DOI:10.11918/202503025

中国钢铁工业废水脱盐及水资源回用技术应用现状

刘文清[1],刘国宏[1],刘金哲[1,2],陈新懿[1],方岩彬[1],冯玉杰[1]

(1.城乡水资源与水环境国家重点实验室(哈尔滨工业大学),哈尔滨 150090;2.河钢集团战略研究院,石家庄 050023)

摘 要:钢铁行业是典型的高水耗、高废水排放量行业。钢铁生产过程中会产生大量综合废水,具有成分复杂、含盐量高、水质水量波动较大等特点。实现此类废水的有效脱盐与回用,对推动钢铁企业降低新水取水量、提升水资源循环利用率及实现绿色可持续发展具有重大意义。根据现有工程案例及相关研究,介绍了钢铁厂综合废水的来源及特点,系统阐述了当前主流的脱盐处理技术,包括反渗透、离子交换、纳滤、电吸附、电渗析、电去离子法及其组合工艺的原理、优缺点、适用范围和技术经济性,总结了近年来中国钢铁厂脱盐回用技术的应用情况,并结合典型钢铁厂实地考察数据,对比了常用综合废水脱盐回用工艺(双膜法及电吸附法)的实际应用效果与运行成本,有针对性地提出了钢铁工业废水脱盐及水资源回用技术的发展方向。本研究可为钢铁工业综合废水脱盐技术的选择和优化提供基础支撑。

关键词:钢铁工业;综合废水;脱盐回用;技术经济分析

中图分类号:X703 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)10-0132-11

Application status of wastewater desalination and water resource reuse technologies in China's steel industry

Liu Wenqing[1], Liu Guohong[1], Liu Jinzhe[1,2], Chen Xinyi[1], Fang Yanbin[1], Feng Yujie[1]

(1. State Key Laboratory of Urban-rural Water Resource and Environment (Harbin Institute of Technology), Harbin 150090, China; 2. Strategic Research Institute, HBIS Group Co., Ltd., Shijiazhuang 050023, China)

Abstract: The steel industry is typically characterized by high water consumption and substantial wastewater discharge. Its production process generates a large volume of comprehensive wastewater, characterized by complex composition, high salinity, and significant fluctuations in water quality and quantity. Achieving effective desalination and reuse of such wastewater is essential for reducing fresh water intake, enhancing water resource recycling rates, and promoting green and sustainable development in the field. According to the existing engineering application cases and published related studies, this paper introduced the sources and characteristics of comprehensive wastewater in steel plants. Then, it systematically elaborated on the principles, advantages and disadvantages, applications, and techno-economic feasibility of mainstream desalination methods, including reverse osmosis, ion exchange, nanofiltration, electro-adsorption, electrodialysis, and electro-deionization, as well as their combination processes. Furthermore, this paper summarized the current application status of desalination and reuse technologies in China's steel plants. Finally, by incorporating field data from typical steel plants, a comparative analysis was conducted on the actual performance and operational costs of commonly used desalination and reuse processes (such as dual-membrane methods and electro-adsorption). Based on the findings, targeted recommendations were proposed for the future development of desalination and water reuse technologies in steel plants. This review aims to provide foundation support for the selection and optimization of desalination technologies for comprehensive wastewater in the steel industry.

Keywords: steel industry; comprehensive wastewater; desalination and reuse; techno-economic analysis

随着经济社会的发展,水资源短缺与工业发展之间的矛盾日益尖锐。钢铁行业是典型的高水耗行业,占中国工业总水耗的10%左右;同时也是典型的高废水排放行业,占中国工业废水排放总量的14%[1]。《工业水效提升行动计划》提出:到2025年,钢铁行业吨钢取水量需降低10%。为达到这一目标,实现钢铁行业可持续发展、强化钢铁行业的水处理及回用等水资源提质增效势在必行。

收稿日期:2025-03-06;**录用日期**:2025-05-13;**网络首发日期**:2025-10-28
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20251027.1814.002
基金项目:基于水资源配置结构的水效评估体系构建与系统优化(HG2023225)
作者简介:刘文清(2001—),女,硕士研究生;刘国宏(1989—),女,副教授,博士生导师;冯玉杰(1966—),女,教授,博士生导师
通信作者:冯玉杰,yujief@hit.edu.cn;刘国宏,liuguohong7@hit.edu.cn

当前，针对钢铁工业废水处理及循环利用，国家已出台多项政策和条例。如《“十四五”工业绿色发展规划》中提到应推动钢铁工业废水再生回用；GB 50405—2017《钢铁工业资源综合利用设计规范》[2]中也指出了钢铁厂应建立全厂性生产废水回收处理站，并宜建设深度处理回用设施，以提高回用水水质及废水重复利用率。

钢铁行业循环水系统中水的不断循环导致含盐量增加而难以回用，最终不得不外排[3]，收集这部分废水至综合处理中心并进行处理回用，可大大降低新水用量，对钢铁企业的节水工作意义重大，同时，可减少废水排放量或不对外排放废水，对实现废水“零排放”具有重要意义[4]。然而，钢铁厂传统的处理工艺无法解决回用水中含盐量高的问题，为改善回用水水质，降低生产系统补水含盐量，需利用脱盐技术来去除水中的盐分，方能实现水资源回用。目前，废水脱盐回用的主要技术有反渗透（reverse osmosis，RO）、纳滤（nanofiltration，NF）、电吸附（electro-sorption，EST）、电渗析（electrodialysis，ED）、离子交换（ion exchange，IX）和电去离子法（electro-deionization，EDI）。废水脱盐技术常面临运行成本高、能耗高以及二次污染等挑战，如膜法脱盐膜材料成本高昂，且需要频繁更换或清洗，提高了运行成本；离子交换法脱盐需要加大量酸碱，易造成二次污染等。目前，对脱盐工艺的评价主要集中在煤化工领域[5-8]，而缺乏钢铁行业废水脱盐技术的经济评价。随着钢铁企业水系统降本增效目标的提出，脱盐工艺作为水资源处理与再利用的关键环节，选择经济适宜的钢铁厂综合废水脱盐技术成为了企业关注的一大问题。

本研究从钢铁厂综合废水的来源及特点出发，讨论了各种脱盐回用技术及其组合工艺的原理和适用条件，并就其处理效果、成本及实际工程应用情况进行了综合分析，为钢铁厂含盐废水回用工艺的选择提供技术指导及支撑。

1　钢铁厂综合废水来源及特点

1.1　钢铁厂综合废水来源

钢铁厂综合废水一般包括钢铁厂烧结球团、炼铁、炼钢、热轧、发电等生产工序直接和间接循环冷却水系统的排污水及冷轧、焦化等经单独处理后达标排放的废水、少部分生活污水以及在合流制排水系统中截留的雨水等[9]，其中，主要的废水来源是净环、浊环等循环水系统的排污水。

1.2　钢铁厂综合废水特点

钢铁厂综合废水主要包括生产工序废水及生活污水等，成分复杂、水质水量波动较大[10]，是最难处理的一类废水，主要污染物有 COD、悬浮物、硬度、油类和盐类等，典型水质如表 1 所示。其中，水中盐类的来源主要可分为补水过程携带和药剂投加引入两大部分[11]。新水中自带的盐分，如 Ca^{2+}、SO_4^{2-}、Cl^- 等会随着补水进入循环水系统，并不断蒸发浓缩，最终会随排水进入综合废水系统；新鲜补水、废水处理过程以及循环水系统中所投加的药剂（如酸、碱）也是水系统盐分的主要来源。理论上钢铁厂综合废水经深度处理后作为中水回用，是钢铁厂水资源高效利用的重要途径。但常规处理技术并不能除去废水中的盐分，若不经过脱盐处理，长期运行会导致中水系统电导率越来越高，进而增加循环水系统结垢腐蚀风险、提高加药和补水成本，并对工厂设备产生损耗等一系列负面影响，因此，对钢铁厂废水进行除盐处理是水回用的前提和保障。

表 1　钢铁厂综合废水典型水质[11-12]

Tab. 1　Typical water quality of comprehensive wastewater in steel plants[11-12]

pH	悬浮物/（mg·L^{-1}）	COD/（mg·L^{-1}）	油类/（mg·L^{-1}）	总硬度/（mg·L^{-1}）（以 $CaCO_3$ 计）	总碱度/（mg·L^{-1}）（以 $CaCO_3$ 计）	TDS/（mg·L^{-1}）	Cl^-/（mg·L^{-1}）
6.5～9.5	20～200	30～90	2～10	200～800	100～200	600～2 000	100～350

2　钢铁厂常用综合废水脱盐回用工艺及技术经济分析

2.1　常用脱盐回用工艺

钢铁厂综合废水通常含盐量较高，对部分废水进行回用前的脱盐处理，降低回用水的 Cl^- 浓度、电导率和硬度等，有利于提高钢铁厂循环水系统的浓缩倍数，降低新水耗量。在进入脱盐系统前，钢铁厂综合废水首先经深度处理，常用工艺流程为“高密度沉淀池—V 型滤池”，主要去除废水中的悬浮物、浊度和油类等，确保出水水质满足进入脱盐系统的要求。工业上常用的脱盐技术有反渗透、离子交换、纳滤、电吸附、电渗析和电去离子技术。

2.1.1　反渗透（RO）

反渗透是通过施加外部压力克服渗透压来实现废水的分离净化[13]。在高压泵的作用下，利用反渗透膜只允许水分子通过的特点，将其与有机物、无机离子、胶体颗粒、细菌等溶质进行分离从而制得脱盐

水,而未通过膜的水溶液浓度逐渐增大,成为浓水。为防止废水中的微生物等对反渗透膜造成污染,降低清洗维护成本[14],工业上常将超滤(ultrafiltration,UF)/微滤(microfiltration,MF)/纳滤(nanofiltration,NF)作为反渗透的预处理技术,组合在一起使用。反渗透技术较为成熟,对废水中的悬浮物以及重金属离子等污染物的去除率均高达95%以上[15],出水水质较好,是工业上回用与零排放的主流技术之一,与传统处理工艺相比,有很大的经济、技术和环保优势[16-17]。陈阳春等[18]根据某钢厂废水水质特点,选择了双膜法(UF + RO)作为脱盐工艺,其产水水质高于工业新水标准,每年可节约包括新水取水费和排污费在内共 1 336.89 万元。Valentina 等[19]评估了双膜法处理钢铁厂废水的效果,结果表明反渗透能去除大部分盐类,可有效减少新水消耗和废水排放量,提高生产设备的使用寿命。

然而,反渗透膜结垢限制了其水回用率的提高[20],回用率一般为 60% ~75%。为提高回用率,需做好有效的预处理工作,如使用双碱法去除硬度、混凝沉淀法去除悬浮物和浊度、超滤去除胶体和细菌等杂质[21],因此,反渗透法还存在预处理较复杂、需使用大量阻垢剂等化学药剂的问题。反渗透膜在处理钢铁厂废水的过程中,不可避免会出现膜污染现象,造成膜性能下降,还会影响膜使用寿命[22]。根据课题组对某钢铁厂反渗透膜及水样的分析,发现该厂由于回用水站无硬度去除能力,废水中钙镁离子含量高,导致膜表面易发生无机物污染。此外,总氮和氨氮等造成的有机物和生物污染也是膜污染的潜在原因,建议优化回用水站工艺,强化除硬及脱氮效果,并注意监测膜系统的运行状态,及时调整操作参数,定期进行物理和化学清洗,以维持系统的长期稳定运行。反渗透膜正常使用寿命为 2 ~5 a,控制进水水质并做好日常维护可有效延长膜寿命,张亚宇等[23]以格网为基本单元进行污染现象分析,采取运行控制和顽固污染清洗措施,有效保持了膜性能,膜元件寿命已达 7 a,产品水水质高于要求。

反渗透膜的研制一直是国内外膜领域的研究热点[24],未来应注重研发具备抗污染、高通量的新型膜材料。同时,随着人工智能的快速发展,未来可构建智慧化膜系统管理平台,利用大数据等技术预测进水污染性[25],实时监测膜系统状态,动态调整清洗周期和加药量等运行参数,实现反渗透系统的智能化运行。

2.1.2 电吸附(EST)

电吸附法(EST)又称为电容去离子法(capacitive deionization,CDI),利用外加电场使含盐水中正负离子分别向不同的电极移动后吸附在电极表面,从而达到脱盐的目的。电吸附法具有操作简单且灵活、使用寿命长(≥5 a)、运行成本较低[26]、预处理要求低、特殊离子(如氟、氯、钙、镁等)去除效果显著等优点。所产水可满足生产新水的水质要求,但达不到软水、除盐水水质要求[27],适用于对硬度和盐度要求不高的钢铁工业新水用户,据统计,目前仅在宝钢 2030、梅钢[28]及武钢中试[29]中有应用。邹正东[30]采用电吸附法处理梅钢出水,处理水量为 500 L/h,中试结果显示,电吸附法对离子态盐类的去除效果明显,对 Cl^-、SO_4^{2-}、硬度和总离子的去除率分别达 82%、80%、93% 和 81%,且直接运行药剂成本较低,可用于特定环境下的深度处理耦合工艺。

然而,电吸附法由于装置成本高、脱盐稳定性不足等问题限制了大规模应用[31],并且废水中的有机物及铁离子会导致系统出现有机污染和离子结垢污染的问题,影响脱盐性能和电荷效率[32]。此外,吸附材料的再生效果即材料的稳定性也会影响系统使用寿命[33]。未来电吸附法应向开发高性能且低成本的电极材料、提高电极抗污染性、优化预处理过程以降低电极的污染结垢风险[34]、优化电极结构(如设计三维多孔结构等[35])以提高电吸附稳定性和电流效率、加强与不同脱盐技术的集成耦合应用[36]等方向发展,以推动其更大规模的产业化应用。

反渗透和电吸附法是目前钢铁企业废水脱盐处理中最常用的两项技术,对反渗透及电吸附法的技术特点进行了对比,如表 2 所示。

表 2 反渗透与电吸附法技术特点比较

Tab. 2 Comparison of technical characteristics between reverse osmosis and electro-adsorption method

项目	反渗透	电吸附
脱盐原理	以压力为推动力,利用反渗透膜只允许水分子通过的特性,将其与其他离子进行分离	利用带电电极对水中离子进行静电吸附从而达到脱除污染物的目的
核心原理	半透膜选择透过性	双电层理论
作用力	压力	电场力
透过物	溶剂,水	溶质,盐
截留物	溶质,盐	溶剂,水
核心元件寿命	2 ~5 a	≥5 a[26]

2.1.3 纳滤(NF)

纳滤膜是介于超滤(UF)和反渗透(RO)之间的压力驱动膜分离技术,能截留分子质量在 200 ~ 1 000的物质,如二价盐、糖类等,而水、溶剂等分子质量小于 200 的物质可通过纳滤膜[37]。纳滤可实

现有机物与小分子无机物、一价盐与多价盐的分离[38]等，具有操作压力低、膜通量大等特点，且运行条件较反渗透宽松，运行成本较低。工业上主要用于适度除盐与分盐浓缩，常与超滤或反渗透等技术结合，以提高脱盐效果及回用率。方健等[39]采用两级双膜法对钢铁厂废水进行深度处理，用二级纳滤处理一级反渗透浓水，提高了总体产水回用率，纳滤出水与反渗透出水混合用作生产消防水，满足了用户的分级用水需求。但纳滤对可溶性单价离子（如 Cl^-）的去除率低，产水水质较反渗透膜差。

2.1.4　电渗析（ED）

电渗析法是在正负电极之间交替放置阴阳离子交换膜，在外加直流电场的驱动下，使阴阳离子定向移动，从而实现脱盐。电渗析法发展至今已有 130 余年的历史，中间衍生出了倒极电渗析（electrodialysis reversal，EDR）、双极膜电渗析（bipolar membrane electrodialysis，BPED）等一系列技术，其中，EDR 应用最为广泛，大多数情况下的电渗析一般就是指 EDR。EDR 通过每隔 15 ~ 20 min 倒换正负电极极性实现自清洗功能[40]，改善了系统的结垢现象，大大提高了水回用率，延长了运行周期。电渗析法技术已相对成熟，可与超滤联用，在高盐废水处理方面得到广泛应用。Yeh 等[41]采用 EDR 技术处理台湾中钢的冷轧废水，EDR 产水经混床深度脱盐后出水回用，其中，EDR 系统脱盐率达 85%，经混床处理后出水水质高，电导率降至（0.82 ±1）μS/cm，该系统可节约包括纯水取水费和废水处理费在内超 11 600 万新台币（折合人民币 2 576.36 万元）。但电渗析法难以处理高硬度废水，且存在能耗高、成本高、无法去除水中的有机物和细菌[42]等问题。随着反渗透在水处理中的发展，更多地选择高效低成本的反渗透用于废水的脱盐回用而非电渗析。

2.1.5　离子交换（IX）

离子交换法是利用阴阳离子交换剂与溶液中的离子发生交换反应，实现废水中离子的有效分离。离子交换法可分为阴阳床与混床，其中，阴阳床（即复床）是由阳离子交换器与阴离子交换器串联组成完成脱盐，含盐废水先经过阳离子交换器去除 Ca^{2+}、Mg^{2+} 等阳离子，经过脱碳器除碳后再进入阴离子交换器中去除 SO_4^{2-}、Cl^-、$HSiO_3^-$ 等阴离子。混床是把一定比例的阴、阳离子交换树脂混合装填于同一交换装置中，能去除水中的大部分离子，出水达到极高的纯度，可用作高压锅炉补水。离子交换法对水中离子的去除率高、产水水质好、适用范围广。岳丽芳等[43]采用混床对双膜法出水进行深度除盐，产生的纯水水质达到 GB/T 1576—2018《工业锅炉水质》[44]的要求，可用于锅炉补水。康勇等[28]采用反渗透 + 阴阳床 + 混床法处理新余钢铁厂中水，产水可分别回用于新水、除盐水、软水系统等，节约了新水用量。

然而，离子交换剂需要定期更换，当溶液中需去除的离子种类过多时，需使用多种交换剂，因此，该法更适用于含盐量低、杂质种类单一的溶液脱盐[45]。钢铁厂中水 TDS 较高，一般在 1 000 ~ 2 000 mg/L，若直接用离子交换法脱盐，将导致设备过大、再生频繁、运行费用过高等问题[46]，因此，在钢铁厂综合废水脱盐回用中，离子交换法一般用于后端脱盐产高纯水。需要注意的是，离子交换法再生时耗酸、碱量大，会给水系统引入大量的盐分，增大末端除盐的压力，因此，从盐平衡的角度看并不太适合于零排放企业。

2.1.6　电去离子（EDI）

电去离子法结合了电渗析与离子交换法，通过阳、阴离子膜对离子的选择透过性及离子交换树脂对水中离子的交换作用，并在电场的作用下实现水中离子的定向迁移，以达到深度除盐目的。EDI 通过离子交换树脂界面水分子发生极化产生的 H^+ 和 OH^- 对装填树脂进行电化学再生，无需使用酸和碱即可连续制取高品质的超纯水，避免了二次污染，且不易浓差极化[47]。EDI 凭借高效简便、环境影响小于离子交换法[48]等特点，目前已成为了超纯水制备方面的主流技术，在钢铁行业综合废水回用领域常用于一级或二级反渗透后产高品质超纯水。李东升[49]采用 EDI 对钢铁厂两级反渗透出水进行深度脱盐，产生的超纯水可外供以实现更高的经济价值。但 EDI 存在初期投资较大、预处理工艺复杂、使用寿命较短（一般为 3 ~ 5 a）等缺点，并且，EDI 膜堆的运行性能受进水水质的影响很大，膜和树脂易受到污染而性能衰减较快，在实际工程中应注意保障进水水质，并定期对模块进行清洗、维护和更换等。

2.2　技术经济分析

不同工艺的脱盐性能及经济成本等差异显著，有必要对各脱盐工艺进行技术经济对比，分析各工艺在钢铁行业应用的优劣势及适用场景，为钢铁厂脱盐工艺的选择提供理论支撑。

对比分析上述脱盐工艺的运行成本、能耗、进水 TDS 范围、TDS 去除率、回用率、总硬度与 Cl^- 去除率，如表 3 所示。

根据常用脱盐工艺的介绍及表 2 中的经济技术性分析，总结了各脱盐工艺的优缺点以及在钢铁行业中的适用场景，如表 4 所示。

表 3 常用脱盐工艺技术经济对比

Tab. 3 Techno-economic comparison of common desalination technologies

技术	运行成本/(元·m^{-3})	能耗/(kWh·m^{-3})	进水 TDS/(mg·L^{-1})	TDS 去除率/%	回用率/%	总硬度去除率/%	Cl^- 去除率/%	参考文献
反渗透	2 ~ 4	1.2 ~ 8.5	500 ~ 50 000	90 ~ 99	一级 50 ~ 75，二级 80 ~ 90	>98	>90	[50 - 51]
纳滤	0.5 ~ 2.5	2 ~ 6	300 ~ 30 000	80 ~ 95	50 ~ 85	>98	50 ~ 65	[50,52]
电渗析	3 ~ 5	1 ~ 12	1 000 ~ 200 000	60 ~ 90	60 ~ 90	90 ~ 95	>90	[50 - 51]
电吸附	0.50 ~ 1.75	1 ~ 2	<5 000	65 ~ 85	70 ~ 85	70 ~ 90	65 ~ 85	[51,53 - 54]
离子交换	0.5 ~ 1.0	1 ~ 5	<500	>99	90 ~ 95	>96	>95	[50,55]
电去离子	0.5 ~ 3.0	0.25 ~ 0.70	<10	97.0 ~ 99.9	60 ~ 95	>99	>99	[50]

表 4 常用脱盐工艺技术优缺点及适用场景

Tab. 4 Advantages, disadvantages, and application scenarios for common desalination technologies

技术	优点	缺点	适用场景
反渗透	对污染物去除效果好、适应性强	运行成本较高、膜易污染、对预处理要求较高	与超滤/微滤结合进行废水脱盐
纳滤	运行成本较低	对一价盐(如 Cl^-)去除效果较差	适度除盐及分盐浓缩
电渗析	技术成熟、操作简便	能耗及成本较高、脱盐率并不高	处理高盐废水
电吸附	运行成本低、回用率较高	脱盐效果及稳定性较差、使用周期短、易发生有机污染和结垢污染	对回用水水质要求不高的钢铁工业新水用户[55]
离子交换	脱盐率高且出水水质稳定	再生频繁、酸碱耗量大、运行费用高	深度脱盐产高纯水
电去离子	脱盐率高、无需酸碱再生	初期投资大、膜和树脂性能衰减较快	深度脱盐产高纯水

3 钢铁厂常用综合废水脱盐回用工艺组合及技术经济分析

3.1 常用脱盐回用工艺组合

由于多种因素的影响，单个工艺处理含盐废水很难达到最佳性能。为了提高处理效果，工业上常使用工艺组合，即将两种或多种脱盐处理技术结合起来处理废水的方法。总结了常见的脱盐工艺组合，如图 1 所示。钢铁厂生产用水主要可分为生产新水和除盐水两大类。其中，除盐水可分为一级除盐水和二级除盐水，钢铁厂一般将经一级反渗透处理的出水称为一级除盐水，将一级除盐水再进行深度脱盐所产水称为二级除盐水。不同厂区对用水水质的要求并非完全统一，通常来说，生产新水的电导率应小于 500 μS/cm，一级除盐水的电导率应小于 50 μS/cm，二级除盐水的电导率应小于 10 μS/cm[56]。

在常见的脱盐组合工艺中，如图 1(a)所示，原水经过滤及超滤预处理后进入一级反渗透，所产水为一级除盐水，可作为连铸、加热炉汽化等产线较高品质冷却水的补水；如图 1(b)所示，原水经过滤后进入电吸附系统进行脱盐，电吸附产水可满足生产新水水质要求，用作浊环等低品质用水循环系统的补水；如图 1(c)所示，原水经预处理后进入一级反渗透，产水作为一级除盐水回用，浓水进入纳滤系统进行脱盐处理以提高水的回用率，纳滤出水与反渗透出水混合后可作厂区消防用水；对于有更高用水需求的钢铁企业可选择如图 1(d)、(e)和(f)所示的工艺组合，原水经预处理后进入反渗透系统，反渗透所产淡水一部分作为一级除盐水直接回用，剩余淡水则进入混床、阴阳床及 EDI 等进行深度脱盐，所产二级除盐水是产线最高要求用水，可用作加热汽化锅炉补水，并且当来水水质较差时，可设置两级反渗透来满足深度脱盐系统的进水要求。钢铁厂可根据进水水质及自身用水需求选择相应脱盐工艺。

根据 2016—2023 年发表的文献[3,11,29,57 - 73]，统计了中国 32 家钢铁企业综合废水脱盐回用中所用工艺情况，如图 2 所示。

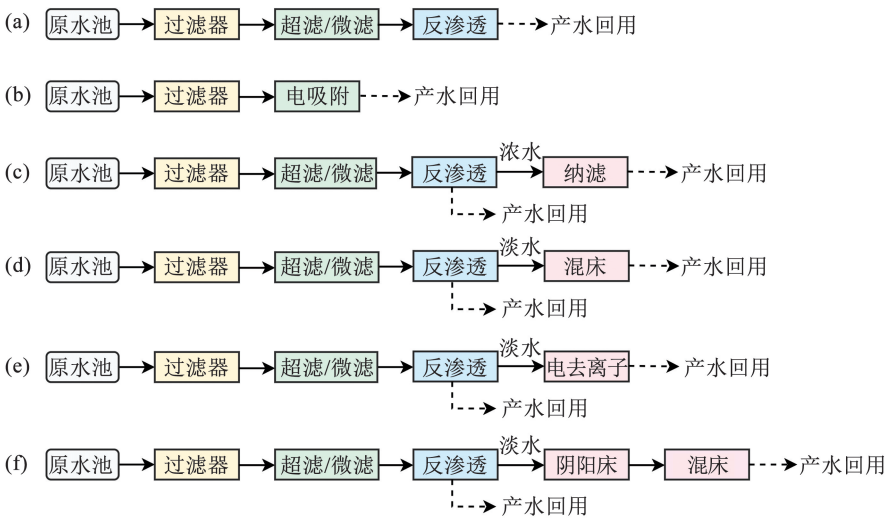


图 1　常见脱盐工艺组合

Fig. 1　Common combination processes for desalination

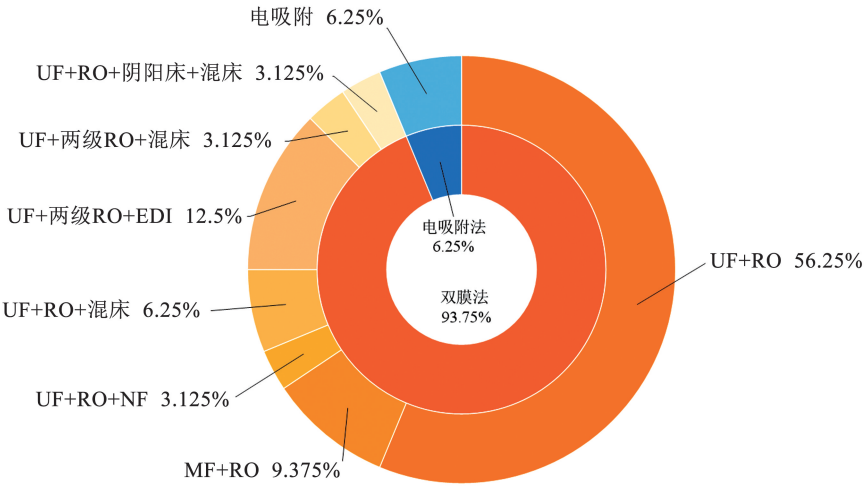


图 2　中国 32 家钢铁企业综合废水脱盐回用中所用工艺情况

Fig. 2　Conditions of technologies used in desalination and reuse of comprehensive wastewater in 32 steel enterprises in China

调研发现，32 家钢铁厂主体工艺为双膜法（占比最高，为 93.75%），其中，18 家为 UF + RO（56.25%），3 家为 MF + RO（9.375%），1 家为 UF + RO + NF（3.125%）。对产水有更高要求的厂家中，2 家使用 UF + RO + 混床（6.25%），4 家使用 UF + 两级 RO + EDI（12.5%），1 家使用 UF + 两级 RO + 混床（3.125%），1 家使用 UF + RO + 阴阳床 + 混床（3.125%）。宝钢 2030 与梅钢采用电吸附法（6.25%）。

3.2　双膜法和电吸附法技术经济分析

YB/T 4699—2019《钢铁企业综合废水深度处理技术规范》[55] 在脱盐部分推荐钢铁企业应用反渗透技术处理综合废水，在对水质要求较低时可使用电吸附技术。从图 2 中总结的中国各钢铁厂脱盐工艺使用情况也可以看出，双膜法应用占比最大，且远远大于其他脱盐工艺，电吸附法其次。因此，针对双膜法和电吸附法进行技术经济性分析。

根据文献[26]以及某钢铁厂实地考察收集了相关数据，如表 5 所示。

取电价为 0.65 元/kWh，盐酸（质量分数 31%）0.55 元/kg，液碱（质量分数 32%）3.5 元/kg，反渗透膜阻垢剂 48 元/kg，反渗透膜还原剂 9 元/kg，次氯酸钠 0.75 元/kg，pH 调节剂 15 元/kg，膜碱性清洗剂 34 元/kg，膜酸性清洗剂 9 元/kg，非氧化性杀菌剂 18 元/kg。计算了双膜法和电吸附法的回用率、污染物去除率及运行费用，对相同处理规模（1 200 t/h）的双膜法和电吸附法的回用率、运行成本、运行消耗及污染物的去除效果进行了对比分析，结果如表 6 所示。

表 5 1 200 t/h 双膜法和电吸附法原始数据

Tab. 5 Raw data of 1 200 t/h double membrane method and electro-adsorption method

技术	运行消耗									
	电耗/(kWh·t^{-1})	盐酸/(kg·t^{-1})	液碱/(kg·t^{-1})	反渗透膜阻垢剂/(kg·t^{-1})	反渗透膜还原剂/(kg·t^{-1})	次氯酸钠/(kg·t^{-1})	pH 调节剂/(kg·t^{-1})	膜碱性清洗剂/(kg·t^{-1})	膜酸性清洗剂/(kg·t^{-1})	非氧化性杀菌剂/(kg·t^{-1})
双膜法(UF+RO)	0.939 1	0.092 6	0.046 3	0.004 6	0.004 6	0.077 2	0.002 3	0.001 6	0.000 2	0.000 8
电吸附法[26]	1.310 0	0.144 0	0.007 5	—	—	—	—	—	—	—

技术	原水污染物			产水污染物		
	电导率/(μs·cm^{-1})	总硬度/(mg·L^{-1})	Cl$^-$/(mg·L^{-1})	电导率/(μs·cm^{-1})	总硬度/(mg·L^{-1})	Cl$^-$/(mg·L^{-1})
双膜法(UF+RO)	2 309	527	323	94	21	18
电吸附法[26]	777	74	253	230	45	45

表 6 双膜法和电吸附法技术经济对比

Tab. 6 Techno-economic comparison of double membrane method and electro-adsorption method

技术	运行消耗									
	电耗/(kWh·t^{-1})	盐酸/(kg·t^{-1})	氢氧化钠/(kg·t^{-1})	反渗透膜阻垢剂/(kg·t^{-1})	反渗透膜还原剂/(kg·t^{-1})	次氯酸钠/(kg·t^{-1})	pH 调节剂/(kg·t^{-1})	膜碱性清洗剂/(kg·t^{-1})	膜酸性清洗剂/(kg·t^{-1})	非氧化性杀菌剂/(kg·t^{-1})
双膜法(UF+RO)	0.939 1	0.092 6	0.046 3	0.004 6	0.004 6	0.077 2	0.002 3	0.001 6	0.000 2	0.000 8
电吸附法[26]	1.310 0	0.144 0	0.007 5	—	—	—	—	—	—	—

技术	水量			运行成本		污染物去除效果		
	进水量/(t·h^{-1})	出水量/(t·h^{-1})	回用率/%	电费/(元·t^{-1})	药剂费/(元·t^{-1})	电导率去除率/%	总硬度去除率/%	Cl$^-$去除率/%
双膜法(UF+RO)	1 200	780	65	0.610 4	0.653 0	95.93	96.02	94.43
电吸附法[26]	1 200	1 080	90	0.851 5	0.105 5	70.40	39.20	82.20

对双膜法以及电吸附法的药剂成本占比进行了分析,如图 3 所示。

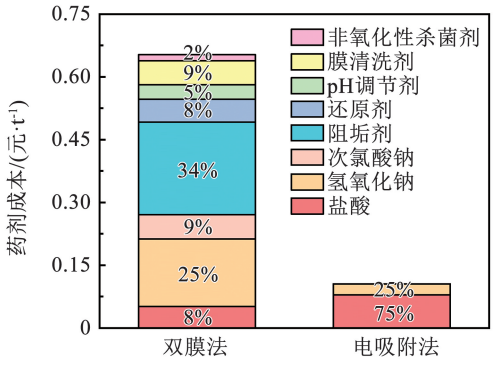


图 3 双膜法与电吸附法药剂成本占比

Fig. 3 Chemical cost proportion of double membrane method and electro-adsorption method

结合表 3 以及图 3 所述各脱盐工艺的对比可以看出:

1)双膜法对污染物的去除效果好,是目前钢铁厂含盐废水回用中最常用的工艺,出水可作一级除盐水回用,但存在所需药剂种类多、运行成本较高且回用率较低的问题。当用钢铁厂中水作为水源时,由于中水水质较差,反渗透回用率较低,一般为 60% ~65%[74],需通过设置合理的预处理系统、适当提高膜的段数等措施来提高回用率。在运行成本方面,根据对双膜法药剂成本占比的分析,阻垢剂、氢氧化钠和次氯酸钠是药剂成本的主要组成部分(分别占比 34%、25%、9%),这些药剂主要用于防止结垢和膜污染,建议在运行时根据实际进水水质精确控制药剂的投加量,避免过量使用。并可通过加强预处理来减少膜污堵现象,从而减少化学清洗的频率,以降低药剂成本。同时,可以采用能量回收技术,通过回收和再利用高压泵的排放压力以降低能耗[75],从而实现运行成本的下降。

2)电吸附法运行成本低、药耗低,运行过程中只消耗少量的盐酸和氢氧化钠(主要用途为电极清洗,其中,盐酸在总药剂成本中占比较高,达 75%),与反渗透相比,无需添加阻垢剂、还原剂等专用药剂,但电耗稍高,且污染物去除效果有限,出水只能达到生产新水要求,适合对硬度和盐度要求不高的钢铁工业新水用户。建议在实际工程中将电吸附再生时的电能进行回收,以降低运行电耗。电吸附法是除双膜法外应用较多的除盐技术,在钢铁厂废水

治理回用方面有很大应用前景，未来可以考虑与其他除盐技术相组合，以满足更高的水质需求，如使用电吸附作预脱盐，后接混床进行深度除盐等。

具体脱盐回用项目中选择哪一项技术，建议结合项目规模、回用要求、项目资金、运行成本、技术效率以及环境影响等因素进行综合评估[76]。

4　结论与展望

钢铁厂综合废水具有含盐量大、成分复杂、水质水量波动大等特点，针对钢铁废水的脱盐处理，是建设节水型钢铁企业的重要环节。每种脱盐技术均有其优、劣势，面对复杂的钢铁厂废水，可综合技术可行性、经济条件、废水水质和回用需求等选择合适的工艺及组合。

随着脱盐工艺的发展，钢铁厂含盐废水的回用处理更加高效及多样化，但仍存在一定的不足，未来的研究可从以下几方面开展：

1）在技术的选择方面，可以结合生命周期评价与层次分析法，构建“环境影响 - 碳排放 - 经济效益 - 技术性能”多维度下的脱盐工艺综合评估模型，为钢铁厂回用工艺的选择提供科学的参考依据。

2）脱盐工艺中能耗导致的环境影响是其总环境影响的重要组成部分，为提高工艺的可持续性，可充分利用太阳能、氢能等绿色能源，降低化石能源占比，实现脱盐过程碳排放及环境影响的下降。

3）钢铁企业现有脱盐技术仍存在结垢污染严重、脱盐效率不足等问题，为提高处理效果，需进一步优化废水脱盐技术性能。首先，应根据实际废水水质选择有效的预处理工艺（如双碱法或电化学法除硬等）来缓解脱盐系统的污染结垢问题，从而提高回用率，降低运行维护成本；其次，开发新的膜材料及电极材料，延长使用寿命、提高稳定性及除盐效率；再次，积极研发新兴脱盐技术，如流动电极电容去离子技术（flow electrode capacitive deionization，FCDI），弥补传统 CDI 技术吸附能力有限及无法长期连续运行的不足，探索其应用于钢铁企业综合废水的可能性；最后，可研究通过不同脱盐工艺间的耦合来提高系统适应性及脱盐率，如超滤 - CDI 耦合技术、纳滤 - CDI 耦合技术等。

4）加强脱盐技术的智慧化管理，将人工智能技术与脱盐系统相结合以提高处理效果。如实时监测进水水质水量、膜通量等关键参数，利用随机森林算法预测产水水质，动态调整加药量和回用率等操作条件，并将人工神经网络等机器学习算法应用于膜污染预测，匹配最优清洗方案等，推动钢铁企业废水脱盐技术向高效化、智能化发展。

5）“零排放”政策下，由于脱盐后所产浓盐水水量大，厂区往往缺乏合适的消纳途径，建议充分利用厂区的低温废热等资源，将其与浓盐水的处理过程相耦合，实现浓盐水的低成本浓缩减量。

参考文献

[1] Sun Wenqiang, Xu Xiandong, Lü Ziqiang, et al. Environmental impact assessment of wastewater discharge with multi-pollutants from iron and steel industry[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 245(1): 210. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.05.081

[2] GB 50405—2017 钢铁工业资源综合利用设计规范[S]
GB 50405—2017 Code for design of comprehensive utilization of iron and steel industry resources[S]

[3] Liang Siyi, Du Ye, Liu Qi, et al. Wastewater reuse and recycling of the steel industry in China: history, current situation, and future perspectives[J]. Water Reuse, 2023, 13(2): 162. DOI: 10.2166/wrd.2023.072

[4] Shi Jingxin, Huang Wenping, Han Hongjun, et al. Review on treatment technology of salt wastewater in coal chemical industry of China[J]. Desalination: The International Journal on the Science and Technology of Desalting and Water Purification, 2020, 493(1): 114640. DOI: 10.1016/j.desal.2020.114640

[5] 苗红军. 脱盐水处理工艺技术的比较与选择[J]. 化肥工业, 2015, 42(6): 33
Miao Hongjun. Selection and comparison of treatment process technology of desalted water[J]. Chemical Fertilizer Industry, 2015, 42(6): 33. DOI: 10.3969/j.issn.1006 - 7779.2015.06.011

[6] 王燕, 赵新明. 脱盐水处理工艺技术的比较分析[J]. 信息记录材料, 2017, 18(8): 65
Wang Yan, Zhao Xinming. Analysis and comparison of treatment process technology of desalted water[J]. Information Recording Materials, 2017, 18(8): 65. DOI: 10.16009/j.cnki.cn13 - 1295/tq.2017.08.042

[7] Yuan Yuan, Lu Jiaqi, Gu Dungang, et al. Deduction of carbon footprint for membrane desalination processes towards carbon neutrality: a case study on electrodeionization for ultrapure water preparation[J]. Desalination: The International Journal on the Science and Technology of Desalting and Water Purification, 2023, 559(1): 116648. DOI: 10.1016/j.desal.2023.116648

[8] Wang Yihan, Wen Zongguo, Cao Xin, et al. Environmental efficiency evaluation of China's iron and steel industry: a process-level data envelopment analysis[J]. The Science of the Total Environment, 2020, 707(10): 135903. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135903

[9] 祝敏, 黄洪伟, 李凤萌, 等. 抗污染反渗透膜在钢铁厂废水资源化利用方面的应用研究[J]. 膜科学与技术, 2023: 1
Zhu Ming, Huang Hongwei, Li Fengmeng, et al. Application research of anti-pollution reverse osmosis membrane in iron and steel plant wastewater resource utilization[J]. Membrane Science and Technology, 2023: 1

[10] 田京雷, 刘金哲, 张社海. 基于水盐协同的钢铁行业废水零排放体系构建研究[C]//中国金属学会, 中国金属学会青年工作委员会. 第十二届中国金属学会青年学术年会暨首届“碳中和”冶金青年科学家沙龙论文集. 北京: 河钢集团有限公司, 河钢大河能源环境科技有限公司, 2024: 232
Tian Jinlei, Liu Jinzhe, Zhang Shehai. Research on the construction of zero wastewater discharge system in the iron and steel industry based on water-salt synergy[C]//The Chinese Society for

Metals, Youth Working Committee of the Chinese Society for Metals. Proceedings of the 12th Youth Academic Annual Conference of the Chinese Society for Metals and the First "Carbon Neutral" Metallurgical Young Scientist Salon. Beijing: Hebei Iron & Steel Group Co., Ltd., Hebei Iron & Steel Dahe Energy & Environment Technology Co., Ltd., 2024: 232. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2024.023520

[11] 梁思懿. 钢铁行业综合废水资源化实践与展望[C]//中国金属学会. 2020 年全国冶金能源环保技术交流会会议文集. 北京: [出版者不详], 2020: 53
Liang Siyi. Practice and prospect of comprehensive wastewater resource utilization in iron and steel industry[C]//The Chinese Society for Metals. Proceedings of the 2020 National Metallurgical Energy and Environmental Protection Technology Exchange Conference. Beijing: [s. n.], 2020: 53. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2020.061339

[12] HJ 2019—2012 钢铁工业废水治理及回用工程技术规范[S]
HJ 2019—2012 Technical specifications for wastewater treatment and reuse of iron and steel industry[S]

[13] Zhu Jianyang, Jin Qiang, Liu Dongming, et al. Investigation on two integrated membrane systems for the reuse of electroplating wastewater[J]. Water and Environment Journal: Journal of the Chartered Institution of Water and Environmental Management, 2018, 32(2): 267. DOI:10.1111/wej.12324

[14] Colla V, Branca T A, Rosito F, et al. Sustainable reverse osmosis application for wastewater treatment in the steel industry[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 130: 103. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.025

[15] 白颖. 基于反渗透技术的煤矿水处理[J]. 山西化工, 2025, 45(3): 224
Bai Ying. Coal mine water treatment based on reverse osmosis technology[J]. Shanxi Chemical Industry, 2025, 45(3): 224. DOI:10.16525/j.cnki.cn14-1109/tq.2025.03.078

[16] 王朋, 张新震, 刘宇曦, 等. 高回收率中水回用深度处理工艺在钢铁废水处理中的应用[J]. 科技创新与应用, 2025, 15(3): 185
Wang Peng, Zhang Xinzhen, Liu Yuxi, et al. Application of high recovery rate reclaimed water reuse advanced treatment process in iron and steel wastewater treatment[J]. Technology Innovation and Application, 2025, 15(3): 185. DOI: 10.19981/j.CN23-1581/G3.2025.03.044

[17] 许国仁, 张彦平, 孙丽欣. CFPS 强化处理钢铁废水效能研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(10): 1318
Xu Guoren, Zhang Yanping, Sun Lixin. Efficiency of CFPS enhanced coagulation in iron and steel wastewater treatment[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004,36(10): 1318

[18] 陈阳春, 周欢, 赵燕鹏, 等. 钢铁企业综合废水处理及回用工程[J]. 工业用水与废水, 2016, 47(3): 55
Chen Yangchun, Zhou Huan, Zhao Yanpeng, et al. Project of treatment and reuse of comprehensive wastewater from iron and steel enterprises[J]. Industrial Water & Wastewater, 2016, 47(3): 55

[19] Valentina C, Ismael M, Teresa B, et al. Efficient use of water resources in the steel industry[J]. Water, 2017, 9(11): 894. DOI: 10.3390/w9110874

[20] Gao Qiusheng, Duan Liang, Jia Yanyan, et al. A comprehensive analysis of the impact of inorganic matter on membrane organic fouling: a mini review[J]. Membranes, 2023, 13(10): 15. DOI: 10.3390/membranes13100837

[21] 梁鑫. 高效反渗透技术在煤化工废水零排放中的应用[J]. 山西化工, 2022, 42(2): 322
Liang Xin. Application of high efficiency reverse osmosis technology in zero discharge of coal chemical wastewater[J]. Shanxi Chemical Industry, 2022, 42(2): 322. DOI: 10.16525/j.cnki.cn14-1109/tq.2022.02.122

[22] Burlace L, Davies P A. Fouling and fouling mitigation in batch reverse osmosis: review and outlook[J]. Desalination and Water Treatment, 2022(249): 1. DOI: 10.5004/dwt.2022.28103

[23] 张亚宇, 隋明明, 戈永川, 等. 钢铁综合废水处理中反渗透膜污染治理[J]. 冶金设备, 2024(6): 78
Zhang Yayu, Sui Mingming, Ge Yongchuan, et al. Membrane pollution control of reverse osmosis in comprehensive sewage treatment of iron and steel enterprise[J]. Metallurgical Equipment, 2024(6): 78

[24] 郭冠军, 韩梦龙, 莫冰玉, 等. 反渗透水处理技术及其应用趋势研究[J]. 价值工程, 2020, 39(3): 201
Guo Guanjun, Han Menglong, Mo Yubin, et al. Research on reverse osmosis water treatment technology and its application trend[J]. Value Engineering, 2020, 39(3): 201. DOI: 10.14018/j.cnki.cn13-1085/n.2020.03.080

[25] 岳云波, 陈白阳, 段炫彤, 等. 反渗透技术在污废水深度处理中的应用及研究进展[J]. 水处理技术, 2018, 44(1): 1
Yue Yunbo, Chen Baiyang, Duan Xuantong, et al. Research progress and application of reverse osmosison wastewater advanced treatment[J]. Technology of Water Treatment, 2018, 44(1): 1. DOI: 10.16796/j.cnki.1000-3770.2018.01.001

[26] Sharan P, Yoon T J, Jaffe S M, et al. Can capacitive deionization outperform reverse osmosis for brackish water desalination? [J]. Cleaner Engineering and Technology, 2021, 3: 100102. DOI: 10.1016/j.clet.2021.100102

[27] 张骅. 某钢铁厂总排废水深度处理工艺探讨[J]. 水处理技术, 2021, 47(12): 128
Zhang Ye. Research on advanced treatment process research of total discharge wastewater from a steel plant[J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(12): 128. DOI: 10.16796/j.cnki.1000-3770.2021.12.027

[28] 康勇, 钱志丹, 吴霞. 双膜法深度处理中水回用的实践应用[J]. 江西化工, 2020, 36(5): 12
Kang Yong, Qian Zhidan, Wu Xia. Practical application of dual membrane process in advanced treatment and reuse for reclaimed water[J]. Jiangxi Chemical Industry, 2020, 36(5): 12. DOI: 10.14127/j.cnki.jiangxihuagong.2020.05.004

[29] Zhang Yunhua, Gan Fuxing, Li Meng, et al. Treatment of reused comprehensive wastewater in iron and steel industry with electrosorption technology[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2011, 18(6): 37. DOI: 10.1016/S1006-706X(11)60075-7

[30] 邹正东. 电吸附除盐技术用于梅钢再生水中试研究[J]. 冶金动力, 2022(5): 73
Zou Zhengdong. Electro-sorption desalination technology for pilot scale of reclaimed water in Mei steel[J]. Metallurgical Power, 2022(5): 73

[31] 吴阳春, 应迪文, 王亚林, 等. 电容脱盐技术及其在废水处理中的应用[J]. 水处理技术, 2019, 45(8): 1
Wu Yangchun, Ying Diwen, Wang Yalin, et al. Capacitive desalination technology and its application in wastewater treatment[J]. Technology of Water Treatment, 2019, 45(8): 1. DOI: 10.16796/j.cnki.1000-3770.2019.08.001

[32] Mossad M, Zou Linda. Study of fouling and scaling in capacitive deionisation by using dissolved organic and inorganic salts[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 244(15): 387. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2012.11.062

[33] Xu Yongyi, Yang Dingchang, Wang Feng, et al. Application of electro-adsorption technology in wastewater treatment of electric power industry[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(3): 138. DOI: 10.13226/j.issn.1006－6772.20021201

[34] Kim H, Choi Y, Lee S, et al. Pretreatment for capacitive deionization: feasibility tests using activated filter media and granule activated carbon filtration[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2021, 93: 253. DOI: 10.1016/j.jiec.2020.10.001

[35] 赵保华，刘晓娜，胡彦云，等. 传统电吸附与流动电极电容去离子技术对比和技术发展趋势[J]. 化工进展，2025，44(7)：4101
Zhao Baohua, LiuXiaona, Hu Yanyun, et al. Comparison and development trend of traditional electroadsorption and flow electrode capacitive deion technology[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2025, 44(7): 4101. DOI: 10.16085/j.issn.1000－6613.2024－0801

[36] 贺舒敏，熊伟，高小龙，等. 电容去离子技术在水处理中的研究进展及展望[J]. 化工进展，2025，44(11)：6660
He Shumin, Xiong Wei, Gao Xiaolong, et al. Research progress and prospects of capacitive deionization technology in water treatment[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2025, 44(11): 6660. DOI: 10.16085/j.issn.1000－6613.2024－1710

[37] Wu Qingbo, Chen Qiuling. Application of membrane separation technology in water treatment process[J]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2020, 508(1): 012048. DOI: 10.1088/1755－1315/508/1/012048

[38] Ahmad N, Ang W, Teow Y H, et al. Nanofiltration membrane processes for water recycling, reuse and product recovery within various industries: a review[J]. Journal of Water Process Engineering, 2022, 45: 102478. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102478

[39] 方建，俞勇，赵珺，等. 两级双膜法处理钢铁工业综合生产废水[J]. 冶金动力，2017(11)：59
Fang Jian, Yu Yong, Zhao Jun, et al. Application of two stage double membrane method in treatment of wastewater in steel industry[J]. Metallurgical Power, 2017(11): 59. DOI: 10.13589/j.cnki.yjdl.2017.11.019

[40] Nayar K G, Lienhard J H. Brackish water desalination for greenhouse agriculture: comparing the costs of RO, CCRO, EDR, and monovalent-selective EDR[J]. Elsevier BV, 2020, 475(1): 114188. DOI: 10.1016/j.desal.2019.114188

[41] Yeh Maosung, Ou Hsinhung, Su Yuchun, et al. Design and parameter optimization of a full-scale wastewater reclamation plant including pretreatment, electrodialysis reversal, and ion exchange in steel manufacturing processes[J]. Journal of Environmental Engineering, 2016, 142(10): 05016003. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943－7870.0001118

[42] Zhang Lei, Chen Shining, Wang Lina, et al. Application of membrane separation technology in wastewater treatment of iron and steel enterprise[J]. Characterization of Minerals, Metals, and Materials, 2017: 545. DOI: 10.1007/978－3－319－51382－9_59

[43] 岳丽芳，王春慧，周红星，等. 钢铁企业综合废水处理及回用工程实例[J]. 水处理技术，2019，45(3)：133
Yue Lifang, Wang Chunhui, Zhou Hongxing, et al. Engineering project of comprehensive wastewater treatment and reuse of iron and steel enterprise[J]. Technology of Water Treatment, 2019, 45(3): 133. DOI: 10.16796/j.cnki.1000－3770.2019.03.028

[44] GB/T 1576—2018 工业锅炉水质[S]
GB/T 1576—2018 Water quality for industrial boilers[S]

[45] 龙涛，王珍，杨玮，等. 高矿化度矿井水脱盐技术应用现状及研究进展[J]. 水处理技术，2023，49(5)：11
Long Tao, Wang Zhen, Yang Wei, et al. Research progress of high salinity mine water desalination technology[J]. Technology of Water Treatment, 2023, 49(5): 11. DOI: 10.16796/j.cnki.1000－3770.2023.05.003

[46] 吴铁，赵春丽，刘大钧，等. 钢铁行业废水零排放技术探索[J]. 环境工程，2015，33(4)：146
Wu Tie, Zhao Chunli, Liu Dajun, et al. Exploration of wastewater zero-emission technologies in iron and steel industry[J]. Environmental Engineering, 2015, 33(4): 146. DOI: 10.13205/j.hjgc.201504031

[47] Yan Haiyang, Wang Yaoming, Wu Liang, et al. Multistage-batch electrodialysis to concentrate high-salinity solutions: process optimization, water transport, and energy consumption[J]. Journal of Membrane Science, 2019, 570(15): 245. DOI: 10.1016/j.memsci.2018.10.008

[48] Huang Yude. Assessment of municipal effluent reclamation process based on the information of cost analysis and environmental impacts[J]. British Journal of Environment & Climate Change, 2014, 188(1/2): 1. DOI: 10.9734/BJECC/2014/8574

[49] 李东升. 钢铁企业综合废水处理回用工程实例思路构建[J]. 皮革制作与环保科技，2023，4(12)：127
Li Dongsheng. Construction of comprehensive wastewater treatment and reuse engineering in iron and steel enterprises[J]. Leather Manufacture and Environmental Technology, 2023, 4(12): 127. DOI: 10.20025/j.cnki.CN10－1679.2023－12－43

[50] 韩秀娟. 矿井水深度处理中使用电吸附除盐技术的研究与应用[J]. 地质研究与环境保护，2022，1(4)：179
Han Xiujuan. Study and application of electric adsorption desalting technology in advanced treatment of mine water[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2022, 1(4): 179. DOI: 10.37155/2811－0595－0104－60

[51] Arash S, Christopher B. Nanofiltration technology in water treatment and reuse: applications and costs[J]. Water science and technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2015, 71(3): 309. DOI: 10.2166/wst.2015.015

[52] 常静，张振海，张晋峰. 电吸附技术在钢铁污水深度处理中的中试研究[J]. 科技与企业，2012(8)：291
Chang Jing, Zhang Zhenhai, Zhang Jinfeng. Pilot research of electro-adsorption technology in advanced treatment of iron and steel wastewater[J]. Science-Technology Enterprise, 2012(8): 291. DOI: 10.13751/j.cnki.kjyqy.2012.08.049

[53] 刘妍博，亢涵. 高盐废水脱盐处理技术的研究现状[J]. 辽宁化工，2023，52(6)：907
Liu Yanbo, Kang Han. Research status of high salinity wastewater desalination treatment technology[J]. Liaoning Chemical Industry, 2023, 52(6): 907. DOI: 10.14029/j.cnki.issn1004－0935.2023.06.02

[54] 段志栋. 反渗透法和全离子交换法除盐技术初步比较[J]. 山西化工，2017，37(4)：64
Duan Zhidong. Preliminary comparison of desalination technology of reverse osmosis and total ion exchange[J]. Shanxi Chemical Industry, 2017, 37(4): 64. DOI: 10.16525/j.cnki.cn14－1109/tq.2017.04.21

[55] YB/T 4699—2019 钢铁企业综合废水深度处理技术规范[S]
YB/T 4699—2019 Technical specification for advanced treatment of comprehensive wastewater from iron and steel industry[S]

[56] GB 50721—2011 钢铁企业给水排水设计规范[S]
GB 50721—2011 Code for design of water supply & drainage of iron

and steel enterprises[S]
[57]邢秀敏, 金玉涛. 河北某钢铁企业冶金中水深度脱盐工程实践[J]. 净水技术, 2023, 42(4): 130
Xing Xiumin, Jin Yutao. Engineering practice of deep desalination for metallurgical reclaimed water in an iron and steel enterprise of Hebei[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(4): 130. DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.04.016
[58]邵亚军, 谭善涛, 黄金明, 等. 钢铁企业双膜法中水回用系统的成功改造及运营[J]. 工业水处理, 2022, 42(6): 198
Shao Yajun, Tan Shantao, Huang Jinming, et al. Successful modification and operation of double membrane water reuse system in steel enterprise[J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(6): 198. DOI: 10.19965/j.cnki.iwt.2021-0895
[59]杨晓明. 双膜法工艺处理钢铁废水及中水回用工程探讨[J]. 四川冶金, 2023, 45(2): 67
Yang Xiaoming. Double membrane process steel wastewater and water reuse engineering project discussed[J]. Sichuan Metallurgy, 2023, 45(2): 67
[60]王为民, 郭彩荣, 梁丹, 等. 钢铁工业综合废水处理回用工程实例[J]. 水处理技术, 2021, 47(10): 129
Wang Weiming, Guo Cairong, Liang Dan, et al. Engineering project of comprehensive wastewater treatment and reuse in the iron and steel industry[J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(10): 129. DOI: 10.16796/j.cnki.1000-3770.2021.10.028
[61]Khosousi T, Ahmadzadeh M, Sadeghi M. Two-stage membrane process (UF/NF) for treatment of water process in the steel industry at a pilot scale[J]. Chemical Papers, 2023(8): 77. DOI: 10.1007/s11696-023-02817-0
[62]王肖颖, 崔秀琴. 钢厂废水处理回用方法探讨: 以福建省三钢(集团)有限责任公司为例[J]. 安阳工学院学报, 2022, 21(4): 42
Wang Xiaoyin, Cui Xiuqin. Discussion on wastewater treatment and reuse methods of steel mills: a case study of Fujian Sangang Group[J]. Journal of Anyang Institute of Technology, 2022, 21(4): 42. DOI: 10.19329/j.cnki.1673-2928.2022.04.011
[63]王付建. 某钢铁企业废水深度处理技术改造[J]. 冶金动力, 2019(2): 67
Wang Fujian. Technical transformation for deep treatment of steel plant wastewater[J]. Metallurgical Power, 2019(2): 67. DOI: 10.13589/j.cnki.yjdl.2019.02.020
[64]陈娥. 双膜法在钢铁行业污水处理中的应用分析[J]. 低碳世界, 2019, 9(9): 19
Chen E. Analysis of the application of double membrane method in sewage treatment in the iron and steel industry[J]. Low Carbon World, 2019, 9(9): 19. DOI: 10.16844/j.cnki.cn10-1007/tk.2019.09.010
[65]刘桥云, 杜在会, 罗滔, 等. 某钢铁厂综合污水处理及回用系统优化[J]. 当代化工研究, 2024(1): 71
Liu Qiaoyun, Du Zaihui, Luo Tao, et al. Study on the optimization of comprehensive sewage treatment and reuse system in an iron and steel plant[J]. Modern Chemical Research, 2024(1): 71. DOI: 10.20087/j.cnki.1672-8114.2024.01.023
[66]王海波. 高效沉淀加双膜法处理技术在废水回收中的应用[J]. 冶金动力, 2018(4): 56
Wang Haibo. Application of high-efficiency precipitation with double membrane process in wastewater reclamation[J]. Metallurgical Power, 2018(4): 56. DOI: 10.13589/j.cnki.yjdl.2018.04.018
[67]陈治国, 罗渝敦, 于学锋, 等. 酒钢中水深度处理试验研究[J]. 冶金动力, 2017(9): 59
Chen Zhiguo, Luo Yudun, Yu Xuefeng, et al. An experimental study on deep treatment of reclaimed water in JISCO[J]. Metallurgical Powe, 2017(9): 59. DOI: 10.13589/j.cnki.yjdl.2017.09.018
[68]付思淇, 马红刚, 郜小晶, 等. 浸没式超滤和反渗透双膜法在钢铁企业污水处理的应用[J]. 冶金动力, 2023(6): 71
Fu Siqi, Ma Honggang, Gao Xiaojing, et al. Application of submerged ultrafiltration and reverse osmosis dual membrane method in wastewater treatment for iron and steel enterprises[J]. Metallurgical Power, 2023(6): 71. DOI: 10.13589/j.cnki.yjdl.2023.06.006
[69]武浩浩, 肖志毅. 中水回用技术的发展和应用[J]. 绿色科技, 2023, 25(2): 202
Wu Haohao, Xiao Zhiyi. Development and application of reclaimed water reuse technology[J]. Journal of Green Science and Technology, 2023, 25(2): 202. DOI: 10.16663/j.cnki.lskj.2023.02.041
[70]吕洋洋. 浅析中水回用在钢厂的应用[C]//第十三届中国钢铁年会论文集. 北京: 中国金属学会, 2022
Lü Yangyang. Analysis of the application of reclaimed water reuse in steel mills[C]//Proceedings of the 13th China Iron and Steel Annual Conference. Beijing: The Chinese Society for Metals, 2022. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2022.016887
[71]李怀明. 工业水处理双膜法除盐工艺在锅炉给水中的应用与优化[J]. 冶金动力, 2017(12): 47
Li Huaiming. Application and optimization of the double-membrane desalination process for industrial water treatment in boiler feed water[J]. Metallurgical Power, 2017(12): 47. DOI: 10.13589/j.cnki.yjdl.2017.12.017
[72]白洁. 济南钢铁集团综合污水处理及回用系统优化研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2016
Bai Jie. Optimization of integrated wastewater treatment and reuse system of Jinan Iron and Steel Group[D]. Jinan: Shandong University of Architecture and Engineering, 2016
[73]翟秋月, 崔秀琴, 刘明远, 等. 双膜法系统在钢铁业中水回用中的应用[J]. 河南化工, 2023, 40(6): 50
Zhai Qiuyue, Cui Xiuqin, Liu Mingyuan, et al. Application of double membrane method system in reclaimed water reuse in the steel industry[J]. Henan Chemical Industry, 2023, 40(6): 50. DOI: 10.14173/j.cnki.hnhg.2023.06.012
[74]刘金哲, 田京雷, 王鑫国, 等. 钢铁行业高盐水零排放处理技术[J]. 河北冶金, 2020(7): 74
Liu Jinzhe, Tian Jinlei, Wang Xinguo, et al. Zero emission technology of high salt water in iron and steel industry[J]. Hebei Metallurgy, 2020(7): 74. DOI: 10.13630/j.cnki.13-1172.2020.0716
[75]张靖宇, 张建国. “超滤+反渗透膜”技术在钢铁企业废水中的应用[J]. 工业技术与职业教育, 2024, 22(2): 14
Zhang Jingyu, Zhang Jianguo. Application of ultrafiltration plus reverse osmosis membrane technology in wastewater of steel enterprises[J]. Industrial Technology and Vocational Education, 2024, 22(2): 14. DOI: 10.16825/j.cnki.cn13-1400/tb.2024.02.010
[76]刘彦伯, 张照韩, 刘国宏, 等. 基于 LCA-AHP 模型的污水处理技术综合评价方法构建[J]. 环境工程, 2024, 42(12): 52
Liu Yanbo, Zhang Zhaohan, Liu Guohong, et al. Construction of a comprehensive impact assessment method of sewage treatment technology based on LCA-AHP model[J]. Environmental Engineering, 2024, 42(12): 52. DOI: 10.13205/j.hjgc.202412007

(编辑 刘 彤)