

工业高盐废水纳滤-反渗透分盐处理技术指南

南

编制说明

《工业高盐废水纳滤-反渗透分盐处理技术指南》标准编制组

二零二一年三月

承担单位：同济大学、天津工业大学、天津膜天膜科技股份有限公司、香港大学、杭州上拓环境科技股份有限公司、宝山钢铁股份有限公司、同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司、内蒙古久科康瑞环保科技有限公司

编制组负责人：王志伟 13817038314

编制组联系人：王雪野 18817366695 史威 13879196878

目次

1 项目背景.....	1
1.1 任务来源.....	1
1.2 主要工作过程.....	1
2 标准编制的必要性.....	3
3 标准编制原则.....	3
4 标准主要内容.....	4
4.1 标准内容结构.....	4
4.2 标准适用范围.....	4
4.3 规范性引用文件.....	4
4.4 术语和定义的内容及论据.....	6
4.5 设计水质的内容及依据.....	9
4.6 工艺设计内容及依据.....	13
4.7 盐回收和水回用要求.....	18
4.8 运行与维护.....	19
5 与相关标准的关系分析.....	22
6 标准性质的建议说明.....	23
7 贯彻措施.....	23
8 其它应说明的事项.....	23
参考文献.....	24

1 项目背景

1.1 任务来源

水资源短缺、水环境污染和水生态破坏是目前制约我国高质量发展的突出瓶颈和生态文明建设的短板。为此，国家发展改革委联合九部门印发的《关于推进污水资源化利用的指导意见》（发改环资〔2021〕13号）中明确提出了“积极推动工业废水资源化利用”和“实施工业废水循环利用工程”等一系列有力措施，加快推进污水资源化利用，优化供水结构、缓解供需矛盾和减少水污染、保障水生态安全，促进解决水资源短缺、水环境污染、水生态损害问题，推动高质量发展、可持续发展。污水资源化利用，作为一种破解水资源短缺、水环境污染和水生态破坏等问题的有效措施和重要途径，是指污水经无害化处理达到特定水质标准，作为再生水替代常规水资源，用于工业生产、市政杂用、居民生活、生态补水、农业灌溉、回灌地下水等，以及从污水中提取其他资源和能源。工业废水是指工业生产过程中产生的废水和废液，其中含有随水流失的工业生产用料、中间产物、副产品以及生产过程中产生的污染物，组成成分复杂，排放总量大。据统计，2019年，全国工业废水排放总量达到252亿吨。其中高盐废水产生量约占总量的7%，含有大量盐类物质和多种难处理的污染物（包括油、重金属、难降解有机物等），如不妥善处理不仅会严重影响生态环境，还会造成资源（如盐类、生产原料等）的浪费。

综上所述，工业高盐废水作为一种难处理可资源化的工业废水，亟需提出针对性的废水资源化利用技术和实施指导规范，实现工业高盐废水的“零排放”及资源化利用。因此，在国家重点研发计划“水资源高效开发利用”重点专项——《上海高新区工业废水近零排放及资源化关键技术研发与应用》（2019YFC0408200）项目的支撑下编制《工业高盐废水纳滤-反渗透分盐处理技术指南》，同济大学等单位承担该标准的编制工作。

1.2 主要工作过程

承担编制工作后，标准起草组经过内部多次研讨和专家论证，形成了目前的征求意见稿及其编制说明。

(1) 编制启动

承担单位同济大学及合作单位确定制定任务后，立刻组织落实标准制定工作。确定由同济大学等为主要起草单位，并由来自科研机构、企业、设计院的相关专家组成起草组，形成标准申报稿。

(2) 理论研究

2020年3月—2020年7月：为了按照文件要求，准确完成制定工作，标准起草组调研了《膜分离法污水处理工程技术规范》(HJ 579-2010)、《环境保护产品技术要求 反渗透水处理装置》(HJ/T 270)、《反渗透水处理设备》(GB/T 19249)、《工业盐》(GB/T 5462-2015)、《纺织废水膜法处理与回用技术规范》(GB/T 30888-2014)等相关标准和书籍，收集和分析了国内外工业高盐废水膜分盐的实际案例。经过资料分析和总结，对在工业高盐废水使用纳滤-反渗透分盐的要点进行梳理和提炼。理顺了标准制定的方向和思路，形成标准编制大纲。

(3) 企业调研

为了使标准具有科学性和可操作性，标准起草组通过资料分析和现场调研，于2020年7月—2020年8月赴典型企业进行实地考察，与相关技术和管理人员进行深入探讨。

(4) 标准草稿

2020年8月—2020年10月：标准起草组召开起草工作研讨会，就标准起草过程中存在的问题进行集中研讨。标准起草组根据纳滤-反渗透分盐技术的特点，进一步完善其技术要求、设计方法、盐产品要求等内容，经过若干次组内部研讨会和专家咨询会，形成了标准草稿。

(5) 标准立项

2020年10月：标准起草组向中国环境科学学会提交立项申请书和标准草稿。

2020年12月：中国环境科学学会召开立项专家评议会。

2021年1月：经中国环境科学学会审议进行立项公示。

2021年2月：经中国环境科学学会审议正式立项。

(6) 标准征求意见稿

2020年10月—2021年3月：标准起草组召开多次工作研讨会，充分吸纳立项会议时各位专家意见，并征求行业内有关专家学者对修订版本的意见，经充分讨论和多次修改，形成《工业高盐废水纳滤-反渗透分盐处理技术指南》（征求意见稿）。

2 标准编制的必要性

高盐废水产生量大，含有大量盐类物质和多种难处理的污染物（包括油、重金属、难降解有机物等），如不妥善处理不仅会严重影响生态环境，还会造成资源（如盐类、生产原料等）的浪费。纳滤-反渗透分盐技术作为工业高盐废水处理与资源化的核心技术之一，近年来在我国工业高盐废水处理领域内的应用规模快速攀升。然而，目前相关技术标准规范仍然缺失，存在技术市场准入门槛不明、市场不规范等现象，导致技术应用与市场需求不匹配等问题。为此，基于对提升工业高盐废水处理与资源化效能、提高水资源利用效率和产业升级的重大需求，编制工业高盐废水纳滤-反渗透分盐技术处理技术指南。

本技术指南的制定将实现纳滤-反渗透分盐技术在工业高盐废水处理领域的设计、应用有据可依，促进工业高盐废水高效利用与资源化，推动工业企业在废水处理与回用过程中“变废为宝”，在解决浓盐水处理成本高的问题基础上，降低企业生产成本；同时，明晰此项技术的市场准入和系统设计方法，推动纳滤-反渗透分盐技术在工业高盐废水处理领域的推广应用和技术进步，促进工业高盐废水的深度处理与资源化，发挥标准引领和引导作用。

综上，本技术指南的制定有助于工业企业降低工业高盐废水排放量，提升水资源循环利用率，可以为加快推进污水资源化利用、促进解决水资源短缺和水环境污染等问题、推动行业可持续发展提供标准支撑。

3 标准编制原则

本标准按照《中国环境科学学会标准管理办法（试行）》的要求和规定，确

定标准的组成要素。

在标准的编制过程中遵循了以下几个原则：

- (1) 科学性和规范性；
- (2) 先进性和实用性；
- (3) 系统性和整体性；
- (4) 贯彻国家、地方的环境保护法律法规及有关规定；
- (5) 与国际现行的再生水和资源化政策、产业政策等相结合；
- (6) 考虑与相关的标准、法规的衔接；

(7) 充分考虑我国工业高盐废水再生利用与资源化技术发展水平、再生水回用途径、再生水利用特点、行业产业升级和发展方式的转变，符合行业规范化发展需求。

4 标准主要内容

4.1 标准内容结构

本指南正文部分共 7 章。第 1 章为适用范围，第 2 章为规范性引用文件，第 3 章为术语和定义，第 4 章为设计水质，第 5 章为工艺设计，第 6 章为盐回收和水回用要求，第 7 章为运行与维护。各章的主要内容及论据分述如下。

4.2 标准适用范围

本标准规定了工业高盐废水纳滤-反渗透分盐处理的术语和定义、工艺选择原则、设计、前处理、纳滤分盐、反渗透浓缩和盐回收等要求。

本标准适用于石油化工、煤化工、精细化工、制药、钢铁、纺织印染、火力发电等采用纳滤-反渗透分盐技术的企业，可作为企业废水回用和盐回收的技术依据。

4.3 规范性引用文件

4.3.1 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。凡是注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB 7475 水质 铜、锌、铅、镉的测定 原子吸收分光光度法
- GB 7484 水质 氟化物的测定 离子选择电极法
- GB 13195 水质水温的测定温度计或颠倒温度计测定法
- GB/T 1576 工业锅炉水质
- GB/T 5462 工业盐
- GB/T 6009 工业无水硫酸钠
- GB/T 6920 水质 pH 值的测定 玻璃电极法
- GB/T 7477 水质 钙和镁总量的测定 EDTA 滴定法
- GB/T 8704.6 钒铁 硅含量的测定 硫酸脱水重量法和硅钼蓝分光光度法
- GB/T 11901 水质 悬浮物的测定 重量法
- GB/T 11903 水质 色度的测定
- GB/T 11906 水质 锰的测定 高碘酸钾分光光度法
- GB/T 13200 水质 浊度的测定
- GB/T 19249 反渗透水处理设备
- GB/T 20103 膜分离技术 术语
- GB/T 23837 工业循环冷却水中铝离子的测定 原子吸收光谱法
- GB/T 30888 纺织废水膜法处理与回用技术规范
- GB/T 32327 工业废水处理与回用技术评价导则
- GB/T 50050 工业循环冷却水处理设计规范
- DL/T 588 水质 污染指数测定方法
- HJ/T 195 水质 氨氮的测定 气相分子吸收光谱法
- HJ/T 270 环境保护产品技术要求 反渗透水处理装置
- HJ/T 315 水质 铁的测定 邻菲罗啉分光光度法
- HJ 487 水质 氟化物的测定 茜素磺酸锆目视比色法

HJ 488 水质 氟化物的测定 氟试剂分光光度法
HJ 535 水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法
HJ 536 水质 氨氮的测定 水杨酸分光光度法
HJ 537 水质 氨氮的测定 蒸馏-中和滴定法
HJ 579 膜分离法污水处理工程技术规范
HJ 586 水质 游离氯和总氯的测定 N,N-二乙基-1,4-苯二胺分光光度法
HJ 694 水质 汞、砷、硒、铋和锑的测定 原子荧光法
HJ 757 水质 铬的测定 火焰原子吸收分光光度法
HJ 828 水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法
SL 78 电导率的测定（电导仪法）

4.3.2 规范性引用文件的使用

本技术指南涉及纳滤-反渗透分盐系统的进水水质要求和膜系统设计时，在团队研究成果基础上，结合标准编制组工程经验及文献资料调研，同时参考《膜分离法污水处理工程技术规范》（HJ 579-2010）、《反渗透水处理设备》（GB/T 19249）、《环境保护产品技术要求 反渗透水处理装置》（HJ/T 270）和《纺织废水膜法处理与回用技术规范》（GB/T 30888-2014）等标准（包括纳滤系统进水水质和膜系统的设计等）进行综合确定。

本技术指南涉及水回用水质和回收盐产品质量时，主要参考《工业锅炉水质》（GB/T 1576）、《工业废水处理与回用技术评价导则》（GB/T 32327）、《工业循环冷却水处理设计规范》（GB/T 50050）、《工业盐》（GB/T 5462）和《工业无水硫酸钠》（GB/T 6009）等标准。

4.4 术语和定义的内容及论据

4.4.1 工业高盐废水 industrial high salinity wastewater

本指南的定义为“工业生产过程中排出，总含盐质量分数为1%及以上的高含盐废水和废液，包含随水流失的工业生产用料、中间产物、副产品以及生产过程中产生的污染物。本标准简称“高盐废水”，参考《工业废水处理与回用技术评价导则》（GB/T 32327）中工业废水的定义“工业生产过程中排出的废水、废

液，其中含有随水流失的工业生产用料、中间产物、副产品以及生产过程中产生的污染物”和《化工名词》（五）中高含盐废水的定义“一般指总含盐质量分数高于 1%的废水”。

4.4.2 纳滤 nanofiltration

本指南的定义为“以压力为驱动力，用于脱除多价离子、部分一价离子和分子量 200~1000 的有机物的膜分离过程”引用《膜分离技术 术语》（GB/T 20103）中对纳滤的定义。

4.4.3 反渗透 reverse osmosis

本指南的定义为“在高于渗透压差的压力作用下，溶剂（如水）通过半透膜进入膜的低压侧，而溶液中的其他组分（如盐）被阻挡在膜的高压侧并随浓溶液排出，从而达到有效分离的过程”引用《膜分离技术 术语》（GB/T 20103）中对反渗透的定义。

4.4.4 膜 membrane

本指南的定义为“表面有一定物理或化学特性的薄的屏障物，它使相邻两个流体相之间构成了不连续区间并影响流体中各组分的透过速度”引用《膜分离技术 术语》（GB/T 20103）中对膜的定义。

4.4.5 膜元件 membrane element

本指南的定义为“由膜、膜支撑体、流道间隔体、带孔的中心管等构成的膜分离单元”引用《膜分离技术 术语》（GB/T 20103）中对膜元件的定义。

4.4.6 膜组件 membrane module

本指南的定义为“由膜元件、壳体、内联接件、端板和密封圈等组成的实用器件”引用《膜分离技术 术语》（GB/T 20103）中对膜组件的定义。

4.4.7 一价盐 monovalent salts

本指南的定义为“主要成分为氯化钠的结晶盐，其中氯化钠含量不小于 92%”基于《工业盐》（GB/T 5462）中对工业盐氯化钠的要求而定义。

4.4.8 二价盐 divalent salts

本指南的定义为“主要成分为硫酸钠的结晶盐，其中硫酸钠含量不小于 92%”基于《工业无水硫酸钠》（GB/T 6009）中对工业硫酸钠的要求而定义。

4.4.9 分盐 salt fractionation

本指南的定义为“对废水中的一价盐和二价盐进行分离的工艺过程”参考修改自《煤化工高盐废水分质提盐结晶技术研究》中对分盐的说明“实现一二价离子分离的过程”。

4.4.10 废水纳滤-反渗透分盐处理系统 nanofiltration-reverse osmosis salt fractionation for industrial wastewater treatment

本指南的定义为“以回收废水中的盐分为目的，由前处理单元、纳滤-反渗透分盐单元、盐结晶单元等设备和设施组成的系统”，由本指南中工艺流程总结而来。

4.4.11 淤泥密度指数 silt density index (SDI)

本指南的定义为“由堵塞 0.45 μm 微孔滤膜的速率所计算得出的、表征水中细微悬浮固体物含量的指数”引用《膜分离技术 术语》(GB/T 20103)中对淤泥密度指数的定义。

4.4.12 蒸发结晶器 evaporative crystallizer

本指南的定义为“通过蒸发溶剂，使得溶液中的溶质浓度增大，达到过饱和度，从而使盐析出的设备”参考《化工名词》(三)中对蒸发结晶的定义“通过蒸发溶剂，使得溶液中的溶质浓度增大，达到过饱和度，从而使晶体析出的过程”。

4.4.13 冷冻结晶器 freezing crystallizer

本指南的定义为“通过降低温度，使溶液产生过饱和析出晶体，实现溶液中不同组分分离的设备”参考《化工名词》(二)中对冷冻结晶的定义“通过降低温度，使液体产生过饱和析出晶体，实现不同液体组分分离的过程”。

4.4.14 工业盐 industrial salt

本指南的定义为“达到工业盐标准的工业用盐”，结合本技术指南的使用背景，参考《制盐工业 术语》(GB/T 19420-2003)中对工业盐定义“供各类工业使用的盐”修改而来。

4.4.15 浓水 concentrated water

本指南的定义为“高盐废水经纳滤、反渗透工艺处理产生的浓缩液（也称浓

溶液或浓盐水)”根据工艺过程，参考《膜分离技术 术语》(GB/T 20103)中对同义的浓缩水的定义“除盐或分离过程中的浓缩液”修改而来。

4.4.16 产水 product water

本指南的定义为“高盐废水经纳滤、反渗透工艺处理产生的透过液”根据工艺过程，参考修改《膜分离技术 术语》(GB/T 20103)中对同义的透过水的定义“透过膜的那部分水”修改而来。

4.5 设计水质的内容及依据

4.5.1 设计水质

本指南的纳滤单元进水水质可参考表 1，各项水质指标的相应测定方法标准总结于表 2 中。由于纳滤单元产水品质较高，反渗透单元进水水质不作规定。

表1 纳滤单元进水水质指标要求

序号	项目	单位	进水限值	产水参考值
1	水温	°C	5~40	无要求
2	pH值	无量纲	6~9	6~9
3	悬浮物(SS)	mg/L	≤2	≤0.5
4	浊度	NTU	≤1	≤0.2
5	化学需氧量(COD _{Cr})	mg/L	≤100	≤20
6	氨氮	mg/L	≤5	≤1
7	色度	倍	≤80	≤10
8	总硬度(CaCO ₃ 计)	mg/L	≤200	≤25
9	余氯	mg/L	≤0.1	无要求
10	铁(III)	mg/L	≤0.05	≤0.01
11	铁(II)	mg/L	≤4	≤1
12	铝	mg/L	≤0.05	≤0.01
13	锰	mg/L	≤0.05	≤0.01
14	淤泥污染指数	无量纲	≤5	无要求
15	氟	mg/L	≤0.5	无要求
16	硅	mg/L	≤5.0	无要求
17	其它重金属	mg/L	≤0.05	≤0.01

表2 水中污染物浓度测定方法标准

序号	项目	方法标准名称	方法标准编号	
1	水温	水质水温的测定温度计或颠倒温度计测定法	GB13195	
2	pH值	水质 pH值的测定 玻璃电极法	GB/T 6920	
3	悬浮物 (SS)	水质 悬浮物的测定 重量法	GB/T 11901	
4	浊度	水质 浊度的测定	GB/T 13200	
5	化学需氧量	水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法	HJ 828	
6	氨氮	水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法	HJ 535	
		水质 氨氮的测定 水杨酸分光光度法	HJ 536	
		水质 氨氮的测定 蒸馏-中和滴定法	HJ 537	
		水质 氨氮的测定 气相分子吸收光谱法	HJ/T 195	
7	色度	水质 色度的测定	GB/T 11903	
8	总硬度 (CaCO ₃)	水质 钙和镁总量的测定 EDTA滴定法	GB/T 7477	
9	电导率	电导率的测定 (电导仪法)	SL 78—1994	
10	余氯	水质 游离氯和总氯的测定 N,N-二乙基-1,4-苯二	HJ 586—2010	
11	氟	水质 氟化物的测定 氟试剂分光光度法	HJ 488	
		水质 氟化物的测定 茜素磺酸锆目视比色法	HJ 487	
		水质 氟化物的测定 离子选择电极法	GB 7484—87	
12	硅	钒铁 硅含量的测定 硫酸脱水重量法和硅钼蓝分	GB/T 8704.6—	
13	铁	水质 铁的测定 邻菲罗啉分光光度法	HJ/T 315—2007	
14	铝	工业循环冷却水中铝离子的测定 原子吸收光谱法	GB/T 23837-2009	
15	锰	水质 锰的测定 高碘酸钾分光光度法	GB/T 11906	
16	淤泥污染指数	水质 污染指数测定方法	DL/T 588—2015	
17	其它重金 属	铬	水质 铬的测定 火焰原子吸收分光光度法	HJ 757—2015
18		镉	水质 铜、锌、铅、镉的测定 原子吸收分光光度 法	GB 7475
19		铅		
20		锌		
21		铜		
22		汞	水质 汞、砷、硒、铍和锑的测定 原子荧光法	HJ 694

本指南的结晶器进水水质应根据一价/二价盐的品质要求进行规定，回收盐质量达不到要求时，可通过前处理工艺对影响一价/二价盐品质的杂质进行去除。必要时也可对结晶器进水进行电渗析、离子交换和蒸发浓缩等补充处理，提高进水盐浓度，降低处理成本。

4.5.2 设计水质依据

设计水质主要规定了纳滤单元的进水水质，各进水指标参考依据如下：

(1) 水温指标综合参考了《膜分离法污水处理工程技术规范》(HJ 579-2010)中对水温的要求“5-45°C”和《陶氏 FILMTEC™ 反渗透和纳滤膜元件 产品与技术手册》中对水温的要求“<45°C”，结合编制组企业实际工程经验确定水温为“5-40°C”；

(2) pH 值指标的确定综合考量了不同材质纳滤膜的 pH 值需求及《Effects of pH and salt on nanofiltration-a critical review》等文献中 pH 对纳滤膜的影响，从保护膜长期稳定运行的角度，并结合其他标准，如《纺织废水膜法处理与回用技术规范》(GB/T 30888-2014)中对 pH 值的要求，将 pH 值的范围定为“6-9”，；

(3) 悬浮物 (SS) 过多极易使膜污堵降低膜性能，基于编制组的项目工程经验，同时参考《纺织废水膜法处理与回用技术规范》(GB/T 30888-2014)对悬浮物的要求，将 SS 的限值定为“≤2 mg/L”；

(4) 浊度、余氯、淤泥污染指数 (SDI) 指标基于编制组的项目工程经验，同时参考了《纺织废水膜法处理与回用技术规范》(GB/T 30888-2014)、《膜分离法污水处理工程技术规范》(HJ 579-2010)、《DOW FILMTEC™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual》和《东丽 膜产品技术手册-反渗透和纳滤》中统一对浊度的要求“≤1 NTU”，对余氯的要求“≤0.1 mg/L”，对 SDI 的要求“≤5”。

(5) 化学需氧量(COD_{Cr})、氨氮和色度过高易导致膜的有机污染和生物污染等结垢污染使膜的工作性能下降，增加膜分离单元的操作和维护费用，并且将严重缩短膜的使用寿命。为确定 COD_{Cr} 和氨氮的指标，综合考量了各类工业高盐废水的特点、膜污染及清洗频率和后续处理单元的需求，结合编制组已有研究成果，并进行相关文献《Fouling of nanofiltration and ultrafiltration membranes applied for wastewater regeneration in the textile industry》和《Contribution of assimilable organic carbon to biological fouling in seawater reverse osmosis membrane treatment》等调研，同时参考了《纺织废水膜法处理与回用技术规范》(GB/T 30888-2014)中对 COD_{Cr}、氨氮和色度的限值，确定 COD_{Cr} 为“≤100 mg/L”，氨氮为“≤5 mg/L”，色度为“≤80 倍”。

(6) 总硬度 (CaCO₃ 计) 指标确定时结合编制组工程经验和研究成果，在

《集成膜法海水淡化过程中纳滤-反渗透膜面结垢趋势预测及防垢研究》等研究的基础上，结合工业高盐废水的特点，参考有关标准，如《纺织废水膜法处理与回用技术规范》(GB/T 30888-2014)规范，为防止膜污染和保证回收盐质量，将总硬度的进水限值定为“ $\leq 200 \text{ mg/L}$ ”；

(7) 含有铁离子和铝离子的水体易产生硅酸铁和硅酸铝等硅酸盐沉淀，锰等重金属离子易生成难溶性的胶体氢氧化物颗粒或氧化物颗粒造成膜污染，使膜发生污堵。此外，铁离子还易使膜被氧化而损伤。因此需要控制纳滤进水中铁、铝和锰的浓度，避免膜污染。此外，重金属浓度较高时，易加剧氯对膜的侵蚀，降低膜的寿命。所以，铁(III)、铁(II)、铝、锰及其它重金属离子指标参考了《DOW FILMTEC™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual》、《钢铁污水除盐技术规范》(YBT4257-2012)和《湿法炼锌企业废水循环利用技术规范》(GB-T27678-2011)后，结合实际需求，分别定为“ $\leq 0.05 \text{ mg/L}$ ”、“ $\leq 4 \text{ mg/L}$ ”、“ $\leq 0.05 \text{ mg/L}$ ”、“ $\leq 0.05 \text{ mg/L}$ ”和“ $\leq 0.1 \text{ mg/L}$ ”。

(8) 氟离子易与水中的 Ca^{2+} 离子形成氟化钙沉淀造成膜污染。为确定其限值，首先通过氟化钙的 K_{sp} 值与设计的硬度限值计算得到了氟的理想限值；同时参照相关文献资料《DOW FILMTEC™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual》中对氟化物结垢的研究说明，再结合实际工程经验和后续膜处理单元的运行需求，将氟的限值最终定为“ $\leq 0.5 \text{ mg/L}$ ”。

(9) 硅，除本身易在膜上形成二氧化硅无机污染外，溶解态二氧化硅还易与铁离子和铝离子等形成硅酸盐沉淀，参考《Combating the Threat of Silica Fouling in RO Plant-Practical Experiences》中对二氧化硅污染的研究与《DOW FILMTEC™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual》中所描述的“Low silica concentrations (10 mg/L) can result in aluminum silicate fouling”，结合《Improving Reverse Osmosis Performance through Periodic Cleaning》和《Complex Fouling and Cleaning-in-Place of a Reverse Osmosis Desalination System》中所述“当给水中并存有 Al^{3+} 和 Fe^{3+} 时，二氧化硅甚至会在低于其饱和度时发生沉淀”，综合考量上述研究成果，基于编制组实际工程经验，将硅指标定为“ $\leq 5 \text{ mg/L}$ ”。

4.6 工艺设计内容及依据

4.6.1 前处理设计

为达到较好的处理效果，前处理阶段的出水应满足纳滤单元的进水要求。基于编制组的项目工程经验，在《煤化工高盐水近零排放及分质制盐技术研究》和《集成膜法海水淡化过程中纳滤-反渗透膜面结垢趋势预测及防垢研究》等研究的基础上，参考了《纺织废水膜法处理与回用技术规范》（GB/T 30888-2014）和《膜分离法污水处理工程技术规范》（HJ 579-2010）等膜法污水处理工程规范，同时结合编制组工程经验及相关技术的需求总结出以下八点。

（1）前处理应根据原水水质、膜组件的结构、产水要求及回收率、回收盐品质要求等综合确定。

（2）为防止和减缓膜堵塞、膜破损以及结晶器结垢，应对进水中的悬浮固体、微溶盐、有机物、油脂和重金属等污染物进行前处理。

（3）为防止前处理加酸、加氯造成管道及设备的腐蚀，在纳滤、反渗透系统的低压侧，应采用 UPVC、PPH、玻璃钢或 HDPE 管材及连接件，在高压侧应采用不锈钢管材及连接件。

（4）为防止化学氧化损伤，可采用在进水中添加还原剂（如亚硫酸氢钠）去除余氯或其他氧化剂，控制余氯含量满足纳滤系统进水要求。

（5）在前处理设计时，可先采用饱和指数法评估水体的结垢潜势。为防止碳酸盐结垢导致的膜损伤，可加酸或阻垢剂控制结垢；为防止硫酸盐结垢导致的膜损伤，可投加阻垢剂进行控制。

（6）为防止微生物污染，可向系统进水中投加杀菌剂进行杀菌消毒处理。

（7）常见工业高盐废水的前处理工艺可参考附录 A。

（8）废水进入纳滤单元之前应达到表 1 的水质要求。

4.6.2 纳滤-反渗透系统设计

4.6.2.1 设计参数

总结了工艺设计所需的参数，包括：设计产水量， m^3/h ；单支膜元件产水量， m^3/h ；水回收率，%；脱盐率，%；进水水质；产水水质；浓水水质。

4.6.2.2 工艺流程

以纳滤-反渗透分盐工艺为主体，综合考量了纳滤及反渗透的技术特点，基于不同工业的产水水质和回收盐质量需求，结合编制组高校及企业的研究和工程经验，参考《膜分离法污水处理工程技术规范》（HJ 579-2010）规范，按照不同处理与回用需求，总结出了以下五个工艺流程。

（1）工业高盐废水纳滤-反渗透分盐系统基本工艺流程：适用于进水一次通过纳滤和反渗透系统即可达到产水要求，纳滤、反渗透浓水分别进入结晶器进行二价盐、一价盐回收可达到分盐要求的情况，其基本工艺流程如图 1 所示。

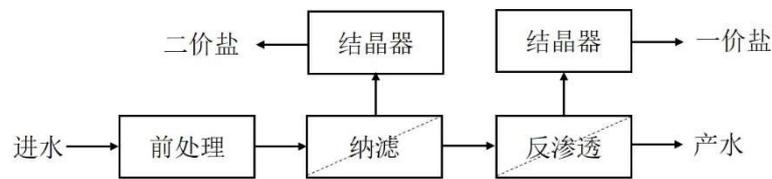
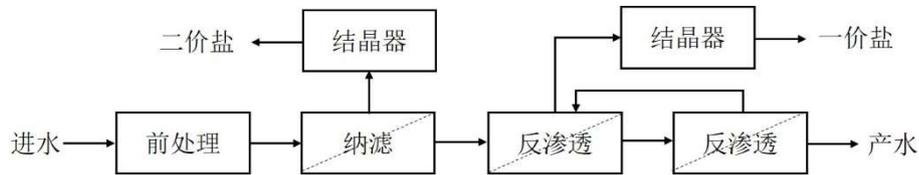


图1 纳滤-反渗透分盐系统基本工艺流程

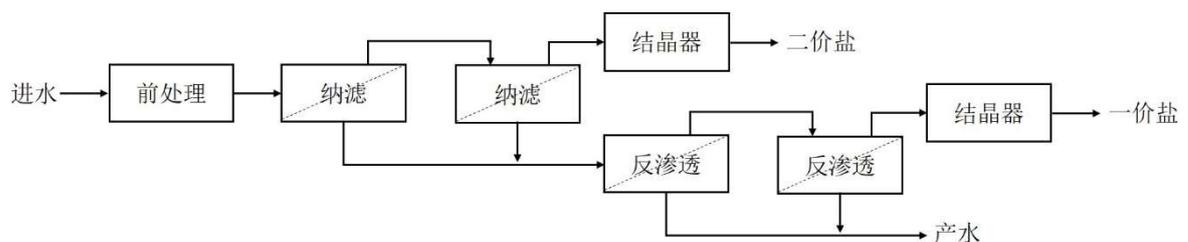
（2）多级反渗透盐回收系统工艺流程：当单级系统分离的产水水质无法达到要求时，可采用多级反渗透工艺，即以上一级系统产水作为进水进入下一级反渗透系统继续分离，直至产水水质达标，工艺流程如图 3 所示。



注：多级（multipass）：上一膜组件的产水作为进水进入下一级膜组件进行再次分离的膜组件排列形式；若需提高水回收率，可在末级中采用多段反渗透工艺。

图2 多级反渗透分盐系统工艺流程

（3）多段纳滤-多段反渗透分盐系统工艺流程：当一次纳滤分离的分盐品质或产水水质无法达到要求时，可采用多段纳滤-多段反渗透分盐工艺，即以上一段浓水作为进水进入下一段进行再次分离，工艺流程如图 3 所示。



注：多段（multistage）：上一膜组件所产浓水作为进水进入下一膜组件进行再次分离的膜组件排列形式，工程中可根据实际需求将后段所产浓水回流至前段进一步浓缩。

图3 多段纳滤-多段反渗透分盐工艺流程

（4）多段纳滤-多级反渗透分盐系统工艺流程：当分盐品质和产水水质均需提升时，可采用多段纳滤-多级反渗透工艺，即通过多段纳滤提升二价盐分盐品质，同时采用多级反渗透进一步提升产水品质，工艺流程如图 4 所示。

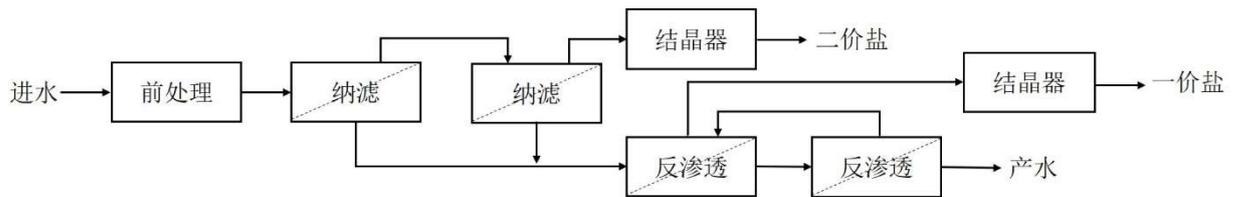


图4 多段纳滤-多级反渗透分盐系统工艺流程

（5）多段多级纳滤-多级反渗透分盐系统工艺流程：当一价盐、二价盐品质和产水水质均需提升时，可采用多段多级纳滤-多级反渗透工艺，通过多段多级纳滤提升一价盐和二价盐分盐品质，同时采用多级反渗透进一步提升产水品质，工艺流程如图 5 所示。

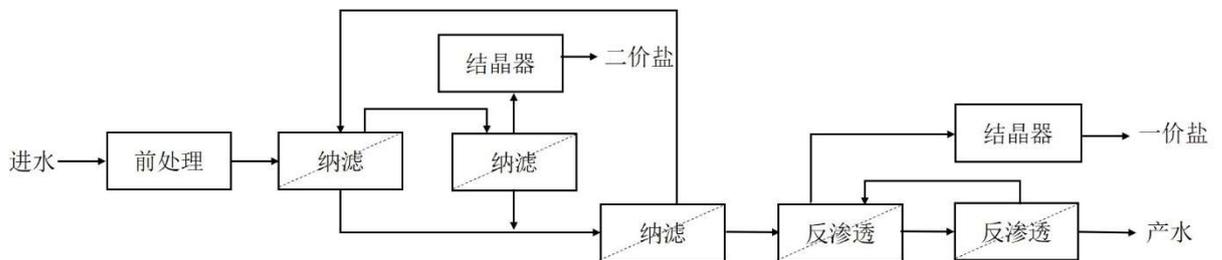


图5 多段多级纳滤-多级反渗透分盐系统工艺流程

4.6.2.3 基本设计计算

根据纳滤、反渗透的设计参数需求，参考《给水排水设计手册（第 4 册-工业给水处理）》及《膜分离法污水处理工程技术规范》（HJ 579-2010），归纳了如下纳滤和反渗透单元设计选型时可能需要的计算公式。

（1）流量平衡

在膜组件运行中，进、出组件的溶液流量是连续的，表达式为：

$$Q_f = Q_p + Q_r \dots \dots \dots (1)$$

式中：

Q_f ——进水流量，单位为立方米每小时（ m^3/h ）；

Q_p ——产水流量，单位为立方米每小时（ m^3/h ）；

Q_r ——浓水流量，单位为立方米每小时（ m^3/h ）。

(2) 物料平衡

在膜处理过程中，膜分离前、后的溶质质量守恒，表达式为：

$$Q_f C_f = Q_p C_p + Q_r C_r \dots\dots\dots(2)$$

式中：

C_f ——进水浓度，单位为毫克每升（ mg/L ）；

C_p ——产水浓度，单位为毫克每升（ mg/L ）；

C_r ——浓水浓度，单位为毫克每升（ mg/L ）。

(3) 水回收率 Y 按照公式(3)计算。

$$Y = \frac{Q_p}{Q_f} \times 100\% = \frac{Q_p}{Q_p + Q_r} \times 100\% \dots\dots\dots(3)$$

(4) 浓缩倍数 CF 按照公式(4)计算。

$$CF = \frac{Q_f}{Q_r} = \frac{100}{100 - Y} \dots\dots\dots(4)$$

(5) 脱盐率 R 按照公式(5)计算。

$$R = \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) \times 100\% \dots\dots\dots(5)$$

(6) 单支膜元件产水量温度校正

在设计温度与标称产水量对应温度不同时，需要对单支膜元件产水量（ Q_p (m^3/h ））进行校正。一般采用生产厂家的提供相关资料进行校正，在无相应参考资料时，可以按照公式(6)进行近似校正。

$$Q_p = Q_{p,25} \times (1 + 0.0215)^{T-25} \dots\dots\dots(6)$$

式中：

Q_p ——相对温度 T 下的产水量；

$Q_{p,25}$ ——基准温度 $25^\circ C$ 下的产水量。

(7) 膜元件数量按公式(7)计算。

$$N_e = \frac{Q_p}{q_{max} \times 0.8} \dots\dots\dots(7)$$

式中：

Q_p ——设计产水量，单位为立方米每小时（ m^3/h ）；

q_{max} ——膜元件最大产水量，单位为立方米每小时（ m^3/h ）；

0.8——设计安全系数。

（8）压力容器（膜壳）数量按式(8)计算。

$$N_v = \frac{N_e}{n} \dots\dots\dots(8)$$

式中：

N_v ——压力容器数；

N_e ——设计元件数；

n ——每个容器中的元件数。

4.6.2.4 附属设计

以本技术中纳滤-反渗透系统的运行需求为基础，根据编制组实际工程中附属管道的经验设计参数及监控项目的需要，参考《膜分离法污水处理工程技术规范》（HJ 579-2010），总结出了管道、自动控制系统和仪表的设计需求与参数。

（1）管道

a) 产水支管和干管的流速宜小于 1.0 m/s。

b) 各段产水可直接输入产水箱。如各段产水管并联到一根总管时，则须在每段产水支管上安装防回流措施（如止回阀等）。

（2）自动控制系统和仪表

a) 自控系统的监控项目宜包括：温度， $^{\circ}C$ ；产水流量， m^3/h ；进水压力，MPa；进水电导率， $\mu S/cm$ ；进水 pH；余氯；ORP；液位，m；产水流量， m^3/h ；产水电导率， $\mu S/cm$ ；浓水流量， m^3/h ；浓水压力，MPa。

b) 进水管应设置余氯或 ORP 监测器，并与还原剂加药装置联动运行。

c) 高压泵进水口应设置低压保护开关，高压泵出水口应设置高压保护开关。

d) 当加酸调节进水 pH 值时，应设置 pH 上、下限值切断开关；如进水设有升温措施，则应设置高温切断开关。

4.6.3 结晶器设计选型

4.6.3.1 结晶器选型

综合考量了各类型结晶器的特点后，根据结晶器的设计参数需求，参考《化工机械手册》和《化学工程手册》中结晶器的相关内容，归纳了结晶器设计选型所需的参数。

(1) 结晶器选型：根据浓水水量和回收盐的品质等要求，选择适当的结晶器类型；

(2) 操作温度：根据盐的溶解度及超溶解度曲线，选择合适的操作温度；

(3) 停留时间：根据对回收盐品质的要求与晶体成核生长动力学数据，确定晶体在结晶器内的停留时间；

(4) 有效尺寸：以停留时间和晶体生长速率为基础，确定结晶器有效尺寸。

4.6.3.2 自动控制系统和仪表

按照结晶器的工作原理和过程，总结了所需的自控系统的监控项目，包括：

(1) 压力，MPa；

(2) 进水电导率， $\mu\text{S}/\text{cm}$ ；

(3) 进水流量， m^3/h ；

(4) 各器件温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

(5) 结晶器内液温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

(6) 冷凝水流量， m^3/h ；

(7) 回收盐量，kg。

4.7 盐回收和水回用要求

根据回收盐的资源化需求确定了回收盐质量要求。以工业回用水的再利用途径为基础，结合工程经验，参考《再生水质安全评价与保障原理》、《城镇污水再生利用工程设计规范》(GB 50335-2002)、《Water reuse in urban areas— Guidelines for water reuse safety evaluation— Assessment parameters and methods》(ISO 20761)和《城市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T 19923-2005)等规范，制定了回用水水质的要求。

4.7.1 盐回收要求

(1) 反渗透膜浓水最终经结晶器结晶后，作为工业盐使用的，一价盐产品的理化指标应符合 GB/T 5462 的规定。

(2) 纳滤膜浓水最终经结晶器结晶后，作为工业盐使用的，二价盐产品的理化指标应符合 GB/T 6009 的规定。

4.7.2 盐的指标测定

(1) 对一价盐的各理化指标测定采用 GB/T 5462 中的方法与标准。

(2) 对二价盐的各理化指标测定采用 GB/T 6009 中的方法与标准。

4.7.3 水回用要求

(1) 反渗透膜产水用作冷却用水（包括直流冷却水和敞开式循环冷却水系统补充水）时，应达到《工业循环冷却水处理设计规范》（GB/T 50050）的要求。

(2) 反渗透膜出水用作低压锅炉补给水时，水质应达到《工业锅炉水质》（GB/T 1576）的要求。

(3) 反渗透膜产水用作工艺与产品用水时，应根据不同生产工艺的具体情况，通过试验验证以确保水质达到相关工艺的供水水质指标要求。必要时，也可对产水进行电渗析、离子交换等补充处理。

(4) 反渗透膜出水用作其他用途时，应达到相关供水水质指标要求。

4.8 运行与维护

4.8.1 膜系统运行与维护

综合考量了膜系统的运行与维护中可能出现的问题，根据膜系统的操作与维护需求，以编制组实际工程经验为基础，参考《海水淡化反渗透系统运行管理规范》（GB/T 31328-2014）和《城镇污水厂运行管理手册》（第 6 版），归纳了膜系统的操作和运行维护流程。

4.8.1.1 膜处理系统的启动

- a) 检查阀门、管路、设备及仪表能否正常运转；
- b) 排尽膜组件中的空气；
- c) 进水水质应符合膜元件的进水要求；
- d) 按照操作规程要求，缓慢开启进水阀门，缓慢升高膜组件进水压力。

4.8.1.2 膜处理系统的调试

a) 膜处理系统按照各器件使用说明进行试运行，调试水泵等流体设备及压力计、温度计等计量设备，记录膜处理系统产水量、压力等运行数据；

b) 形成膜分离系统调试记录、72 小时连续运行记录和 24 小时满负荷运行记录；

c) 形成产水水质测试报告。

4.8.1.3 膜处理系统的运行与维护

a) 稳定运行后，及时记录运行参数；

b) 定期查看膜系统运行情况；

c) 定期记录膜处理系统的压力、产水量、进水电导率、产水电导率等运行指标；

d) 定期检测产水水质；

e) 定期校验电导率仪、压力计、流量计等仪表，确保膜系统安全运行；

f) 定期进行膜组件清洗；

g) 定期进行检查维修，并做好记录；

h) 当运行压力、产水和电导率等发生异常时，按照操作规程及时处理。

4.8.1.4 膜处理系统的停运

a) 停止运行时，先停止出水再停止进水；

b) 按照操作规程要求，缓慢关闭进水阀门，缓慢降低膜组件的进水压力；

c) 停止运行后，用符合要求的前处理水或产水冲洗整个膜组件；

d) 停止运行期间，膜组件和管道内的水不能流失；

e) 停止运行期间膜元件的保存方法可见附录 B.2；

f) 停止运行期间膜装置厂房的室温宜为 5~40℃。

4.8.2 结晶系统运行与维护

根据本技术指南中结晶系统的运行特点，以结晶器的相关结构和检验方法为基础，结合编制组工程经验，参考《化工机械手册》和《结晶器》（JB/T 20068-2005），总结了常用的蒸发结晶及冷冻结晶系统的运行维护要求。

4.8.2.1 蒸发结晶系统的运行

(1) 蒸发结晶系统的启动

- a) 严格按照蒸发结晶器启动操作流程，进行启动前准备；
- b) 检查加热室、泵组、仪表、蒸汽与冷凝管路、加料管路等是否完好；
- c) 按照启动流程依次开启进料阀、蒸汽阀等，查看液位情况。

(2) 蒸发结晶系统的调试

a) 蒸发系统按照使用说明进行试运行，调试蒸发结晶器、加热设备、冷凝器、泵、排水系统、电器仪表控制等运行数据；

b) 形成蒸发结晶系统调试记录，包括 72 小时连续运行记录和 24 小时满负荷运行记录；

c) 形成回收盐产品质量报告。

(3) 蒸发结晶系统的运行与维护

- a) 运行过程中，需保持操作条件的稳定；
- b) 定期查看结晶器运行情况；
- c) 定期记录蒸发结晶系统的液位、温度、压力、流量等运行指标；
- d) 定期观察各加料泵、过料泵、强制循环泵的运行工况；
- e) 定期检测盐产品质量；
- f) 定期校验温度计、压力表、真空表等仪表，确保蒸发器安全运行；
- g) 定期清除蒸发器内的结垢；
- h) 定期进行检查维修，并做好记录。

(4) 蒸发结晶系统的停运

- a) 出现运行异常，尽快切断蒸汽；
- b) 在安全前提下，停止进料；
- c) 处理料液，进行维修。

4.8.2.2 冷冻结晶系统的运行

(1) 冷冻结晶系统的启动

- a) 严格按照冷冻结晶器启动操作流程，进行启动前准备；
- b) 检查冷冻结晶系统的管道、阀门和搅拌装置是否完好；
- c) 检查仪表、电器设备、传动装置等是否正常；

- d) 打开进料泵进出口阀门,开启进料泵进料,液位控制在回流管回液为止;
- e) 进完料后开启搅拌,再开启物料循环泵;
- f) 打开冷媒阀门进行降温结晶,控制降温速度。

(2) 冷冻结晶系统的调试

- a) 冷冻结晶系统按照使用说明进行试运行,调试冷冻结晶器、冷却设备、泵、电器仪表控制等运行数据;
- b) 形成冷冻结晶系统调试记录,包括 72 小时连续运行记录和 24 小时满负荷运行记录;
- c) 形成回收盐产品质量报告。

(3) 冷冻结晶系统的运行

- a) 运行过程中,需保持操作条件的稳定;
- b) 定期检查结晶器运行情况;
- c) 定期记录冷却结晶系统的液位、温度、流量等运行指标;
- d) 定期观察各进料泵、循环泵的运行工况;
- e) 定期检测盐产品质量;
- f) 定期校验设备管道保温设施,确保冷量利用率;
- g) 定期进行检查维修,并做好记录。

(4) 冷冻结晶系统的停运

- a) 关闭循环泵和搅拌装置;
- b) 关闭阀门和电源;
- c) 长期停用时,要排尽系统内的积水,防止管道或设备冻裂。

5 与相关标准的关系分析

本指南按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第 1 部分:标准化文件的结构和起草规则》的规定起草,内容符合国家相关法律法规的规定,是对当前相关国家和行业标准中未覆盖内容的必要补充。

为了准确完成制定工作,标准起草组收集《膜分离法污水处理工程技术规范》

(HJ 579-2010)、《反渗透水处理设备》(GB/T 19249)、《工业盐》(GB/T 5462-2015)、《环境保护产品技术要求 反渗透水处理装置》(HJ/T 270)、《纺织废水膜法处理与回用技术规范》(GB/T 30888-2014)和《城镇污水再生利用技术指南(试行)》等相关国家和行业标准。经过资料分析和提炼,理顺了标准制定的方向和思路,形成标准编制大纲。

6 标准性质的建议说明

本指南属于团体标准,由中国环境科学学会归口。

7 贯彻措施

(1) 开展宣贯培训

标准发布后,为保障标准贯彻实施,主要起草人选取分盐工艺运用较多典型工业园区所在的省市,开展宣贯培训。

(2) 推动在全国典型企业分盐工艺中应用

开展与相关企业合作联动,推动标准在全国典型企业分盐工艺的方案论证、验收工作及操作运行中发挥重要作用。

8 其它应说明的事项

本标准为首次制订,随着高盐废水资源化利用行业的快速崛起和相关新技术的快速发展,本标准中的工业高盐废水分盐及资源化技术可能会随之发生变化。因此,建议在本标准实施过程中,继续广泛听取和收集各方面的意见与建议,并根据实际应用情况,对本标准进行不断地修订与完善,使其实用性和可操作性与时俱进,为规范开展工业高盐废水资源化系统升级改造工作提供依据和指导。

参考文献

- [1] 刘二. 煤化工高盐废水分质提盐结晶技术研究[D]. 宁夏大学, 2020.
- [2] Luo J, Wan Y. Effects of pH and salt on nanofiltration—a critical review[J]. *Journal of Membrane Science*, 2013, 439:18-28.
- [3] 李琨. 纳滤分离煤化工浓盐水的效能及膜污染机理研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2020.
- [4] Van der Bruggen B., Cornelis G., Vandecasteele C., Devreese I. Fouling of nanofiltration and ultrafiltration membranes applied for wastewater regeneration in the textile industry[J]. *Desalination*, 2005, 175(1):111-119.
- [5] Weinrich L., Le Chevallier M., N. Haasc C.. Contribution of assimilable organic carbon to biological fouling in seawater reverse osmosis membrane treatment[J]. *Water Research*, 2016, 101:203-213.
- [6] Dudley L. Y. Combating the Threat of Silica Fouling in RO Plant-Practical Experiences[J]. *International Desalination and Water Reuse Quarterly*, 2003, 12(4): 28-31.
- [7] Graham S.I., Reiz R.L., Hickman C.E.. Improving Reverse Osmosis Performance though Periodic Cleaning[J]. *Desalination*, 1989, 74:113-124.
- [8] Luo M., Wang Z., Complex Fouling and Cleaning-in-Place of a Reverse Osmosis Desalination System[J]. *Desalination*, 2001, 141(1):15-22.
- [9] 窦晓春. 煤化工高盐水近零排放及分质制盐技术研究[D].北京化工大学,2018.
- [10] 宋跃飞. 集成膜法海水淡化过程中纳滤一反渗透膜面结垢趋势预测及防垢研究[D].中国海洋大学,2013.
- [11] 刘志学, 吕巍, 徐会军. 现代煤化工盐结晶技术及政策解析[M]. 中国石化出版社, 2018.
- [12] HJ 579 《膜分离法污水处理工程技术规范》(2010). 国家环境保护部.
- [13] GB/T 19249 《反渗透水处理设备》(2017). 国家质量监督检验检疫总局.

- [14] HJ/T 270 《环境保护产品技术要求 反渗透水处理装置》(2006). 国家环境保护总局.
- [15] GB/T 30888 《纺织废水膜法处理与回用技术规范》(2014). 国家质量监督检验检疫总局.
- [16] GB/T 1576 《工业锅炉水质》(2018). 国家市场监督管理总局.
- [17] GB/T 32327 《工业废水处理与回用技术评价导则》(2015). 国家质量监督检验检疫总局.
- [18] GB/T 50050 《工业循环冷却水处理设计规范》(2017). 中华人民共和国住房和城乡建设部.
- [19] GB/T 5462 《工业盐》(2015). 国家质量监督检验检疫总局.
- [20] GB/T 6009 《工业无水硫酸钠》(2014). 国家质量监督检验检疫总局.
- [21] GB/T 32327 《工业废水处理与回用技术评价导则》(2015). 国家质量监督检验检疫总局.
- [22] GB/T 20103 《膜分离技术 术语》(2006). 国家质量监督检验检疫总局.
- [23] 化工名词审定委员会. 化工名词 (二) 基本有机化工[M]. 科学出版社, 2019.
- [24] 化工名词审定委员会. 化工名词 (三) 化学工程基础[M]. 科学出版社, 2019.
- [25] 化工名词审定委员会. 化工名词 (五) 化工规划·研发·工程建设及产业化 [M]. 科学出版社, 2019.
- [26] 《制盐工业 术语》(GB/T 19420-2003). 国家质量监督检验检疫总局.
- [27] 《钢铁污水除盐技术规范》(YBT4257-2012). 中华人民共和国工业和信息化部.
- [28] 《湿法炼锌企业废水循环利用技术规范》(GB-T27678-2011). 国家质量监督检验检疫总局.
- [29] 李川军. 高含盐废水分盐结晶处理工艺技术组合对比[J]. 化工管理, 2020(27):166-167.
- [30] 华东建筑设计研究院有限公司. 给水排水设计手册. 第4册, 工业给水处理 [M]. 中国建筑工业出版社, 2002.
- [31] 李克永. 化工机械手册[M]. 天津大学出版社, 1991.

- [32] 时钧. 化学工程手册[M]. 化学工业出版社, 1996.
- [33] 胡洪营, 吴乾元, 黄晶晶, 等. 再生水水质安全评价与保障原理[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [34] GB 50335 《城镇污水再生利用工程设计规范》(2002). 国家质量监督检验检疫总局.
- [35] ISO 20761. Water reuse in urban areas— Guidelines for water reuse safety evaluation— Assessment parameters and methods. Geneva, Switzerland.
- [36] GB/T 19923 《城市污水再生利用 工业用水水质》(2005). 国家质量监督检验检疫总局.
- [37] GB/T 31328 《海水淡化反渗透系统运行管理规范》(2014). 国家质量监督检验检疫总局.
- [38] 美国水环境联合会 著. 陈秀荣, 徐宏勇, 衣春敏, 丁雷 译. 城镇污水厂运行管理手册:第 6 版[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [39] JB/T 20068 《结晶器》(2005). 中华人民共和国工业和信息化部.
- [40] GB/T 1.1 《标准化工作导则 第 1 部分: 标准化文件的结构和起草规则》(2020). 国家市场监督管理总局.
- [41] Dai R.B., Li J.Y., Wang Z.W. Constructing interlayer to tailor structure and performance of thin-film composite polyamide membranes: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2020, 282, 102204.
- [42] Yang Z., Guo H., Tang C.Y. The upper bound of thin-film composite (TFC) polyamide membranes for desalination. *Journal of Membrane Science*, 2019, 590, 117297.