

上海市环境科学学会

关于《正渗透膜废水处理技术指南（征求意见稿）》团体标准公开征求意见的函

各相关单位：

由上海市环境科学学会组织编制的团体标准《正渗透膜废水处理技术指南》已形成征求意见稿。按照《上海市环境科学学会团体标准管理办法》的有关要求，现公开征求意见。请于 2023 年 4 月 12 日前将《征求意见回复表》反馈至上海市环境科学学会。

联系人：戚芳方

电 话：021-64756391-603

邮 箱：shsseshjjc@126.com

附件：1.征求意见稿文本

2.编制说明

3.征求意见回复表



ICS 01.040.13

CCS Z05

团 体 标 准

T/SSESB ×-2023

正渗透膜废水处理技术指南

Technical guidelines of forward osmosis process for wastewater treatment

(征求意见稿)

2023-××-××发布

2023-××-××实施

上海市环境科学学会 发布

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 工艺原理与流程	3
5 正渗透膜适用的废水类型及主要污染物	4
6 前处理手段	5
7 技术要求	5
8 浓水及汲取液处理要求	10
9 运行和维护	11

前 言

本文件按照 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。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由上海市环境科学学会提出。

本文件由上海市环境科学学会归口。

本文件主编单位：东华大学、上海展恒环保科技有限公司、上海市环境科学学会。

本文件参编单位：同济大学、上海城投老港基地管理有限公司、南通华新环保科技股份有限公司、戈润环保科技有限公司、沃顿科技股份有限公司、上海欧伦水处理设备工程有限公司。

本文件主要起草人：黄满红、林燕莉、李咏梅、王林、李隽、郭辉东、陈刚、戚芳方、包卫彬、于涛、周强、于乐、燕梦莹、张宏庆、张海生。

正渗透膜废水处理技术指南

1 范围

本文件规定了正渗透膜法废水处理技术的工艺流程、前处理方法、设计参数与技术要求、再生水回用方法等。

本文件适用于以正渗透膜法对污水进行处理和回用工程,可为水处理设施设计与施工及项目完成后运行与管理提供技术依据。

2 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。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;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/T 6920 水质 pH 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/T11901 水质 悬浮物的测定 重量法
- GB/T11903 水质 色度的测定
- GB/T13200 水质 浊度的测定
- GB/T11914 水质 化学需氧量的测定 重铬酸钾法
- 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 7484 水质 氟化物的测定 离子选择电极法
- 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 20103 膜分离技术术语
- GB/T 30888 纺织废水膜法处理与回用技术规范
- HJ 579 膜分离法污水处理工程技术规范
- HJ 2010 膜生物法污水处理工程技术规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

膜分离 membrane separation

以压力、渗透压、蒸气压等为驱动力，以膜为过滤介质，实现溶剂与溶质分离的方法。

3.2

膜 membrane

表面有一定物理或化学特性的薄的屏障物，它使相邻两液体相之间构成不连续区间并影响流体中各组分的透过速度。

3.3

正渗透 forward osmosis membrane, FO

以非均相选择性透过膜两侧溶液渗透压差为驱动力，溶剂（如水）通过半透膜进入膜的高渗透压侧，而溶液中其他组份（盐、有机物等）被阻挡在膜的低渗透压侧并随浓溶液排出，从而达到有效分离的过程。

3.4

复合膜 composite membrane

用两种不同膜材料，分别制成具有分离功能的表面活性层（致密层）和起支撑作用的多孔层组成的膜。

3.5

膜元件 membrane element

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。

3.6

水回用 water reuse

污水经处理后，达到一定水质要求，满足某种使用功能需要，可进行有益使用的水。

3.7

水通量 water flux

按规定的流速、温度、汲取液条件下，单位时间内通过单位膜面积产生的产品水的量。

3.8

截留率 rejection rate

表示某种物质被截留去除的百分比。

3.9

膜污染 membrane fouling

料液中某些组分在膜表面或膜孔内沉积导致膜过滤性能下降的现象。

3.10

膜清洗 membrane cleaning

采取物理、化学等方法去除膜污染，恢复膜通量的手段。

3.11

浓水 concentrated water

经过正渗透装置处理后产生的因含盐量增加而被浓缩的水。

3.12

汲取液 draw solution

用于正渗透过程提供高渗透压的溶液。

4 工艺原理与流程

4.1 工艺原理

正渗透技术是一种利用渗透压梯度使得水自发从渗透压低的原料液侧透过半透膜进入到渗透压较高的汲取液侧的膜分离过程。废水处理中，通过正渗透截留废水中盐、有机物等物质，以满足废水的深度处理及回用需求。

4.2 工艺流程

正渗透典型工艺流程如图 1 所示。

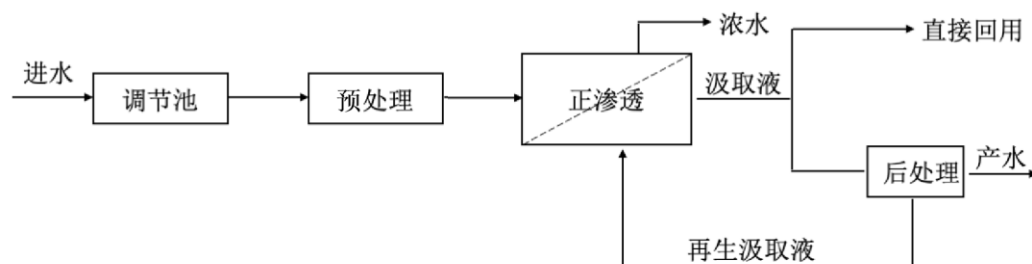


图 1 正渗透工艺流程

5 正渗透膜适用的废水类型及主要污染物

正渗透适用于生活污水和工业废水处理，特别可用于水资源的回收。为保证正渗透工艺的良好处理效果与运行稳定，应根据不同类型废水的主要污染物指标，因地制宜地设计废水前处理工艺，以满足正渗透进水水质要求。几类常见废水的主要污染物指标如下。

5.1 垃圾渗滤液

垃圾渗滤液的主要污染物指标包括：pH、化学需氧量 COD、五日生化需氧量 BOD、氨氮 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、总氮 TN、色度、悬浮物、总磷等。

5.2 纺织印染废水

纺织印染废水的主要污染物指标包括：pH、温度、SS、COD、BOD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、色度、锑等。

5.3 钢铁行业废水

钢铁工业废水主要污染物指标包括：pH、SS、COD、TP、酚类、动植物油、总氰、热污染等。

按照具体工艺/工段的不同，还应关注钝化液、铅、锌、铬等污染物。

5.4 页岩气废水

页岩气废水的主要污染物指标包括：色、嗅和味、pH、石油类、氯化物、硫化物、挥发酚、耗氧量、氨氮、总硬度、溶解性总固体等，可根据页岩气开发工程特征污染物种类适当增加或减少。

5.5 电厂废水

电厂废水的主要污染物指标包括：pH、温度、SS、COD、汞、铜、铅、砷、氟以及硫酸根、亚硫酸根、碳酸根等。

6 前处理手段

6.1 一般规定

为防止和减缓膜污染、预防膜损伤以及达到良好去除效果，应针对不同来源废水中特征污染物进行前处理，使前处理阶段的出水应满足正渗透工艺的进水要求。前处理的主要作用为：

- ① 除去悬浮固体，降低浊度；
- ② 抑制和控制微溶盐的沉淀；
- ③ 调节和控制进水温度和 pH；
- ④ 杀死和抑制微生物生长；
- ⑤ 去除各种有机物；
- ⑥ 防止铁、锰等金属的氧化物和二氧化硅的沉淀等。

6.2 预防悬浮固体及浊度污染和堵塞膜组件，可采用沉淀（沉砂池、初沉池或高密沉淀池等）、混凝沉淀、介质过滤、气浮、微滤、超滤等处理。

6.3 防止膜化学氧化损伤，可通过活性炭吸附或在进水中添加还原剂（亚硫酸氢钠）去除余氯或其他氧化剂，使余氯含量小于等于 0.1mg/L。

6.4 预防铁、铝腐蚀物形成胶体和颗粒污堵膜组件，可采用无烟煤或石英砂等为过滤介质的过滤器去除。

6.5 预防动植物油引起的膜污染，可采用隔油池、气浮等工艺去除。

6.6 预防微生物污染，可对进水进行物理法或化学法杀菌消毒处理。

6.7 控制膜结垢，常用的硬度处理工艺有化学沉淀（投加软化剂 CaO、Na₂CO₃、NaHCO₃、NaOH 等）、强酸阳离子树脂软化。

7 技术要求

7.1 一般规定

7.1.1 应根据原水水量、水质和产水回用要求、排放要求等信息，选择合适的预处理和汲取液再生工艺。

7.1.2 正渗透膜材料

应根据原水水质、污染物类型、产水要求及回收率等确定膜材料。

正渗透膜有醋酸纤维素（CTA）膜、聚酰胺复合（PA-TFC）膜和水通道蛋白（AQP）复合膜等。CTA 膜具有较好的亲水性，抗氧化能力强，机械强度高特点；TFC 膜具有耐磨损、耐热、耐化学药品、亲水性好、水通量高等特点；AQP 膜利用水通道蛋白对水分子高度专一的选择性，对原水中溶质与水分子进行分离，从而达到分离、提纯浓缩原水目的，具有高回收率，出水水质好的特点。

7.1.3 工艺设备选型、自动控制系统设置应符合 HJ 579、HJ 2010、GB/T 39717、GB/T 19249 和 HJ/T 270 的规定。

7.1.4 膜元件及清洗

出现以下情形之一，宜对膜元件进行清洗再生，具体可根据膜生产厂家相关要求适当调整：

- a) 膜通量下降 15%；
- b) 盐截留率下降 15%；
- c) 装置压差增加 15%时；
- d) 装置长期停运时，在用保护溶液保存之前。

清洗分为物理和化学清洗。其中在线维护性物理清洗系统包括：

- a) 在线维护性物理清洗系统包括储液罐、管路系统、计量控制系统；
- b) 采用渗透反冲洗或气液两相流方式对膜元件进行清洗，前者是将汲取液置于原料液储罐，汲取液储罐加入纯水，依靠渗透压使纯水扩散至原料侧，达到反冲洗目的；后者是将净化过的压缩空气与水一道送入膜元件，在气液两相流剪切力作用下去除污染物。

在线恢复性化学清洗系统包括：

- a) 在线恢复性化学清洗系统包括加药罐、管路系统、计量控制系统；
- b) 化学清洗剂的选择根据污染物类型、污染程度和膜的物化性质确定。常用化学清洗剂包括：NaOH、柠檬酸、氨水、HCl 等，以及膜生产厂家规定的相关清洁化学品。

7.2 工艺设计参数包括：

- 1) 处理水量， m^3/d ；
- 2) 处理水质；
- 3) 膜通量， $L/m^2 d$ ；
- 4) 清洗周期，h；
- 5) 每次清洗时间，min

7.3 基本设计计算

7.3.1 产水量按公式（1）计算

$$q_s = C_m \times S_m \times q_0 \quad (1)$$

式中 q_s —单支膜元件的稳定产水量, L/h;

q_0 —单支膜元件的初始产水量, L/h;

C_m —组装系数, 取值范围为 0.90~0.96;

S_m —稳定系数, 取值范围为 0.6~0.8。

设计温度 25℃, 实际温度的波动, 可用公式（2）修正产水量的计算:

$$q_{st} = q_s \times (1 + 0.0215)^{t-25} \quad (2)$$

恒流运行膜组件, 产水量可按公式（3）计算

$$q_s = J \times S \times t_{net} \quad (3)$$

式中 J —膜通量, L/(m²d);

S —每个膜元件的有效面积, m²;

t_{net} —膜累计产水时间, h/d。

7.3.2 膜通量按公式（4）计算

$$J = \frac{\Delta V}{A \Delta t} \quad (4)$$

式中 A —膜有效面积, m²;

ΔV —一定时间段 (Δt , d) 渗透到汲取液的水量, L。

7.3.3 盐返混通量按公式（5）计算

$$J_s = \frac{V_t C_t - V_0 C_0}{A_m \Delta t} \quad (5)$$

式中 J_s —盐返混通量, g/m²h;

V_t, V_0 —分别为 t 时刻和初始时刻的料液体积, L;

C_t, C_0 —分别为 t 时刻和初始时刻料液中的盐浓度, g/L。

7.3.4 截留率按公式（6）、（7）计算

$$DF = \frac{V_D}{V_P} \quad (6)$$

$$R(\%) = \left(1 - \frac{DF \times C_D}{C_F}\right) \quad (7)$$

式中, DF —稀释系数;

V_p —FS 到 DS 的渗透体积, L;

C_D, V_D —DS 中污染物的浓度, mg/L 和运行结束时 DS 的体积, L;

C_F —FS 中污染物的初始浓度, mg/L。

R —污染物截留率, %。

7.3.5 膜组件数按公式（8）计算

$$n = \frac{Q}{q_s} \quad (8)$$

式中 Q —设计产水量, L/h。

7.4 进出水水质要求

7.4.1 不同类型正渗透膜适用的进水水质

不同类型的正渗透膜适用的废水类型有所差异,可按照膜生产厂家推荐使用相应类型的膜组件和材料。

7.4.2 正渗透膜系统进水水质指标要求可参考表 1。

表 1 正渗透系统进水指标要求

序号	项目	膜类型	单位	进水阈值	去除率参考值/%
1	pH	CTA	无量纲	3-7	—
		TFC		2-11	—
		AQP		3-10	—
2	温度	CTA	°C	5~50	—
		TFC		5~45	
		AQP		5~40	
3	SS	—	mg/L	≤1000	≥90
4	浊度	CTA	NTU	≤1000	≥90
		TFC		≤1	
		AQP		≤1	
5	COD	—	mg/L	≤50000	≥90
6	总硬度 (CaCO ₃)	—	mg/L	≤15000	≥90
7	余氯	CTA	mg/L	≤2	无要求
		TFC		≤0.1	
		AQP		≤0.1	
8	硅	—	mg/L	≤50.0	≥90
9	油	—	mg/L	≤20.0	≥90
10	淤泥密度指 数 (SDI)	CTA	无量纲	无要求	≥80
		TFC		≤5.0	
		AQP		≤5.0	

7.5 污染物监测要求

7.5.1 水中污染物浓度采用表 2 所列标准进行测定。

表 2 水中污染物浓度测定方法

序号	项目	标准名称	标准号	
1	pH	水质 pH 值的测定 玻璃电极法	GB/T 6920	
2	SS	水质 悬浮物的测定 重量法	GB/T 11901	
3	浊度	水质 浊度的测定	GB/T 13200	
4	COD	水质 化学需氧量的测定 重铬酸钾法	GB/T 11914	
5	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	
6	色度	水质 色度的测定	GB/T 11903	
7	总硬度	水质 钙和镁总量的测定 EDTA 滴定法	GB/T 7477	
8	电导率	电导率的测定（电导率仪法）	SL 78	
9	余氯	水质 游离氯和总氮的测定 N,N-二乙基-1,4-苯二胺分光光度法	HJ 586	
10	铁	水质 铁的测定 零菲啉分光光度法	HJ/T 345	
11	锰	水质 锰的测定 高碘酸钾分光光度法	GB/T 11906	
12	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	
13	动植物油	水质 石油类和动植物油类的测定 红外分光光度法	HJ 637	
14	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	
15	硅	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 8704.6	
16	其他	铬	水质 铬的测定 火焰原子吸收分光光度法	HJ 757
17	重金	铈	水质 铈的测定 火焰原子吸收分光光度法	HJ 1046-2019

序号	项目		标准名称	标准号
18	属	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、铋和锑的测定 原子荧光法	HJ 694

8 浓水及汲取液处理要求

8.1 浓水处理

8.1.1 正渗透工艺产生的浓水可并入污水生化处理系统，亦可通过适当的浓水处理工艺（如活性炭吸附、离子交换树脂、电化学氧化、臭氧氧化等）处理后达标排放，浓水处理排放应满足国家或地方污水排放标准的规定。

8.1.2 若需回收浓水中盐分，可采用膜工艺结合蒸发结晶或冷冻结晶等方式分离回收盐。

8.2 汲取液及再生技术

理想的汲取液需具备的基本特征有：可产生高渗透压；溶质反向通量最小化；溶质常温下呈固态；易于储存及运输；尽量无毒；与正渗透膜具有较好的化学相容性；无需或者依靠简易且低能耗的汲取液再生系统实现汲取液回收和补给。合适的正渗透汲取液筛选流程图如图 2 所示，主要分为筛选环节、正渗透性能测试环节以及汲取液回收系统评价环节。

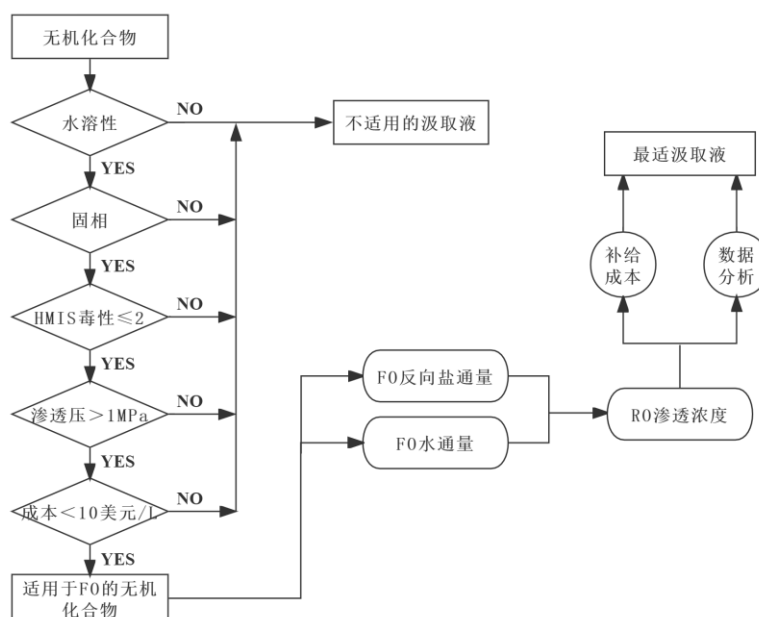


图 2 正渗透汲取液筛选流程示意图

8.2.1 正渗透汲取液可分为无机盐类、有机物类和响应型汲取液。

(1) 常见的无机汲取液包括 NaCl 、 MgCl_2 、 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 、 CaCl_2 、 MgSO_4 、 Na_2SO_4 、 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 、 NH_4HCO_3 、 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 等。

(2) 常见的有机汲取液包括葡萄糖、蔗糖、乙醇、二乙醚、2-甲基咪唑、表面活性剂等。

(3) 常见的响应型汲取液包括磁响应纳米颗粒、pH 响应聚丙烯酸钠等。

8.2.2 汲取液再生

(1) 根据不同生产工艺的具体情况，稀释的汲取液可直接用于生产回用（如纺织染整行业的染色阶段，农业灌溉等）时，则无需对汲取液进行浓缩再生。

(2) 若出水用于厂区工艺用水、杂用水或直接外排时，可通过反渗透、膜蒸馏、电渗析等方式分离产水和汲取液。

(3) 汲取液直接回用或处理后出水用作生产水时，应根据不同生产工艺的具体情况，达到相关工艺的供水指标要求。

(4) 汲取液直接回用或处理后出水用作其他用途时，应达到相关供水水质指标要求。

9 运行和维护

9.1 启动

9.1.1 系统运行人员应经过岗位安全培训和技能培训，经考核后上岗，定期进行岗位培训。

9.1.2 系统运行人员应熟悉正渗透膜系统的整体工艺、相关技术条件和设施、运行操作的基

本要求，能正确处理运行中出现的各种故障与技术问题。

9.1.3 检查阀门、管路及设备能否正常运转，排出膜组件内空气。

9.1.4 检查进水水质是否符合膜元件要求。

9.2 运行

9.2.1 检查和试验在线监测仪器仪表，设定信号传输及报警。

9.2.2 系统稳定运行后，记录操作条件和性能参数。

9.3 停机与维护

9.3.1 停机时，宜对膜系统进行清洗。

9.3.2 膜系统停机后，其他辅助系统也应停机。

9.3.3 如果系统停机超过 7d，应对隔膜原件进行充分清洗，并通过拧开所有配件来使泵和管道干燥。

《正渗透膜废水处理技术指南》

编制说明

(征求意见稿)

《正渗透膜废水处理技术指南》

标准编制组

二〇二三年二月

目 录

1 标准编制背景.....	1
1.1 任务来源.....	1
1.2 工作过程.....	1
2 标准制定的必要性分析.....	2
2.1 完善膜法废水处理技术的需要.....	2
2.2 促进我国正渗透膜产业快速发展的需要.....	2
2.3 保证正渗透膜技术顺利实施的需要.....	3
3 国内外相关标准研究.....	3
3.1 国内相关技术标准情况.....	3
3.2 国外相关技术标准情况.....	4
3.3 国内外相关技术标准与本标准的关系.....	4
4 标准制定的基本原则和技术路线.....	5
4.1 标准制定的基本原则.....	5
4.2 适用范围和主要技术内容.....	5
4.3 标准制定的技术路线.....	6
5 标准条文的研究报告和说明.....	6
5.1 本方法研究适用范围.....	6
5.2 术语和定义.....	6
5.3 研究方法.....	8
5.4 实施案例.....	17
6 标准编制单位与管理.....	19
6.1 主要合作单位的工作基础.....	19
6.2 合作单位与任务分工.....	21
7 标准实施建议.....	21
7.1 标准执行.....	21
7.2 标准完善.....	21
7.3 其他建议.....	21
8 参考文献.....	21

1 标准编制背景

1.1 任务来源

2022年4月，上海市环境科学学会下达了《正渗透膜废水处理技术指南》团体标准制定任务，项目承担单位为东华大学、上海展恒环保科技有限公司、同济大学、上海城投老港基地管理有限公司、南通华新环保科技股份有限公司、戈润环保科技有限公司、沃顿科技股份有限公司、上海欧伦水处理设备工程有限公司。标准归口管理单位为上海市环境科学学会。

1.2 工作过程

1.2.1 发起标准提案（2022年4月）

根据《上海市环境科学学会团体标准管理办法》规定，由东华大学发起《正渗透膜废水处理技术指南》的团体标准提案，上海市环境科学学会将提案提交团体标准工作办公室，经汇总和格式审查后，提交审查委员会审查。

1.2.2 成立标准编制组（2022年4月）

2022年4月，东华大学环境科学与工程学院牵头成立编制组，编制组成员由长期从事正渗透膜法废水处理、正渗透膜应用和运营、相关膜元件开发人员组成，并明确编制组成员的分工和职责。

1.2.3 文献资料收集（2022年4月~2022年6月）

编制组根据《国家环境保护标准制修订工作管理办法》、《上海市环境科学学会团体标准管理办法》的相关程序，检索、查询和收集国内外相关标准、专利和文献资料，主要集中在国家相关政策文件、环境保护主管部门相关管理要求、膜分离法污水处理工程技术规范、水质监测技术规范等。经过资料分析和共性总结，对正渗透膜工艺处理废水的要点进行梳理和提炼，理顺标准制定的方向和思路。

1.2.4 企业调研（2022年4月~2022年6月）

为使标准具有科学性和实践性，标准起草以资料分析为主，企业调研为辅，赴多家企业进行实地考察，与技术人员、管理人员就工艺设计、处理效能、运营维护等内容进行探讨。

1.2.5 确定技术路线（2022年6月）

在广泛调研、初步研究基础上，结合相应的标准和技术规范、污水处理行业的实际需求与膜技术现场实施现状，编制组召开多次研讨会，初步确定主要研究内容和技术路线，编写开题论证报告和标准草案。

1.2.6 审查立项和开题(2022年6月-10月)

经上海市环境科学学会、团体标准领导小组和团体标准审查委员会的联合审查，该团体标准与2022年6月29日正式立项。2022年10月8日，上海市环境科学学会在线上组织召开了标准开题论证会，专家组通过了标准的开题论证，并提出了具体的修改意见和建议。

1.2.7 标准征求意见（2023年3月）

编制组进一步完善了标准草案和编制说明，于2023年2月完成了所有的编写任务，进

入标准意见征求阶段。随后汇总反馈意见，修改文本形成送审稿。

具体流程和计划见表 1 所示。

表 1 工作流程和计划安排

序号	工作流程	具体内容	牵头单位	完成时间
1	标准提案	成立编制组	上海市环境科学学会	2022.4
		编制开题报告	东华大学	2022.8
2	立项审查	开题论证会	上海市环境科学学会	2022.10
3	标准编制	调研座谈、完善文本技术内容和编制说明	东华大学	2022.10-2023.1
4	征求意见	征求意见稿审查会	上海市环境科学学会	2023.2
		组织征求意见	上海市环境科学学会	2023.3
		汇总反馈意见，修改文本形成送审稿	东华大学	2023.3
5	标准审查	组织技术审查	上海市环境科学学会	2023.3
6	标准报批	批准发布与实施	上海市环境科学学会	2023.4

2 标准制定的必要性分析

2.1 完善膜法废水处理技术的需要

在废水处理过程中，膜技术作为一种新型的混合体分离技术被广泛应用，不仅可以高效去除污染物、有效净化废水，而且还能回收有用物质。目前，膜技术已广泛应用于各种废水的处理中。较之于传统的过滤技术而言，膜可在分子范围内分离，无需发生相的变化或者添加助剂。根据不同操作方式和膜孔径，可将膜分成正渗透膜（FO）、微滤膜、超滤膜、纳滤膜以及反渗透膜。基于膜技术开发新的废水深度处理工艺，实现废水的近零排放对于节约资源、降低处理费用、保护环境实现可持续发展有着重要的意义。膜法水处理工程技术标准包括工程类技术标准和产品类技术标准两类，是水处理工程立项、科研、招投标、设计、建设施工、验收、运行全过程服务的技术依据。目前，只有行业管理部门制定了少量膜处理工艺技术规范，整体上我国膜处理工程技术领域标准化工作仍是薄弱环节。

2.2 促进我国正渗透膜产业快速发展的需要

“十四五”时期是全球战略性新兴产业的孕育和爆发期，是高新技术产业的新一轮高速增长期。正渗透（FO）作为一种新兴的废水深度处理回用技术，是以非均相选择透过膜两侧

溶液渗透压差为驱动力、实现水分子跨膜运输的膜分离技术，相对于传统压力驱动膜技术，正渗透膜具有低能耗、低污染和高截留能力的优点。当前，正渗透技术广泛应用于垃圾渗滤液、高浓度工业污水和市政废水处理等。尽管如此，正渗透技术的发展仍面临一些问题，首先，正渗透膜进水差别较大，工艺长期运行稳定性受到影响，有必要对进水水质及预处理工序进行规范；其次，正渗透汲取液的选择较多，需要对其有指导性的选定依据；最后，膜污染清洗方法目前还主要依靠经验，阻碍了其在水处理中的大规模应用。针对这些问题，本标准的制定可明确规范正渗透膜进水要求、汲取液选用依据以及膜污染清洗方式等方面。随着正渗透技术标准的制定，未来该技术在污水处理领域必将得到更可靠的应用。

与反渗透/纳滤膜工艺不同，这些技术均有比较成熟的技术标准（如 GB/T 19249-2017，HY/T 054.1-2001，HY/T 054.2-2001，T/ZGM 007-2021），而正渗透技术却无相应标准规范，这无疑制约了其进一步发展。因此，编制正渗透技术标准是促进该项技术快速发展的需要。

2.3 保证正渗透膜技术顺利实施的需要

正渗透膜技术在我国工业污水处理工程实践中已得到应用。但是尚缺少可操作性的技术标准，指导正渗透膜法工业废水处理设施的建设与运行。由于缺乏标准的规范与指导，无论是在工程建设还是设施运行管理方面都存在一定问题，影响正渗透膜处理设施发挥应有效能。因此，总结国内外正渗透膜处理工艺技术的发展与应用案例，编制正渗透膜废水处理技术规范，对正确应用和管理该项技术具有积极意义。使基于正渗透膜技术工艺的污水处理设施从建设到运行全过程在标准规范下，对于保证工程建设质量、保证系统稳定运行和保证环境保护主管部门监察监管都具有重要意义。

3 国内外相关标准研究

3.1 国内相关技术标准情况

当前，在膜分离水处理领域，目前已经颁布了《电渗析技术》、《中空纤维反渗透技术》、《卷式超滤技术》、《微孔滤膜孔性能测试方法》等 27 项标准。如行业标准《微滤水处理设备》给出了微滤水处理设备相关的定义、规格和型号、要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输存储等；环保总局颁发的《环境保护产品技术要求 反渗透水处理装置》、《环境保护产品技术要求 超滤装置》、《环境保护产品技术要求 电渗析装置》等标准给出反渗透、超滤、电渗析水处理装置定义、规格与型号、要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输和存储；《微孔滤膜孔性能测试方法》、《反渗透膜测试方法》等标准则给出了平板膜/中空膜定义、脱盐率、水通量、厚度、孔径、孔隙率等测试方法。

我国膜废水处理标准中，有诸如《纺织废水膜法处理与回用技术规范 GB/T30888-2014》、《工业废水处理与回用技术评价导则 GB/T32327-2015》、《纺织染整工业废水治理工程技术规范 HJ 471-2009》等多项标准。标准规定了不同废水定义和特征、膜工艺选择原则、预处理、深度处理和回用要求等。

3.2 国外相关技术标准情况

对国外膜废水处理相关技术标准调研发现，主要有国际标准化组织（ISO）、美国材料和实验协会（ASTM）和日本工业标准（JIS）编制的相关标准。如：

ISO 20468-5:2021 Guidelines for performance evaluation of treatment technologies for water reuse systems — Part 5: Membrane filtration 水回用系统处理技术性能评价指南第 5 部分:膜过滤

ASTM D4194-2003 反渗透和纳滤膜水质分析的用的标准指南 Standard Guide for Water Analysis for Reverse Osmosis and Nanofiltration Application

ASTM D6161-2010 微量过滤、超滤、纳米过滤以及反渗透膜工艺的标准术语 Standard Terminology Used for Microfiltration, Ultrafiltration, Nanofiltration and Reverse Osmosis Membrane Processes

ASTM E1343-2001 平板超滤膜分子量界限评定的测试方法 Test Method for Molecular Weight Cutoff Evaluation of Flat Sheet Ultrafiltration Membrane

ASTM D4194-2003 反渗透纳滤装置工作特性试验方法 Standard Test Methods for Operating Characteristics of Reverse Osmosis and Nanofiltration Devices

JIS K0102-2008 工业废水的测试方法 Testing Methods for Industrial Wastewater

JIS K0094-1994 工业用水和工业废水的取样方法 Sampling Methods for Industrial Water and Industrial Wastewater

JIS K3802-1995 膜术语 Technical Terms for Membrane and Membrane Processes

JIS K3805-1990 反渗透膜元件及性能的试验方法 Testing Methods for Solute Rejection and Water Flux of Reverse Osmosis Membrane Element and Module Using Aqueous Solution of Various Solutes

JIS K3821-1990 超滤组件的纯水渗透性能测试方法 Testing Methods for Pure Water Permeability Flow of Ultrafiltration Modules

3.3 国内外相关技术标准与本标准的关系

上述标准中，没有与正渗透技术直接相关的标准规范，表明本标准编制的先进性、及时性和前瞻性。而前期调研的有关反渗透装置设计、测试方法、管理维护等标准为本标准制定正渗透膜技术相应内容提供有价值参考。调研得到的工业废水处理方面的相关标准也为本标准编制提供大量可供借鉴的内容。

因此，本标准编制以国家环境保护现有法律、法规、标准为主要依据，同时参考水处理行业其他相关技术规范和设计手册，结合国内外有关正渗透技术建设运行的文献资料及调研获得的正渗透工艺系统运行数据资料，总结编制本标准。参照的法规、标准有：

- (1) GB/T 6920 水质 pH 的测定 玻璃电极法
- (2) GB/T 7477 水质 钙和镁总量的测定 EDTA 滴定法
- (3) GB/T 11901 水质 悬浮物的测定 重量法

- (4) GB/T11903 水质 色度的测定
- (5) GB/T13200 水质 浊度的测定
- (6) HY/T 074-2018 反渗透海水淡化工程设计规范
- (7) GB/T 32327-2015 反渗透膜测试方法
- (8) GB/T 32359-2015 海水淡化反渗透膜装置测试评价方法
- (9) GB/T 31328-2014 海水淡化反渗透系统运行管理规范
- (10) GB/T 23954-2009 反渗透系统膜元件清洗技术规范
- (11) ASTM D4195-2008 反渗透和纳滤膜水质分析的用的标准指南
- (12) ASTM D6161-2005 用于微滤、超滤、纳滤和反渗透膜处理的标准术语
- (13) ASTM D4516-1985 反渗透性能数据的标准化
- (14) JIS K0102-2008 工业废水的测试方法
- (15) GB/T 30888-2014 纺织废水膜法处理与回用技术规范
- (16) HJ579-2010 膜分离法污水处理工程技术规范

4 标准制定的基本原则和技术路线

4.1 标准制定的基本原则

本标准依据《环境工程技术规范制定技术导则》、《标准化工作导则第1部分：标准的结构和编写》（GB/T 1.1-2020）等要求，确定标准的组成要素。体现如下原则：

- (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) 考虑与相关标准、法规的衔接
- (7) 充分考虑废水再生与资源化技术发展水平、再生水回用工艺的用水特点、转变行业发展方式，符合规范化发展需求。

4.2 适用范围和主要技术内容

正渗透技术是一种利用渗透压梯度使得水自发从渗透压低的原料液侧透过半透膜进入到渗透压较高的汲取液侧的膜分离过程。废水处理中，通过正渗透去除废水中盐、有机物等物质，以满足废水的深度处理及回用需求。

标准适用于采用正渗透技术对经适当预处理的城市污水、垃圾渗滤液、纺织印染等废水进行有效处理和回用。根据不同废水的水质特点、国家及地方对废水处理和回用质量的要求，本标准主要技术内容包括废水正渗透膜处理技术的术语定义、工艺流程、预处理方法、设计原理、水回用要求、运营维护等。

4.3 标准制定的技术路线

本规范的方法研究技术路线见图 1。

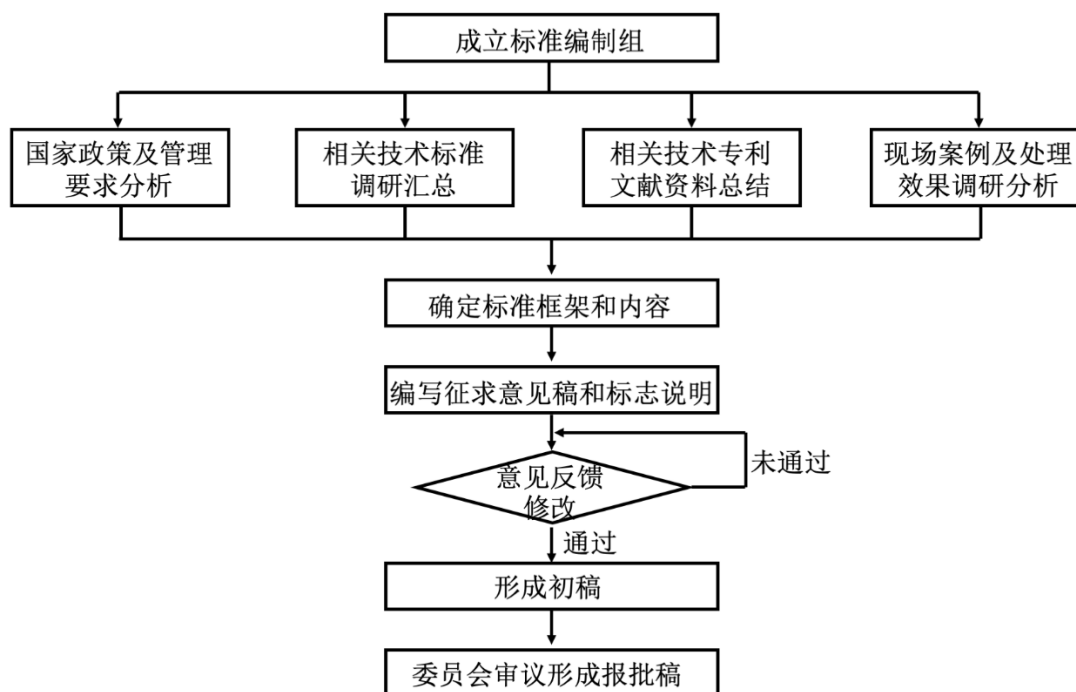


图 1 标准制定的技术路线

5 标准条文的研究报告和说明

5.1 本方法研究适用范围

本标准规定正渗透膜法废水处理技术的工艺流程、前处理方法、设计参数与技术要求、再生水回用方法等。

本标准适用于以正渗透膜法对污水进行处理和回用工程,可为水处理设施设计与施工及项目完成后运行与管理提供技术依据。

5.2 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

5.2.1 膜分离 membrane separation

本规范的定义为“以压力、渗透压、蒸气压等为驱动力,以膜为过滤介质,实现溶剂与溶质分离的方法。”引用《膜分离技术 术语》(GB/T 20103)、《膜分离法污水处理工程技术规范》(HJ 579-2010)中对膜的定义中对膜分离的定义。

5.2.2 膜 membrane

本规范的定义为“表面有一定物理或化学特性的薄的屏障物,它使相邻两液体相之间构成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)、《膜分离法污水处理工程技术规范》(HJ 579-2010)中对膜的定义中对膜分离的定义。

5.2.3 正渗透 forward osmosis membrane, FO

本规范的定义为“以非均相选择性透过膜两侧溶液渗透压差为驱动力，溶剂（如水）通过半透膜进入膜的高渗透压侧，而溶液中其他组份（盐、有机物等）被阻挡在膜的低渗透压侧并随浓溶液排出，从而达到有效分离的过程。”修改自《膜技术手册（第二版）》中对正渗透的定义“一种利用膜两侧溶液的渗透压差为驱动力，驱使水分子从高化学势一侧向低化学势一侧自发迁移的膜过程”。

5.2.4 复合膜 composite membrane

本规范的定义为“用两种不同膜材料，分别制成具有分离功能的表面活性层（致密层）和起支撑作用的多孔层组成的膜。”引用《膜分离技术 术语》（GB/T 20103）中对复合膜的定义。

5.2.5 膜元件 membrane element

本规范的定义为“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。

5.2.6 水回用 water reuse

本规范的定义为“污水经处理后，达到一定水质要求，满足某种使用功能需要，可进行有益使用的水。”引用《工业用水节水 术语》（GB/T 21534）中对回用水的定义。

5.2.7 水通量 water flux

本规定定义为“在规定运行条件下，单位时间内通过单位膜面积产生的产品水的量。”修改自《膜分离技术 术语》（GB/T 20103）中对同义的纯水透过率的定义“按规定的流速、温度、压力，在单位时间内通过单位膜面积的纯水透过量”。

5.2.8 截留率 rejection rate

本规定的定义为“表示某种物质被截留去除的百分比。”参考《膜分离技术 术语》（GB/T 20103）中截留率的定义“表示脱除特定组分的能力”修改而来。

5.2.9 膜污染 membrane fouling

本规范的定义为“料液中某些组分在膜表面或膜孔内沉积导致膜过滤性能下降的现象。”引用《膜分离技术 术语》（GB/T 20103）中对膜污染的定义。

5.2.10 膜清洗 membrane cleaning

本规范的定义为“采取物理、化学等方法去除膜污染，恢复膜通量的手段。”引用《平板膜生物反应器法污水处理工程技术规范》（DG/TJ 08-2190）中对膜清洗的定义。

5.2.11 浓水 concentrated water

本规范的定义为“经过正渗透装置处理后产生的含盐量增加而被浓缩的水。”参考《反渗透水处理设备》（GB/T 19249-2017）中对同义的浓水的定义修改而来。

5.2.12 汲取液 draw solution

本规范的定义为“用于正渗透过程提供渗透压的溶液。”参考专著《正渗透基本原理及其应用》中对同义的驱动溶液的定义修改而来。

5.3 研究方法

5.3.1 前处理手段

一般规定，为防止和减缓膜污染、预防膜损伤以及达到良好去除效果，应针对不同来源废水中特征污染物进行前处理，使前处理阶段的出水应满足正渗透工艺的进水要求。在参考《膜技术手册（第二版）》、《给水排水设计手册》、《工业废水污染防治》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》等专著、研究和《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）等标准以及相关文献的基础上总结得到。前处理的主要作用为：

- ①除去悬浮固体，降低浊度；
- ②抑制和控制微溶盐的沉淀；
- ③调节和控制进水温度和 pH；
- ④杀死和抑制微生物生长；
- ⑤去除各种有机物；
- ⑥防止铁、锰等金属的氧化物和二氧化硅的沉淀等。

5.3.1.1 预防悬浮固体及浊度污染和堵塞膜组件

悬浮固体包括淤泥、铁的氧化物和腐蚀产物、 MnO_2 、与硬度有关的沉淀物、 $Al(OH)_3$ 絮凝物、 SiO_2 微细砂石、硅藻、细菌、有机胶体等。可采用沉淀（沉砂池、初沉池或高密沉淀池等）、混凝沉淀、介质过滤、气浮、微滤、超滤等处理。参考自《膜技术手册（第二版）》、《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》等资料。

5.3.1.2 防止膜化学氧化损伤

可通过活性炭吸附或在进水中添加还原剂（亚硫酸氢钠）去除余氯或其他氧化剂，使余氯含量小于等于 0.1 mg/L，参考自《纺织废水膜法处理与回用技术规范》（GB/T 30888-2014）。

5.3.1.3 预防铁、铝腐蚀物形成胶体和颗粒污堵膜组件

原始进水中溶解的金属盐在正渗透单元中会发生沉淀，常见的沉淀物是氢氧化铁、氢氧化铝也可能存在氢氧化锰，在除铁过程中锰也会被除去。

- ①降低进水 pH 和消除氧气可防止氢氧化铁沉淀；
- ②曝气、加氯或高锰酸钾将亚铁氧化为三价铁，然后过滤去除；
- ③海绿砂滤器一步将二价铁氧化为三价铁沉淀滤去；
- ④铁含量不高时，如 <1 mg/L 时也可由钠型阳离子交换软化除铁；

在以铝剂处理系统中，控制 pH 在 6.5~6.7，从而使铝的溶解度最低，防止铝对正渗透单元的污染。参考《膜技术手册（第二版）》、《膜前预处理工艺对缓解纳滤膜污染的研究》等。

5.3.1.4 预防动植物油引起的膜污染

可采用隔油池、气浮等工艺去除。

5.3.1.5 预防微生物污染

微生物污染会形成致密凝胶层，会吸附高浓度的离子，使浓差极化更严重，降低流动混合效果，同时由于酶的作用也会促进膜的降解和水解。一般采用氯化杀菌，在正渗透单元前的系统中，水的余氯保持在 0.5~1 mg/L 即可防止微生物繁殖。

对于芳香族聚酰胺膜（复合膜或不对称中空纤维膜等），其耐氯性差，应以活性炭或亚硫酸氢钠脱氯，促使水满足使用要求。

醋酸纤维素类膜，在 0.2~0.5 mg/L 的余氯或 pH=6 的条件下，膜寿命可达三年。参考自《膜技术手册（第二版）》。可对进水进行物理法或化学法杀菌消毒处理。

5.3.1.6 控制膜结垢

由于水不断透过膜，膜的进水中的那些微溶盐在膜面附近的浓水中超过其溶度积而沉淀析出导致膜结垢产生，为提高膜的使用寿命、降低膜清洗频次，建议对进水水质进行结垢潜在风险评估，针对不同来源废水中特征污染物进行前处理以控制膜结垢。常用的处理工艺有：

- ①降低回收率，避免浓缩液超过溶度积；
- ②离子交换软化除去钙（镁）离子，但对高碱度的水和大工程，此法不经济；
- ③加酸除去进水中的碳酸根和重碳酸根；
- ④添加防垢剂，如 SHMP，抑制硫酸钙等微溶盐的沉淀。

实际应用中，多用加酸和加防垢剂相结合的方法。参考自《膜技术手册（第二版）》、《纺织废水膜法处理与回用技术规范》等。

5.3.2 技术要求

一般规定，应根据原水水量、水质和产水回用要求、排放要求等信息，选择合适的预处理和汲取液再生工艺。

膜材料及设备选型、自动控制系统设置应符合 HJ 579、HJ 2010、GB/T 39717、GB/T 19249 和 HJ/T 270 的规定。

5.3.3 膜元件及清洗

膜元件污染与清洗的内容主要参考了《Membrane cleaning in membrane bioreactors: A review（膜生物反应器的膜清洗：综述）》、《平板膜生物反应器法污水处理工程技术规范》（DG/TJ 08-2190）、《膜分离法污水处理工程技术规范》（HJ579）、《工业废水回用工程运行管理规范》（DB11/T 1765-2020）、《给水排水设计手册》等资料，结合 FTS 流体技术有限公司《OsmoBC™ Integrated Membrane Systems For Industrial Wastewater Treatment》、丹麦 Aquaporin 公司《Aquaporin Inside® HFFO®14 module Hollow Fiber Forward Osmosis module》等相关膜产品技术指南，并基于编制组的实际工程经验确定。

出现以下情形之一，宜对膜元件进行清洗再生，具体可根据膜生产厂家相关要求适当调

整:

- a) 膜通量下降 15%;
- b) 盐截留率下降 15%;
- c) 装置压差增加 15%时;
- d) 装置长期停运时, 在用保护溶液保存之前。

清洗分为物理和化学清洗。其中在线维护性物理清洗系统包括:

- a) 在线维护性物理清洗系统包括储液罐、管路系统、计量控制系统;
- b) 采用渗透反冲洗或气液两相流方式对膜元件进行清洗, 前者是将汲取液置于原料液储罐, 汲取液储罐加入纯水, 依靠渗透压使纯水扩散至原料侧, 达到反冲洗目的; 后者是将净化过的压缩空气与水一道送入膜元件, 在气液两相流剪切力作用下去除污染物。

在线恢复性化学清洗系统包括:

- a) 在线恢复性化学清洗系统包括加药罐、管路系统、计量控制系统;
- b) 化学清洗剂的选择根据污染物类型、污染程度和膜的物化性质确定。常用化学清洗剂包括: NaOH、柠檬酸、氨水、HCl 等, 以及膜生产厂家规定的相关清洁化学品。

5.3.4 基本设计计算

工艺设计参数包括:

- (1) 处理水量, m^3/d ;
- (2) 处理水质;
- (3) 膜通量, $L/m^2 d$;
- (4) 清洗周期, h ;
- (5) 每次清洗时间, min 。

产水量按公式 (1) 计算

$$q_s = C_m \times S_m \times q_0 \quad (1)$$

式中, q_s —单支膜元件的稳定产水量, L/h ;

q_0 —单支膜元件的初始产水量, L/h ;

C_m —组装系数, 取值范围为 0.90~0.96;

S_m —稳定系数, 取值范围为 0.6~0.8。

设计温度 $25^\circ C$, 实际温度的波动, 可用公式 (2) 修正产水量的计算:

$$q_{st} = q_s \times (1 + 0.0215)^{t-25} \quad (2)$$

对于恒流运行膜组件, 产水量可按公式 (3) 计算

$$q_s = J \times S \times t_{net} \quad (3)$$

式中, J —膜通量, $L/(m^2 d)$;

S —每个膜元件的有效面积, m^2 ;

t_{net} —膜累计产水时间, h/d 。

公式 (1)、(2)、(3) 参考《膜分离法污水处理工程技术规范》(HJ 579-2010)。

膜通量按公式 (4) 计算

$$J = \frac{\Delta V}{A \Delta t} \quad (4)$$

式中，A—膜有效面积，m²；

ΔV —一定时间段 (Δt , d) 渗透到汲取液的水量，L。

公式 (4) 参考《膜分离技术基础 (第三版)》。

盐返混通量按公式 (5) 计算

$$J_s = \frac{V_t C_t - V_0 C_0}{A_m \Delta t} \quad (5)$$

式中， J_s —盐返混通量，g/m²h；

V_t , V_0 —分别为 t 时刻和初始时刻的料液体积，L；

C_t , C_0 —分别为 t 时刻和初始时刻料液中的盐浓度，g/L。

公式 (5) 参考《正渗透基本原理及其应用》。

截留率按公式 (6)、(7) 计算

$$DF = \frac{V_D}{V_P} \quad (6)$$

$$R(\%) = \left(1 - \frac{DF \times C_D}{C_F}\right) \quad (7)$$

式中，DF—稀释系数；

V_p —FS 到 DS 的渗透体积，L；

C_D, V_D —DS 中污染物的浓度，mg/L 和运行结束时 DS 的体积，L；

C_F —FS 中污染物的初始浓度，mg/L。

R—污染物截留率，%。

公式 (6)、(7) 主要参考了《Antifouling forward osmosis membranes by ϵ -polylysine mediated molecular grafting for printing and dyeing wastewater: Preparation, characterization, and performance (ϵ -聚赖氨酸分子接枝处理印染废水的防污正渗透膜:制备、表征和性能)》等文献资料中对污染物截留率的计算公式。

5.3.5 进出水水质要求

5.3.5.1 不同类型正渗透膜适用的进水水质

不同类型的正渗透膜适用的废水类型有所差异，可按照膜生产厂家推荐使用相应类型的膜组件和材料。如表 2 所示，列举了 FTS 流体技术有限公司生产的相关商业正渗透膜元件的适用领域。

表 2 不同膜元件适用的进水类型

膜型号	适用领域
FO-CTA-8040-85	用于处理重度污染废水 (例如: 垃圾渗滤液、脱硫废水、煤化工废水、纺织印染废水、脱硫废水等)
FO-CTA-8040-45	用于处理中度污染的废水 (如脏海水和其他受污染的盐水)
FO-CTA-8040-31	用于处理轻度污染废水 (例如: 低污染盐水、海水)
FO-CTA-4040	膜组件等同 8040 系列, 但特点是 4 英寸 (102mm) 小直径系列, 适用于小体积的物料及其他特殊应用 (例如: 医药废水)

5.3.5.2 正渗透膜系统进水水质指标要求可参考表 3。

表 3 正渗透系统进水指标要求

序号	项目	膜类型	单位	进水阈值	去除率参考值/%
1	pH	CTA	无量纲	3-7	—
		TFC		2-11	—
		AQP		3-10	—
2	温度	CTA	°C	5~50	—
		TFC		5~45	
		AQP		5~30	
3	SS	—	mg/L	≤1000	≥90
4	浊度	CTA	NTU	≤1000	≥90
		TFC		≤1	
		AQP		≤1	
5	COD	—	mg/L	≤50000	≥90
6	总硬度 (CaCO ₃)	—	mg/L	≤15000	≥90
7	余氯	CTA	mg/L	≤2	无要求
		TFC		≤0.1	
		AQP		≤0.1	
8	硅	—	mg/L	≤50.0	≥90
9	油	—	mg/L	≤20.0	≥90
10	淤泥密度指 数 (SDI)	CTA	无量纲	无要求	≥80
		TFC		≤5.0	
		AQP		≤5.0	

5.3.6 污染物监测要求

水中污染物浓度采用表 4 所列标准进行测定。

表 4 水中污染物浓度测定方法

序号	项目	标准名称	标准号
1	pH	水质 pH 值的测定 玻璃电极法	GB/T 6920-1986
2	SS	水质 悬浮物的测定 重量法	GB/T 11901-1989
3	浊度	水质 浊度的测定	GB/T 13200
4	COD	水质 化学需氧量的测定 重铬酸钾法	GB/T 11914-1989
5	氨氮	水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法	HJ 535-2009
		水质 氨氮的测定 水杨酸分光光度法	HJ 536-2009
		水质 氨氮的测定 蒸馏-中和滴定法	HJ 537-2009
		水质 氨氮的测定 气相分子吸收光谱法	HJ/T 195-2009
6	色度	水质 色度的测定	GB/T 11903-1989

7	总硬度	水质 钙和镁总量的测定 EDTA 滴定法	GB/T 7477
8	电导率	电导率的测定（电导率仪法）	SL 78-1994
9	余氯	水质 游离氯和总氮的测定 N,N-二乙基-1,4-苯二胺分光光度法	HJ 586-2010
10	铁	水质 铁的测定 零菲罗啉分光光度法	HJ/T 345-2007
11	锰	水质 锰的测定 高碘酸钾分光光度法	GB/T 11906
12	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
13	动植物油	水质 石油类和动植物油类的测定 红外分光光度法	HJ 637
14	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
15	硅	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 8704.6
16	其他重金属	水质 铬的测定 火焰原子吸收分光光度法	HJ 757
17		水质 铈的测定 火焰原子吸收分光光度法	HJ 1046-2019
18		水质 铜、锌、铅、镉的测定 原子吸收分光光度法	GB 7475
19			
20			
21			
22		水质 汞、砷、硒、铋和锑的测定 原子荧光法	HJ 694

5.3.7 正渗透系统进出水水质指标要求依据

水质指标要求主要规定了正渗透系统的进水水质，以下介绍各进水指标参考依据如下：

(1) pH 值指标的确定综合考量了不同材质正渗透膜的 pH 值需求及《膜分离技术基础（第三版）》中醋酸纤维素（CTA）膜对酸碱的耐受性，并依据实际案例，本规范将 CTA 膜的 pH 值的范围定为“3~7”；参考《膜技术手册（第二版）》P591 中对芳香族聚酰胺复合膜 pH 的要求，将 TFC 膜的 pH 值的范围定为“2~11”；根据研究论文《水通道蛋白正渗透复合膜的制备和膜内水分子传质过程研究》中对水通道蛋白正渗透耐受酸碱的研究说明，将水通道蛋白膜的 pH 值的范围定为“3~10”。

(2) 温度指标综合参考了《膜分离法污水处理工程技术规范》（HJ 579-2010）中对水温的要求和《Effects of feed and draw solution temperature and transmembrane temperature difference on the rejection of trace organic contaminants by forward osmosis（进料液、汲取液温

度和跨膜温差对正渗透抑制微量有机污染物的影响)》、《一种正渗透作为预处理的热法海水淡化系统和方法》等文献资料,结合编制组实际工程经验,按照膜的类型分别确定 CTA、TFC、AQP 膜的运行温度为“5~50℃”、“5~45℃”、“5~30℃”。

(3) SS 过多极易使膜发生污堵,导致膜性能衰减,基于编制组的项目工程经验,参考《纺织废水膜法处理与回用技术规范》(GB/T 30888-2014)对悬浮物的要求以及《正渗透工艺用于高盐水深度减量技术解析》相关案例分析,按照水质分类,将 SS 的限值定为“1000mg/L”。

(4) 浊度、余氯参考了《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》(HJ579-2010)、《DOW FILMTEC™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual (1 陶氏膜 FILMTEC™反渗透膜技术手册)》和《东丽膜产品技术手册-反渗透和纳滤》、FTS 流体技术有限公司《FO 操作说明》、丹麦 Aquaporin 公司《Aquaporin Inside® HFFO®14 module 技术手册》等资料,结合编制组实际工程经验,按照膜的类型确定 CTA、TFC、AQP 膜的进水浊度和余氯分别为“≤1000 NTU”、“≤1 NTU”、“≤1 NTU”和“≤2 mg/L”、“0.1 mg/L”、“0.1 mg/L”。

(5) 化学需氧量(COD)过高易导致膜的有机污染和生物污染,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 指标,综合考量了各类工业废水的特点、膜污染及清洗频率和后续处理单元的需求,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 的限值,以及《正渗透工艺用于高盐水深度减量技术解析》相关案例分析,确定了进水 COD 限值为“≤50000 mg/L”。

(6) 总硬度(CaCO₃计)指标在《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,结合工业废水的特点和编制组的工程经验,参考《纺织废水膜法处理与回用技术规范》(GB/T 30888-2014)规范,以及《正渗透工艺用于高盐水深度减量技术解析》相关案例分析,为防止膜污染,将总硬度的进水限值定为“≤15000 mg/L”。

(7) 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 (反渗透装置抗硅结垢的实践经验)》中对二氧化硅污染的研究与《DOW FILMTEC™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual (陶氏膜 FILMTEC™反渗透膜技术手册)》中所描述的“Low silica concentrations (10 mg/L) can result in aluminum silicate fouling[低二氧化硅浓度(10 mg/L)会导致硅酸铝结垢]”,结合《Improving Reverse Osmosis Performance through Periodic Cleaning (通过定期膜清洗提高反渗透性能)》和《Complex Fouling and Cleaning-in-Place of a Reverse Osmosis Desalination System (反渗透海水淡化系统的复合污染和原位清洗)》中所述“当给水中并存有 Al³⁺和 Fe³⁺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以及《正渗透工艺用于高盐水深度减量技术解析》相关案例分析,按照水质分类将硅指标定为“≤50 mg/L”。

(8) 油类参考了《平板膜生物反应器法污水处理工程技术规范》(DG/TJ 08-2190)、《膜生物法污水处理工程技术规范》(HJ 2010-2011)、《给排水设计手册》、《纺织废水膜法处理与回用技术规范》(GB/T 30888-2014)中对动植物油和石油类的限值以及《正渗透工艺用于高盐水深度减量技术解析》相关案例分析,规定油类的进水限值为“ $\leq 20 \text{ mg/L}$ ”。

(9) 淤泥密度指数(SDI)参考了《膜分离法污水处理工程技术规范》(HJ579-2010)、《纺织废水膜法处理与回用技术规范》(GB/T 30888-2014)以及 FTS 流体技术有限公司《FO 操作说明》、丹麦 Aquaporin 公司《Aquaporin Inside® HFFO®14 module 技术手册》等资料,规定 TFC、AQP 类正渗透膜 SDI 进水限制“ ≤ 5.0 ”。

(10) 正渗透各项产水参考值主要参考了《给排水设计手册》、《膜分离法污水处理工程技术规范》(HJ579-2010)以及各类膜产品手册,并基于编制组工程经验给出。

5.3.8 水回收要求

- (1) 正渗透系统的整体水回收率不小于 50%。
- (2) 回用水宜遵循“分类收集、分质处理、分级回用”原则,将低浓度有机废水处理后的出水达到相应标准后回用。
- (3) 回用水的回用途径以生产用水为主,非生产用水为辅。
- (4) 出水用作生产水时,应根据不同生产工艺的具体情况,经试验验证保证水质达到相关工艺的供水指标要求。
- (5) 出水用作其他用途时,应达到相关供水水质指标要求。

5.3.9 浓水及汲取液处理要求

正渗透浓水及汲取液的处理要求,在参考《膜技术手册(第二版)》、《正渗透基本原理及其应用》、《膜分离技术基础(第三版)》等专著、研究,《Recovering and reuse of textile dyes from dyebath effluent using surfactant driven forward osmosis to achieve zero hazardous chemical discharge(采用表面活性剂驱动正渗透回收和再利用染色废水中的纺织品染料,实现有害化学物质零排放)》、《A comprehensive review of standalone and hybrid forward osmosis for water treatment: Membranes and recovery strategies of draw solutions(独立和耦合正渗透系统在水处理中的综合综述:膜和汲取液的回收策略)》等相关文献的基础上总结得到。

5.3.9.1 浓水处理

正渗透工艺产生的浓水可并入污水生化处理系统,亦可通过适当的浓水处理工艺(如活性炭吸附、离子交换树脂、电化学氧化、臭氧氧化、膜分离等)处理后达标排放,浓水处理排放应满足国家或地方污水排放标准的规定。

若需回收浓水中盐分,建议采用正渗透工艺结合多级闪蒸、膜蒸馏或冷冻结晶方式来实现,验证工艺可行性,确保回收盐有适当的再利用途径。

浓水处理可按如图 2 的工艺流程进行处理或进入二级膜处理。

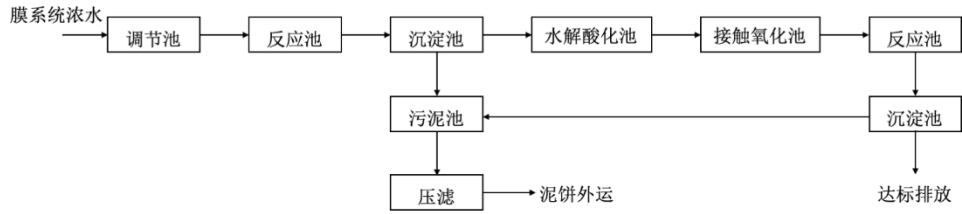


图 2 浓水处理基本工艺流程

5.3.9.2 汲取液及再生技术

(1) 汲取液筛选

理想的汲取液需具备的基本特征有：可产生高渗透压；溶质反向通量最小化；溶质常温下呈固态；易于储存及运输；尽量无毒；与正渗透膜具有较好的化学相容性；无需或者依靠简易且低能耗的汲取液再生系统实现汲取液回收和补给。合适的正渗透汲取液筛选流程图如图 3 所示，主要分为筛选环节、正渗透性能测试环节以及汲取液回收系统评价环节。

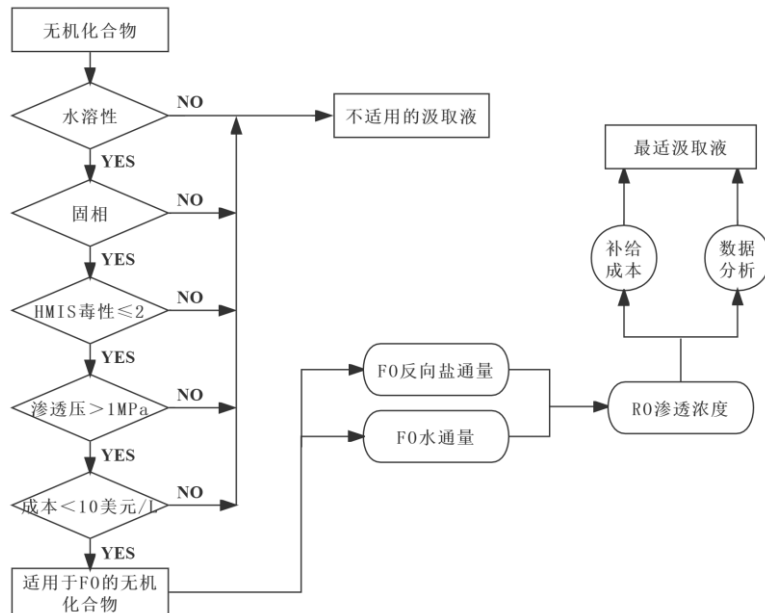


图 3 正渗透汲取液筛选流程示意图

正渗透汲取液可分为无机盐类、有机物类和响应型汲取液。

①常见的无机汲取液包括 NaCl 、 MgCl_2 、 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 、 CaCl_2 、 MgSO_4 、 Na_2SO_4 、 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 、 NH_4HCO_3 、 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 等。

②常见的有机汲取液包括葡萄糖、蔗糖、乙醇、二乙醚、2-甲基咪唑、表面活性剂等。

③常见的响应型汲取液包括磁响应纳米颗粒、pH 响应聚丙烯酸钠等。

(2) 汲取液再生

若稀释的汲取液可直接用于生产回用（如纺织染整行业的染色助剂添加阶段，农业灌溉等）时，则无需对汲取液进行浓缩再生。

若出水用于厂区工艺用水、杂用水或直接外排时，可通过反渗透、纳滤等方式对稀释汲

取液分离产水和汲取液，同时考虑后续工艺的能耗成本。

5.3.10 运行和维护

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 FTS 流体技术有限公司《OsmoBC™ Integrated Membrane Systems For Industrial Wastewater Treatment》、丹麦 Aquaporin 公司《Aquaporin Inside® HFFO® 14 module Hollow Fiber Forward Osmosis module》等相关膜产品技术指南，归纳了膜系统的操作和运行维护流程。

5.3.10.1 启动

- (1) 系统运行人员应经过岗位安全培训和技能培训，经考核后上岗，定期进行岗位培训；
- (2) 系统运行人员应熟悉正渗透膜系统的整体工艺、相关技术条件和设施、运行操作的基本要求，能正确处理运行中出现的各种故障与技术问题；
- (3) 检查阀门、管路以及设备能否正常运转，排出膜组件内空气；
- (4) 检查进水水质是否符合膜元件要求。

5.3.10.2 运行

- (1) 检查和试验在线监测仪器仪表，设定信号传输及报警；
- (2) 系统稳定运行后，记录操作条件和性能参数。

5.3.10.3 停机与维护

- (1) 停机时，宜对膜系统进行清洗。
- (2) 膜系统停机后，其他辅助系统也应停机。
- (3) 如果系统停机超过 7d，应对隔膜原件进行充分清洗，并通过拧开所有配件来使泵和管道干燥。

5.4 实施案例

5.4.1 某垃圾焚烧发电厂渗滤液处理

本项目的进水是电厂垃圾渗滤原液。水中污染物来源复杂，悬浮物、油脂含量高，COD、氨氮含量高，硬度高，总 TDS 含盐量高，属于很难处理的复杂水源。采用了正渗透膜处理系统工艺，系统回收率达到 70% 以上，处理后的产水水质也大大优于 GB16889-2008 相关指标。相关工艺流程图如图 4 所示，进出水水质指标如表 5 所示。

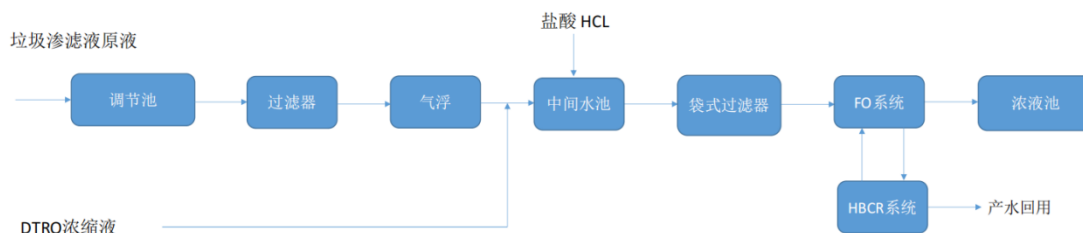


图 4 某垃圾焚烧发电厂渗滤液处理流程图

表 5 电厂脱硫废水水质情况

序号	检测项目	单位	原水	产水
1	pH	无量纲	5~7.5	6.9
2	SS	mg/L	2000~6000	0.1
3	COD _{Cr}	mg/L	28000	5.6
4	BOD ₅	mg/L	15000~30000	3.4
5	氯离子	mg/L	4000~5000	26.9
6	总硬度	mg/L	6000	1.2
7	总碱度 (以 CaCO ₃ 计)	mg/L	10000	1.5
8	氨氮	mg/L	750	0.85
9	总氮	mg/L	<2500	1.3
10	电导率	us/cm	20000~30000	98.5
11	总磷 (以 P 计)	mg/L	30~300	0.54
12	TDS	mg/L	≤25000	63.2

5.4.2 电厂脱硫废水处理

某电厂对脱硫废水原液（加纯碱和加 FO 阻垢剂）两种不同工况进行中试试验，图 5、图 6 为废水处理工艺流程图。正渗透设备在运行过程中不需要复杂的前端预处理：

- 1) 实验所用装置能够将进水 TDS 均值 16471~32820mg/L 的脱硫废水浓缩到 TDS 均值 120000mg/L 以上，浓缩了 4~7.5 倍；除盐率达 90%；FO 段回收率 75%~90%；
- 2) FO 系统的时均处理水量 0.7~0.85m³/h；
- 3) 正渗透在运行过程的能耗，回收量，单位时间处理量与进水的的水质和用户设定浓缩排放是有密切关系。可适应加大的进水水质波动；
- 4) 在两种工况下都能长期稳定、可靠的连续运行。

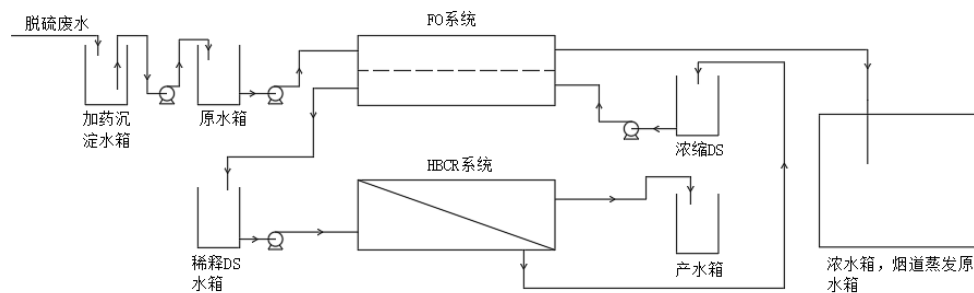


图 5 脱硫废水处理工艺流程图（加纯碱）

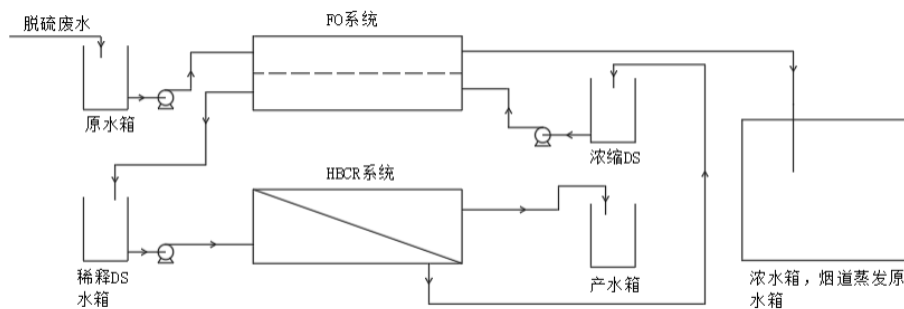


图 6 脱硫废水处理工艺流程图（加阻垢剂）

该工艺相关出水水质如表 6 所示。通过对正渗透技术在脱硫废水零排放处理上的应用，了解并收集工艺参数及相应配套设备参数，能够独立的对正渗透进行工艺设计，控制系统设计，成套设备设计及制作等。为解决传统脱硫废水处理工艺的回收率低及末端出水水质和水量不稳定等问题提供解决方案。

表 6 电厂脱硫废水水质情况

序号	检测项目	单位	原水	产水
1	Ca ²⁺	mg/L	1660	ND
2	Mg ²⁺	mg/L	1250	0.01
3	Na ⁺	mg/L	2310	5.6
4	SO ₄ ²⁻	mg/L	2430	ND
5	氯离子	mg/L	8490	8.03
6	pH	mg/L	8.6	5.6
7	CO ₃ ²⁻	mg/L	140	6.2
8	碱度	mg/L	187	18.6
9	TSS	mg/L	27	2
10	TDS	us/cm	20200	402

6 标准编制单位与管理

6.1 主要合作单位的工作基础

东华大学是教育部直属、国家“211 工程”重点建设的高等院校，以工科为主的工、理、管、文等学科协调发展的有特色的全国重点大学。学校地处中国上海，现有松江校区、延安路校区和新华路校区，学校创建于 1951 年，时名华东纺织工学院，是新中国第一所纺织高等学府。1960 年，被国家教育部确定为全国重点大学，是中国首批具有博士、硕士、学士三级学位授予权的大学之一。1985 年，学校更名为中国纺织大学。1995 年，进入国家“211 工程”重点建设行列。1999 年，更名为东华大学。学校现设有纺织学院、服装与艺术设计

学院、旭日工商管理学院、机械工程学院、信息科学与技术学院、计算机科学与技术学院、化学化工与生物工程学院、材料科学与工程学院、环境科学与工程学院等学院，拥有 6 个博士后流动站、7 个一级学科博士点，有 1 个一级学科国家重点学科，5 个二级学科国家重点学科，1 个国家重点（培育）学科，7 个上海市一流学科，1 个上海高校 I 类高峰学科，同时设有 13 个国家和省部级科研基地，2 个国家“111”引智基地以及国家大学科技园。东华大学在废水处理标准制修订方面拥有成熟管理制度、技术能力，牵头或参与起草了《纺织工业污染防治可行技术指南》、《印染废水排放标准（试行）》、《新疆印染废水治理工程技术规范》、《棉浆粕和粘胶纤维水污染物排放标准》、《纺织染整工业回用水水质》、《纺织染整工业废水治理工程技术规范》、《纺织染整工业水污染物排放标准》等国家和地方标准修订工作。在正渗透膜处理废水方面有多年的研究经验，主持多项正渗透相关国家自然科学基金以及国家重点研发计划项目等，发表相关 SCI 论文 100 余篇，相关专利 20 余项。

上海展恒环保科技有限公司：公司成立于 2003 年 05 月，注册资金 5000 万元，是一家集环保工程设计、施工总承包、环境污染治理设施运营管理技术于一体的上海市高新技术企业。主营业务涵盖高难度废水正渗透膜处理工艺设计、制造、安装、调试及维护保养；标准化产品的开发及销售；新型材料的研发及推广；环保大数据平台运营与维护等。公司具有建筑业企业资质证书《环保工程专业承包三级》、环境污染治理工程总承包资质证书《水污染治理、大气污染治理、含设备制作、安装、施工一体化贰级》、专项工程设计证书《水污染治理、大气污染治理乙级》、上海市高新技术企业证书、企业信用等级 3A 级证书、上海市“专精特新”中小企业证书、已通过上海市松江区专利示范试点企业。公司自成立以来，凭借着雄厚的技术实力，成功承接了 200 多个污染治理项目，凭借着专业能力、创新意识和诚信实干，获得了业主方的一致认可。公司开发的 FO 膜相关技术在绿点科技（无锡）有限公司、捷普绿点精密电子（无锡）有限公司、天津编物（无锡）有限公司、江苏无锡杨市电镀园、余姚市桐张岙垃圾填埋场、云南贵金属集团等单位的废水处理中得到应用。

同济大学：同济大学是中国最早的国立大学之一，是教育部直属并与上海市共建的全国重点大学。2017 年，列为国家世界一流大学建设 A 类高校。同济大学环境科学与工程学院是全国高等院校中最早以学院建制成立的环境教育和科研学术机构，学院的科研领域主要包括水污染控制工程、给水排水工程、固体废物处理与资源化、生态修复、环境化学、环境生物学、水资源综合管理与利用、环境规划与管理等。承担了国家科技攻关计划、国家“水体污染控制与治理”重大科技专项、国家高技术研究发展计划（863 计划）、国家自然科学基金等一批国家及地方的重大、重点科研项目。2013 年以来，获国家级与省部级科技奖励 33 项，其中以第一完成单位获得国家科技进步奖二等奖 2 项、国家技术发明二等奖 1 项，省部级一等奖 8 项。年均获国家发明专利 70 余项，年均发表 SCI 论文 300 余篇，在 ESI 数据库中本学科进入被引次数全球前 1% 机构行列。同济大学在正渗透的制备及其在城市污水的应用方面有多年的研究，并利用正渗透膜对上海华特迪士尼有限公司灰水回用进行了分析。

6.2 合作单位与任务分工

- (1) 东华大学：负责标准编制工作，制定技术路线，编写标准文本及说明。
- (2) 同济大学：负责国内外废水膜法处理调研、技术论证。
- (3) 上海展恒环保科技有限公司、上海城投老港基地管理有限公司、南通华新环保科技股份有限公司、戈润环保科技有限公司、沃顿科技股份有限公司、上海欧伦水处理设备工程有限公司：负责商业膜的制备，并进行现场处理工艺及流程及关键参数的梳理分析。

7 标准实施建议

7.1 标准执行

本标准是对正渗透膜废水处理的技术指南，适用于垃圾渗滤液和各类工业废水处理，可在开展废水深度处理和回用设计和施工时参考使用，不具有强制性要求。

7.2 标准完善

本标准中所列技术要求是根据目前正渗透废水处理应用情况推荐确定的。在实施过程中，要结合废水处理和资源化要求的变化、政策调整以及新型技术发展情况，及时进行修订和更新，以指导未来废水资源化系统升级。

7.3 其他建议

本标准是在结合国内外正渗透废水处理技术的文献和案例调研和研究的基础上编制的，难免存在代表性不足的问题。如管理部门和应用单位、研究人员对本标准有合理的意见或者建议，可向标准管理部门、主要起草单位提供相关材料，适时启动对本文件进行修改完善，可更新版本或发布修改单。

8 参考文献

- [1] GB/T 6920 水质 pH 的测定 玻璃电极法[S].
- [2] GB/T 7477 水质 钙和镁总量的测定 EDTA 滴定法[S].
- [3] GB/T11901 水质 悬浮物的测定 重量法[S].
- [4] GB/T11903 水质 色度的测定[S].
- [5] GB/T13200 水质 浊度的测定[S].
- [6] HY/T 074-2018 反渗透海水淡化工程设计规范[S].
- [7] GB/T 32327-2015 反渗透膜测试方法[S].
- [8] GB/T 32359-2015 海水淡化反渗透膜装置测试评价方法[S].
- [9] GB/T 31328-2014 海水淡化反渗透系统运行管理规范[S].
- [10] GB/T 23954-2009 反渗透系统膜元件清洗技术规范[S].

- [11] ASTM D4195-2008 反渗透和纳滤膜水质分析的用的标准指南[S].
- [12] ASTM D6161-2005 用于微滤、超滤、纳滤和反渗透膜处理的标准术语[S].
- [13] ASTM D4516-1985 反渗透性能数据的标准化[S].
- [14] ISO 20468-5:2021 Guidelines for performance evaluation of treatment technologies for water reuse systems — Part 5: Membrane filtration 水回用系统处理技术性能评价指南第5部分:膜过滤[S].
- [15] 何涛, 李雪梅等. 正渗透基本原理及其应用[M].北京: 科学出版社, 2017.
- [16] 王湛, 王志, 高学理等. 膜分离技术基础(第三版)[M].北京: 化学工业出版社, 2018.
- [17] 邓麦村, 金万勤等. 膜技术手册(第二版)[M].北京: 化学工业出版社, 2020.
- [18] 黄丽, 黄满红. 汲取液对正渗透微生物燃料电池处理垃圾渗滤液的影响[J]. 环境科学学报, 2017, 37(10): 197-201.
- [19] 孔壮, 郭吉丽, 邵梦育, 黄满红. UiO-66-NH₂ 改性正渗透膜对四环素及基因的去除研究[J]. 水处理技术, 2022, 48(3): 369-373.
- [20] 叶静菱, 王昊, 陈东辉, 黄满红. 正渗透处理印染废水的性能及回用研究[J]. 膜科学与技术, 2022, 9.
- [21] 肖小兰. FO 深度处理垃圾焚烧厂渗滤液的运行效能及膜污染特性[J]. 环境工程学报, 2020, 34(12): 115-117.
- [22] 姚吉, 张稳妥, 滕良方, 等. “双膜工艺”在工业区污水处理厂再生水工程中的应用[J]. 中国给水排水, 2019(20).
- [23] S. Lee, C. Boo, M. Elimelech, S. Hong, Comparison of fouling behavior in forward osmosis (FO) and reverse osmosis (RO)[J]. Journal of Membrane Science, 2010, 365: 34-39.
- [24] C. Ding, M. Yi, B. Liu, C. Han, X. Yu, Y. Wang, Forward osmosis-extraction hybrid process for resource recovery from dye wastewater[J]. Journal of Membrane Science, 2020, 612: 118376.
- [25] M. Li, X. Wang, C.J. Porter, W. Cheng, X. Zhang, L. Wang, M. Elimelech, Concentration and recovery of dyes from textile wastewater using a self-standing, support-free forward osmosis membrane[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53: 3078-3086.
- [26] Jialing Song, Mengying Yan, Jingling Ye, Shengyang Zheng, Liang Ying Ee, Zhiwei Wang, Jun Li, Manhong Huang. Research progress in external field intensification of forward osmosis process for water treatment: A critical review[J]. Water Research, 2022, 222: 118943.
- [27] Mengyu Shao, Yulin Li, Lijun Meng, Jili Guo, Yanan Gao, Yanbiao Liu, Manhong Huang. Simultaneous removal of antimony, chromium and aniline by forward osmosis membrane: Preparation, performance and mechanism[J]. Desalination, 2021, 520: 115363.
- [28] Mengying Yan, Mengyu Shao, Jun Li, Nan Jiang, Yuan Hu, Wenjun Zeng, Manhong Huang. Antifouling forward osmosis membranes by ϵ -polylysine mediated molecular grafting for printing and dyeing wastewater: Preparation, characterization, and performance[J]. Journal of Membrane Science, 2023, 668: 121288.

[29] Maria Yasmeen, Muhammad Saqib Nawaz, Sher Jamal Khan, Noreddine Ghaffour, Muhammad Zafar Khan. Recovering and reuse of textile dyes from dyebath effluent using surfactant driven forward osmosis to achieve zero hazardous chemical discharge[J]. *Water Research*, 2023, 668: 119524.

[30] Satish Kumar Singh, Chhaya Sharma, Abhijit Maiti. A comprehensive review of standalone and hybrid forward osmosis for water treatment: Membranes and recovery strategies of draw solutions[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021,9: 105473.

附件 3

征求意见回复表

单位名称（盖章）				
联系人				
通讯地址				
联系电话				
邮 箱				
序号	标准条款	修改建议	主要理由	备注

（不够请另附页）