

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.02.017

# 循环冷却水排污水除硬脱盐强化预处理工程实践

陈永飞<sup>1</sup>, 马莉<sup>2</sup>, 涂康妹<sup>1</sup>

(1. 杭州永湛环境科技有限公司, 浙江 杭州 311121; 2. 煤炭工业太原设计研究院集团有限公司, 山西 太原 030024)

**摘要:** 工业循环冷却水排污水属于难处理的工业废水。某热电联产有限公司循环冷却水排污水存在水量大、硬度高、总磷高、难生化降解等问题。为合理配置水资源,减少原水使用量,加大中水回用力度,采用高密度沉淀池/臭氧催化氧化/曝气生物滤池(BAF)组合工艺强化预处理循环冷却水排污水。通过该工艺处理,出水COD从134 mg/L降至55 mg/L,TP从3.64 mg/L降至0.61 mg/L,总硬度降低约1/2(从728 mg/L降至385 mg/L),其中COD和TP达到《合成树脂工业污染物排放标准》(GB 31572—2015)中新建企业直接排放限值,总硬度达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)。排污水的预处理成本为1.45元/m<sup>3</sup>,远低于园区供水水价(3.62元/m<sup>3</sup>)。

**关键词:** 循环冷却水排污水; 强化预处理; 回用水; 总磷; 硬度; 高密度沉淀池; 臭氧催化氧化; 曝气生物滤池

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)02-0105-05

## Engineering Practice of Enhanced Pretreatment of Recirculating Cooling Sewage by Dehardening and Desalting

CHEN Yong-fei<sup>1</sup>, MA Li<sup>2</sup>, TU Kang-mei<sup>1</sup>

(1. Hangzhou Yongzhan Environmental Technology Co. Ltd., Hangzhou 311121, China; 2. Coal Industry Taiyuan Design and Research Institute Group Co. Ltd., Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** Industrial recirculating cooling sewage is difficult to treat. The recirculating cooling sewage of a cogeneration company faced problems such as large water volume, high hardness, high total phosphorus (TP), refractory and biorefractory content. To allocate water resources rationally, reduce the use of raw water, and increase the reuse of reclaimed water, a combined process of high-density sedimentation, ozone catalytic oxidation, and biological aerated filter (BAF) was adopted to enhance the pretreatment of recirculating cooling sewage. By this process, effluent COD was reduced from 134 mg/L to 55 mg/L, TP from 3.64 mg/L to 0.61 mg/L, and total hardness was reduced by half from 728 mg/L to 385 mg/L, respectively. Notably, the COD and TP met the direct discharge limits for new enterprises specified in the *Emission Standard of Pollutants for Synthetic Resin Industry* (GB 31572-2015), and the total hardness complies with the *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749-2022). The pretreatment cost of the sewage was 1.45 yuan/m<sup>3</sup>, significantly lower than the water supply fee of 3.62 yuan/m<sup>3</sup> in the industrial park.

**Key words:** recirculating cooling sewage; enhanced pretreatment; reclaimed water; total phosphorus; hardness; high-density sedimentation tank; ozone catalytic oxidation; biological aerated filter (BAF)

循环冷却水在工业用水中占比较高,特别是石油化工、电力、钢铁、冶金等行业循环冷却水的用量占其用水总量的50%~90%。原水中含盐、钙、镁等离子会导致设备出现腐蚀、结垢等问题<sup>[1]</sup>。循环冷却水浓缩到一定倍数(通常为2.5~3倍)必须排出一定的浓水,并补充新水<sup>[2-3]</sup>。浓水即为循环冷却水排污水,由于水量大,必须经过除硬脱盐系统净化后,再返还循环冷却水池补水。

目前除硬脱盐系统主要处理工艺有:超滤+反渗透法,纳滤(脱盐),电渗析、电吸附(脱盐);离子交换树脂法(除硬);药剂软化法(投加化学药剂除硬)等<sup>[3]</sup>。

地表水用作循环冷却水,除含盐外,还含有一定的有机物,因此在经过浓缩后会引发排污水COD超标。为防止设备、管道等受盐分腐蚀,循环冷却水系统经常采用含有磷的缓蚀剂,因此排污水中总磷浓度也偏高<sup>[4]</sup>。

为保障除硬脱盐系统稳定运行并延长使用寿命,通常会对排污水进行针对性的强化预处理,目前主要做法有:混凝澄清(投加除磷剂除磷,投加石灰、烧碱、纯碱除硬度)<sup>[5]</sup>;投加药剂(投加氧化剂去除有机物或杀菌,投加还原剂还原氧化性杀菌剂,投加阻垢剂延缓系统的结垢等)<sup>[6]</sup>。在降解有机物、防止微生物滋生污染方面,目前的预处理工艺还有所欠缺。

为此,针对有机物和TP含量较高的循环冷却水排污水,开展了高密度沉淀池、臭氧催化氧化以及曝气生物滤池(BAF)组合工艺高效降解有机物和去除TP的研究及实践,取得了较好的效果,可供类似项目参考。

## 1 废水水量、水质及排放标准

某热电联产有限公司(热电厂与聚酯切片-涤纶联产)以地表水作为循环水的来源,循环冷却水排污水主要污染物为有机物、总磷及硬度等,具有水量大、难以生化处理等特点。设计水量为890 m<sup>3</sup>/h,污水经预处理后,除总硬度要求达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)外,其余水质指标需达到《合成树脂工业污染物排放标准》(GB 31572—2015)中新建企业直接排放限值,达标后再进入双膜系统进行脱盐处理。

设计进、出水水质见表1。

表1 进水水质及排放标准

Tab.1 Influent quality and discharge standard

项目	COD/ (mg·L <sup>-1</sup> )	TP/ (mg·L <sup>-1</sup> )	总硬度/ (mg·L <sup>-1</sup> )	SS/ (mg·L <sup>-1</sup> )	pH
循环冷却水排污水	≤150	≤4	≤800	≤10	6.5~8.5
排放标准	≤60	≤1	≤450	≤30	6~9

## 2 处理工艺

### 2.1 工艺流程

由于循环冷却水排污水中存在有机物,碳酸盐硬度及总磷较高,因此采用循环冷却水排污水→排污水调节池→高密度沉淀池→臭氧催化氧化池→氧化稳定池→BAF→回用调节池的强化预处理工艺(见图1),处理后总硬度达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022),其余水质指标达到《合成树脂工业污染物排放标准》(GB 31572—2015)中新建企业直接排放限值要求,达标后进入双膜回用处理系统。

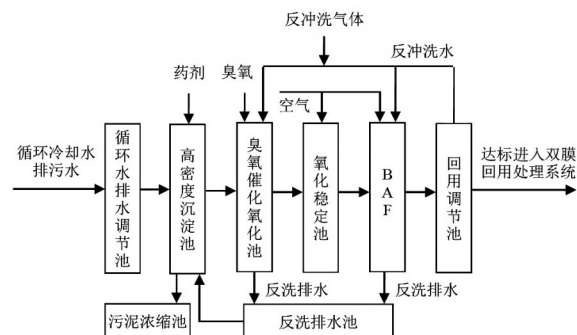


图1 循环冷却水排污水处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of treatment process for recirculating cooling sewage

高密度沉淀池采用烧碱(氢氧化钠)软化并投加絮凝剂降低总硬度、TP和SS,pH控制在8左右。循环冷却水排污水在调节池中均质均量后,经泵提升进入高密度沉淀池,通过投加药剂进行混凝反应沉淀,降低水中总硬度、TP,并削减水中的胶体物质和SS。

污水经高密度沉淀池去除总硬度、TP和SS后,进入臭氧催化氧化池。臭氧催化氧化具有很强的氧化还原效果,能加快氧化反应的进行,从而达到分解和降低有害物质的目的。溶解于水中的臭氧直接或在催化剂作用下产生羟基自由基与水中有机物反应,对有机物进行氧化或部分氧化,出水自

流进入氧化稳定池,待污水中的氧化剂分解后自流进入BAF,进一步进行生物处理。

BAF用来处理经臭氧催化氧化处理后的废水,附着的微生物通过吸附截留和氧化分解作用对有机物进行降解,处理出水效果好、抗负荷冲击能力强、氧传输效率高、水质稳定。BAF出水自流进入回用调节池,达标后进入“双膜”(超滤-反渗透)回用处理系统。

臭氧催化氧化池和BAF均需要定期清洗(水洗、气洗、气水联合反冲洗),分别排除过滤黏泥、臭氧杀菌产生的黏泥和生化处理的剩余污泥,系统设置反洗排水池,臭氧催化氧化池和BAF反洗排水自流进入反洗排水池,经泵提升排至高密度沉淀池进水端进行循环处理。

高密度沉淀池产生的污泥经污泥提升泵提升进入污泥浓缩池,浓缩后的泥水混合物经螺杆泵提升进入叠螺机脱水,脱水后的污泥进入企业自身热电厂内部进行焚烧处理。

## 2.2 主要构筑物及设计参数

### ① 循环水排水调节池

钢筋混凝土结构,有效容积为 $2\,223\text{ m}^3$ ,停留时间为 $2.5\text{ h}$ 。配备污水提升泵3台(2用1备),流量 $450\text{ m}^3/\text{h}$ ,扬程 $110\text{ kPa}$ ,功率 $30\text{ kW}$ ,将循环冷却水排污水调节池的水提升至高密度沉淀池;双曲面搅拌机2台,功率 $7.5\text{ kW}$ ,叶轮直径 $2.8\text{ m}$ ;设超声波液位计1台。

### ② 高密度沉淀池

钢筋混凝土结构,2座并联运行,表面负荷 $3.36\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。配备反应器2台,规格 $\text{Ø}3.5\text{ m}\times 4.5\text{ m}$ ;快速混合器2台,功率 $7.5\text{ kW}$ ,用于反应区搅拌;中心传动刮泥机2台,直径 $13\text{ m}$ ,功率 $0.75\text{ kW}$ ,将沉淀池底部周边污泥刮至中间,便于排泥;斜管及支架 $265.2\text{ m}^2$ ,斜管斜长 $1\text{ m}$ ,内切圆直径 $\text{Ø}60\text{ mm}$ ,有助于提高表面负荷率;污泥泵4台(两两互备),流量 $30\text{ m}^3/\text{h}$ ,扬程 $150\text{ kPa}$ ,功率 $3\text{ kW}$ ,通过污泥回流保持稳定的悬浮污泥层,有助于提高表面负荷率;泥位计2台。配备加药系统3套,分别投加碱、PAC和PAM。

### ③ 臭氧催化氧化池

钢筋混凝土结构,8座并联运行,单座尺寸为 $6\text{ m}\times 6\text{ m}\times 6.5\text{ m}$ ,催化剂为粒径 $\text{Ø}3\sim 5\text{ mm}$ 的非均相金属离子基负载型,填充高度 $3.09\text{ m}$ ,总有效容积 $890$

$\text{m}^3$ ,总表观停留时间 $1\text{ h}$ ,滤速 $3.09\text{ m/h}$ 。臭氧投加量为 $60\text{ mg/L}$ 。采用气水联合冲洗,反洗水由反洗供水泵提供,反冲洗后的水排入反洗排水池;反洗空气采用厂内压缩风;气冲洗强度为 $40\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ,水冲洗强度为 $20\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ;单座反冲洗气量为 $24\text{ m}^3/\text{min}$ ,单池反冲洗水量为 $720\text{ m}^3/\text{h}$ ,单池1次反冲理论上全部置换水量为 $216\text{ m}^3$ ,则该反冲洗强度下需要水冲洗 $18\text{ min}$ 。

### ④ 氧化稳定池

钢筋混凝土结构,有效容积 $849.6\text{ m}^3$ ,停留时间 $0.95\text{ h}$ 。为防止残留臭氧对后续BAF产生杀菌的不利影响,在稳定氧化池内设置曝气搅拌,加快残留臭氧的分解。设计曝气强度为 $0.6\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ ,曝气量为 $8.5\text{ m}^3/\text{min}$ 。

### ⑤ BAF

钢筋混凝土结构,8座并联运行,单座尺寸为 $6\text{ m}\times 6\text{ m}\times 6.5\text{ m}$ 。采用粒径为 $\text{Ø}5\sim 8\text{ mm}$ 的多孔高效填料,填充高度为 $3.09\text{ m}$ ,总有效容积为 $890\text{ m}^3$ ,总表观停留时间为 $1\text{ h}$ ,滤速为 $3.09\text{ m/h}$ 。采用气水联合反洗,反洗水由反洗供水泵提供,反冲洗后的水排入反洗排水池;反洗空气采用厂内压缩风;气冲洗强度为 $40\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ,水冲洗强度为 $20\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ;单座反冲洗气量为 $24\text{ m}^3/\text{min}$ ,单池反冲洗水量为 $720\text{ m}^3/\text{h}$ ,单池1次反冲理论上全部置换水量为 $216\text{ m}^3$ ,则在该反冲洗强度下需要水冲洗 $18\text{ min}$ 。

### ⑥ 回用调节池

钢筋混凝土结构,有效容积为 $1\,039.5\text{ m}^3$ ,停留时间为 $1.168\text{ h}$ 。配备反洗供水泵3台(2用1备),流量 $360\text{ m}^3/\text{h}$ ,扬程 $200\text{ kPa}$ ,功率 $37\text{ kW}$ ,用于臭氧催化氧化池和BAF的反冲洗。

### ⑦ 反洗排水池

臭氧催化氧化池和BAF瞬时反冲洗排水量大,因此建设反洗排水池用于收集反冲洗排水。反洗排水池为钢筋混凝土结构,池容为 $479.7\text{ m}^3$ 。配备反洗排污水提升泵2台(1用1备),流量 $360\text{ m}^3/\text{h}$ ,扬程 $105\text{ kPa}$ ,功率 $22\text{ kW}$ ,将反洗排水池的水提升至高密度沉淀池。

### ⑧ 污泥浓缩池

钢筋混凝土结构,2座直径 $8\text{ m}$ 浓缩池并联运行,污泥固体负荷为 $42.52\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。配备中心传动刮泥机2台,直径 $8\text{ m}$ ,功率 $0.55\text{ kW}$ ;集水堰板 $50\text{ m}$ ,板高 $300\text{ mm}$ 。污泥脱水处理系统1套。污泥量



估算:绝干污泥为 $0.2\text{ kg/m}^3$ ,干污泥量为 $4.272\text{ t/d}$ ,湿污泥量为 $213.6\text{ m}^3/\text{d}$ (浓缩污泥含水率98%)。以脱水污泥含水率80%计,则脱水后干污泥量为 $21.36\text{ t/d}$ 。

### 3 运行调试

#### 3.1 调试重点、难点

调试重点、难点:①对高密度沉淀池加药量和污泥回流比的控制,需达到混凝沉淀效果最佳,同时兼具经济性;②合理调控臭氧催化氧化池和BAF的运行周期,与整个污水处理工况适配。

臭氧催化氧化池和BAF并联运行,组数较多,控制阀较多,在自控设计过程中需合理安排正常运行、反冲水洗、气洗、气水联合反冲洗的时序。臭氧催化氧化池过程控制要求见表2。BAF过程控制要求与臭氧催化氧化池的不同之处在于少一路进气气动阀门操作,其余均相同。

表2 臭氧催化氧化池过程控制要求

Tab.2 Control demand for operation of ozone catalytic oxidation tank

项目	进水气动阀门	反洗进水气动阀门	反洗排水气动阀门	进气气动阀门	反洗进气气动阀门
正常运行	启	闭	闭	启	闭
反冲水洗	闭	启	启	闭	闭
气洗	闭	闭	启	闭	启
气水联合洗	闭	启	启	闭	启

臭氧催化氧化池和BAF运行方式均为:正常运行→气洗→气水联合反冲洗→水反冲洗(此循环为一个周期),每个周期暂设定为3 d(根据实际情况调整,程序设定可调),其中清洗时间(根据实际情况调整,程序设定可调)依次分别暂定为:气洗5 min,气水联合反冲洗5 min,水反冲洗10 min。

#### 3.2 问题分析及解决对策

调试运行过程中局部反冲洗剧烈,BAF出现“跑料”现象,分析原因主要有:①单格滤池跨度达到6 m,而未设置反冲洗均匀布水装置,当跨度较小时(一般为3~4 m以下),设置反冲洗均匀布水装置与否影响不大,但当跨度增大时,其不利影响显现;②为了保证滤板的强度,在其下方设置了支撑梁,跨度较大时支撑梁高度相应偏高,干扰了布水的均匀性。针对这些不足,一方面通过适当减少反冲洗

水量,另一方面在收水渠处设置滤网拦截滤料,进而降低不利影响,从而有效解决运行中的问题。

### 4 处理效果

该项目于2023年8月完成调试并正式投入运营,一直运行稳定。取2023年9月—2024年8月的水质监测平均数据,分析各主要处理单元的处理效果(见表3)。运行过程中平均水量约 $816\text{ m}^3/\text{h}$ 。

表3 各处理单元对主要污染物的去除效果

Tab.3 Removal effect on main pollutants by each

unit		mg·L <sup>-1</sup>	
项目	COD	TP	总硬度
进水	134	3.64	728
高密度沉淀池	119(11.2%)	0.93(74.5%)	385(47.1%)
臭氧催化氧化池	71(40.3%)	0.93	
BAF	55(22.5%)	0.61(34.4%)	

注:该处理系统对COD、TP和总硬度的去除率分别为58.96%、83.24%和47.10%;括号内的数据为该处理单元对相应污染物的去除率。

由表3可知,预处理后总硬度达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022),COD和TP稳定达到《合成树脂工业污染物排放标准》(GB 31572—2015)中新建企业直接排放限值要求。

### 5 技术经济分析

该工程总投资约6 650万元,其中土建投资1 800万元,工艺设备及管道材料等3 700万元,电气自控及线缆等350万元,施工安装800万元。

日常直接运行费用主要为电费、药剂费、人工费,合计约 $1.45\text{ 元/m}^3$ ,其中电费 $0.93\text{ 元/m}^3$ 、药剂费 $0.45\text{ 元/m}^3$ 、人工费 $0.07\text{ 元/m}^3$ 。污水处理直接运行费用远低于该园区的供水水价( $3.62\text{ 元/m}^3$ ),企业获取较大经济效益的同时,也降低了企业和园区污水排放总量。

### 6 结语

采用高密度沉淀池/臭氧催化氧化池/BAF组合工艺强化预处理循环冷却水排污水,能有效降低COD、TP、总硬度指标,COD和TP达到《合成树脂工业污染物排放标准》(GB 31572—2015)中新建企业直接排放限值,总硬度达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022),再进入“双膜”系统进行脱盐处理,脱盐后的水再返回循环冷却水池作为补水。

经过该工艺处理后,对循环冷却水排污水的COD平均去除率为58.96%,TP平均去除率为

83.24%,总硬度平均去除率为47.1%。

采用高密度沉淀池、臭氧催化氧化池以及BAF组合工艺处理循环冷却水排污水的预处理成本为1.45元/m<sup>3</sup>,若园区补充新水,则供水水价为3.62元/m<sup>3</sup>,可见,通过回用预处理后的排污水,有利于减少企业的经济投入,符合国家“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水政策。

#### 参考文献:

- [1] 高俊国. 探讨燃气电厂循环冷却水排污水处理技术[J]. 科技风, 2020(14): 157-158.  
GAO Junguo. Discussion of wastewater treatment technology for recirculated cooling water in gas power plants[J]. Technology Wind, 2020(14): 157-158 (in Chinese).
- [2] 肖艳. 电厂循环冷却排污水达标外排处理试验研究[J]. 能源环境保护, 2021, 35(4): 34-38.  
XIAO Yan. Experimental study on standard discharge treatment of recirculating cooling sewage of a power plant[J]. Energy Environmental Protection, 2021, 35(4): 34-38 (in Chinese).
- [3] 王波慧, 方正, 曲大雷, 等. 循环冷却排污水回用于循环水系统在大连发电厂的应用[J]. 当代化工研究, 2022(18): 80-82.  
WANG Bohui, FANG Zheng, QU Dalei, et al. Application of circulating cooling effluent reuse in circulating water system in Dalian power plant[J]. Modern Chemical Research, 2022(18): 80-82 (in Chinese).
- [4] 孙晖, 戴家涨, 冯悦, 等. 城市再生水回用于电厂循环冷却水的分析及处理[J]. 内蒙古电力技术, 2022, 40(6): 94-98.  
SUN Hui, DAI Jiazhang, FENG Yue, et al. Analysis and treatment on reuse of urban reclaimed water for circulating cooling water of power plant[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2022, 40(6): 94-98 (in Chinese).
- [5] 袁冰. 臭氧催化氧化技术在废水处理中的应用[J]. 化学工程与装备, 2022, 12(12): 292-293.  
YUAN Bing. Application of ozone catalytic oxidation technology in wastewater treatment[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2022, 12(12): 292-293 (in Chinese).
- [6] 郑垒, 郑旭文, 汪晓军, 等. 一体式臭氧催化氧化-曝气生物滤池深度处理印染废水[J]. 中国给水排水, 2019, 35(22): 105-107.  
ZHENG Lei, ZHENG Xuwen, WANG Xiaojun, et al. Advanced treatment of dyeing wastewater by integrated catalytic ozonation and biological aerated filter[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(22): 105-107 (in Chinese).

作者简介: 陈永飞(1984- ), 男, 江苏淮安人, 本科, 高级工程师, 注册环保工程师, 注册建造师, 主要从事市政污水和工业废水处理工作。

E-mail: yongfei28@126.com

收稿日期: 2024-10-15

修回日期: 2024-10-20

(编辑: 衣春敏)

## 优化国土空间开发保护格局 加强生态环境分区管控