

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2018. 06. 01

热电厂中水回用深度处理技术与国内应用进展

魏源送^{1,2,3}, 郑利兵^{1,2,3}, 张 春^{2,4}, 郁达伟^{1,2}, 王亚炜^{1,2},
郑嘉熹^{1,2}, 岳增刚⁵, 王 钢⁵

(1. 中国科学院生态环境研究中心环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100085;
2. 中国科学院生态环境研究中心水污染控制实验室, 北京 100085; 3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049;
4. 北京工业大学化学工程学院, 北京 100029; 5. 华能嘉祥发电有限公司, 山东 济宁 272400)

摘要:综述了我国中水深度处理工艺的发展历程、相关工艺在国内电厂的主要研究与应用情况及其主要问题与控制策略。石灰混凝法是热电厂中水回用的第二代处理工艺,应用广泛;双膜法及全膜法具有更高的污染物去除效率,已成为目前热电厂中水回用的主流深度处理工艺。膜污染是膜法深度处理工艺的限制因素,膜污染形成机制与控制策略研究成为中水回用领域的研究热点和难点。随着水处理技术及设备的发展,一些新型的材料、技术和设备也逐渐推广应用于热电厂的中水深度处理;未来城市中水将成为热电厂的第一水源,膜法将成为中水深度处理与回用的最关键工艺,其预处理和深度处理工艺将实现多样化与高效化的发展。

关键词:中水回用;热电厂;石灰混凝;双膜法;反渗透;预处理

中图分类号:X703.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2018)06 - 0001 - 11

Progress of application and research of advanced treatment technologies for reclaimed water reuse in thermal power generation plant in China

WEI Yuansong^{1,2,3}, ZHENG Libing^{1,2,3}, ZHANG Chun^{2,4}, YU Dawei^{1,2}, WANG Yawei^{1,2},
ZHENG Jiaxi^{1,2}, YUE Zenggang⁵, WANG Gang⁵

(1. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Beijing 100085, China; 2. Laboratory of Water Pollution Control Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Beijing 100085, China;
3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy Sciences, Beijing 100049, China;
4. College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;
5. Huaneng Jiaxiang Power Generation Co., Ltd., Jining 272400, China)

Abstract: The development of advanced treatment technology for reclaimed water reuse, their application status in thermal power generation plants in China, and the limitations and controlling strategies for these technologies are reviewed. Lime coagulation was the 2nd generation reclaimed water treatment technology, which has been widely applied. Membrane technology becomes the mainstream technology for reclaimed wastewater reuse due to its excellent performance. Membrane fouling is the limiting factor for membrane processes, therefore the membrane fouling issue and its control strategies are becoming the research focus. With the development of water treatment technology and equipment, new-type advanced treatment processes as well as new technologies, materials have been applied in the reclaimed water treatment. The reclaimed water would be the first option for thermal power

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07203-005);“十二五”国家科技支撑计划(2014BAC01B03)
作者简介:魏源送(1969—),男,研究员,博士,主要从事污水处理与回用及河流生态治理等研究。E-mail:yswei@rcees.ac.cn

generation plants in the future, and dual-membrane technology will be the key advanced treatment technology, with the pretreatment and advanced treatment technologies developed efficiently.

Key words: reclaimed wastewater reuse; thermal power generation plant; lime coagulation; dual-membrane technology; reverse osmosis; pre-treatment

随着全球水资源短缺与水污染、水生态问题的不断恶化,再生水回用的研究和应用已有超过半个世纪的历史,成为国际公认的“城市第二水源”^[1-2]。我国也积极推进再生水的回用,2015 年再生水产量达 0.2762 亿 m³/d,回用量 45.3 亿 m³,再生水回用率达到 10% 左右^[3-4]，“水十条”和“十三五”规划等明确要求进一步提高污水处理率和再生水回用率,对工业的取水和用水做了显著的限制。因此,再生水将成为我国工业用水的重要水源之一。

热电厂是工业用水大户,我国热电厂用水占总用水量的 8%^[5],在美国则是最大的工业用水户^[6]。热电厂用水的 80% ~ 90% 是循环冷却水,水质要求不如饮用水严格。随着污水处理率的逐步提高和污水处理设施的扩大建设,大部分热电厂可以获取稳定的中水水源,因此热电厂中水回用在全球得到广泛的关注和应用。热电厂中水回用既解决了电厂水资源短缺问题又实现了城市污水的二次利用,既经济高效又节能环保^[7-8]。我国采用中水作为热电厂补给水源的研究与应用起步较晚^[9],随着水资源与水环境问题的恶化,国家颁布“水十条”等政策对热电厂用水作了严格限制,并大力推广热电厂工业节水及水回用。因此越来越多的热电厂特别是新电厂或电厂新建工程开始使用再生水,同时旧电厂的改造也势在必行,再生水替代常规水源已成为解决水资源短缺的不可或缺的重要举措。为解决水源转换引起的新问题,再生水深度处理工艺的研究与推广应用将受到高度重视与关注。

本文在总结目前热电厂中水回用的现状、水源转换所引起的主要问题、主流的中水深度处理工艺及其国内应用情况的基础上,重点分析了中水深度处理技术的发展和现状、膜污染形成机制与控制策略,并对其应用趋势与发展前景进行了分析和展望。

1 热电厂中水回用存在的主要问题及其解决策略

热电厂用水主要包括循环冷却水、锅炉补给水以及厂区分生活用水,其中循环冷却水约占用水总量的 80% ~ 90%。目前,中水已在国内外热电厂得到了广泛应用,是电厂非常重要的替代水源^[8]。但热电厂从新鲜水向中水进行水源转换时,中水中尚存

的悬浮物、营养盐、金属离子、有机物及微生物等污染物在循环冷却系统浓缩后会显著加剧腐蚀、结垢及微生物滋生等问题^[10-12]。

腐蚀按照形成机制主要分为氯离子腐蚀、氨氮腐蚀和微生物腐蚀 3 类^[10,13]。中水成分复杂,氯离子指标未做限制,氨氮限值为 5 mg/L,总粪大肠菌限值为 1 000 个/L,在循环系统中浓缩后会显著加剧腐蚀现象。同时不同类型的腐蚀方式之间会形成协同效应,进而恶化腐蚀现象。解决腐蚀问题的主要策略包括去除污染物、杀菌消毒以及耐腐蚀性材料应用等。

结垢是热电厂中水回用过程的另一个棘手问题,中水中的钙、镁、铁、磷酸盐、二氧化硅、硅酸盐等物质在一定的碱度、硬度和温度下在管道及冷凝器上结晶沉淀形成化学垢,导致管道输水效率下降甚至堵塞,影响热交换并降低热效率。目前化学垢防治常采用如下策略:①降低硬度及结垢类离子的浓度;②调节 pH 值,降低结垢物质的结垢潜势;③投加阻垢剂,阻止或干扰难溶性无机盐形成沉淀、结垢^[14-15]。

微生物滋生是电厂中水水源转换过程的另一个重要问题,中水中的有机物、营养盐和悬浮物等会显著地促进微生物生长繁殖,并释放胞外聚合物形成稳定的生物膜,形成严重的生物垢并加剧腐蚀现象。防治措施主要是防止微生物生长和进行微生物灭活^[16-17],主要包括使用杀菌剂和应用消毒策略。

为保障电厂设施的稳定运行,我国规定电厂循环冷却水和锅炉补给水的进水水质需满足 GB/T 19923—2005《城市污水再生利用 工业用水水质》标准的要求。因此,中水热电厂回用必须进行深度处理以去除中水中的污染物,减轻腐蚀、结垢和微生物滋生等现象,中水深度处理核心工艺包括防腐、阻垢、有机物去除、脱盐和杀菌等。

2 热电厂中水回用深度处理技术及国内应用现状

中水深度处理是减缓腐蚀、结垢和微生物滋生问题的最根本手段,由于中水水质的复杂性与用水标准的严格性^[18-19],一般需要组合不同工艺以保障系统的稳定运行。工艺流程通常为“预处理—主体工艺(—深度处理)”,同时结合阻垢和杀菌工艺以

保障系统的稳定性及产水的水质。中水深度处理主体工艺经历了从过滤沉淀、石灰混凝到双膜工艺的演变,目前热电厂中水回用采用的主体深度处理工艺包括石灰混凝、膜分离、曝气生物滤池(BAF)等。随着水处理技术的发展和用水标准特别是对脱盐 and 有机物去除要求的提高,其他新型工艺包括高级氧化、膜生物反应器(MBR)、电渗析(ED)、离子交换、微生物燃料电池、电吸附、电去离子脱盐(EDI)等也在热电厂中水回用的预处理或深度处理中得到了研究和应用。此外,随着热电厂内部水回用及零排放的要求,中水回用过程中浓水的深度脱盐以提高水回用率的需求也在增加,热法脱盐技术、膜蒸馏(MD)、ED 等技术也逐渐应用于热电厂中水回用深度处理系统。

2.1 石灰混凝工艺

石灰混凝工艺是以石灰除硬与混凝过程为核心的工艺,通过去除硬度物质、悬浮物及少量有机物达到阻垢的目的,并一定程度上降低水中细菌和病毒的浓度。石灰混凝法是随着中水回用钙镁结垢问题逐渐暴露出来后替代传统的过滤或混凝工艺的第二代中水深度处理工艺,在国内外热电厂中得到了普遍应用,其工艺流程如图 1 所示。20 世纪 50 年代,石灰混凝法就开始应用于热电厂循环冷却水的处理^[20],国内首次开展中水回用的华能热电厂中水深

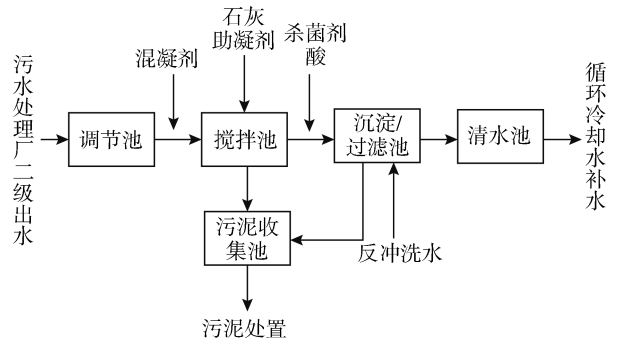


图 1 石灰混凝中水处理工艺流程

度处理工艺采用了该方法^[9]。中水经过石灰混凝后,需过滤或沉淀实现絮体的分离,其中变孔隙滤池^[21]和机械搅拌澄清池^[22]的应用较多。混凝过程对有机物特别是小分子有机物的去除效率差,因此,结合生物工艺去除有机物等其他溶解性污染物可以保障中水的有效处理,是目前石灰混凝工艺的重要改进,目前主要应用的技术包括厌氧/好氧(A/O)工艺和 BAF 工艺。内蒙古华宁热电公司采用 A/O-石灰混凝组合工艺处理中水,有效去除有机物、悬浮物等污染物并降低碱度和硬度,保障热电厂用水的稳定性^[23]。BAF 也可有效去除中水的有机物和悬浮物,增加整体工艺的处理效率^[24-25]。但石灰混凝工艺会引起 pH 值显著增大(一般可达 8~9),提高了水中钙镁、磷酸盐、硅类等的结垢潜势。因此,中水经石灰混凝后一般需加酸调节 pH 值。

石灰混凝工艺具有运行费用低、可有效去除污染物(有机物、悬浮物、硅类等)、无浓缩废水排放且固体废物便于处理的优点,广泛应用于国内热电厂循环冷却水的中水回用工程,特别是早期建设投运的热电厂中水回用工程(表 1)^[20-21,25-31]。由于石灰混凝法对有机物及盐类的去除能力有限,腐蚀、结垢和微生物滋生的问题仍然是中水回用的主要问题。随着热电厂用水标准的提高以及锅炉和除氧器等补水也逐渐采用中水,对 COD 和脱盐要求显著提高,膜分离技术逐渐成为热电厂中水深度处理的主流工艺。但石灰混凝法具有高效的除浊及除硬性能,仍广泛用于膜工艺的预处理工艺,适用于旧工程项目的改造。

2.2 双膜工艺

膜分离技术是以膜为过滤介质在驱动力作用下进行物质分离的技术,具有分离效果好、分离速率快、操作管理简单等优势,广泛应用于中水深度处理。反渗透(RO)膜由于具有优良的污染物(包括

表 1 以石灰混凝工艺为主体工艺的热电厂中水回用工程

热电厂	工艺流程	规模/(m ³ ·h ⁻¹)	水 源	用 途
山东潍坊电厂二期工程 ^[20]	石灰混凝-酸化(硫酸和 CO ₂)-变孔隙滤池-消毒(ClO ₂)	3 200	城市中水	循环冷却水
华能北京热电有限公司 ^[26]	石灰混凝-澄清(PAM)-后混凝(加酸)-变孔隙滤池	5 200	高碑店污水处理厂二级出水	循环冷却水
大唐灞桥热电厂 ^[27]	石灰混凝-砂滤-消毒	800	二级出水	循环冷却水
甘肃某电厂 ^[28]	石灰混凝-变孔隙滤池	1 800	二级出水	循环冷却水
南屯电厂三期工程 ^[29]	石灰混凝	9 400	中水	循环冷却水
山西某电厂 ^[30]	石灰混凝-D 型滤池	420	中水	循环冷却水
某电厂中水回用项目 ^[21]	BAF-石灰混凝-变孔隙滤池	1 600	二级出水	循环冷却水
北方地区某热电厂 ^[31]	BAF-石灰混凝-变孔隙滤池	220	污水处理厂出水	循环冷却水
内蒙古华电包头发电有限公司 ^[25]	BAF-石灰混凝-机械澄清池-V 形滤池	2 600~3 000	城市中水和工业中水	循环冷却水

盐类)截留效果,已成为中水深度处理的主流工艺,在热电厂应用中逐步替代石灰混凝工艺(表2)^[32-45]。为减轻膜负荷和防止膜污染,RO 过程对进水质要求较高,一般要求淤泥密度指数(SDI)小于5,因此,为去除水中的胶体、有机污染物、悬浮物、大部分微生物等,通常采用微滤(MF)或超滤(UF)结合保安过滤器作为预处理工艺(即双膜工艺)。双膜工艺目前已成为热电厂中水深度处理的主流工艺,得到了广泛应用^[46-47]。Jonas 等^[48]的研究发现,采用混凝-UF 组合工艺可以有效控制 RO 膜污染,因此一般双膜过程采用混凝沉淀/过滤工艺来保障工艺的稳定运行。RO 中水深度处理时,会有少量的离子跨膜传质,特别是在出现膜污染或膜破损的情况下。因此,为了进一步保障产水的脱盐效果,满足除氧器用水或锅炉补给水等更高的用水水质要求,需进一步进行深度脱盐处理,目前主要采用的工艺为离子交换和 EDI。意大利某热电厂^[49]采用石灰混凝-UF-RO-离子交换工艺进行中水深

度处理与回用,发现双膜工艺可显著去除悬浮物、铁、硅、磷、有机物和盐离子等,而离子交换可以进一步去除离子,实现超纯水的生产,满足热电厂的回用要求。离子交换目前广泛应用于我国热电行业,是双膜工艺最常用的深度处理工艺^[39,42]。湛江电力公司采用赤坎污水处理厂二级出水,经双膜+离子交换工艺深度处理后用作热电厂锅炉补给水,设计规模为8400 t/h,处理后水的电导率和二氧化硅质量浓度分别为0.069 μS/cm 和2 μg/L,显著低于锅炉补给水的水质要求^[40]。张旭明^[42]研究了多介质过滤器-UF—级 RO-二级 RO-混床组合工艺的深度处理中水效果,发现两级 RO 和混床结合不仅显著地脱盐,而且降低了整体深度处理系统的运行维护成本。

ED 和 EDI 是目前中水和工业废水回用领域研究与应用的热点方向,即通过离子交换膜与电场的结合实现高效的离子去除,作为双膜法的深度处理工艺(即全膜法)。随着热电厂零排放概念的不断深入和推广,全膜法在热电厂水处理中得到一定的

表 2 以双膜法为主体工艺的热电厂中水回用工程

热电厂	工艺流程	规模/ (m ³ ·h ⁻¹)	水 源	用 途
石家庄裕华电厂 ^[32]	石灰混凝-变孔隙滤池-高效纤维过滤器-钠型阳床-弱酸阳床-高效 RO	1000	城市中水	循环冷却水、锅炉补给水
内蒙古包头电厂 ^[32]	BAF-石灰混凝-UF-RO		工业补给水、循环冷却水、锅炉补给水	城市中水、冷却塔排污水
某国际电力发展有限公司 ^[33]	纤维球过滤-活性炭过滤-RO	70	电厂工业废水处理系统和总排系统的达标出水	电厂回用
大武口污水处理厂 ^[34]	BAF-纤维过滤器-UF-RO	800	污水处理厂中水	循环冷却水
某钢铁自备电厂 ^[45]	双介质过滤器-自清洗过滤器-UF-RO	480	某钢铁废水处理厂中水	循环冷却水、锅炉补充水
北京某电厂 ^[36]	机械搅拌加速澄清池-双介质过滤器-盘式过滤器-UF-RO	36	中水	循环冷却水
陕西神木发电有限责任公司 ^[37]	混凝-高效纤维过滤器-连续 MF-RO	6000	中水、电厂生产废水	循环冷却水
大连北海热电厂 ^[38]	生化池-PAC 絮凝-沉淀池-纤维球复合过滤器-活性炭复合过滤器-RO	400	春柳污水处理厂二级出水	循环冷却水
宁夏六盘山电厂 ^[32]	BAF-双介质过滤器-弱酸阳床-UF-RO-强酸阳床-碱性阴床-混床		中水与自来水共混(40%~80%)	锅炉补给水
湛江调顺电厂 ^[32]	机械搅拌澄清-高效纤维过滤-多介质过滤-弱酸阳床-RO-混床		中水	锅炉补给水
邯郸热电厂 ^[39]	石灰混凝-高效过滤-自清洗过滤-UF-RO-离子交换	624	城市中水	循环冷却水、锅炉补充水
湛江电力有限公司 ^[40]	混凝气浮-过滤-UF-RO-阳床-阴床-混床	8400	赤坎污水处理厂二级处理出水	锅炉补给水
新疆乌鲁木齐某热电厂 ^[41]	双介质过滤器-UF-RO-阳床-阴床-混床	300	城市污水处理厂再生水	锅炉补给水
某发电厂 ^[42]	多介质过滤器-超滤—级 RO-二级 RO-混床	500	循环排污水	电厂除氧器用水
辽宁调兵山煤矸石发电公司 ^[43]	二级 BAF-UF-RO-EDI	450	中水(水库水备用)	冷却水、锅炉补给水
山西大同二电厂 ^[32]	二期:过滤-UF-RO-脱盐 三期:过滤-UF—级 RO-除碳-二级 RO-EDI		中水	电厂开式冷却水、锅炉补给水
大连泰山热电厂 ^[44]	混凝澄清-过滤-UF-两级 RO-EDI	260	马栏河污水处理厂二级出水	超高压锅炉补给水
中电投某热电厂 ^[45]	混凝过滤-UF-两级 RO-EDI	2~2.5	中水	锅炉补给水

研究与应用^[50-51],满足更高的用水需求,同时可实现浓水的浓缩和盐回收。全膜法基本流程如图2所示,预处理主要去除悬浮物、硬度物质、部分有机物及氮磷等营养盐,包括混凝、石灰除硬、吸附、高级氧化等工艺。RO过程进一步去除盐离子、有机物及其他污染物。后处理过程包括:①为满足更高的水质需求,对RO产水采用ED、离子交换、EDI等工艺进一步脱盐,并结合臭氧氧化和杀菌去除有机物和微生物;②为满足零排放要求,RO浓水采用高级氧化、吸附等工艺去除有机物;采用热法、ED、MD等技术深度脱盐,实现更高的水回收率,回收盐类,实现零排放或近零排放。目前随着热电厂用水要求的提高和零排放概念的普及,全膜法中水深度处理工艺在国内热电厂中受到了广泛关注,并逐步得到了工程应用。辽宁调兵山煤矸石发电公司采用BAF-双膜-EDI组合工艺进行中水深度处理,制备除盐水用于锅炉补给,除盐水制水量为102 t/h,目前该系统已运行9年,仍可保障稳定的产水^[43]。大连泰山热电厂采用双膜-EDI工艺深度处理中水以满足超高压锅炉补给水的水质要求,每年节约淡水625万m³,节省资金1800多万元^[44]。

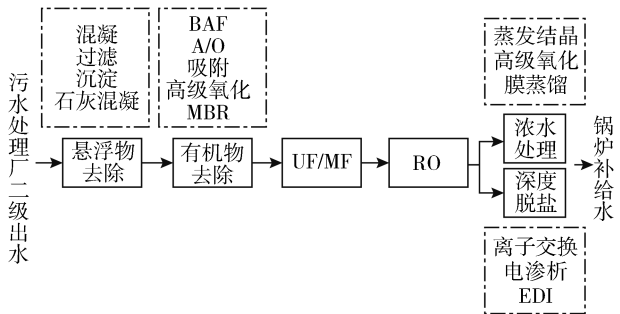


图2 热电厂全膜法中水深度处理工艺流程

2.3 其他中水回用深度处理工艺

热电厂中水回用早期,中水深度处理主要关注悬浮物和有机物的去除,对水质要求较低,因此一些基于微生物处理的技术也是热电厂中水深度处理的常用工艺,最受关注的是BAF和MBR。申亮等^[52]采用BAF-高效混凝沉淀组合工艺处理污水处理厂二级出水,出水各项指标均能达到热电厂要求。国电内蒙古东胜热电有限公司采用二级生物滤池去除有机物及氮磷,同时采用UF去除悬浮物,实现了中水回用系统的稳定运行^[53]。浙能长兴电厂3万t/d城市中水综合利用项目、浙江浙能长兴发电有限公司6万t/d城市污水回用项目均采用曝气生物流化床(ABFT)工艺,保障循环冷却水的安全^[54-55]。国电内蒙古东胜热电有限公司采用两级过滤膜生物反应器(DF-MBR)深度处理城市中水,出水水质稳定,经济效益显著,投资回报率高^[56]。内蒙古呼和浩特

市金桥发电厂以二级出水为补给水源,采用MBR-UF工艺实现了污水资源化^[57-58]。由于BAF和MBR存在盐离子类物质去除效果的限制,随着热电厂用水水质标准的提高,BAF和MBR工艺目前主要作为预处理工艺在热电厂中应用。BAF预处理技术既可以与石灰混凝法联用,解决石灰混凝法对有机物去除能力有限的问题^[21,31];又可以作为膜过程的预处理工艺,降低膜过程的有机负荷,缓解膜污染问题^[32,34,43]。MBR工艺在热电厂主要作为RO的预处理,已被证明是优于UF/MF的预处理工艺^[59-60],例如,MBR-RO工艺是新加坡NEWater项目的一项关键技术^[61],MBR工艺可以替代污水处理厂传统的二级处理工艺,其出水采用RO深度处理,可简化中水深度处理流程。

随着水处理技术的发展,其他新型技术也在热电厂中水回用中得到了应用,如前述的ED和EDI工艺,在全膜法工艺中广泛应用。纳滤(NF)是介于UF和RO之间的压力驱动膜工艺,具有良好的有机物去除和分盐作用,逐渐应用于中水深度处理。Li等^[62]研究发现,采用NF处理城市中水可有效去除有机物和盐类,满足水回用要求与地表水Ⅳ类标准。NF也常与MBR组合用于中水的处理,MBR可显著实现有机物和悬浮物的去除,进而降低NF膜污染。Cartagena等^[63]研究发现MBR-NF过程可以有效实现城市中水中盐类、有机物和氮磷的去除,且表现出与MBR-RO过程相似的污染去除效果,因此MBR-NF可以有效地应用于中水深度处理。尹星等^[64]的研究也发现MBR-NF处理城市中水可以满足循环冷却水的水质要求。在热电厂应用方面,NF已经在脱硫废水处理中得到了广泛研究^[65],在循环冷却水和锅炉补给水方面也得到一定的关注。Colburn等^[66]采用NF处理电厂洗刷废水,发现超过10 g/L TDS的废水可实现80%水回收,钙、镁、硫酸根及重金属的截留率都高于91%。Dow等^[67]采用NF处理某电厂循环水排污水,溶解性总固体和总硬度的去除率达90%以上,盐类去除率达80%以上,出水水质符合工业用水和循环水补水的水质要求。李乐等^[68]针对某电厂的水库补水进行NF深度处理研究,盐类和有机物去除率分别高于80%和60%,其研究认为采用NF产水作为循环水冷却塔补水可大幅提高浓缩倍率,减少水库水取水量140.2万m³/a。目前NF在热电厂中水回用深度处理工程中的应用还未见报道,但鉴于NF对悬浮物、胶体、有机物、盐类的高效截留效果及更低的操作压力,及其可与RO组合实现高品质产水与长期稳定运行^[69],预期NF将在未来的热电厂中水回用工程中得到广泛应用。

MD 是一种热驱动膜工艺,结合了热法和膜法的优势,通过疏水膜实现水与溶质的分离,是一种高效脱盐技术。MD 广泛应用于海水淡化和苦咸水软化,近年来逐渐应用于高浓高盐废水如工业废水、RO/NF 浓水等处理^[70],是再生水深度处理系统一种有效的零排放工艺。MD 目前在脱硫废水深度处理与零排放技术中得到了一定研究,是热电厂工业水处理的重要储备技术^[71-72]。由于具有较高的污染物浓度适应性且产水质量优良,MD 常用来深度处理 RO 或 NF 的浓水,提高水回收率并实现零排放。Yan 等^[73-74]采用直接接触式膜蒸馏(DCMD)深度处理 RO 浓水,发现可以有效地实现所有离子高于 99% 截留。Naidu 等^[75]考察了 MD 对 RO 中水回用系统的浓水处理效率,发现可以实现 85% 的水回收率和 99% 的盐截留率,显著提升了水利用率。目前,电厂零排放的概念逐渐深入,热电厂对中水回用、工业废水回用及水利用率的要求也在不断提高,因此,膜浓水处理的要求愈加迫切,MD 可以实现浓水的脱盐与浓缩,进而提高水利用率与实现零排放,未来将在热电厂水回用深度处理中得到广泛的关注。

针对中水深度处理问题,其他新型的工艺和材料也日益受到关注,包括物理法、高级氧化及催化氧化技术、微生物处理技术、新型膜技术、高效吸附材料、催化材料、复合材料和纳米材料等。虽然目前大多处于实验室阶段,但可以预期随着材料科学和水处理技术的发展,将会逐渐实现工程应用,也将在热电厂中水深度处理中得到应用。

3 RO 膜污染问题及控制

膜分离技术已经成为热电厂中水深度处理的主流工艺,但中水含有的微量悬浮物、有机物、阴阳离子、硅类、微生物等物质会导致膜出现有机、无机、微生物的污染,造成显著的污堵现象。RO 膜为致密无孔膜,操作压力高,污染物浓缩率高,更易出现膜污堵,导致反冲洗频繁,降低膜的使用效率,甚至出现膜破损的风险,是热电厂双膜法中水回用的限制因素。

3.1 膜污染机制研究

膜污染是中水深度处理过程的主要问题,影响处理工艺的效果、操作复杂度与运行成本及膜寿命。膜污染主要分为无机污染、有机污染和微生物污染,受地区水质、污水处理厂处理工艺、中水输运过程及中水预处理工艺等因素的影响,因此膜污染形成机制复杂,通常以复合污染形式出现。无机污染主要是无机盐结晶,其主要原因是中水中无机盐类在循

环使用时会实现 4 ~ 10 倍的浓缩^[76],因此出现表面结晶和体相结晶的现象。同时,有机物和微生物的存在会显著促进无机结垢,主要原因是天然有机物和微生物胞外分泌物由于存在羟基和羧基等基团,易与无机盐结合,促进其沉积^[77-79]。有机污染是 RO 中水处理过程非常重要的膜污染组成,大量研究表明中水中的有机物组成和天然水体中的有机物组成存在显著差异^[18,80],特别是经过循环浓缩后污染物浓度显著增加,极易在膜表面沉积,形成致密覆盖层。有机污染的主要组成包括天然有机物(NOM)、污水处理过程形成的有机物(EfOM)、微生物生长代谢形成的胞外聚合物(EPS)和溶解性微生物聚合物(SMP),疏水性有机物易与膜表面结合,可以作为微生物和无机物在膜表面沉积的桥梁,促进微生物污染和无机污染。EPS 和 SMP 类物质保护微生物,可使微生物对杀菌剂的耐受性提高甚至高达 1000 倍^[81],也是微生物膜的主要成分。胶态物质也是膜污染的重要组成,主要包括多糖、蛋白质等有机大分子和硅、铝、铁等无机水解高分子^[82]。

微生物污染是 RO 过程最难以解决的问题,也是最重要的膜污染组成,其在预处理阶段难以得到有效控制,且微生物组成类型多,受多种外界条件影响,形成机制复杂,也是目前膜污染研究中理解最为粗浅的部分^[83]。目前微生物污染研究存在很大的差异,未形成统一的观点。Khambhaty 等^[84]认为 γ -Proteobacteria 是 RO 过程最主要的微生物,包括 *Pseudomonas*、*Xanthomonas* 和 *Sphingomonas* 三类。一些其他研究也支持 γ -Proteobacteria 细菌是主要的微生物组成的观点^[85-86],但也有研究者发现 α -Proteobacteria 或 β -Proteobacteria 是主要的微生物组成^[87-88]。上述研究结果不同的主要原因是微生物群落结构受水质、阻垢剂、杀菌剂、环境及操作条件、化学清洗试剂等诸多因素的影响,因此难以达成一致观点,也是膜污染形成机制复杂的最主要原因^[89-90]。Tan 等^[86]研究发现使用非氧化性杀菌剂可以促进 *Pseudoxanthomonas* 的生长,主要原因是 γ -Proteobacteria 对非氧化性杀菌剂具有更高的耐受性。Zheng 等^[91]研究发现微生物在膜污染层呈现显著的垂直分布现象,认为化学清洗和杀菌剂的投加是微生物群落垂直分布形成的催化剂, γ -Proteobacteria 是膜污染形成的先锋污染物,在污染层底部具有高丰度。因此建议采用多种杀菌剂复配使用或交替使用的策略,防止特定微生物形成成熟的生物膜。

膜污染是膜分离技术的限制性因素,但膜污染问题不可避免,膜预处理过程是解决膜污染的有效

手段,预处理工艺的开发也是膜技术深度处理中水的重要研究方向;同时,膜污染的解析与形成机制分析、膜清洗策略的制定与实施也是膜技术用于中水深度处理的重要议题。膜法中水回用的第二个重点是系统管理,包括预处理系统和 RO 系统的运行工况实时监测与控制,其中预处理系统的控制主要是预处理系统出水的水质控制,保障 RO 系统的稳定运行。RO 系统的控制主要包括膜产水水质、跨膜压差、膜污染的实时监测以及膜反冲洗与清洗策略的制定与实施。

总体而言,膜污染机制研究依然是中水回用领域的重要研究方向,得到了广泛关注。目前,随着分析检测技术的发展,一些新型测试方法如透射显微镜技术(TEM)、光学相干断层扫描技术(OCT)、X 射线光电子能谱(XPS)、拉曼光谱(RS)、卢瑟福背散射能谱(RBS)、电子自旋共振(ESR)、核磁共振谱(NMR)和微生物群落结构分析与基因组学分析等逐步应用于膜污染分析,促进了膜污染形成机制研究的发展^[92]。但膜污染受诸多条件影响且存在变化演替过程,因此很难得到非常一致的结论。为了实现膜污染控制,针对具体问题具体分析,需结合膜污染组成、分布与形成原因的分析制定有效的膜污染控制策略。

3.2 膜污染控制策略

膜污染控制是实现膜技术高效稳定运行的有效保障。膜污染机制研究的主要目的之一是服务于膜污染控制,目前膜污染控制主要策略包括杀菌阻垢、中水预处理、膜在线和离线的化学清洗以及膜工艺的科学运行管理,其中预处理工艺是控制 RO 膜污染的最重要的控制措施。

RO 对进水有严格的限制,一般要求 SDI 小于 5、余氯低于 0.1mg/L、浊度低于 1NTU 等。预处理工艺主要是降低中水的悬浮物、胶体、有机物、微生物等浓度,调整温度和 pH 值,抑制和控制微溶盐、金属氧化物和硅的沉积,防止出现严重的膜污堵^[93]。目前预处理工艺主要包括混凝沉淀、膜过滤、MBR、吸附、高级氧化等。

目前膜技术如 MF、UF 是 RO 最常用的预处理技术,可以有效截留悬浮物、微生物和有机物。微生物方法也是去除有机污染的常用方法,在热电厂中水深度处理中得到了较多应用,但微生物法的缺陷是无机污染物的去除能力有限,并易受水质影响,导致微生物失活和去除效果不稳定。微生物与膜结合的 MBR 工艺近年来在 RO 预处理过程中受到广泛关注,也是污水处理厂升级工艺实现中水回用的主要技术改造手段。针对有机物问题,吸附和催化工

艺也得到了广泛应用,新型的吸附材料、催化材料及复合材料目前得到越来越多的开发和应用。针对微生物和无机结垢问题,杀菌阻垢是中水回用中防止管道及相关构筑物腐蚀或结垢的重要手段,新型杀菌剂和阻垢剂的开发也是水回用领域的重点研究方向。由于微生物的多样性和垂直分布特征^[91],高效复合杀菌剂及其复配应用应该在中水深度处理中得到重视。

总之,混凝-过滤-膜分离是最常见的 RO 预处理技术,具有技术成熟、操作简单等优点。随着技术发展,目前 MBR、活性炭吸附、高级氧化等技术的工程应用也越来越多。为防止腐蚀和结垢,杀菌与阻垢是中水回用两个不可缺少的环节,是保障 RO 系统稳定运行的重要手段;同时,保安过滤器作为 RO 系统最后一道防线,在实际应用中必须设置。

4 结语与展望

城市中水回用于热电厂主要具有以下优势:①价格优势;②中水经一定处理可满足热电厂的水质要求;③中水资源丰富,特别是随着城镇污水处理率和处理规模的进一步提高。因此,随着我国对热电厂用水的政策限制和工业零排放要求的日益严格,城市中水将成为今后热电厂的重要水源,热电厂中水回用的需求与比例将进一步扩大。但中水所含的悬浮物、有机物、盐类等污染物是限制热电厂中水回用的主要因素,如何经济高效地缓解结垢、腐蚀和微生物滋生将是实现热电厂中水回用的关键。今后热电厂中水回用的研究与应用将在以下几方面得到进一步发展:

a. 新建热电厂将全面实现中水回用,以双膜法为主体的深度处理工艺将得到更为广泛的推广应用,石灰混凝+双膜工艺将是已建热电厂中水回用升级改造的主流工艺。其他如吸附、高级氧化、微生物处理、MBR 技术等也将逐步得到应用,一些新型水处理技术包括磁混凝、MD、正渗透等将逐步应用于热电厂的中水回用,新型组合工艺开发将是实现中水深度处理的重要突破点。

b. RO 膜污染控制及其稳定运行是中水回用的重点,其预处理技术的优化及新型预处理技术的开发、膜污染机理及其控制研究等将成为中水回用领域的热点。为满足日益提高的水质、水回用率和零排放需求,RO 产水的深度脱盐和 RO 浓水深度处理将是今后膜法深度处理工艺的难点与热点。

c. 新型污水处理材料包括吸附剂、过滤介质、催化剂、膜材料等将越来越多地应用于热电厂的中水回用,新型复合材料制备及其推广应用将是推动

中水回用技术发展的重要突破点。同时,新型环保型阻垢剂与杀菌剂的研发与应用也是热电厂中水回用的一个重要研究方向。

d. 覆盖预处理、膜处理和后处理的全过程智能化管理与监控将是今后热电厂中水回用研究与应用的热点。

参考文献:

[1] CHEW M Y, WATANABE C, TOU Y. The challenges in Singapore NEWater development: coevolutionary development for innovation and industry evolution [J]. Technology in Society, 2011, 33 (3/4) : 200-211.

[2] BIXIO D, THOEYE C, WINTGENS T, et al. Water reclamation and reuse: implementation and management issues [J]. Desalination, 2008, 218 (1/2/3) : 13-23.

[3] CHU J, CHEN J, WANG C, et al. Wastewater reuse potential analysis: implications for China's water resources management [J]. Water Research, 2004, 38 (11) : 2746-2756.

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2016 年城乡建设统计公报 [EB/OL]. (2017-08-18) [2017-11-11]. http://www.mohurd.gov.cn/xytj/tjzljsxytjgb/tjxxjtjgb/201708/t20170818_232983.html.

[5] SAFARI I, WALKER M E, HSIEH M K, et al. Utilization of municipal wastewater for cooling in thermoelectric power plants [J]. Fuel, 2013, 111 : 103-113.

[6] WANG X J, ELMAHDI A, ZHANG J Y, et al. Water use and demand forecasting model for coal-fired power generation plant in China [J]. Environment, Development and Sustainability, 2018 (2) : 1-19.

[7] WALKER M E, THEREGOWDA R B, SAFARI I, et al. Utilization of municipal wastewater for cooling in thermoelectric power plants: evaluation of the combined cost of makeup water treatment and increased condenser fouling [J]. Energy, 2013, 60 : 139-147.

[8] 李利. 热电项目中水利用水资源论证实例分析 [J]. 水资源保护, 2008, 24 (增刊 1) : 130-133. (LI Li. Case analysis of water utilization water resources demonstration in thermal power projects [J]. Water resources protection, 2008, 24 (Sup1) : 130-133. (in Chinese))

[9] 高轩, 吴智泉. 中水回用于火电厂循环冷却水的现状和经济性研究 [J]. 能源技术经济, 2010 (9) : 14-21. (GAO Xuan, WU Zhiqian. Study on the status quo and economical efficiency of using reclaimed water as cooling water for thermal power plants [J]. Energy Technology Economy, 2010 (9) : 14-21. (in Chinese))

[10] HSIEH M K, LI H, CHIEN S H, et al. Corrosion control when using secondary treated municipal wastewater as alternative makeup water for cooling tower systems [J]. Water Environment Research, 2010, 82 (12) : 2346-2356.

[11] KAVITHA A, VASUDEVAN T, PRABU H G. Evaluation of synthesized antiscalants for cooling water system application [J]. Desalination, 2011, 268 (1/2/3) : 38-45.

[12] 祁誉, 李进, 吴芳芳, 等. 城市再生水回用于发电厂水质特征分析 [J]. 华北电力技术, 2015 (12) : 28-35. (QI Yu, LI Jin, WU Fangfang, et al. Analysis of water quality characteristics of urban reclaimed water for power plants [J]. North China Electric Power Technology, 2015 (12) : 28-35. (in Chinese))

[13] CHOUDHURY M R, HSIEH M K, VIDIC R D, et al. Corrosion management in power plant cooling systems using tertiary-treated municipal wastewater as makeup water [J]. Corrosion Science, 2012, 61 : 231-241.

[14] LIU W, CHIEN S H, DZOMBAK D A, et al. Mineral scaling mitigation in cooling systems using tertiary-treated municipal wastewater [J]. Water Research, 2012, 46 (14) : 4488-4498.

[15] LI H, HSIEH M K, CHIEN S H, et al. Control of mineral scale deposition in cooling systems using secondary-treated municipal wastewater [J]. Water Research, 2011, 45 (2) : 748-760.

[16] CHIEN S H, CHOWDHURY I, HSIEH M K, et al. Control of biological growth in recirculating cooling systems using treated secondary effluent as makeup water with monochloramine [J]. Water Research, 2012, 46 (19) : 6508-6518.

[17] 孙敏华, 刘智安, 秦伟. 中水回用电厂循环冷却水的微生物控制研究 [J]. 环境工程, 2009, 27 (增刊 1) : 71-73. (SUN Minhua, LIU Zhian, QIN Wei. Study on microbiological control of circulating cooling water in reclaimed water power plant [J]. Environmental Engineering, 2009, 27 (Sup1) : 71-73. (in Chinese))

[18] PING X, JING W, YAJUN Z, et al. Foulant characteristics comparison in recycling cooling water system makeup by municipal reclaimed water and surface water in power plant [J]. Journal of Analytical Methods in Chemistry, 2015, 2015 : 746064. DOI:10.1155/2015/746064.

[19] HU H Y, DU Y, WU Q Y, et al. Differences in dissolved organic matter between reclaimed water source and drinking water source [J]. Science of the Total Environment, 2016, 551 : 133-142.

[20] 魏新庆. 石灰法处理二级处理出水回用于电厂冷却循环水的应用研究 [D]. 天津: 天津大学, 2008.

[21] 王萍, 李会海. 变孔隙滤池在电厂回用水处理中的应用 [J]. 环境工程, 2012 (3) : 36-40. (WANG Ping, LI Huihai. Application of variable pore filter in the reuse water treatment of power plant [J]. Environmental Engineering, 2012 (3) : 36-40. (in Chinese))

[22] 曾书怀. 澄清池在电厂废水处理回用领域的应用研究 [J]. 科技创新导报, 2015 (14) : 97-98. (ZENG Shuhuai. The application research of clarifier in the reuse of

- p>
wastewater treatment of power plant [J]. Science and Technology Innovation Report,2015(14):97-98.
- [23] 白世雄. 用于火电厂循环冷却水的城市污水处理工艺改造[J]. 内蒙古电力技术,2014,32(6):82-84. (BAI Shixiong. The improve of municipal wastewater treatment process for circulating cooling water in thermal power plants [J]. Inner Mongolia Electric Power Technology, 2014,32(6):82-84. (in Chinese))
- [24] 庞从章,庞会从,聂通林. 中水回用作电厂循环水补充水的设计[J]. 河北化工,2008,31(5):21-22. (PANG Ccongzhang,PANG huicong,NIE Tongling. Design of the recycled water advanced treatment for make-up water of recirculating cooling water system [J]. Hebei Chemical Industry,2008,31(5):21-22. (in Chinese))
- [25] 刘江,刘涛. 全中水循环再利用技术应用分析[J]. 内蒙古电力技术,2013,31(3):105-108. (LIU Jiang, LIU Tao. Reuse technology of reclaimed water and its application [J]. Inner Mongolia Electric Power Technology,2013,31(3):105-108. (in Chinese))
- [26] 罗德波,闫彩霞,崔伟强,等. HW 澄清技术在电厂中水回用领域的应用实例[J]. 华电技术,2015,37(2):68-72. (LUO Debo, MIN Chaixia, CUI Weiqiang, et al. Application of HW clarification technology in reclaimed water reuse of power plants [J]. Water Conservancy & Electric Power Machinery, 2015, 37 (2): 68-72. (in Chinese))
- [27] 张新娟. 中水在电厂循环水系统的应用[J]. 河南科技: 上半月,2013(9):184. (ZHANG Xinjuan. Application of reclaimed water in circulating water system of power plant [J]. Henan Science and Technology: First Half Month, 2013(9):184. (in Chinese))
- [28] 杨洁,姜梅,张得君,等. 中水回用于火电厂循环水存在问题探讨[J]. 电力科技与环保,2011,27(2):35-37. (YANG Jie,JIANG Mei,ZHANG Dejun,et al. Discussion on the problems existing in the reuse of reclaimed water for circulating water in thermalpower plants [J]. Electric Power Technology and Environment Protection,2011,27(2):35-37. (in Chinese))
- [29] 鲁战明. 中水回用于循环冷却水系统的研究与应用[D]. 长沙:中南大学,2010.
- [30] 张洪江,杨云龙. 电厂中水回用工程设计与分析[J]. 电力科技与环保,2012,28(3):46-48. (ZHANG Hongjiang,YANG Yunlong. Design and analysis of water reuse project in power plant [J]. Electric Power Technology and Environment Protection,2012,28(3):46-48. (in Chinese))
- [31] 王仁雷,靳立靖,宋广田. 某热电厂城市中水回用工程分析[J]. 发电与空调,2012,33(3):36-39. (WANG Renlei,JIN Lijin,SONG Guangtian. Analysis of urban water reuse project in a thermal power plant [J]. Power Generation & Air-Conditioning,2012,33(3):36-39. (in Chinese))
- [32] 刘世念,陈宇,余菲,等. 中水回用于南北火电厂锅炉补给水的水源区域性差异及回用效果分析[J]. 广东化工,2013,40(24):77-78. (LIU Shinian,CHEN Yu,YU Fei,et al. Regional differences in water source and its reuse effect of reclaimed water reused boiler feedwater in north and south thermal power plants [J]. Guangdong Chemical Industry,2016,40(24):77-78. (in Chinese))
- [33] 李红莲,邱如斌,陈潮华,等. 膜技术在电厂中水回用系统中的应用[J]. 河南工程学院学报(自然科学版),2012,24(2):39-42. (LI Honglian,QIU Rubin,CEHN Chaohua, et al. Application of membrane technology in water reuse system of power plants [J]. Journal of Henan Institute of Engineering(Natural Sciences),2012,24(2):39-42. (in Chinese))
- [34] 祖良,刘文杰. 抗污染超滤膜在电厂中水回用中的应用[J]. 水工业市场,2011(9):21. (ZU Liang,LIU Wenjie. Application of anti-pollution ultrafiltration membrane in water reuse of power plant [J]. Water Industry Market, 2011(9):21. (in Chinese))
- [35] 张文耀,张志勇. 抗污染超滤-反渗透膜在电厂中水回用中的应用[J]. 给水排水,2014,40(12):52-55. (ZHANG Wenyao,ZHANG Zhiyong. Application of anti-pollution ultrafiltration-reverse osmosis membrane in water reuse of power plant [J]. Water & Wastewater,2014,40(12):52-55. (in Chinese))
- [36] 于海琴,刘正修,李进,等. 火电厂中水回用 RO 膜污染特征研究[J]. 膜科学与技术,2012,32(3):75-78. (YU Haiqin, LIU Zhengxiu, LI Jin, et al. Study on RO membrane contamination characteristics of water reuse in thermal power plants [J]. Membrane Science and Technology,2012,32(3):75-78. (in Chinese))
- [37] 曹井国,张述超,周增庆,等. 电厂中水回用工程的设计与运行[J]. 中国给水排水,2007,23(20):78-80. (CAO Jingguo,ZHANG Shuchao,ZHOU Zengqing, et al. Design and operation of power plant water reuse project [J]. China Water & Wastewater,2007,23(20):78-80. (in Chinese))
- [38] 杨海军. 大连北海热电厂中水回用中试试验研究[D]. 大连:大连理工大学,2006.
- [39] 张妙. 中水石灰处理膜法脱盐堵塞问题的调查[J]. 科技传播,2012(9):135. (ZHANG Miao. Investigation on desalination and blocking of lime treatment membrane method in reclaimed water [J]. Science and Technology Communication,2012(9):135. (in Chinese))
- [40] 郑观文,彭巧玲,曹顺安. 城市中水回用于锅炉补给水的处理工艺运行和分析[J]. 山东化工,2016,45(19):137-139. (ZHENG Guanwen, PENG Qiaoling, CAO Shunan. The operation and analysis of treatment process of city reclaimed water reused for boiler make-up water [J]. Shandong Chemical Industry,2016,45(19):137-139. (in Chinese))

- [41] 张占梅,陈斌,宋英豪.城市再生水作火电厂锅炉补给水对预处理系统的影响[J].水处理技术,2016,42(4):87-90. (ZHANG Zhanmei, CHEN Bin, SONG Yinghao. Effect of urban reclaimed water as preheating system for boiler feed water of thermal power plant[J]. Water Purification Technology, 2016, 42(4):87-90. (in Chinese))
- [42] 张旭明.超滤和反渗透在电厂中水回用技术中的应用[J].工业水处理,2006,26(6):82-83. (ZHANG Xuming. Application of ultrafiltration and reverse osmosis in reclaimed water reuse technology of power plant[J]. Industrial Water Treatment, 2006, 26(6):82-83. (in Chinese))
- [43] 苏永.全膜法中水回用处理系统的运行管理[J].工业用水与废水,2015(5):47-49. (SU Yong. Operation and management of reclaimed water reuse treatment system in full membrane method [J]. Industrial Water & Wastewater, 2015(5):47-49. (in Chinese))
- [44] 张栋顺.中水全膜处理系统在热电厂的应用[J].工业水处理,2010,30(7):78-80. (ZHANG Dongshun. Application of reclaimed water full-membrane treatment system in thermal power plant [J]. Industrial Water Treatment, 2010, 30(7):78-80. (in Chinese))
- [45] 仲惟雷.双膜法和EDI在热电厂中水回用中的试验研究[J].热力发电,2011,40(7):48-53. (ZHONG Weilei. Double-membrane method and EDI study on water reuse in thermal power plant [J]. Thermal Power Generation, 2011, 40(7):48-53. (in Chinese))
- [46] BONN L V, GUEY L, DEL CASTILLO J. UF/MF as RO pretreatment; the real benefit[J]. Desalination, 2008, 222(1/2/3):59-65.
- [47] KENT F C, FARAHBAKHS K, MAHENDRAN B, et al. Water reclamation using reverse osmosis: analysis of fouling propagation given tertiary membrane filtration and MBR pretreatments [J]. Journal of Membrane Science, 2011, 382(1/2):328-338.
- [48] JONAS L, BAUM J A, ZIMMERMANN Y S, et al. Comparison of pre-treatment technologies towards improving reverse osmosis desalination of cooling tower blow down[J]. Desalination, 2015, 357:140-149.
- [49] KATSOYIANNIS I A, GKOTSIS P, CASTELLANA M, et al. Production of demineralized water for use in thermal power stations by advanced treatment of secondary wastewater effluent [J]. Journal of Environmental Management, 2017, 190:132-139.
- [50] 刘学军.全膜法水处理技术在电厂锅炉补给水处理中的应用[J].热力发电,2006,35(12):52-55. (LIU Xuejun. Application of full-membrane water treatment technology in the treatment of boiler make-up water in power plant [J]. Thermal Power Generation, 2006, 35(12):52-55. (in Chinese))
- [51] 李长海,张雅潇,党小建.全膜法水处理技术在电厂中的应用[J].工业水处理,2013,33(9):80-83. (LI Changhai, ZHANG Yaxiao, DANG Xiaojian. Application of integrated membrane water treatment technology to a power plant [J]. Industrial Water Treatment, 2013, 33(9):80-83. (in Chinese))
- [52] 申亮,王鹤立,廉新颖,等.市政污水厂出水回用电厂循环水系统工艺研究[J].工业水处理,2011,31(1):55-57. (SHEN Liang, WANG Heli, LIAN Xinyin, et al. Research on process of circulating water system for water recycling power plant of municipal wastewater treatment plant [J]. Industrial Water Treatment, 2011, 31(1):55-57. (in Chinese))
- [53] 王天虎,马克,马龙.国电东胜热电中水回用系统实际运行情况分析[J].内蒙古科技与经济,2010(8):33. (WANG Tianhu, MA Ke, MA Long. Analysis on the actual operation of the water reuse system of state grid Dongsheng thermal power system [J]. Inner Mongolia Sci-Tech Economy, 2010(8):33. (in Chinese))
- [54] 周海滨,张东明,常燕.深度脱氮技术在电厂中水回用中的应用[J].工业水处理,2011,31(3):81-84. (ZHOU Haibin, ZHANG Dongming, CHANG Yan. Application of advanced nitrogen removal technology in reclaimed water reuse of power plant [J]. Industrial Water Treatment, 2011, 31(3):81-84. (in Chinese))
- [55] 顾月平,程材.ABFT工艺应用于热电厂中水回用工程[J].能源环境保护,2013,27(5):46-48. (GU Yueping, CHENG Chai. Application of ABFT process for water reuse in thermal power plants [J]. Energy Environmental Protection, 2013, 27(5):46-48. (in Chinese))
- [56] 倪明,马跃华,徐志清,等.两级过滤膜生物反应器在中水回用火电厂的工程应用[J].水处理技术,2009(8):112-113. (NI Ming, MA Yuehua, XU Zhiqing, et al. Engineering application of two-stage filter membrane bioreactor in reclaimed water thermal power plant [J]. Water Treatment Technology, 2009(8):112-113. (in Chinese))
- [57] 丁杰,苏尼娜,陈东旭.膜生物反应器在城市中水回用中的应用[J].水处理技术,2008,34(10):71-74. (DING Jie, SU Nina, CHEN Dongxu. Application of membrane bioreactor in urban reclaimed water reuse [J]. Water Treatment Technology, 2008, 34(10):71-74. (in Chinese))
- [58] 程立国.MBR在电厂中水回用深度处理中的应用与探讨[J].能源环境保护,2014,28(5):52-54. (CHENG Ligu. Application and discussion of MBR in advanced treatment of reclaimed water reuse in power plants [J]. Energy Environmental Protection, 2014, 28(5):52-54. (in Chinese))
- [59] 刘炎伟,刘付德,徐行洋,等.膜生物反应器在电厂中水回用中的应用研究[J].热力发电,2006,35(12):56-

57. (LIU Yanwei, LIU Fude, XU Hangyang, et al. Application of membrane bioreactor in water reuse of power plants [J]. Thermal Power Generation, 2006, 35 (12):56-57. (in Chinese))
- [60] TAM L, TANG T, LAU G N, et al. A pilot study for wastewater reclamation and reuse with MBR/RO and MF/RO systems[J]. Desalination, 2007, 202(1/2/3):106-113.
- [61] QIN J J, KEKRE K A, TAO G, et al. New option of MBR-RO process for production of NEWater from domestic sewage[J]. Journal of Membrane Science, 2006, 272 (1/2):70-77.
- [62] LI K, WANG J, LIU J, et al. Advanced treatment of municipal wastewater by nanofiltration: operational optimization and membrane fouling analysis[J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, 43:106-117.
- [63] CARTAGENA P, KADDOURI M, CASES V, et al. Reduction of emerging micropollutants, organic matter, nutrients and salinity from real wastewater by combined MBR-NF/RO treatment [J]. Separation and Purification Technology, 2013, 110:132-143.
- [64] 尹星, 吴志超, 王志伟, 等. MBR-纳滤组合工艺在生活污水和大型超市废水处理中的研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4 (1):120-124. (YIN Xing, WU Zhichao, WANG Zhiwei, et al. Study on combined MBR-NF process for treating domestic wastewater and a big shopping mall's wastewater [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(1):120-124. (in Chinese))
- [65] 王冬梅, 程家庆, 孔繁军. 脱硫废水零排放技术与工艺路线[J]. 工业水处理, 2017, 37(8):109-112. (WANG Dongmei, CHENG Jiaqing, KONG Fanjun. Zero discharge technology and process route of desulfurization wastewater [J]. Industrial Water Treatment, 2017, 37(8):109-112. (in Chinese))
- [66] COLBURN A S, MEEKS N, WEINMAN S T, et al. High total dissolved solids water treatment by charged nanofiltration membranes relating to power plant applications [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, 55(14):4089-4097.
- [67] DOW N, GRAY S, LI J D, et al. Pilot trial of membrane distillation driven by low grade waste heat: membrane fouling and energy assessment [J]. Desalination, 2016, 391:30-42.
- [68] 李乐, 马志环, 翟绍晶, 等. 纳滤处理火电厂循环水补水提高浓缩倍率试验研究[J]. 中国电力, 2017, 50(7):133-137. (LI Le, MA Zhihuan, CUI Shaojing, et al. Experimental study on improving the concentration ratio of circulating water by processing make-up water with nanofiltration in coal-fired power plants [J]. Electric Power, 2017, 50(7):133-137. (in Chinese))
- [69] 王玲, 熊伟东. 电厂锅炉补给水处理中的膜分离技术[J]. 工业锅炉, 2012(6):14-17. (WANG Ling, XIONG Weidong. Membrane technologies in boiler feed water treatment [J]. Industrial Boiler, 2012(6):14-17. (in Chinese))
- [70] WANG P, CHUNG T S. Recent advances in membrane distillation processes: membrane development, configuration design and application exploring[J]. Journal of Membrane Science, 2015, 474:39-56.
- [71] 王美琪, 刘龙飞, 张胜寒, 等. 膜蒸馏技术的研究进展及其在电厂中的应用现状[J]. 华北电力技术, 2017(6):62-66. (WANG Meiqi, LIU Longfei, ZHANG Shenghan, et al. The development of membrane distillation technology and its application in power plants [J]. North China Electric Power, 2017(6):62-66. (in Chinese))
- [72] JIA F, WANG J. Treatment of flue gas desulfurization wastewater with near-zero liquid discharge by nanofiltration-membrane distillation process[J]. Separation Science and Technology, 2018, 53(1):146-153.
- [73] YAN Z, YANG H, QU F, et al. Reverse osmosis brine treatment using direct contact membrane distillation: effects of feed temperature and velocity[J]. Desalination, 2017, 423:149-56.
- [74] YAN Z, YANG H, YU H, et al. Reverse osmosis brine treatment using direct contact membrane distillation (DCMD): effect of membrane characteristics on desalination performance and the wetting phenomenon [J]. Environmental Science: Water Research & Technology, 2018, 4(3):428-437.
- [75] NAIDU G, JEONG S, CHOI Y, et al. Membrane distillation for wastewater reverse osmosis concentrate treatment with water reuse potential [J]. Journal of Membrane Science, 2017, 524:565-575.
- [76] PANDEY S R, JEGATHEESAN V, BASKARAN K, et al. Fouling in reverse osmosis (RO) membrane in water recovery from secondary effluent: a review[J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2012, 11(2):125-145.
- [77] SHIM Y, LEE H J, LEE S, et al. Effects of natural organic matter and ionic species on membrane surface charge[J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36 (17):3864-3871.
- [78] ZULARISAM A W, ISMAIL A F, SALIM R. Behaviours of natural organic matter in membrane filtration for surface water treatment: a review [J]. Desalination, 2006, 194 (1):211-231.
- [79] JAWOR A, HOEK E M V. Effects of feed water temperature on inorganic fouling of brackish water RO membranes[J]. Desalination, 2009, 235(1):44-57.
- [80] HU H Y, DU Y, WU Q Y, et al. Differences in dissolved organic matter between reclaimed water source and drinking water source [J]. Science of The Total Environment, 2016, 551:133-142.

(下转第 16 页)

- example [J]. Journal of Natural Science of Human Normal University, 2013, 36(1): 86-90. (in Chinese))
- [8] 王繁玮, 陈星, 朱琰, 等. 基于 PSR 的城市水生态安全评价体系研究: 以“五水共治”治水模式下的临海市为例[J]. 水资源保护, 2016, 32(2): 82-86. (WANG Yiwei, CHEN Xing, ZHU Yan, et al. Study of urban aquatic ecological security evaluation system based on PSR model: a case study in Linhai City under mode of co-governance on five water categories[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2): 82-86. (in Chinese))
- [9] 郝光玲, 王烜, 罗阳, 等. 基于改进的综合评价模型的北京市水资源短缺风险评价[J]. 水资源保护, 2017, 33(6): 27-31. (HAO Guangling, WANG Xuan, LUO Yang, et al. Assessment of water shortage risk in Beijing based on improved comprehensive evaluation model[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(6): 27-31. (in Chinese))
- [10] 于凤存, 方国华. 饮用水水源地综合预警指标体系构建的研究[J]. 中国农村水利水电, 2011(8): 93-95. (YU Fengcun, FANG Guohua. Research on comprehensive early-warning index system of drinking water area[J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(8): 93-95. (in Chinese))
- [11] 何贝贝, 李绍飞, 朱习爱. 天津市水环境安全评价及其指标体系研究[J]. 水资源保护, 2016, 32(1): 125-129. (HE Beibei, LI Shaofei, ZHU Xi'ai. Study on water environment security evaluation and index system in Tianjin City[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(1): 125-129. (in Chinese))
- [12] 于凤存, 方国华, 肖秋英. 集中式饮用水水源地安全预警系统框架的研建[J]. 灾害学, 2008(4): 21-24. (YU Fengcun, FANG Guohua, XIAO Qiuying. Safety warning system for water source area of centralized drinking water[J]. Journal of Catastrophology, 2008(4): 21-24. (in Chinese))
- [13] 杨竹. 基于 AHP-模糊评价法的水源涵养生态环境评价[D]. 北京: 中国地质大学, 2016.
- [14] 冯利华, 骆高远. 区域水环境自净能力的定量评价[J]. 环境保护科学, 2002, 28(5): 23-24. (FENG Lihua, LUO Gaoyuan. Quantitative evaluation on self-purification of water environment of area[J]. Environmental Protection Science, 2002, 28(5): 23-24. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-12-01 编辑: 王 芳)

(上接第 11 页)

- [81] LEE H J, KIM H E, LEE C. Combination of cupric ion with hydroxylamine and hydrogen peroxide for the control of bacterial biofilms on ro membranes [J]. Water Research, 2017, 110: 83-90.
- [82] ZHU X, ELIMELECH M. Colloidal fouling of reverse osmosis membranes: measurements and fouling mechanisms [J]. Environmental Science & Technology, 1997, 31(12): 3654-3662.
- [83] KOMLENIC R. Rethinking the causes of membrane biofouling [J]. Filtration & Separation, 2010, 47(5): 26-28.
- [84] KHAMBHATY Y, PLUMB J. Characterization of bacterial population associated with a brackish water desalination membrane [J]. Desalination, 2011, 269(1): 35-40.
- [85] BAE H, JEONG D, KIM H, et al. Dynamic shift in community structures of biofilm-forming bacteria by the pre-treatment systems of seawater reverse osmosis processes [J]. Desalination, 2014, 343: 17-25.
- [86] TAN Y J, SUN L J, LI B T, et al. Fouling characteristics and fouling control of reverse osmosis membranes for desalination of dyeing wastewater with high chemical oxygen demand [J]. Desalination, 2017, 419: 1-7.
- [87] LEE J, JUNG J Y, KIM S, et al. Selection of the most problematic biofoulant in fouled RO membrane and the seawater intake to develop biosensors for membrane biofouling [J]. Desalination, 2009, 247(1): 125-136.
- [88] WU B, SUWARNO S R, TAN H S, et al. Gravity-driven microfiltration pretreatment for reverse osmosis (RO) seawater desalination: microbial community characterization and RO performance [J]. Desalination, 2017, 418: 1-8.
- [89] AYACHE C, MANES C, PIDOU M, et al. Microbial community analysis of fouled reverse osmosis membranes used in water recycling [J]. Water Research, 2013, 47(10): 3291-3299.
- [90] MIYOSHI T, TSUYUHARA T, OGYU R, et al. Seasonal variation in membrane fouling in membrane bioreactors (MBRs) treating municipal wastewater [J]. Water Research, 2009, 43(20): 5109-5118.
- [91] ZHENG L, YU D, WANG G, et al. Characteristics and formation mechanism of membrane fouling in a full-scale RO wastewater reclamation process: Membrane autopsy and fouling characterization [J]. Journal of Membrane Science, 2018, 563: 843-856.
- [92] MALAEB L, AYOUB G M. Reverse osmosis technology for water treatment: state of the art review [J]. Desalination, 2011, 267(1): 1-8.
- [93] 宋恩民, 杨曦, 王峰. 浅析 RO 预处理系统的设计要点 [J]. 山东煤炭科技, 2007(5): 53-54. (SONG Enming, YANG Xi, WANG Feng. Analysis of design points of RO pretreatment system [J]. Shandong Coal Science and Technology, 2007(5): 53-54. (in Chinese))

(收稿日期: 2018-01-26 编辑: 熊水斌)