

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):130-136.

XING X M, JIN Y T. Engineering practice of deep desalination for metallurgical reclaimed water in an iron and steel enterprise of Hebei[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(4):130-136.

## 河北某钢铁企业冶金中水深度脱盐工程实践

邢秀敏<sup>1,\*</sup>, 金玉涛<sup>2</sup>

(1. 邯郸市第一医院, 河北邯郸 056002; 2. 河北钢铁集团邯钢邯宝焦化厂, 河北邯郸 056015)

**摘要** 文章对河北省某钢铁企业深度脱盐水站的工程实践进行研究分析, 脱盐水站以冶金废水处理回用的中水为水源进行深度净化处理, 采用浸没式超滤+反渗透的“双膜”工艺制备脱盐水。投运近6年来, 整体产水稳定, 水质合格, 有效地维持了工业园区污水回用的整体水质平衡, 显著提升企业污水回用效率, 对于冶金企业密集而水资源紧张的河北地区, 环境效益巨大。

**关键词** 工程实践 运行分析 污水回用 超滤 反渗透

中图分类号: TQ09 文献标识码: B 文章编号: 1009-0177(2023)04-0130-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.04.016

## Engineering Practice of Deep Desalination for Metallurgical Reclaimed Water in an Iron and Steel Enterprise of Hebei

XING Xiumin<sup>1,\*</sup>, JIN Yutao<sup>2</sup>

(1. The First Hospital of Handan, Handan 056002, China;

2. Hebei Iron & Steel Group Handan Hanbao Iron and Steel Company Coking Plant, Handan 056015, China)

**Abstract** The engineering practice of deep desalination station in an iron and steel enterprises in Hebei is researched and analyzed in this paper. Reclaimed water from metallurgical wastewater treatment is used for the water source of the deep desalination station, which is treated effectively by "double membrane" (submerged ultrafiltration and reverse osmosis) to produce desalinated water. In the past six years for operation, the overall water production of the station was stable and the water quality is qualified, which effectively maintained the water quality balance of wastewater reuse in the industrial park, significantly improved the wastewater reuse efficiency of enterprises. The environmental benefits are huge for Hebei, where metallurgy enterprises are concentrated and water resources are tight.

**Keywords** engineering practice operation analysis wastewater reuse ultrafiltration (UF) reverse osmosis (RO)

我国钢铁行业的年用水量在250亿m<sup>3</sup>左右, 约占国内工业总耗水量的14%, 排水量约占20%<sup>[1]</sup>, 是典型的耗水与排水大户。此外, 我国水资源短缺日益严峻, 部分钢铁企业的外部水源供给形势日益紧张, 而大量排放的废水污染环境造成水质型缺水, 进一步加剧当地水资源的短缺现状。所以, 提高钢铁企业的废水回用效率, 以回用水作为外部水源的补充, 降低废水外排量, 成为钢铁企业可持续发展的

一项重要任务<sup>[2]</sup>。河北某钢铁企业新建年产能500万t板材的工业园区, 配套建有处理能力为105000m<sup>3</sup>/d的回用水站, 收集处理园区内工业废水和部分雨水, 制备中水回用于生产, 以实现废水资源的重复高效利用。

中水因重复使用, 水质浓缩, 其含盐量明显提高, 水质呈硬化趋势, 进而增加了中水回用的结垢风险与阻垢成本。因此, 采用超滤+反渗透的双膜工艺将部分中水进行脱盐处理降低硬度, 以保持中水水质盐分平衡, 深入实施废水资源化与减排, 稳步推进废水零排放。以中水为水源深度净化、制备高纯水的深度处理项目在工业污、废水回用中应用不多,

[收稿日期] 2022-04-09

[通信作者] 邢秀敏(1981—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为工程项目管理, E-mail: xingxiumin721@163.com。

但技术推广前景广阔,特别是对于支持水资源紧张地区的工业发展具有较大的意义。本文对河北省某钢铁企业脱盐站的工程实践进行研究,分析运行以来遇到的异常情况的处理措施与效果,以期为其他类似工业污废水回用处理提供借鉴与参考。

### 1 车站概况

深度脱盐站处理能力为 46 662 m<sup>3</sup>/d,是目前该地区最大的中水脱盐站。核心工艺采用“浸入式超滤+反渗透”双膜工艺,生产的脱盐水供厂区生

产使用。在几年的运行中,该站克服水质剧烈波动与季节变化的不利影响,始终保持着较高的产水负荷,为工业园区的整体供水水质和污水资源化水平的提高做出了贡献,并积累了技术经验,对于水资源紧张、冶金产业密集的河北地区,尤其具有研究和推广的价值。

#### 1.1 工艺简介

深度脱盐站工艺流程与设计水量平衡如图 1 所示。

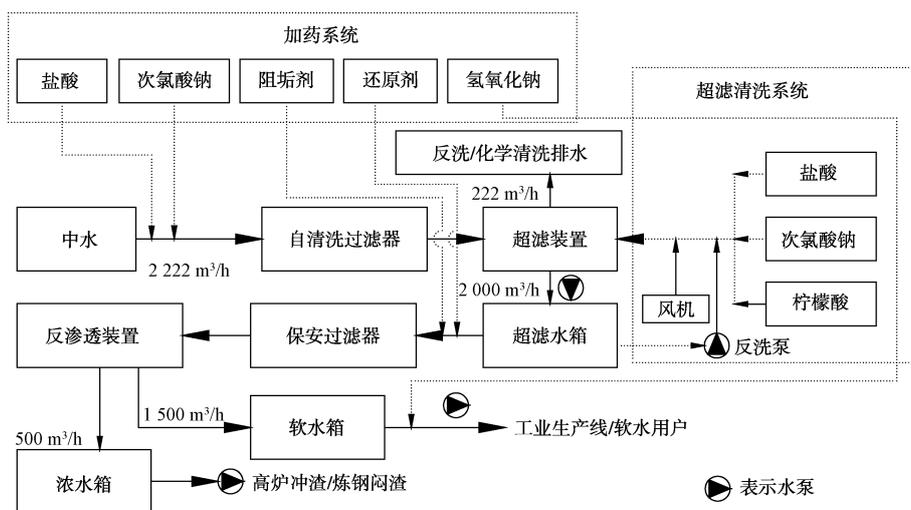


图 1 深度脱盐站工艺流程与水量平衡示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Process Flow and Water Balance of the Deep Desalination Station

该工艺进水投加盐酸调节 pH 值至 6.0~6.5,使用次氯酸钠杀菌灭藻,再通过自清洗过滤器去除以悬浮物为主的颗粒杂质,随后进入超滤膜组件进一步去除以胶体为主的杂质。超滤产水送入超滤水箱储存,出水加膜阻垢剂和还原剂后通过保安过滤器,再经高压泵加压进入反渗透膜组件脱盐,反渗透浓水送高炉冲渣与炼钢闷渣,借助炉渣的余热实现浓盐水全部蒸发。产水送入软水箱,加氢氧化钠调节 pH 值至 6.5~8.5,外送至用户使用。

车站采用系统模块化设计,检测仪表设施完善,自动化程度高。作为整套工艺流程的核心的“双膜”具有如下特点<sup>[3]</sup>。

(1) 选用浸没式外压式中空纤维膜元件,脏水在膜外侧,负压过滤,采用空气擦洗、自动反洗,抗污堵能力强。膜元件为聚偏氟乙烯(PVDF)材质,具有机械强度高、抗氧化性强、耐化学清洗、膜架填充密度大、占地小、全量过滤的优点,回收率达 90%。

(2) 超滤反洗与清洗全程自控运行,并可根据

生产情况调整修正,适应性强<sup>[4-5]</sup>。

(3) 反渗透膜采用抗污染型膜元件,具有运行压力低、产水量高、脱盐效果好、抗有机污染能力强、耐化学清洗等特点。

#### 1.2 设计水质

深度脱盐站设计进水水质与产水水质指标如表 1 所示。

表 1 深度脱盐站设计水质

指标	设计进水水质	设计产水水质
pH 值	6.0~6.5	6.5~8.5
悬浮物/(mg·L <sup>-1</sup> )	<5.0	不得检出
总硬度(以 CaCO <sub>3</sub> 计)/(mg·L <sup>-1</sup> )	-	<10
水温/℃	18~30	-
Cl <sup>-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	-	<25
COD <sub>Cr</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	120	-
电导率/(μS·cm <sup>-1</sup> )	3 000~4 000	<200
铁/(mg·L <sup>-1</sup> )	<1.0	<0.3
矿物油/(mg·L <sup>-1</sup> )	<3.0	不得检出

1.3 使用药剂

所示。

深度脱盐双膜工艺运行所投加药剂情况如表 2

表 2 深度脱盐车站主要投加药剂

Tab. 2 Main Pharmaceutical Dosages of the Deep Desalination Station

药剂名称	有效成分	配药浓度(质量分数)	投加方式	备注
次氯酸钠	>10%	10%	膜清洗/连续投加	含铁量<0.01%
异噻唑啉酮	≥8%	8%	冲击投加,100 mg/L	每周投加一次,20~30 min
亚硫酸氢钠	>98%	25%	连续投加	25 kg 袋装
阻垢剂	厂商标准	50%	连续投加	25 kg 桶装
盐酸	≥30%	30%	膜清洗/连续投加	槽车汽运
氢氧化钠	>30%	30%	膜清洗/连续投加	槽车汽运/袋装
柠檬酸	>99%	-	膜清洗	25 kg 袋装
草酸	>99%	-	膜清洗	25 kg 袋装

2 车站主要设备设施参数

如表 3 所示。

深度脱盐双膜工艺运行主要设备设施设计参数

表 3 深度脱盐车站主要设备设施设计参数

Tab. 3 Designed Parameters of Equipment and Facilities of the Deep Desalination Station

系统	名称	参数、规格、容积
前处理系统	自清洗过滤器	3 个,单个 $Q=1\ 000\ m^3/h$ 、 $P=0.2\sim 1.0\ MPa$ ;过滤精度为 $100\ \mu m$
超滤系统	超滤装置	8 个膜池,单个膜池 $Q=300\ m^3/h$ ;每个膜池含有 10 支膜架;每个膜架有 36 支膜元件;单支膜面积为 $27.92\ m^2$ ;过滤精度为 $0.04\ \mu m$
	超滤抽吸泵	8 台,单台 $Q=360\ m^3/h$ 、 $H=25\ m$ (变频)
	反洗装置	4 台罗茨风机,变频,单台 $Q=4\ 320\ m^3/h$ 、 $H=2.6\ m$ ;4 台反洗水泵,变频,单台 $Q=810\ m^3/h$ 、 $H=19\ m$
	清洗装置	清洗水箱 1 个, $V=20\ m^3$ ;清洗水泵 2 台,单台 $Q=76\ m^3/h$ 、 $H=10\ m$
	超滤水箱	2 个,单个 $V=1\ 000\ m^3$
	超滤送水泵	9 台,单台 $Q=285\ m^3/h$ 、 $H=35\ m$
反渗透系统	保安过滤器	8 个,单个 $Q=285\ m^3/h$ 、 $P=0.6\ MPa$ ;过滤精度为 $0.5\ \mu m$
	高压泵	9 台,单台 $Q=285\ m^3/h$ 、 $H=145\ m$
	反渗透装置	8 套,单套 $Q=214\ m^3/h$ ;每套含有 45 支膜组件(一段 30 支/二段 15 支);每组含有 7 支膜元件;膜壳设计压力为 $2.07\ MPa$
	冲洗装置	冲洗水泵 1 台, $Q=208\ m^3/h$ 、 $H=35\ m$
	清洗装置	清洗水箱 1 个, $V=15\ m^3$ ;清洗水泵 1 台, $Q=270\ m^3/h$ 、 $H=35\ m$ ;清洗保安过滤器 1 个, $Q=270\ m^3/h$ 、 $P=0.6\ MPa$ ;过滤精度为 $5\ \mu m$
	软水水箱	2 个,单个 $V=3\ 000\ m^3$
	浓水箱	2 个,单个 $V=1\ 500\ m^3$
	软水泵	5 台,单台 $Q=500\ m^3/h$ 、 $H=65\ m$
	浓水泵	5 台,单台 $Q=167\ m^3/h$ 、 $H=60\ m$
	加药系统	盐酸 储罐
原水加药泵		2 台,单台 $Q=25\ L/h$ 、 $H=120\ m$
超滤清洗加药泵		2 台,单台 $Q=1.0\ m^3/h$ 、 $H=20\ m$
	次氯酸钠 储罐	1 个, $V=15\ m^3$

(续表3)

系统	名称	参数、规格、容积
	原水加药泵	2台,单台 $Q=85\text{ L/h}$ 、 $H=70\text{ m}$
	超滤清洗加药泵	2台,单台 $Q=1.0\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=20\text{ m}$
柠檬酸	储罐	1个, $V=2.0\text{ m}^3$
	超滤清洗加药泵	2台,单台 $Q=1.0\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=20\text{ m}$
阻垢剂	储罐	2个,单个 $V=2.0\text{ m}^3$ ;带2台 $0.2\text{ kW}$ 搅拌机
	加药泵	9台,单台 $Q=3.8\text{ L/h}$ 、 $H=76\text{ m}$
还原剂	储罐	2个,单个 $V=2.0\text{ m}^3$ ;带2台 $0.2\text{ kW}$ 搅拌机
	加药泵	9台,单台 $Q=3.8\text{ L/h}$ 、 $H=76\text{ m}$
杀菌剂	储罐	1个, $V=2.0\text{ m}^3$
	加药泵	2台,单台 $Q=25\text{ L/h}$ 、 $H=126\text{ m}$
氢氧化钠	储罐	1个, $V=10\text{ m}^3$ ;带2台 $0.2\text{ kW}$ 搅拌机
	加药泵	2台,单台 $Q=25\text{ L/h}$ 、 $H=126\text{ m}$

注:  $Q$ ——流量;  $V$ ——有效体积或容积;  $H$ ——扬程;  $P$ ——压力; 尺寸——长×宽×高。

### 3 双膜运行参数与污染防治改造

#### 3.1 应对进水水质异常的改造

冶金中水水质复杂且波动较大,深度脱盐水处理设计进水硬度(按  $\text{CaCO}_3$  计)在  $300\sim 900\text{ mg/L}$ ,悬浮物质量浓度  $<5\text{ mg/L}$ ,而该指标在实际运行中很难保证。同时,进水可能含油,将对膜系统稳定运行产生极为不利的影 响。研究<sup>[5]</sup>表明,减小滤网孔径有利于进一步提升过滤效率与过滤精度。因此,将双膜之前的过滤器中  $800\ \mu\text{m}$  孔径的滤网更换为  $100\ \mu\text{m}$  孔径的滤网,提高拦截精度,增加清洗频次,保障进水水质。并增加在线水中油分析仪表,强化水质控制,以实现及时调整加药量与生产负荷的依

据,当发现来水含油时,适当降低脱盐水处理负荷,以延长双膜系统的运行周期并提高产水综合效能。

#### 3.2 双膜污染防治与清洗

双膜法可以截留水中胶体、大分子有机物、微生物、悬浮颗粒以及金属氧化物等杂质,发挥精密过滤作用,在使用中膜会受到污染,包括因污堵、吸附所引起的污染(不可逆污染)和因浓差极化形成的凝胶层污染(可逆污染)<sup>[6]</sup>。污染发生后,膜组件运行压差升高,严重时,产水量下降直至无法产水。为恢复系统产水性能,须对膜进行清洗维护,水处理运行参数设定如表4所示。

表4 深度脱盐水处理膜系统运行参数

Tab. 4 Operation Parameters of the Deep Desalination Station

运行参数		超滤	反渗透	
运行压力	跨膜压差	上限为 $85\text{ kPa}$ ;阻塞值 $\geq 48\text{ kPa}$ 触发化学清洗	一段压差	$\leq 0.3\text{ MPa}$
			二段压差	$\leq 0.3\text{ MPa}$
回收率		$\geq 90\%$		$\geq 75\%$
运行周期	反冲洗	$0.5\text{ h}$	冲洗	系统停车后
	化学反冲洗(氯洗)	$24\text{ h}$		
	化学反冲洗(酸洗)	$168\text{ h}$		
	化学清洗	$504\text{ h}$	化学清洗	视通水性能定
	离线化学清洗	视通水性能定	离线清洗	$2\ 160\text{ h}$
产水水质	浊度 $<0.2\text{ NTU}$ ;淤泥密度指数(SDI) $<3.0$		如表1所示	

注:系统配备完善的监计仪表,全过程实现集中控制与实时监控。

超滤系统设置在线反冲洗、在线化学冲洗、在线

化学清洗和离线化学清洗3种,研究<sup>[7]</sup>表明,对超

滤膜进行反冲洗可以有效去除沉积在膜表面的污染物。一般来说,冲洗是指系统不需停机浸泡,只需按照既定的产水步序进行,对系统整体产水量影响较小,冲洗可较好地恢复膜组件压差。但随着运行时间和产水量的累计,压差仍呈阶梯上升趋势,达到设定压差或是达到运行周期后,需要进行化学清洗。化学清洗时间长,为6~8 h,清洗效果好,对各类污染去除彻底,一般需要2~4 h的酸碱浸泡与交替循环清洗,污染严重时还须重复几次清洗,以提高膜通水性能恢复效果。

脱盐预处理系统选用超滤工艺,其产水水质稳定优良,去除浊度、悬浮物和细菌效果理想,有效地保障了反渗透系统的运行,因此,反渗透系统可稳定达到运行周期。当达到运行周期后,需要对反渗透膜组件进行清洗,恢复通水能力。站区反渗透膜组件采用一级两段式布置,同时,以七芯膜替代常见的六芯膜,保证回收率稳定不低于75%。在实际生产中,一段与二段的膜组件污染情况与频次存在差异,通常二段膜组件的产水量首先发生衰减。一段反渗透膜组件多出现杂质和有机物的污染污堵,二段的膜组件由于进水的浓缩更倾向于结垢的污堵,

定期或离线清洗后对膜壳内膜元件进行倒换,一段与二段膜组件序列交替使用,可有效防止出现同类型频繁污堵造成膜元件性能的加速衰减。

双膜工艺的膜污染主要集中在超滤系统中,正常工作条件下,超滤系统的产水情况,将成为整套系统出力的“瓶颈”,对于膜污染防治,也应将重点落在超滤系统。

超滤的膜组件冲洗方式包括水冲洗、气洗和气水混合洗。水洗采用超滤产水为水源,化学清洗液采用相应的药剂与反渗透产水配置,采用循环冲洗和停留浸泡方式,一般包括酸洗(盐酸、柠檬酸、草酸)、碱洗和氯洗(次氯酸钠)<sup>[8]</sup>。

多样的冲洗清洗方式与药剂配比可以更有针对性地去除膜污染物质。超滤纳污能力有限,污堵往往很迅速,不同的水源其污染物质特性也不同,甚至同一水源由于不同的季节、时段和上游工序的影响,其污堵的清洗恢复都有显著差别<sup>[9]</sup>。需要在运行中对膜系统的反洗与清洗加强关注,及时调整,准确应对,并通过实践的积累,特别是针对性的高效清洗方式的选择,来保证整个系统的产水优良稳定。常用的超滤膜化学清洗方式如表5所示。

表5 超滤膜化学清洗方式

Tab. 5 Chemical Cleaning Methods of UF Membrane

序号	酸洗			碱洗			氯洗			清洗顺序
	药剂	pH值	浸泡时间/min	药剂	pH值	浸泡时间/min	药剂	质量分数	浸泡时间/min	
1	柠檬酸	3	40	氢氧化钠	12	30	次氯酸钠	10%	60	氯洗-碱洗-酸洗
2	柠檬酸	2~3	60	氢氧化钠	11	40	次氯酸钠	10%	60	氯洗-酸洗-碱洗
3	盐酸	2	30	氢氧化钠	12	60	次氯酸钠	10%	40	酸洗-碱洗-氯洗

电站设计运行6套超滤设备,其中备用1套、检修或维护1套,运行中的超滤交错投运,使产水量、跨膜压差和阻塞进行“排队”。当投运时间最长的超滤需要停车清洗时,其清洗方式与恢复效果可为后续的清洗选择提供很好的借鉴与参考。完成清洗的超滤设备,首先需要投运试产水2~4 h,待机备用,记录期间的运行参数,以考核清洗效果。

## 4 工程实施效果

### 4.1 工程效果

深度脱盐电站建成投产至今稳定运行,凭借设备选型适当、工序衔接严密合理、运行操作到位,整体维持着高负荷、高效率产水,有效地解决了中水浓缩导致的含盐量升高的问题,实现了污水资源整体的高效稳定回用。同时,还可以通过调整脱盐水产水

量,持续地对污水回用的整体水质进行提升与优化,为该工业园区的水资源利用水平提升做出贡献。

### 4.2 产水水质分析

深度脱盐电站产水水质稳定,基本达到了设计要求,化验数据如表6所示,该数据为2020年剔除事故状态下的产水超标数据后的平均化验数据。

表6 深度脱盐电站实际水质

Tab. 6 Actual Water Quality of the Deep Desalination Station

指标	实际进水水质	实际产水水质
pH值	7~9	6.5~8.0
电导率/( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	2 500~4 500	80~150
硬度/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	700~1 000	100~200
$\text{Cl}^{-}$ /( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	300~600	$\leq 1$

### 4.3 解决运行异常情况的措施与效果

#### (1) 上游水质波动影响

在深度脱盐水处理初期,工业园区供排水管网与各区域泵站逐步投产,排水系统水质、水量极不稳定。特别是循环水系统的初期管道酸洗预膜排水中含有大量铁离子,含盐量高,对于以中水为水源的深度脱盐水处理危害极大,膜污染频繁。水处理不得降低处理负荷,或是提高中水碱度从而减少高价金属离子的携带。这类问题随着厂区给排水系统的日渐稳定而逐步减少。

工业园区排水体制为雨水、污水、废水分流排放,但是初期雨水因管道的冲洗含有大量的泥沙,设计通过泄洪泵站的回流管送至回用水站处理回用。这些携带泥沙的初期雨水造成回用水站的来水波动,继而影响到深度脱盐水站的进水水质,造成膜污染。经过几次类似事故,深度脱盐水处理在入夏后持续保持产水水池高液位,在遇降雨时减产或停产,以水池存水供应管网,防止膜污染。在深度脱盐水处理运行异常的统计中,因来水水质波动造成影响的事件约占 28%。

#### (2) 冬季低温影响

双膜工艺中可适应 0~40℃ 的进水,但过低的进水温度会影响膜组件,特别是反渗透膜组件的产水能力,并导致运行电耗增加。回用水站的中水常年水温在 10~27℃,通过泵组输送后水温有小幅度的提高,可以满足深度脱盐水站的进水要求。但是在冬季,特别是降雪时,中水的水温可能低至 5℃ 且持续时间较长,对深度脱盐水站的稳定、经济运行非常不利。为此,通过加大循环水系统置换、引锅炉连排水至深度脱盐水处理原水箱等措施,提高中水水温至 10℃ 左右,有效减少了低温进水的影响。

### 4.4 运行成本分析

深度脱盐水处理制水成本为 5.0~5.5 元/m<sup>3</sup>,主要包含设备电费、中水成本、药剂费(包括常规水质化验)、自用水费(不包括站区生活用水,包括反洗和设备仪表所用的压缩空气折算)和人工费用等,不包括更换膜组件的费用。其中,药剂费与中水成本所占比例较大,分别达到了 34.95% 和 16.05%(年平均)。运行平稳时,运行成本随之小幅度降低,最好的月份达到了 4.7 元/m<sup>3</sup>,当运行出现波动时,运行成本随之上升,特别是药剂费用与中水成本,变化增加最为明显。

### 5 结论

(1) 深度脱盐水处理以回用中水为水源制备脱盐水处理,有效解决了污水回用污染物质浓缩,特别是盐分含量的剧增带来的水质问题,降低结垢风险与阻垢成本。该工程从技术上保证了工业污水回用的整体水质均衡,为污水稳定、持续再生利用进行了有益的实践,特别是对于水资源紧张而冶金产业密集的河北地区,更具借鉴意义。

(2) 以回用中水为水源的脱盐水处理,由于来水水质不稳定的特性,对脱盐工序的运行调控水平要求高,特别是各类药剂的投配与调节。同时,须强化对进水水质、过程水质的检化验或是增加水质在线监测表计,为精准调控提供支撑。在此基础上,不断积累运行经验,以保证脱盐站区长周期稳定、高品质产水。

(3) 双膜工艺的高效稳定运行,关键点在超滤膜组件的污染防治,由于超滤膜组件纳污能力十分有限,其污染一般都是在短时间内发生,并迅速恶化影响产水。同时,污染物质的复杂性,难以及时准确地分析确认成分,导致其清洗的效果难以保证,这就需要在实践中不断地摸索不同的清洗方案,采用“清洗试验”的方式评判膜组件清洗效果,进而在动态的生产状态下保持水站的处理能力维持在较高的水平。

### 参考文献

- [1] 喻依兆. 钢铁工业“十三五”节能的重要方向[J]. 低碳世界, 2017(26): 265-266.  
YU Y Z. Important direction of iron and steel industry "13th Five-Year Plan" energy conservation[J]. Low Carbon World, 2017(26): 265-266.
- [2] 张凯莉. 典型钢铁工业园水网络优化[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.  
ZHANG K L. Water network optimization for typical steel industry in China[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [3] 丁姗姗, 李洛洛. 反渗透膜技术的应用[J]. 山东工业技术, 2015(22): 22-38.  
DING S S, LI L L. Application of reverse osmosis membrane technology[J]. Journal of Shandong Industrial Technology, 2015(22): 22-38.
- [4] 陈燕彬. 反渗透膜技术在冶金废水深度处理中的应用[J]. 当代化工研究, 2018, 34(5): 116-117.  
CHEN Y B. Application of reverse osmosis membrane technology

- in advanced treatment of metallurgical wastewater[J]. *Modern Chemical Research*, 2018, 34(5): 116-117.
- [5] 史金宏,郭建新,黄蓓,等. 瓦楞形复层结构多孔铝过滤材料的制备、界面结构与性能[J]. *功能材料*, 2022, 53(6): 6137-6144.
- SHI J H, GUO J X, HUANG B, et al. Fabrication, interface structure and properties of porous aluminum filter material with dual-corrugated structure[J]. *Journal of Functional Materials*, 2022, 53(6): 6137-6144.
- [6] 温永杰,路江尚,王乐译,等. 冶金高盐含氰废水的零排放处理[J]. *膜科学与技术*, 2019, 39(2): 94-97.
- WEN Y J, LU J S, WANG L Y, et al. Zero discharge treatment of metallurgical high salt and cyanide containing wastewater[J]. *Membrane Science and Technology*, 2019, 39(2): 94-97.
- [7] 倪明,马克,朱新民,等. 浸没式超滤膜清洗工程案例[J]. *膜科学与技术*, 2010, 30(5): 64-66.
- NI M, MA K, ZHU X M, et al. A case analysis on chemical cleaning of submerged ultra filtration membrane[J]. *Membrane Science and Technology*, 2010, 30(5): 64-66.
- [8] 邓良. 超滤处理高藻水中膜污染特性及预处理和反冲洗优化调控研究[D]. 广州: 广州大学, 2022.
- DENG L. Study on membrane fouling characteristics of ultrafiltration treatment of algal-laden water and optimization and regulation of pretreatment and backwashing[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2022.
- [9] 陆俊宇,李伟英,赵勇,等. 不同预处理工艺对超滤膜运行影响的中试试验研究[J]. *水处理技术*, 2010, 36(6): 119-122.
- LU J Y, LI W Y, ZHAO Y, et al. Pilot study on the effect of different pretreatment measures on surface water ultrafiltration [J]. *Technology of Water Treatment*, 2010, 36(6): 119-122.

(上接第 94 页)

好,4 h 后对 TP 的去除率达到 96.8%,且出水中的 TP 以溶解性 TP 为主。

(3)由上述试验结果可见,铁盐的投加能够有效除磷,铁盐化学除磷在基于微滤膜的膜分离过程中具有良好的应用前景,在适当的 pH 和 Fe/P 条件下除磷效果较好。而对于其在 MBR 反应器中的具体应用,则有待今后进一步研究。

### 参考文献

- [1] NEOH C H, NOOR Z Z, MUTAMIM N S A, et al. Green technology in wastewater treatment technologies: Integration of membrane bioreactor with various wastewater treatment systems [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 283: 582-594. DOI: 10.1016/j.cej.2015.07.060.
- [2] JEGATHEESAN V, PRAMANIK B K, CHEN J, et al. Treatment of textile wastewater with membrane bioreactor: A critical review[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 204: 202-212. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.01.006.
- [3] GIACOBBO A, FERON G L, RODRIGUES M A S, et al. Integration of membrane bioreactor and advanced oxidation processes for water recovery in leather industry[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2015, 56(7): 1712-1721.
- [4] LI R H, WANG X M, LI X Y. A membrane bioreactor with iron dosing and acidogenic co-fermentation for enhanced phosphorus removal and recovery in wastewater treatment [J]. *Water Research*, 2018, 129: 402-412. DOI: 10.1016/j.watres.2017.11.035.
- [5] WANG Y, TNG K H, WU H, et al. Removal of phosphorus from wastewaters using ferrous salts - A pilot scale membrane bioreactor study [J]. *Water Research*, 2014, 57: 140-150. DOI: 10.1016/j.watres.2014.03.029.
- [6] YANG X L, SONG H L, CHEN M, et al. Characterizing membrane foulants in MBR with addition of polyferric chloride to enhance phosphorus removal [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(20): 9490-9496. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.07.105.
- [7] JAY U. Iron deficiency: A concise review[J]. *American Journal of Hematology*, 2005, 78(3): 225-231.
- [8] FELT B T, LOZOFF B. Brain iron and behavior of rats are not normalized by treatment of iron deficiency anemia during early development[J]. *Journal of Nutrition*, 1996, 126(3): 693-701. DOI: 10.1093/jn/126.3.693.
- [9] WANG Y, LESLIE G L, WAITE T D. Impact of iron dosing of membrane bioreactors on membrane fouling [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 252: 239-248. DOI: 10.1016/j.cej.2014.04.106.
- [10] PARFITT R L, ATKINSON R J, SMART R S C. The mechanism of phosphate fixation by iron oxides I [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1975, 39(5): 837-841.
- [11] GILBERT B, LU G, KIM C S. Stable cluster formation in aqueous suspensions of iron oxyhydroxide nanoparticles [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2007, 313(1): 152-159. DOI: 10.1016/j.jcis.2007.04.038.
- [12] 林进南. 利用硫酸亚铁去除污水中的磷酸盐[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- LIN J N. Phosphate removal by ferrous sulfate from wastewater [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.