

引用格式: 罗珊, 肖建群, 郜瑞莹, 等. 燃机电厂循环水排污水处理工艺研究 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(增刊 1): 115-121. LUO Shan, XIAO Jianqun, GAO Ruiying, et al. Research on treatment process of sewage discharged from circulating water in gas turbine power plants [J]. Southern energy construction, 2024, 11(Suppl. 1): 115-121. DOI: [10.16516/j.ceec.2024.S1.18](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.S1.18).

燃机电厂循环水排污水处理工艺研究

罗珊^{1,✉}, 肖建群¹, 郜瑞莹¹, 童鹏²

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663;

2. 华能东莞燃机热电有限责任公司 广东 东莞 523000)

摘要: [目的]在国家水资源重复利用的节水政策引导下,越来越多的电厂采用中水作为循环水补充水,增加了电厂循环水排污水的处理难度,文章针对循环水排污水中 COD、总氮、总磷等污染物超标问题,提出了生物处理法结合高级氧化法的处理工艺。[方法]以广东某燃机电厂为例,介绍了以中水为补充水的循环水排污水的水质特征,整理了近年来不同新建燃机电厂循环水排污水排放标准,针对超标污染物的种类和特性,提出了“反硝化池+二沉池+高级氧化+曝气生物滤池+砂滤”工艺,并深入分析了各级处理工艺的原理、功能及优缺点。[结果]反硝化池在缺氧条件下,进行反硝化反应可实现总氮的脱除,芬顿和臭氧高级氧化可分解和氧化废水中难生物降解的 COD,曝气生物滤池作为二级生化池,不仅有生物吸附和氧化作用,还有固液分离的过滤作用,可将前端工艺中剩余的 COD 和过量的外加碳源一起处理,实现 COD 的达标,通过混凝澄清和过滤可去除总磷和悬浮物。该工艺是一种高效稳定的循环水排污水深度处理工艺。[结论]为实现电厂的循环水排污水稳定达标排放处理工艺提供参考。

关键词: 中水; 循环水排污水; 反硝化; 高级氧化; 曝气生物滤池

中图分类号: TM621; X703

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)S1-0115-07

DOI: [10.16516/j.ceec.2024.S1.18](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.S1.18)

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Research on Treatment Process of Sewage Discharged from Circulating Water in Gas Turbine Power Plants

LUO Shan^{1,✉}, XIAO Jianqun¹, GAO Ruiying¹, TONG Peng²

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China;

2. Huaneng Dongguan Gas Turbine Thermal Power Co., Ltd., Dongguan 523000, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] Under the guidance of the national water-saving policy for water resource reuse, more and more power plants are using reclaimed water as make-up water for circulating water, which increases the difficulty of treating sewage discharged from circulating water in power plants. This paper proposes a treatment process that combines biological treatment with advanced oxidation to address the issue related to excessive COD, total nitrogen, and total phosphorus pollutants in sewage discharged from circulating water. [Method] Taking a gas turbine power plant in Guangdong province as an example, this paper described the water quality characteristics of sewage discharged from circulating water using reclaimed water as make-up water, and sorted out the discharge standards for sewage discharged from circulating water in different newly-built gas turbine power plants in recent years. Based on the types and characteristics of pollutants exceeding the standard, a "denitrification tank + secondary sedimentation tank + advanced oxidation + aerated biological filter + sand filter" process was proposed, and a thorough analysis of the principles, functions, advantages and disadvantages of various treatment processes was conducted. [Result] Under anaerobic conditions in the denitrification tank, denitrification reaction can remove the total nitrogen. Fenton and ozone advanced oxidation can decompose and oxidize COD that is difficult to biodegrade in wastewater. As a secondary biochemical tank, the aerated biological filter not only has biological adsorption and oxidation effects but also has solid-liquid separation filtration effects. It can treat the remaining COD in the front-end process together with excess external carbon sources, achieving COD compliance. Total phosphorus and suspended solids can be removed through coagulation, clarification and filtration. This

收稿日期: 2023-08-17 修回日期: 2023-09-21

基金项目: 中国能建广东院科技项目“循环冷却水排水深度处理达标排放关键技术研究与应用”(EX11131W)

process is an efficient and stable in-depth treatment process for sewage discharged from circulating water. [Conclusion] It can provide reference for the stable and standard discharge treatment process of sewage discharged from circulating water in power plants.

Key words: reclaimed water; sewage discharged from circulating water; denitrification; advanced oxidation; aerated biological filter

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

为加强水污染防治力度,确保国家水资源安全,环保部门对工业废水排放标准和节水减排要求越来越高。电厂作为工业用水大户,用水需求和废水外排量都很大,需加强厂内用水技术管理,提高污水处理技术,减少废水排放量,积极推进绿色节能环保理念^[1]。电厂循环冷却系统用水量占电厂整体用水量的60%~80%,是最有潜力的节水减排部门^[2]。近年来城市中水越来越多用作电厂循环冷却水补水,不仅可以扩大中水回用规模,减少处理后城市污水的排放,也为电厂冷却水提供了一个水质稳定、水量充足的水源,为解决火电厂水资源匮乏提供了有效途径^[3-4]。

电厂采用中水作为循环冷却水补水已有很多成功稳定的运行案例^[5],但随着国家对于废水排放要求越来越高,近年来多个新建燃机电厂如大唐惠州某电厂、华能东莞某电厂等均要求循环水排污水处理后达到地表水排放V类标准,以中水作为补充水的循环冷却水排污水存在总氮、总磷、悬浮物和COD超标的风险,无法实现稳定达标排放^[6-7]。

文章以广东某2×498 MW燃气蒸汽联合循环机组为例,分析了以中水为补充水的循环水排污水的水质特点,根据环评要求的废水排放标准,提出了一种高效稳定的循环水排污水深度处理工艺路线。为循环水排污水中COD、总氮、总磷的达标排放处理工艺选择提供参考。

1 工程概况

本项目采用带冷却塔的二次循环冷却水系统,循环水系统补充水采用城镇污水处理厂中水,两台机组的循环冷却水设计流量为58 640 t/h,循环水浓缩倍数为5.5。污水处理厂中水出水执行《水污染物排放限值》(DB44/26—2001)^[8]一级标准及《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB18918—2002)^[9]一

级A标中的较严者,根据全年逐月12份水质报告资料,分析中水的水质特征如下:总氮(TN,以硝态氮为主):5.64~12.46 mg/L;COD:4~22 mg/L;氨氮(NH₃-N):0.025~0.22 mg/L;悬浮物:4~19 mg/L。中水经絮凝沉淀后在循环冷却系统中浓缩5.5倍排出,排污水的设计水质见表1,其中总氮、氨氮、总磷和悬浮物以中水浓度最高值乘5.5倍确定,COD以发电厂化学设计规范(DL 5068—2014)中附录L“敞开式循环冷却水系统水质的控制指标”限制为准。

表 1 循环水排污水水质

Tab. 1 Water quality of sewage discharged from circulating water

参数	总氮/ (mg·L ⁻¹)	COD/ (mg·L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)	总磷/ (mg·L ⁻¹)	悬浮物/ (mg·L ⁻¹)	pH
水质	≤68.53	≤100	≤9.6	≤1.2	≤1.19	≤100	6~9

2 主要污染物排放指标

本项目环评报告批复要求循环水排污水需满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918—2002)^[9]一级A标准、《水污染物排放限值》(DB44/26—2001)^[8]第二时段一级标准和《淡水河、石马河流域水污染物排放标准》(DB 44/2050—2017)^[10]表1第二时段标准的较严者,根据上述3个排放标准较严者确定循环水排污水主要污染物排放指标见表2。

表 2 循环水排污水主要污染物排放指标

Tab. 2 Discharge indicators for main pollutants in sewage discharged from circulating water

参数	总氮/ (mg·L ⁻¹)	COD/ (mg·L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)	总磷/ (mg·L ⁻¹)	悬浮物/ (mg·L ⁻¹)	pH
水质	≤15	≤40	≤10	≤2	≤0.4	≤10	6~9

对比表1和表2可知,本项目循环水排污水的总氮(TN)、COD、总磷(TP)和悬浮物均存在较高的超标风险,需新建一套循环水排污水处理系统,确保出水稳定达标排放。

3 现有处理工艺存在的问题

传统的循环水排污水处理工艺为混凝澄清及过滤, 主要去除排污水中的悬浮物, 排放标准提高后, 针对超标的总氮 (TN)、COD、总磷 (TP), 传统工艺无法满足外排要求。根据污染物属性, 可参考市政污水处理和复杂工业废水处理工艺^[1], 主体工艺采用生物处理法去除废水中的总氮和总磷和部分 COD, 由于循环水排污水中 BOD_5/COD_{Cr} 比值低, COD 难以完全通过生化处理, 需采用高级氧化去除排污水中难降解的 COD。

目前已投运电厂中以城市污水处理厂中水作为循环冷却水主要补充水, 并对循环水排污水深度处理外排达地表水标准的案例较少。

北京某燃气热电厂循环水补水为中水, 循环水排污水采用“复合生物滤池+活性砂滤池”工艺, 出水的 COD 和总氮无法保证达标排放, 主要原因是生化段无法对难降解有机污染物进行有效处理, 而且复合生物滤池停留时间不足, 造成出水难以达标。

华能巢湖某电厂循环水补水为地表水, 循环水浓缩倍数为 6, 循环水排污水采用“曝气生物流化床→混凝澄清器→臭氧催化氧化→曝气生物活性炭滤池→石英砂过滤器”工艺, 处理后基本达标, 但运行过程中也反馈出了一些问题, 曝气生物流化床设备受气温影响较大, 气温较低如冬季时基本无作用; 混凝澄清器加药系统未设置助凝剂加药装置和除磷剂加药装置, 絮凝沉淀效果较差; 臭氧高级氧化工艺

可提高出水水质, 但由于进水水质波动, COD 偶尔超标。

为研究难生物降解有机物的去除工艺, 本项目对广东某纺织公司生产废水处理系统进行了调研, 其工艺流程为: 生产废水→絮凝沉淀池→臭氧催化氧化→曝气生物滤池 (BAF)→反硝化深床滤池→多介质过滤器, 处理水量约为 500 t/h, 通过絮凝沉淀池实现悬浮物的初步去除和泥水分离, 难降解有机物被臭氧催化氧化分解, 曝气生物滤池 (BAF) 不仅有生物吸附、氧化作用, 还有固液分离的过滤作用, 现场运行反馈, “臭氧催化氧化+曝气生物滤池 (BAF)” 联合使用 COD 去除率可提高至 70% 以上。

4 循环水排污水处理工艺选择

4.1 循环水排污水处理工艺设计

由于循环水排污水中 BOD_5/COD_{Cr} 比值一般 <0.3 , 属于难生化水平, 脱氮过程中需外加碳源增加污水可生化性; 通过加除磷混凝剂和过滤设备实现总磷和悬浮物达标排放^[12]; 由于中水为污水处理厂生化处理出水, 排污水中 COD 的主要成分为难降解有机污染物, 在前端生物脱氮过程中去除效率有限^[13], 考虑来水生化性较差、水质波动性较大的因素, 为保证 COD 稳定达标排放, 采用高级氧化技术对废水进行深度处理。

根据本项目循环水排污水水质特点及排放要求, 再结合以上 3 个案例运行情况分析, 本项目循环水排污水处理系统主工艺流程如图 1 所示:



图 1 循环水排污水处理系统主工艺流程

Fig. 1 Main process flow of treatment system for sewage discharged from circulating water

4.2 方案说明

4.2.1 调节池

调节池起到调节水质水量的作用, 减轻后续处理冲击负荷, 保证后续处理工段水质稳定。调节池污水采用曝气搅拌, 一方面防止污水中的悬浮物在调节池沉积, 另一方起到预曝气的作用, 将循环水中投加消毒剂产生的余氯进一步脱出, 避免污水中的余氯对后续生化系统造成影响。

4.2.2 一级 A 生化池

生物脱氮主要通过硝化和反硝化两个过程, 硝化反应指硝酸盐和亚硝酸盐菌在好氧条件下将氨氮氧化成硝酸盐氮和亚硝酸盐氮; 在缺氧条件下, 反硝化菌将硝酸盐氮和亚硝酸盐氮还原成氮气从水中逸出, 达到脱氮的目的^[14]。以中水为补充水的循环水排污水中氨氮含量低, 总氮以硝态氮为主, 因此仅需要设置反硝化池。

一级 A 生化池通过反硝化作用去除硝态氮,反硝化菌在脱氮过程中会利用部分排污水中的碳源,导致 COD 和 BOD₅ 浓度有所下降,同时由于短程硝化-厌氧氨氧化和微生物细胞合成作用,可去除污水中部分氨氮^[15]。

一级 A 生化池具有操作简易、无二次污染、工艺稳定、投资和运行成本低等优点,但处理效率受温度影响较大。本项目循环水排污水中可生物降解的有机物不足以作为自源电子供体,因此在反硝化池中需要外加碳源作为营养物质,外加碳源一般为乙酸钠或葡萄糖,运行期间可能存在碳源投加过量导致出水 COD 偏高的风险。

4.2.3 二沉池

经过一级 A 生化池处理,污水中的总氮浓度大幅度降低,接着污水进入二沉池,投加混凝剂和絮凝剂,实现磷的脱除,通过二沉池的泥水分离作用,污水中的污泥被浓缩,排放至污泥处理系统处理。

4.2.4 高级氧化技术

高级氧化技术可采用 Fenton 高级氧化或臭氧高级氧化,两种工艺具体的特点如下:

1) Fenton 高级氧化

Fenton(芬顿)是处理高浓度含难生物降解有机物的技术中最常用的高级氧化技术。芬顿氧化是在亚铁离子的催化作用下 H₂O₂ 发生链式反应产生 ·OH 自由基,其氧化还原电位高达 2.80 V,可无选择氧化水中大部分有机物^[16]。

Fenton 氧化工艺首先对进水的 pH 值进行调节至 3~4,停留足够的时间来完成氧化反应^[17],然后调节废水 pH 至弱碱性,加入铁离子形成铁盐絮状沉淀,去除废水中剩余有机物和重金属。因此,Fenton 氧化实际是化学氧化和吸附混凝的共同作用。为了进一步提升 Fenton 氧化的处理效果,降低药剂的投加量,以降低药剂运行费用及污泥产生量,可采用含有催化剂的芬顿催化氧化设备,形成 Fenton 催化氧化工艺。

Fenton 反应的优点:可氧化多种有毒有害有机物,适用范围广;不需高温高压;工艺设备简单。

2) 臭氧催化氧化

臭氧为强氧化剂,臭氧催化氧化技术是在常温常压下,利用催化剂将臭氧更多地分解成氧化能力

更强的·OH,从而将水中大分子、难降解的有机污染物氧化成小分子有机物、CO₂ 和 H₂O,达到降解污染物的目的。由于·OH 氧化能力强,对各种有机物的反应速率常数均较为接近,催化氧化基本没有选择性。

相比于上述其他高级氧化技术,臭氧催化氧化技术具有不产生二次污染,反应速率快,运行成本低等优点。

实际设计时建议取循环水排污水或对中水按循环水浓缩倍数浓缩后,进行芬顿和臭氧氧化对 COD 去除效果的对比试验,根据试验结果选择最适合的高级氧化法。本项目取一期的循环水排污水进行了小试验,确定臭氧氧化的氧化效率更高、成本更低,在高级氧化段运行成本均为 0.8 元/t 时,芬顿和臭氧催化氧化对 COD 的去除率分别为 37% 和 52%,在高级氧化段运行成本均为 1.5 元/t 时,芬顿和臭氧催化氧化对 COD 的去除率分别为 46% 和 57%,因此高级氧化单元选用臭氧催化氧化技术。

4.2.5 二级生化池

由于一级 A 生化池中需外加碳源,水质波动导致碳源加药量难以精准控制,高级氧化单元对小分子有机物以及外加碳源去除效率有限,需在高级氧化单元后加二级生化池,其型式采用曝气生物滤池,通过曝气生物滤池对前端工序中残留的 COD 进一步降解去除,达到 COD 的稳定达标排放。

曝气生物滤池不仅可以生物氧化降解有机物,还可起固液分离的过滤作用^[18]。滤池中填装改性陶粒滤料,微生物生长附着在滤料表面,形成稳定的生物膜。在降解有机物的过程中,也可截留部分悬浮物^[14,19-21]。系统运行动力消耗较大,自动化程度要求高。曝气生物滤池具有占地少,投资成本低的优点,但是运行成本较高^[11]。

4.2.6 砂滤

曝气生物滤池出水悬浮物浓度在 50~70 mg/L,经均质后泵送至砂滤器,本项目出水总磷和 SS 要求较高,通过砂滤进一步去除污水中的总磷和 SS,确保污水达标排放。

4.2.7 排放水池

砂滤器出水自流至排放水池。在排放水池中投加次氯酸钠进行消毒,保证出水稳定达标。排放水池出水达标排放。

4.3 主要设备规范

循环水排污水处理系统主要设备规范见表 3。

表 3 主要设备规范表

Tab. 3 Specifications for main equipment

设备名称	型号及规格	数量
反硝化池	$V=600\text{ m}^3$	2座
二沉池	$V=500\text{ m}^3$	2座
絮凝沉淀池	$V=500\text{ m}^3$	2座
臭氧接触氧化池	单组 $75\text{ m}^3/\text{h}$, 每组 2 格, 单格 $4.5\text{ m}\times 4.5\text{ m}\times 5\text{ m}$ (有效水深)	2组
BAF提升池	$V=500\text{ m}^3$	1座
BAF提升泵	$Q=75\text{ m}^3/\text{h}$, $p=0.55\text{ MPa}$	3台
BAF-DN池	$75\text{ m}^3/\text{h}$, $6.5\text{ m}\times 6.5\text{ m}\times 7\text{ m}$	2座
BAF-DC池	单座 $75\text{ m}^3/\text{h}$, 每座 2 格, 单格 $6.5\text{ m}\times 6.5\text{ m}\times 7\text{ m}$	2座
BAF曝气风机	$Q=13\text{ m}^3/\text{min}$, $p=70\text{ kPa}$	4台
BAF反洗风机	$Q=20\text{ m}^3/\text{min}$, $p=80\text{ kPa}$	2台
BAF产水池	$V=200\text{ m}^3$	1座
BAF反洗泵	$Q=400\text{ m}^3/\text{h}$, $p=0.30\text{ MPa}$	2台
砂滤池供水泵	$Q=75\text{ m}^3/\text{h}$, $p=0.30\text{ MPa}$	2台
砂滤池	$Q=75\text{ m}^3/\text{h}$, $3\text{ m}\times 8\text{ m}\times 5\text{ m}$	2座
清净水池	$V=200\text{ m}^3$	1座
排放泵	$Q=150\text{ m}^3/\text{h}$, $p=0.35\text{ MPa}$	2台
集水池	$V=120\text{ m}^3$	1座
回收水泵	$Q=50\text{ m}^3/\text{h}$, $p=0.25\text{ MPa}$	2台
碳源加药装置	2个 25 m^3 储罐, 材质钢衬塑; 2台计量泵, 200 L/h	1套
除磷剂加药装置	2个 20 m^3 溶液箱, 材质钢衬塑; 2台计量泵, 50 L/h	1套
混凝剂加药装置	2个 30 m^3 溶液箱, 材质钢衬塑; 2台计量泵, 100 L/h	1套
助凝剂加药装置	自动溶解箱, 材质钢衬塑; 2台计量泵, 200 L/h	1套
臭氧发生单元	6 kg/h , 包含空压机、冷干机、制氧机、内循环泵	2套
泥水输送泵	$Q=12\text{ m}^3/\text{h}$, $p=0.50\text{ MPa}$	2台
污泥浓缩池	$V=130\text{ m}^3$	1座
污泥输送泵	$Q=4\text{ m}^3/\text{h}$, $p=0.30\text{ MPa}$	2台
离心脱水机	$Q=4\text{ m}^3/\text{h}$	1台
电动污泥斗	$V=4\text{ m}^3$	1台
单轨起重机	起重量 2 t , 起升高度 9 m	1台

4.4 经济性分析

4.4.1 设备、土建工程投资成本估算

循环水排污水处理系统的设备材料和土建安装

调试投资成本估算见表 4。

4.4.2 运行费用估算

循环水排污水处理系统的运行费用主要包括电费、化学药品费和水费, 年运行费用估算见表 5。

表 4 循环水排污水处理系统投资成本

Tab. 4 Investment cost of treatment system for sewage discharged from circulating water

项目	费用/万元
设备材料购置费用	1 200
建筑土建费用	650
安装调试费	150
总投资费用	2 000

表 5 循环水排污水处理系统运行费用

Tab. 5 Operation cost of treatment system for sewage discharged from circulating water

项目	费用
电费/(元·t ⁻¹)	0.4
化学药品费/(元·t ⁻¹)	2.95
水费/(元·t ⁻¹)	0.04
制水成本/(元·t ⁻¹)	3.39
年运行费用/(万元·年 ⁻¹)	177.98

注: 臭氧加药量按 100 mg/L 计算。

5 结论

本文列举的广东某 $2\times 498\text{ MW}$ 燃气蒸汽联合循环机组, 水源采用中水, 水质在南方地区有一定代表性, 采用中水作为补充水的循环水排污水中主要超标物为总氮 (TN)、COD、总磷 (TP) 和悬浮物。循环水排污水采用“反硝化池+二沉池+高级氧化+曝气生物滤池+砂滤”工艺, 通过一级 A 生化池脱氮、高级氧化去除 COD, 通过加混凝剂、絮凝剂和过滤去除总磷和悬浮物, 可实现排污水的稳定达标排放。系统流程相对简单, 投资和运行费用低, 通过调研同类型废水的成功运行案例证明系统安全可靠, 可为使用类似水源和排放标准的电厂提供参考, 电厂在选用本工艺时可通过中试试验或者现场调试确定和优化具体运行参数。

参考文献:

[1] 汪雪姣. 电厂循环冷却水系统节水及零排放技术研究 [J]. 中

- 国新技术新产品, 2021(5): 68-70. DOI: [10.3969/j.issn.1673-9957.2021.05.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-9957.2021.05.022).
- WANG X J. Research on water-saving and zero emission technology for circulating cooling water system in power plants [J]. *New technology & new products of China*, 2021(5): 68-70. DOI: [10.3969/j.issn.1673-9957.2021.05.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-9957.2021.05.022).
- [2] 马双忱, 马岚, 刘畅, 等. 电厂循环冷却水处理技术研究与应用进展 [J]. *化学工业与工程*, 2019, 36(1): 38-47. DOI: [10.13353/j.issn.1004.9533.20183001](https://doi.org/10.13353/j.issn.1004.9533.20183001).
- MA S C, MA L, LIU C, et al. Progress in research and application of circulating cooling water treatment technologies in power plants [J]. *Chemical industry and engineering*, 2019, 36(1): 38-47. DOI: [10.13353/j.issn.1004.9533.20183001](https://doi.org/10.13353/j.issn.1004.9533.20183001).
- [3] 肖建群. 某 H 级燃机电厂再生水深度处理系统方案设计 [J]. *南方能源建设*, 2021, 8(2): 31-36. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.02.005](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.02.005).
- XIAO J Q. Design of advanced treatment scheme for reclaimed water of a H-class gas turbine power plant [J]. *Southern energy construction*, 2021, 8(2): 31-36. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.02.005](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.02.005).
- [4] 刘政修, 袁育亭. 采用城市再生水作为循环冷却水补水的循环排污水处理工艺探讨 [J]. *华北电力技术*, 2014(4): 50-53. DOI: [10.3969/j.issn.1003-9171.2014.04.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-9171.2014.04.011).
- LIU Z X, YUAN Y T. Study of circulating sewage treatment of makeup water using city recycled water [J]. *North China electric power*, 2014(4): 50-53. DOI: [10.3969/j.issn.1003-9171.2014.04.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-9171.2014.04.011).
- [5] 田芳, 张积轩. 中水作为循环水补充水的优化运行试验研究 [J]. *东北电力技术*, 2019, 40(9): 40-43. DOI: [10.3969/j.issn.1004-7913.2019.09.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7913.2019.09.010).
- TIAN F, ZHANG J X. Research on optimized operation test of supplement water as circulating water in secondary water [J]. *Northeast electric power technology*, 2019, 40(9): 40-43. DOI: [10.3969/j.issn.1004-7913.2019.09.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7913.2019.09.010).
- [6] 李海燕, 刘晓奎, 彭芳, 等. ABFT 工艺在火电厂循环水排污水处理中的应用 [J]. *工业水处理*, 2021, 41(6): 269-272. DOI: [10.11894/iwt.2020-0576](https://doi.org/10.11894/iwt.2020-0576).
- LI H Y, LIU X K, PENG F, et al. Application of ABFT process in the treatment of circulating water drainage in a thermal power plant [J]. *Industrial water treatment*, 2021, 41(6): 269-272. DOI: [10.11894/iwt.2020-0576](https://doi.org/10.11894/iwt.2020-0576).
- [7] 李亚娟, 陈景硕, 余耀宏, 等. 高回收率循环水排污水回用处理工艺研究 [J]. *工业安全与环保*, 2016, 42(9): 15-18. DOI: [10.3969/j.issn.1001-425X.2016.09.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-425X.2016.09.005).
- LI Y J, CHEN J S, YU Y H, et al. High recovery rate of recycling treatment technology research of circulating waste water [J]. *Industrial safety and environmental protection*, 2016, 42(9): 15-18. DOI: [10.3969/j.issn.1001-425X.2016.09.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-425X.2016.09.005).
- [8] 广东省环境保护局, 广东省质量技术监督局. 水污染物排放限值: DB 44/26—2001 [S]. 广州: 广东省环境保护局, 2001.
- Guangdong Provincial Environmental Protection Bureau, Guangdong Bureau of Quality and Technical Supervision. Discharge limits of water pollutants: DB 44/26—2001 [S]. Guangzhou: Guangdong Provincial Environmental Protection Bureau, 2001.
- [9] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 城镇污水处理厂污染物排放标准: GB 18918—2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- State Environmental Protection Administration, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Discharge standard of pollutants for municipal wastewater treatment plant: GB 18918—2002 [S]. Beijing: China Standard Press, 2002.
- [10] 广东省环境保护局, 广东省质量技术监督局. 淡水河、石马河流域水污染物排放标准: DB 44/2050—2017 [S]. 广州: 广东省环境保护局, 2017.
- Guangdong Provincial Environmental Protection Bureau, Guangdong Bureau of Quality and Technical Supervision. Discharge standard of water pollutants in watershed of Danshui River and ShiMa River: DB 44/2050—2017 [S]. Guangzhou: Guangdong Provincial Environmental Protection Bureau, 2017.
- [11] 张慕诗, 林珍红, 苏宁子. 循环排水污水处理工艺优化技术分析 [J]. *天津化工*, 2022, 36(6): 96-98. DOI: [10.3969/j.issn.1008-1267.2022.06.024](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-1267.2022.06.024).
- ZHANG M S, LIN Z H, SU N Z. Optimization technology analysis of circulating drainage sewage treatment process [J]. *Tianjin chemical industry*, 2022, 36(6): 96-98. DOI: [10.3969/j.issn.1008-1267.2022.06.024](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-1267.2022.06.024).
- [12] 胡大龙, 许臻, 杨永, 等. 火电厂循环水排污水回用处理工艺研究 [J]. *工业水处理*, 2019, 39(1): 33-36. DOI: [10.11894/1005-829x.2019.39\(1\).033](https://doi.org/10.11894/1005-829x.2019.39(1).033).
- HU D L, XU Z, YANG Y, et al. Research on the reuse treatment process for the wastewater from circulating water in a thermal power plant [J]. *Industrial water treatment*, 2019, 39(1): 33-36. DOI: [10.11894/1005-829x.2019.39\(1\).033](https://doi.org/10.11894/1005-829x.2019.39(1).033).
- [13] 张江涛, 朱学兵, 董娟, 等. 循环水排污水处理组合工艺应用及评估 [J]. *热力发电*, 2021, 50(11): 158-164. DOI: [10.19666/j.rlfid.202104078](https://doi.org/10.19666/j.rlfid.202104078).
- ZHANG J T, ZHU X B, DONG J, et al. Application and evaluation of combined process of circulating cooling water blowdown treatment [J]. *Thermal power generation*, 2021, 50(11): 158-164. DOI: [10.19666/j.rlfid.202104078](https://doi.org/10.19666/j.rlfid.202104078).
- [14] 李小琳. 烟气脱硫废液的成分解析及其净化技术 [D]. 大连: 大连海事大学, 2014. DOI: [10.7666/d.Y2584060](https://doi.org/10.7666/d.Y2584060).
- LI X L. The component analysis of flue gas desulfurization wastewater and its purification technology [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2014. DOI: [10.7666/d.Y2584060](https://doi.org/10.7666/d.Y2584060).
- [15] 马万军, 李永刚, 胡明明, 等. 采用中水水源的循环水排污水降解高分子有机物及总氮工艺试验研究 [J]. *全面腐蚀控制*, 2023, 37(2): 23-30. DOI: [10.13726/j.cnki.11-2706/tq.2023.02](https://doi.org/10.13726/j.cnki.11-2706/tq.2023.02).

- 023.08.
MA W J, LI Y G, HU M M, et al. Study on the degradation of polymer organic matter and total Nitrogen by circulating water source [J]. *Total corrosion control*, 2023, 37(2): 23-30. DOI: 10.13726/j.cnki.11-2706/tq.2023.02.023.08.
- [16] 朱心悦, 韦新东, 蒋宝军. 高级氧化技术处理废水的研究进展 [J]. *中国资源综合利用*, 2015, 33(3): 42-46. DOI: 10.3969/j.issn.1008-9500.2015.03.025.
ZHU X Y, WEI X D, JIANG B J. The research progress of advanced oxidation technology for wastewater treatment [J]. *China resources comprehensive utilization*, 2015, 33(3): 42-46. DOI: 10.3969/j.issn.1008-9500.2015.03.025.
- [17] 翟阳. 我国造纸工业废水深度处理的技术现状及其发展趋势 [J]. *中国造纸*, 2011, 30(10): 56-62. DOI: 10.3969/j.issn.0254-508X.2011.10.013.
ZHAI Y. Current status and development trend of advanced treatment technologies for waste water of paper industry in China [J]. *China pulp & paper*, 2011, 30(10): 56-62. DOI: 10.3969/j.issn.0254-508X.2011.10.013.
- [18] 张博, 雷海东, 王波慧, 等. 循环冷却排污水污泥处理后用于电厂脱硫工艺的探讨 [J]. *化工管理*, 2022(26): 38-40. DOI: 10.19900/j.cnki.ISSN1008-4800.2022.26.012.
ZHANG B, LEI H D, WANG B H, et al. Discussion on application of circulating cooling sewage sludge to desulfurization process in power plant [J]. *Chemical management*, 2022(26): 38-40. DOI: 10.19900/j.cnki.ISSN1008-4800.2022.26.012.
- [19] 郑明珂, 王诗景. 苏南某纺织产业园生态湿地设计方案研究 [J]. *广西水利水电*, 2022(4): 62-64. DOI: 10.16014/j.cnki.1003-1510.2022.04.014.
ZHENG M K, WANG S J. Study of ecological wetland design scheme for a textile industrial park in the South of Jiangsu province [J]. *Guangxi water resources & hydropower engineering*, 2022(4): 62-64. DOI: 10.16014/j.cnki.1003-1510.2022.04.014.
- [20] 尤涛. 厌氧/接触氧化处理高盐腌制废水的工艺优化 [J]. *工业水处理*, 2013, 33(2): 51-54. DOI: 10.3969/j.issn.1005-829X.2013.02.015.
YOU T. Optimization of anaerobic-contact oxidation combined process for treating pickle wastewater with high salinity [J]. *Industrial water treatment*, 2013, 33(2): 51-54. DOI: 10.3969/j.issn.1005-829X.2013.02.015.
- [21] 王琳, 张炯, 方娟. 分散式污水处理单元改善城市河道水环境的尝试 [J]. *安全与环境工程*, 2008, 15(1): 50-53. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1556.2008.01.014.
WANG L, ZHANG J, FANG J. Application of decentralized wastewater treatment to improving water environment of urban rivers [J]. *Safety and environmental engineering*, 2008, 15(1): 50-53. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1556.2008.01.014.

作者简介:



罗珊

罗珊 (第一作者, 通信作者)

1991-, 女, 工程师, 武汉大学应用化学专业, 主要从事电厂给水和废水处理研究及设计工作(e-mail)luoshan@gedi.com.cn。

肖建群

1977-, 女, 高级工程师, 武汉水利电力大学环境工程学士, 主要从事电厂给水处理研究及设计工作(e-mail)xiaojianqun@gedi.com.cn。

郜瑞莹

1980-, 女, 高级工程师, 清华大学环境科学与工程硕士, 主要从事电厂给水和污水处理、海水淡化技术研究及设计工作(e-mail)gaoruiying@gedi.com.cn。

项目简介

项目名称 循环冷却水排水深度处理达标排放关键技术研究与应用 (EX11131W)

承担单位 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司发电工程公司

项目概述 项目主要针对以城市中水为冷却塔补水水源的电厂, 研究其循环水排污水达地表水排放标准的关键处理工艺。

(编辑 赵琪)