两种水质：一种是脱硫废水（水量为 20m³/h）；另一种是凝结水精处理再生废水（水量为 2m³/h）。水质分别如表 2、表 3 所示。

表 2　脱硫废水水质

项目	单位	结果	项目	单位	结果
pH		5.7	NO_3^-	mg/L	100～1000
TDS	mg/L	28960～56221	Mg^{2+}	mg/L	5247～5411
SS	mg/L	10234～10865	Ca^{2+}	mg/L	4925～4933
Cl^-	mg/L	12305～18873	NH_3-N	mg/L	5～50
SO_4^{2-}	mg/L	5633～24321	COD	mg/L	100
F^-	mg/L	50～200	SiO_2	mg/L	～200

表 3　精处理再生废水水质

项目	单位	结果	项目	单位	结果
pH		6～9	全铁	mg/L	15～30
TSS	mg/L	1～10	NH_4^+	mg/L	65～500
Cl^-	mg/L	～24500	Na^+	mg/L	16000
COD	mg/L	1～2			

本方案采用的预处理工艺为两级沉淀处理工艺，一级混凝沉淀达到达标排放的目的，二级混凝沉淀达到蒸发系统进水指标的要求。

间歇排放的精处理废水进入均量调解池，池内设预曝气系统以达到混合搅拌及预曝气目的，然后与脱硫废水一起进入调节池。调节池内废水均匀进入反应池 1，池内加入石灰以调整其 pH 值在 10～10.5 左右，大部分重金属、Mg^{2+}、及 F^-等与石灰进行反应生成沉淀被去除，混合液进入反应池 2，向反应池 2 内加入有机硫溶液，以去除残余的重金属离子，再加入铁系混凝剂和有机高分子絮凝剂，在机械搅拌澄清池 1 内完成固液分离。澄清池 1 内生成的污泥一部分回流到反应池 1，利用石膏晶种法的原理，去除其中的过饱和石膏，另一部分进入污泥浓缩池进行污泥浓缩，浓缩池内上清液回流到反应池 1 进行再处理，浓缩污泥则由厢式压滤机进行固液分离，压滤液同样回流进入反应池 1 进行再处理，压滤形成的泥饼外运处置。经过上述处理工序，废水的污染指标中除 pH 外可以达到排放要求，因此澄清池 1 上清液进中和水池，用盐酸调节其 pH 为 6～9，然后进入二级澄清或达标排放。

澄清池 1 上清液进入反应池 3，向池内加入 Na_2CO_3，以去除易引起后续深度蒸发处理系统结垢的 Ca^{2+}离子，反应池 3 出水进入机械搅拌澄清池 2 进行固液分离，沉淀污泥中含有大量 $CaCO_3$，可回流到烟气处理系统回用；澄清池 2 的上清液进入中间水池，此时出水的 pH 为 10～10.5，Ca^{2+}浓度降到 1000mg/l，一部分水用于石灰浆制备，其余水经过 pH 回调池，用盐酸将 pH 调整到 8.5～9.0，作为蒸发系统进水。

图 2　一级混凝澄清

图 3　二级混凝澄清

预处理经两级混凝沉淀处理后，一级混凝沉淀（用于非正常工况排放）和二级混凝沉淀（用于蒸发系统进水）的出水水质指标见表 4。

表 4　预处理系统各级出水水质

项目	单位	一级混凝澄清	二级混凝澄清	备注
pH		～10	8.5～9.0	
TDS	mg/L	39000	40000	
SS	mg/L	70	70	
Ca^{2+}	mg/L	1000	100	
Mg^{2+}	mg/L	50	50	
Cl^-	mg/L	18000	20000	
SO_4^{2-}	mg/L	1800	1800	
HCO_3^-	mg/L	0	100	
F^-	mg/L	30	30	
NH_3-N	mg/L	10	10	
COD_{cr}	mg/L	90	90	
全铁	mg/L	10	10	
SiO_2	mg/L	50	50	

2）多效蒸发浓缩装置

预处理出水利用蒸发系统余热经预热后，依次进入一至四效蒸发结晶器进行蒸发浓缩结晶。末效盐浆经增稠器和离心机实现固液分离，分离出来的液体回到系统再循环处理，固体颗粒经干燥器干燥后包装外运。电厂来的新蒸汽作为系统的初始热源，前一效产生的二次蒸汽可作为后一效的加热蒸汽；通过公高效气液分离器，对二次蒸汽中的液滴分离效率高达万分之三，能确保系统产生的二次蒸汽冷凝水出水水质，稳定达到 GB/T19923—2005《城市污水再生利用 工业用水水质》中敞开式循环冷却水补充水的要求，送到电厂作为循环水补充水。系统产生的结晶盐纯度、白度均预达到工业盐要求。

多效蒸发技术（MED）是将蒸汽的热能进行循环并多次重复利用，以减少热能消耗，降低成本。加热后的盐水在多个串联的蒸发器中蒸发，利用前效蒸发产生的二次蒸汽，作为后效蒸发器的热源，后效中水的沸点温度和压力比前效低，效与效之间的热能再生利用可以重复多次。一般最多只做到四效，四效后蒸发效果就很差。四效蒸发器工艺流程如图 4 所示。

不管是单效蒸发还是多效蒸发，蒸发过程需要消耗大量的蒸汽，对于四效蒸发，1 吨水大约需要消耗 0.3 吨的蒸汽。多效蒸发把前效产生的二次蒸汽作为后效的加热蒸汽，但第一效仍然需要不断补充大量新鲜蒸汽，并且末效产生的二次蒸汽还需要冷凝水冷凝，整个蒸发系统比较复杂。另外，效数增加，设备费用会相应增加，每一效的传热温差损失也会增加，使得传热温差减小，设备的生产强度下降。

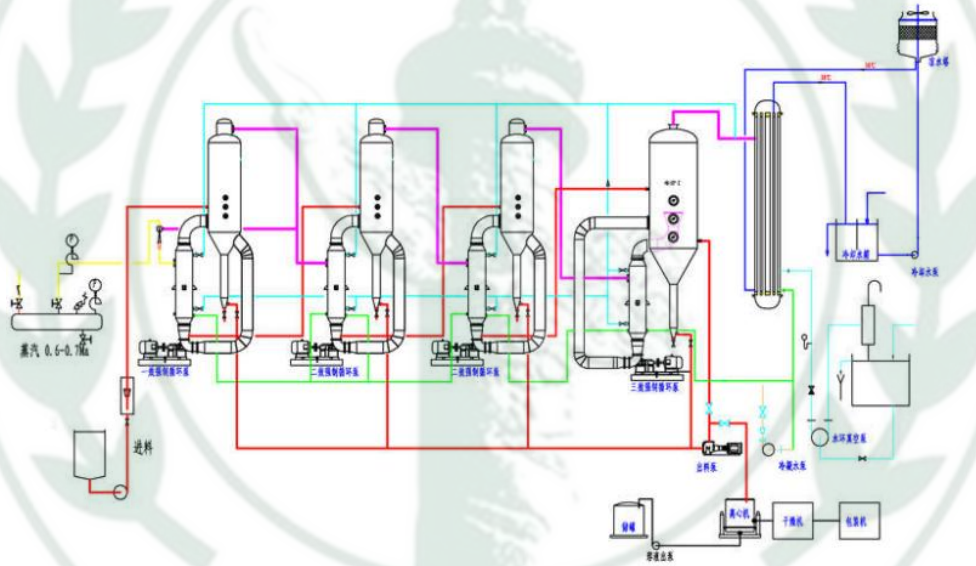

图 4　四效蒸发器工艺流程图

5.2.3 现场实际运行情况

经过现场实地考察及与运行人员讨论，得出的结论如下。

1）河源电厂废水零排放系统实施方案为二级软化澄清+四效立管强制循环蒸发低温多效（MED）蒸发结晶，相当于两效蒸发+两效结晶。

2）通过运行统计，该系统实际废水处理量为 240~360m^3/d，产生约 50 吨泥饼（灰场抛弃，非溶解固体废物），工业盐约 3～4t/d（出售）；每处理 1m^3 废水，消耗蒸汽约 300kg，耗电约 30kW.h，能耗较高。

3） 该项目建成总投资约为 9750 万元，总占地 3 千平方米。

5.3 焦作万方电厂 2×350MW 机组废水零排放工程

5.3.1 项目概况

盛发环保科技（厦门）有限公司于 2015 年 9 月投资建设运营的焦作万方电厂 2×350MW 机组脱硫废水旁路烟道蒸发工程正式投运。

5.3.2 工艺流程

脱硫废水旁路烟道蒸发技术是将脱硫废水经过软化及膜浓缩处理后的浓水通过双流体雾化喷枪在旁路烟道内雾化蒸发。废水液滴蒸发的热源为从空预器前端烟道引入的少量高温烟气，利用烟气热量，使雾化后的废水液滴瞬间完全蒸发。废水蒸发后产生的结晶盐和水蒸气与粉煤灰一起进入除尘器前端烟道。结晶盐随粉煤灰一起被除尘器捕捉去除，水蒸气则进入脱硫系统，在脱硫系统喷淋冷却作用下凝结成新鲜水回收利用，从而实现脱硫废水的“零排放”。脱硫废水旁路烟道蒸发“零排放”处理的工艺流程如图 5 所示。

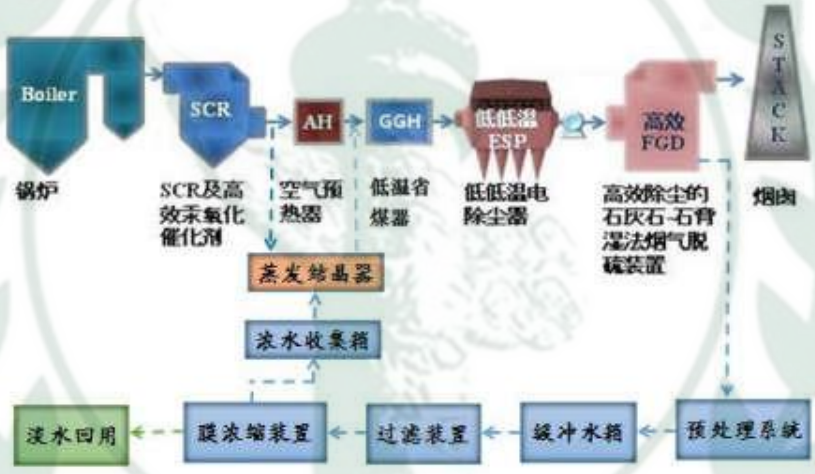

图 5　旁路烟道蒸发工艺流程图

脱硫废水进入集水池后，针对进水悬浮物、钙、镁、硫酸根离子含量过高的特点，通过向反应箱中投加石灰乳、碳酸钠、液碱及混凝絮凝药剂，分别与水中的钙、镁离子反应生成氢氧化物、碳酸化合物沉淀，去除水中的硬度离子、悬浮物及各类重金属等，絮凝后的络合物、沉淀物、以及固体悬浮物形成的大颗粒物质经澄清器实现固液分离。

沉淀池的污泥经污泥收集池收集浓缩后送到板框压滤机进行脱水处理，形成含固量约为 60%-70%的泥饼，泥饼外运处理或者掺煤燃烧，滤液回至废水集水池。经预处理后的脱硫废水，去除水中大部分的钙、镁、硫酸根及重金属，可部分直接回用至脱硫系统进行循环利用，控制脱硫系统浆液内氯离子在 15000mg/L 左右。

经两级软化后的脱硫废水由中间水箱收集，用盐酸调整 pH 至中性，经多介质过滤器去除微小悬浮颗粒物后输送至超滤系统。

多介质过滤器及超滤系统处理后废水 SDI＜3，达到反渗透膜进水水质要求。反渗透膜采用海水淡化膜，系统脱盐率≥97%，系统回收率≥60%；反渗透产生的 60%的淡水直接回用于脱硫系统或者工业用水，40%的浓水进入旁路烟道蒸发系统蒸发处理。

脱硫废水零排放系统装置主要由以下六个子系统组成：1）预处理系统；2）过滤系统；3）超滤系统；4）反渗透系统；5）蒸发结晶器系统；6）自动控制系统。

5.3.3 项目运行情况

焦作万方电厂脱硫废水量为 20m³/h，改造项目设置废水软化及浓缩车间，占地面积约为 25m×20m，约 500m²。脱硫废水旁路烟道蒸发系统如图 6 所示，旁路烟道布置在现有 SCR 出口至空预器出口竖直烟道旁边，不再占用厂区地面，旁路烟道截面为椭圆形，高约 10m，截面积约为 2m²。整个系统的改造施工周期约为 6 个月，停机时间一周左右即可。

根据工艺设计，经过双碱软化处理后的脱硫废水进入“超滤-海水反渗透”膜浓缩系统，膜浓缩系统产生的浓水水量为 8m³/h，浓水再平均分配至 2 台机组的 4 套旁路烟道蒸发系统，每套蒸发系统消纳量为 2m³/h。根据现场监控数据，目前 2 套旁路烟道蒸发系统投入运行，处理水量分别为 0.7m³/h 和 1.73m³/h，外引高温烟气量分别为 9800Nm³/h 和 24960Nm³/h。脱硫废水浓水在旁路烟道内蒸发后，烟气温度由 331℃降低到 148℃。每套旁路烟道蒸发系统设置 2 支雾化喷枪，单支喷枪的最大喷水负荷为 1.2m³/h，运行压力为 6.7bar；喷枪雾化压缩空气的运行压力为 6.5bar，压缩空气流量为 6m³/min。

图 6　脱硫废水旁路烟道蒸发系统图及雾化效果图

焦作万方电厂 20m³/h 脱硫废水采用“双碱法+双膜法+旁路烟道蒸发”处理系统的系统投资约 3500 万元，年药品消耗费用约 172.8 万元，电费成本约 100.8 万元。

5.4 国家电投集团（商丘）民生热电厂废水零排放项目

5.4.1 项目概况

商丘民生热电厂脱硫废水零排放项目由国家电投集团远达水务公司总承包，采用低温多效闪蒸浓缩+高温旁路干燥蒸发技术。该电厂脱硫废水零排放项目设计处理能力为 30m³/h，处理工艺主要包括废水进料系统、闪蒸浓缩系统、冷却水系统、浓缩液干燥系统等。

5.4.2 工艺流程

1）废水进料系统

该系统主要包括废水缓冲池、废水给料泵、罗茨风机等。废水系统的进水由废水旋流器溢流至 2 座 500m³ 的废水缓冲池，由废水给料泵输送至 A/B 列的闪蒸浓缩系统。废水缓冲池采用罗茨风机曝气方式防止沉淀。

图 7　废水缓冲池

2）闪蒸浓缩系统

该系统设计进水量 30m³/h，产水量 26m³/h，浓浆液量为 4m³/h，按两列设置，单列进水量为 15m³/h。主要包括蒸发器、分离器、强制循环泵、增稠器、真空泵系统、凝结水系统、地坑系统等。废水经进料系统的废水给料泵输送至 A/B 列的一效分离器，热源主要由两台机组引风机汇合烟道上设置的烟气换热器供给进入一效蒸发器，蒸汽在一效蒸发器内与一效强制循环的废水进行热交换，加热后的脱硫废水进入抽真空的一效分离器内进行低温闪蒸，通过抽真空产生压差，依次进入二、三效分离器内进行低温闪蒸。水浓缩率最大可达到 90%，并可在一定范围内自动可调，最高可浓缩到 3m³/h，实现脱硫废水的浓缩减量。闪蒸浓缩过程中产生的水蒸汽，经过凝结后可直接回收至本系统的冷却塔系统或其它用途补水。

图 8　三效蒸发系统

3）冷却水系统：

设置一套机械通风冷却塔系统，冷凝系统的冷却水由机械通风冷却塔循环水泵进行循环冷却供给，凝冷器回水回至机械通风冷却塔系统，冷却塔循环排污通过集水坑泵，再排至脱硫塔地坑系统。

4）旁路烟道干燥系统

该系统采用高温烟气旁路干燥，将浓缩浆液进行雾化干燥结晶，设计处理能力为 5m^3/h，分两套独立单元（每台锅炉机组各配一套），每套处理能力 2.5m^3/h。主要包括浓液输送系统、浓液干燥塔、管式除尘装置、压缩空气装置、输灰装置等。该系统闪蒸浓缩后的脱硫废水在增稠器内通过溢流至浓液池，通过一级浓液输送泵送至干燥塔附近的浓液箱，再通过浓液箱配套的二级浓液输送泵与压缩空气一起喷入干燥塔内。浓液通过与电厂空气预热器前端抽取的热烟气混合，实现脱硫废水的干燥蒸发，干燥蒸发后的烟气经过管式除尘器后、由干燥引风机送入除尘器前主烟道，被管式除尘器及干燥塔收集下的固体粉尘经过气力输灰系统送入渣仓内，实现脱硫废水零排放。高温烟气“浓液干燥”是利用空预器前烟气，把低温闪蒸浓缩后的脱硫废水与压缩空气一起喷入浓液干燥塔内进行干燥，通过设置管式除尘器把70%-80%的干燥物收集下来，再通过气力输送的形式送至渣仓，干燥后的烟气回到除尘器前主烟道内，从而达到脱硫废水零排放。

图 9　旁路烟道干燥系统

5.4.3 调研总结

1）该电厂脱硫废水零排放采用低温多效闪蒸+高温旁路烟道干燥蒸发的工艺路线，在一年的运行时间内，能够长期连续稳定运行，同时未对电袋除尘器造成不良影响。

2）该电厂在干燥塔尾端设置管式除尘器，使得进入飞灰系统的盐份不超过 30%，其余进入渣中，该电厂相关人员反馈渣同样可进行销售，但价格较低；粉煤灰满足最终掺入水泥中（掺入量按 20%-40%计）的氯离子不超过 0.06%的限值，粉煤灰可正常销售。

3）该电厂在设计磨细后的飞灰入口时，设计在垂直烟道处，但经过实际测试，垂直烟道容易积灰，造成堵塞。建议设计时同样考虑此问题。

4）该厂#1 机检修期间对多效闪蒸第三效进行检查，未发现内部有堵塞和板结现象，只有少量泥。

5.5 国家能源集团湖北公司汉川电厂废水零排放项目

5.5.1 项目概况

汉川电厂一、二期工程装机容量为 4×330MW，分别于 1991 年和 1998 年建成投产。三期扩建工程拟建设 2×1000MW 超超临界燃煤机组。常规处理对脱硫废水进行中和（碱化）、絮凝处理后，送至澄清池/浓缩池，出水在清水箱内加酸调节合格。澄清/浓缩池底部排泥经污泥输送泵送至脱水机，产生的泥饼外运。

本工程 1~6 号机组烟气脱硫系统均采用石灰石-石膏湿法脱硫工艺。1~6 号机组脱硫废水量共计 36m^3/h，已按常规方案即采用“中和（碱化）+絮凝+澄清”方案建成并投运。

5.5.2 工艺流程

脱硫废水零排放系统方案为“预处理软化+膜浓缩处理+蒸发结晶干燥”工艺，各单元工艺流程如下。

1）预处理软化

预处理软化工艺流程如图 7 所示。经预处理达标排放的脱硫废水进入废水收集池进行收集和均质处理，考虑到脱硫废水水质水量的波动，废水收集池设计为两格，分别安装空气搅拌器，采用序批式进水方式。一格池子进水完毕后自动切换至另一格池子进水，池内废水经充分搅拌均质后，经提升泵提升至机械加速沉淀池内添加石灰、氯化钙，进行初步软化处理，形成硫酸钙、氢氧化镁的沉淀物，同时氢氧化镁携带二氧化硅形成共沉淀；沉淀池出水自流进入反应槽 1，继续补充添氢氧化钠，对 pH 进行精调，pH 值控制在 11.5 左右，使氢氧化镁沉淀更加完全。反应槽 1 出水进入反应槽 2，加入碳酸钠溶液，与沉淀池出水中残余的钙离子反形成碳酸钙沉淀，混合液进入浓缩槽，由循环泵输送至管式膜进行固液分离，此时大流量的水在浓缩槽和管式超滤膜之间循环，部分膜透过水则经投加盐酸进行 pH 调整后送至纳滤原水箱短期贮存，两级反应槽均设置机械搅拌和 pH 监控。

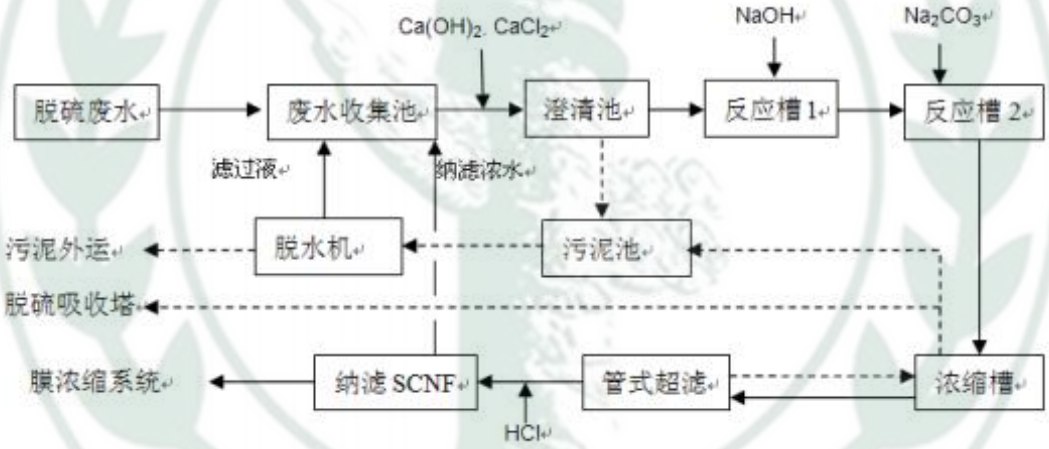

图 10　预处理工艺

系统设置管式超滤膜系统 2 套，单套处理量 28.4m³/h，配套相的化学清洗、加药装置。管式超滤产水经提升后进入纳滤装置进行分盐处理。

系统设置 SCNF 纳滤设备 2 套，单套设计出力 22m³/h，设计进水水质条件下回收率 80%。纳滤产水进入后续膜浓缩处理段，纳滤浓水回流至废水收集池与原水混合后进入软化预处理系统，为防止硫酸根离子在系统内富集，采用投加石灰和氯化钙的方式生成硫酸钙沉淀，使硫酸根从体系内排出。

澄清池产生的污泥主要成份为硫酸钙及氢氧化镁，经污泥脱水后作为一般固废处理。管式超滤所产生的污泥主要成分为碳酸钙，含固率 5%左右，这部分污泥优先考虑回收利用作为脱硫系统的脱硫剂，其次可与前段污泥一起经脱水处理后作为一般固废处置。

2）膜浓缩处理单元

膜浓缩处理单元是本方案的核心部分，为了减少结晶器进水量，浓缩部分要求把 36m³/h

脱硫废水进行浓缩，最终满足结晶系统进水水质要求。工艺流程如下：

图 11　膜浓缩装置

膜浓缩处理处理单元由特殊流道高盐反渗透装置、高压反渗透装置、反渗透装置及配套设备组成。软化预处理单元来经纳滤分盐处理后的软化水（含氯化钠 98%以上）TDS27900mg/L，进入 SCRO 反渗透进行初步浓缩减量。本方案 SCRO 系统采用两段式设计，系统设置 SCRO 一段装置 2 套，单套产水 8.8t/h，设计进水水质条件下系统回收率 40%；设置 SCRO 二段装置 1 套，产水能力 8t/h，回收率 33.5%。系统配套相的清洗加药及能量回收系统。

SCRO 排浓水 TDS 达到 59200mg/L 左右，浓盐水提升进入高压反渗透 DTRO，进一步浓缩 TDS 至 118400mg/L，水量减量至 8t/h。本工程设置 DTRO 高压反渗透 2 套，单套设计产水量 4.5t/h，浓水进入蒸发结晶处理单元进行蒸发结晶处理。

由于 SCRO 及 DTRO 产水 TDS 大于 500mg/L，本工程设置 2 套 BWRO 反渗透装置对 SCRO 产水及 DTRO 产水进行进一步脱盐处理，单套处理能力 18.1t/h，以满足回用要求。BWRO 反渗透浓水回收至 SCRO 进行处理。

图 12　管式超滤、SCNF 膜、DTRO

3）结晶干燥单元

经膜浓缩处理后产生的浓盐水含盐量达到 118400mg/L 以上，水量减量至 8t/h 左右，经软化预处理及分盐提纯处理后，废水中盐分 97.5%以上为氯化钠。这部分浓盐水进入蒸发结晶系统处理后，结晶盐析出，之后由流化床干燥并打包，固液分离，真正实现零排放，冷凝

水回用，结晶盐外卖。本工程采用的蒸汽机械压缩再循环（MVR）技术作为蒸发结晶核心工艺，主要工艺流程如下图所示。

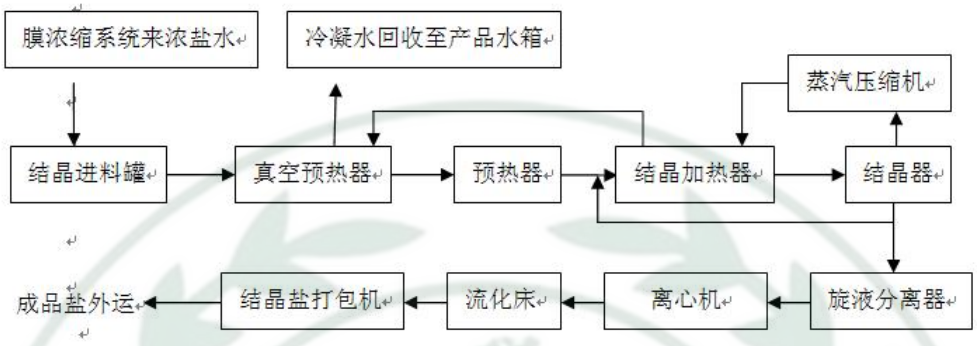

图 13　结晶干燥单元工艺流程图

蒸发结晶处理单元设计处理能力 8t/h，膜浓缩系统来浓盐水进入结晶进料罐，由泵提升进入真空预热器预热后脱除废水中的不凝气，之后进入蒸汽预热器对废水进行预加热。预热器出水进入结晶循环泵进口，与结晶器循环浆液混合、均质后进入结晶加热器，通过蒸汽换热升温至沸点温度，升温后的浓盐水进入结晶器进行闪蒸，产生的二次蒸汽经过除雾器脱除所夹带的雾滴、飞沫后由结晶器顶部引出，引出的二次蒸汽通过蒸汽压缩机加压升温后作为结晶加热器的加热介质，二次蒸汽经热交换后凝结成蒸馏冷凝液，冷凝液经蒸汽预热器换热将所含热量传递给进入蒸发系统浓盐水，降温后的冷凝液回收至产品水箱。结晶器内剩余浓盐水一部分输送至旋液分离器，出料进入离心脱水机，另一部分返回结晶循环泵入口浓晶浆经离心脱水机固液分离后产生的含水率小于 10%的固体盐，然后由螺旋输送机送至流化床进行干燥处理，使结晶盐含水率降至 0.3%以下。蒸发干燥系统成品盐达到 GB/T 5462-2015《工业盐》标准所规定的精制工业盐二级标准。

4）结晶盐干燥包装设备

结晶盐干燥系统包括干燥/冷却流化床、鼓风机、空气加热器、引风机、旋风分离器、湿式除尘器等，用以实现物料干燥脱水/冷却功能。湿物料经输送装置进入流化床，经流化床热空气使其产生正常的流态化，由热风提供热量，使水分蒸发，干燥后的物料进入流化床冷却段，由自然空气使其产生正常的流态化，由自然空气提供冷量，使物料冷却，经冷却后自内加热流化床排料口排出进入斗提机，经斗提机提升进入料仓，再进入包装工序。采用双级气动加料系统，给料速度双速可调，采用控制用户料仓出料阀门，实现包装速度和精度的自动控制，电子平台计量型称重方式，性能稳定可靠。灌装时只需人工上袋，给定信号后，便可完成自动灌装、自动计量、满称时自动停机、松袋的工作循环，由叉车输出后储运，最

终产品为 1000kg 袋装工业氯化钠。

5.5.3 调研总结

针对此种废水零排放工艺，纳滤实现了分盐，SCRO 以及 DTRO 实现了浓缩，减小了结晶器的出力，运行安全可靠，产出结晶盐颜色白皙，纯度高。但由于 SCRO 浓缩后含盐量较高，DTRO 浓缩段运行压力较高，达到 150 公斤左右，设备安全稳定性存在隐患。另一个存在问题为脱硫废水水量水质不稳定，调节水池应尽量做大，起到调节及稳定水质作用。预处理及软化阶段加药要精细控制，否则结晶器制盐品质、纯度受影响。

6 主要技术内容及说明

6.1 内容

检测与控制中对日常分析检测项目，采用列表的方式分别列举，根据混凝澄清的技术特点确定水温、pH、悬浮物、浊度主要测试项目；根据膜法浓缩减量系统技术特点，确定 pH、SDI、电导率、TDS、COD、ORP、Ca^{2+}主要测试项目；根据热法浓缩减量系统技术特点，确定 pH、浊度、电导率、TDS、Cl^-、Ca^{2+}为主要测试项目； 根据蒸发结晶系统技术特点，确定水温、pH、电导率、TDS、Cl^-、Ca^{2+}为主要测试；按照《工业盐》（GB/T 5462）结晶盐品质分级要求，选取结晶盐中水分、氯离子、硫酸根离子、钙镁离子、水不溶物作为结晶盐应测项目；根据烟气蒸发干燥系统技术特点，确定水温、pH、电导率、TDS、Cl^-、Ca^2为主要测试项目；含盐粉煤灰是烟气蒸发干燥工艺的副产物，本标准将含盐粉煤灰产量及成份作为烟气蒸发干燥系统的应测项目，参考《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》（GB/T 1596）中关于粉煤灰的理化性能要求，选取含湿量、氯离子作为含盐粉煤灰应测项目。。

7 标准实施的环境效益与经济技术分析

无

8 标准实施建议

本标准发布后，可为火电厂高盐废水零排放处工程提供技术依据。建议标准发布后，作为一种推荐标准实施，在行业主管部门、发电公司、设计院、研究院、工程公司等相关单位进行广泛宣贯。