

## 工业水处理

秦梦如<sup>1</sup>, 关杰<sup>1</sup>, 郭耀广<sup>1,\*</sup>, 等. 化工高盐废碱液工业废水的真空蒸发处理工艺[J]. 净水技术, 2026, 45(9): 132–137.

Qin M R, Guan J, Guo Y G, et al. Vacuum evaporation treatment process for high-salinity lye wastewater in chemical industry[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(9): 132–137.

## 化工高盐废碱液工业废水的真空蒸发处理工艺

秦梦如<sup>1</sup>, 关杰<sup>1</sup>, 郭耀广<sup>1,\*</sup>, 赵敏<sup>1</sup>, 吴鸿铖<sup>2</sup>, 陈卫华<sup>3</sup>, 王炜炜<sup>3</sup>

(1. 上海第二工业大学资源与环境工程学院, 上海 201209; 2. 上海沃百环保发展有限公司, 上海 201209; 3. 上海黎明资源再利用有限公司, 上海 201209)

**摘要** 【目的】工业废水处理是我国环保产业的重要分支, 本文旨在开展碱性高盐、高质量浓度有机废水的蒸发结晶动力学试验, 为实际蒸发系统设计提供数据支撑。【方法】本试验以某化工企业高盐废碱液原水为研究对象, 搭建废水真空蒸发结晶分离试验装置, 考查了蒸发压力、蒸发温度、pH 对废水蒸发结晶效果的影响。【结果】随着蒸发压力、废水 pH 的增大, 有机物截留率增大; 蒸发温度升高, 有机物截留率减小; 通过单因素试验得到最佳试验结果为: 温度为 95 ℃, 压强为 -80 kPa 和 pH 值为 10.5, 此时高盐废碱液的有机物去除率和减重率分别高达 99.9% 和 67.5%, 且冷凝水的水质指标达到上海市《污水综合排放标准》(DB31/199—2018) 三级标准。与委外直接焚烧法相比, 每吨废浓缩液可节省 1 624 元处置费用。【结论】结果可为化工领域碱性、高盐度及高质量浓度有机废水的蒸发结晶处理工艺提供科学依据, 助力该领域的技术优化与实践应用。

**关键词** 工业高盐废水; 真空蒸发结晶; 有机物截留率; 浓缩比; 经济效益分析

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)09-0132-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.09.014

## Vacuum Evaporation Treatment Process for High-Salinity Lye Wastewater in Chemical Industry

Qin Mengru<sup>1</sup>, Guan Jie<sup>1</sup>, Guo Yaoguang<sup>1,\*</sup>, Zhao Min<sup>1</sup>, Wu Hongcheng<sup>2</sup>, Chen Weihua<sup>3</sup>, Wang Weiwei<sup>3</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China;

2. Shanghai Wobai Environmental Development Co., Ltd., Shanghai 201209, China;

3. Shanghai Liming Resources Reuse Co., Ltd., Shanghai 201209, China)

**Abstract** [Objective] Industrial wastewater treatment is an important branch of the environmental protection industry in China. The evaporation crystallization kinetics of alkaline high salt and high mass concentration organic wastewater are conducted through experiments to provide data support for the practical design of evaporation systems. [Methods] In this experiment, the high-salt waste lye stock solution from a chemical enterprise was taken as the research object, and a vacuum evaporative crystallization separation test device for wastewater was built. The effects of evaporating pressure, evaporation temperature and pH on the evaporation crystallization performance of wastewater were investigated. [Results] The retention rate of organics increased with the increase of evaporation pressure and waste liquid pH. With the increase of evaporation temperature, the retention rate of organics decreased. The optimum experimental results obtained by single factor test were as follows: when the temperature was 95 ℃, the pressure was -80 kPa and the pH value was 10.5, the retention rate of organics and weight loss of high salt waste alkali liquor were as high as 99.9% and

[收稿日期] 2024-11-02

[基金项目] 国家自然科学基金(52270129、52370142); 上海市东方英才计划青年项目; 浦东新区科技民生项目(PKJ2021-C01)

[作者简介] 秦梦如(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为固体废弃物处理与处置, E-mail: 2911106002@qq.com。

[通信作者] 郭耀广(1985—), 男, 教授, 研究方向为环境污染治理技术, E-mail: ygguo@sspu.edu.cn。

67.5% respectively, and the water quality index of condensate met the third level standard of Shanghai *Integrated Wastewater Discharge Standard* (DB31/ 199—2018). Compared with the direct incineration method, a disposal-cost saving of 1 624 yuan per ton of waste concentrate could be achieved. [Conclusion] This paper provides a scientific basis for the evaporation and crystallization treatment process of alkaline, high salinity and high concentration organic wastewater in the chemical industry, and helps the technical optimization and practical application in this field.

**Keywords** industrial high-salinity wastewater; vacuum evaporative crystallization; retention rate of organics; concentration ratio; economic benefit analysis

随着制造业的迅速发展,工业活动产生的高盐与高质量浓度有机废水排放量也逐步上升。高盐工业废水,通常是指含盐质量分数 $\geq 1\%$ 的工业废水,它具有盐分高、色度大、有机质含量高、环境危害性大和化学成分复杂的特征,COD 质量浓度多为十几乃至数百克每升,含盐质量分数一般在 5%以上,有些甚至超过 20%<sup>[1-2]</sup>。预计到 2030 年,全球水资源短缺将超过 40 000 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ ,超过 50 亿人将面临缺水<sup>[3]</sup>。而高盐废水处理技术的研究不仅关注高盐废水的出路和减少危废处置量,还在解决水资源短缺问题上发挥着重要作用。通过有效的处理和回收利用,高盐废水处理技术可以实现资源的最大化利用,同时保护环境,促进可持续发展。

目前,常应用于高盐废水的处理工艺有热浓缩、膜浓缩、反渗透技术和电化学处理技术。膜浓缩技术是以压强差、温度差和电位差为推动力,利用物质成分和膜间的大小差别、电荷相互排斥等物化作用,进行污染物的分离、纯化和浓缩<sup>[4]</sup>。膜浓缩技术能够处理高盐分污水中的有机物,而盐的析出则需要另一个孔径的滤膜,这不仅容易导致膜堵塞,而且大大增加了处理成本<sup>[5]</sup>。热浓缩技术包括多级闪蒸(MSF)、多效蒸发(MED)、机械式蒸汽再压缩(MVR)技术<sup>[6]</sup>。MSF 是将高盐度的废水加热,之后经过不同的温度和压力减小的蒸发室,蒸发结晶出水;MED 是将多个蒸发器连接起来,把高盐废水的水分蒸发,然后再回收利用水蒸气,降低成本;MVR 是将蒸发产生的蒸汽经过压缩机浓缩,提高温度和压力,重新作为下一轮废水的热源,重复利用<sup>[7-8]</sup>。但这些热浓缩的技术都是将废水以浓缩液的形式排出,产生的危废多,易结垢,后续需额外处理。反渗透技术适用于高盐度和高污染负荷的废水处理,但存在水资源浪费和膜污染问题。电化学处理则在难降解污染物的处理上具有优势,但能耗和设备维护成本较高。而真空蒸发技术在处理复杂废水和热敏

性物料时表现出色,其在处理工业高盐度、高有机物含量废水时,废水中的盐可以被浓缩结晶析出,冷凝水拟部分回用或排放,浓缩物水泥固化,实现最终的固液分离,以低成本从废水中回收水,减少危废处理量,降低成本<sup>[9]</sup>,可以有效解决化工高盐废水对环境的污染问题。

因此,本试验自主构建了小型真空蒸发试验装置,针对某化工企业的高盐废碱液,在不同工况下展开蒸发结晶分离特性的试验,旨在确定实现最佳固液分离效果的条件,从而为工业化工高盐废水的低成本处理、资源化回收及零排放提供相应的技术支撑与参考依据。

## 1 试验部分

### 1.1 试验仪器和药品

主要试验仪器:智能数显恒温水浴锅(RE-201D)、隔膜真空泵(GM-0.5B、极限压力 $>0.095\text{ MPa}$ 、抽气速度为  $30\text{ L/min}$ )、循环换水泵(AQ-1 000,最大流量为  $1\text{ 000 L/h}$ )、蛇形冷凝管、单口圆底烧瓶、铁支架台、分析天平和软管等。pH 和溶解性总固体(TDS)测定分别采用上海雷磁实验室 pH 计(pHSJ-3J)和便携式 TDS 仪(TDS-10)。化学需氧量(COD)和氨氮测定采用哈希消解器(DRB200)和哈希多参数水质分析仪(DR3900)。

主要试剂:硫酸( $\text{H}_2\text{SO}_4$ , AR)和氢氧化钠(NaOH, AR)均购于国药集团;COD 试剂(HR,  $20\sim 1\text{ 500 mg/L}$ )和高范围氨试剂组均购于哈希水质分析仪器(上海)有限公司。

### 1.2 试验方法

蒸发结晶试验装置由智能数显恒温水浴锅、隔膜真空泵、循环换水泵等部分组成,依据试验的需求对其进行组装,实际废水真空蒸发结晶流程如图 1 所示。

试验水样取自某化工企业高盐废碱液,主要成分是污泥(25%)、钛白粉(20%)、碱水(50%)。取  $100\text{ mL}$  水样测定不同蒸发结晶条件下冷凝液的水质

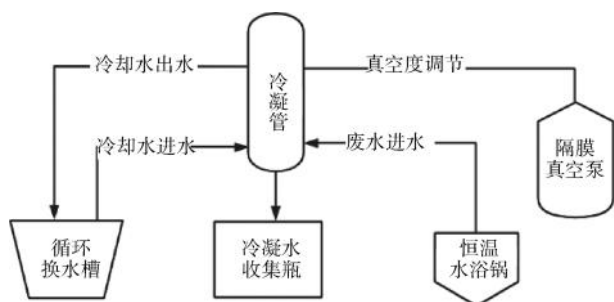


图1 废水真空蒸发结晶流程

Fig. 1 Process of Vacuum Evaporative Crystallization for Wastewater

指标,观察蒸发过程和烧瓶内壁结垢情况。设置温度、压强、pH 3 个变量,经对比得出最佳的试验条件。调节蒸发温度,分别在蒸发温度为 95、85 ℃ 和 75 ℃ 时,进行真空蒸发浓缩分离试验;调节溶液蒸发压强,分别在蒸发压力为-75、-80 kPa 和-85 kPa 时,进行蒸汽温度为 95 ℃ 的真空蒸发浓缩分离试验;分别用 1 mol/L  $H_2SO_4$  和 1 mol/L NaOH 调节溶液 pH,分别在 pH 值为 4.5、7.5 及 10.5 时,进行蒸汽温度为 95 ℃,蒸发压力为-80 kPa 的真空蒸发浓缩分离。

### 1.3 水质指标分析方法

对高盐废碱液和冷凝水的常用理化性质进行测定。COD 采用快速消解分光光度法进行测定<sup>[10]</sup>;氨氮采用水杨酸分光光度法进行测定<sup>[11]</sup>;TDS 采用重量法进行检测<sup>[12]</sup>;pH 采用玻璃电极法检测<sup>[13]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 高盐废碱液原水水质指标

原水水质指标 pH、TDS、氨氮、COD 如表 1 所示。此高盐废碱液原水中的有机物和 TDS 的含量较高,均超过上海市《污水综合排放标准》(DB31/199—2018)三级标准。因此需要对废水进一步处理,蒸发结晶试验使得冷凝水的指标达到排放标准。

表 1 原水水样指标

Tab. 1 Indices of Raw Water Samples

| 指标                        | 分析结果    | 上海市《污水综合排放标准》<br>(DB31/199—2018)三级标准 |
|---------------------------|---------|--------------------------------------|
| pH 值                      | 10~11   | 6~9                                  |
| TDS/( $mg \cdot L^{-1}$ ) | 149 600 | 2 000                                |
| COD/( $mg \cdot L^{-1}$ ) | 160 000 | 500                                  |
| 氨氮( $mg \cdot L^{-1}$ )   | 2.4     | 45                                   |

### 2.2 不同的工艺参数对冷凝水水质指标的影响

#### 2.2.1 蒸发温度的影响

图 2 展示了蒸发压强为-80 kPa,pH 值为 10.5

时,冷凝水水质指标 TDS、COD、氨氮的含量随蒸发温度的变化。由图 2 可知,随着蒸发温度的升高,废水达到过饱和质量浓度,就会析出白色晶体颗粒,冷凝水中氨氮、COD、TDS 的含量也增加。温度越高,冷凝水中 COD 的含量越高,是因为蒸发结晶过程中原水含有的部分有机物受热分解会随着蒸汽进入冷凝液;冷凝水中还有少量的盐,可能是蒸发过程中微小液滴夹带所造成<sup>[14]</sup>。在 75 ℃ 时,TDS、COD 和氨氮的质量浓度最低,分别是 4.0、80.0  $mg/L$  和 0.1  $mg/L$ ,并且在该温度下废水蒸发无迸溅,在此条件下冷凝水指标均可满足上海市《污水综合排放标准》(DB31/199—2018)三级标准。

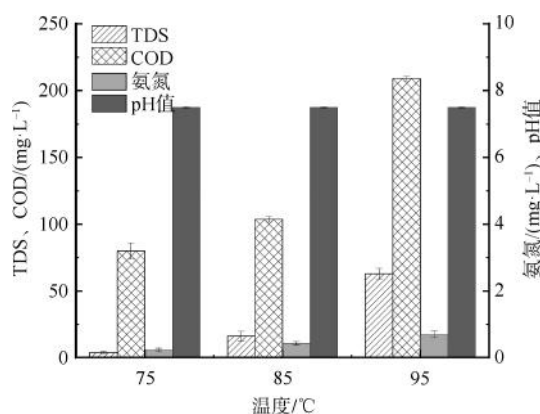


图 2 温度对冷凝水水质指标的影响

Fig. 2 Effect of Temperature on Condensate Water Quality Indices

在蒸发温度分别设定为 75、85 ℃ 和 95 ℃ 的条件下进行试验,结果显示,对废水中的有机物截留率分别为 99.9%、99.9% 和 98.8%,减重率(计算为 1-含固率)分别为 67.2%、68.5% 和 71.1%,真空蒸发结晶的时长分别是 4.0、3.0 h 和 2.0 h(表 2)。由此可知,真空蒸发温度越高,冷凝水中有有机物截留率越低、蒸发浓缩时长越短。综合考虑有机物的截留率和时间成本等因素。最终选择 95 ℃ 为蒸发温度。

#### 2.2.2 蒸发压力的影响

图 3 展示了蒸发温度为 95 ℃,pH 值为 10.5 时,冷凝水水质指标 TDS、COD、氨氮的含量随蒸发温度的变化。由图 3 可知,随着真空度的增大,冷凝水中 COD、TDS、氨氮的含量升高。所以冷凝水中氨氮、COD 和 TDS 与蒸发压力是正相关的。冷凝水中 COD 高是因为废水中低蒸汽压的难挥发性有机物随着真空度的增加而随着冷凝水被带出。同时,真

表 2 废水蒸发浓缩分离特性试验结果

Tab. 2 Experimental Results of Characteristics of Wastewater Evaporative and Concentrative Separation

| 反应条件                    | 原水质量/g | 冷凝水质量/g | 有机物去除率 | 含固率   | 浓缩比  | 蒸发结晶耗时/h |
|-------------------------|--------|---------|--------|-------|------|----------|
| 75 ℃、-85 kPa、pH 值为 10.5 | 106.6  | 71.6    | 99.9%  | 32.8% | 3.06 | 4.0      |
| 85 ℃、-85 kPa、pH 值为 10.5 | 106.7  | 73.1    | 99.9%  | 31.5% | 3.18 | 3.0      |
| 95 ℃、-85 kPa、pH 值为 10.5 | 108.0  | 76.8    | 99.8%  | 28.9% | 3.46 | 2.0      |

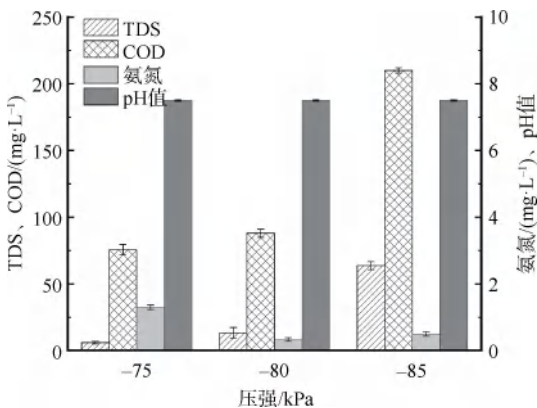


图 3 蒸发压力对冷凝水水质指标的影响  
Fig. 3 Effect of Evaporating Pressure on  
Condensate Water Quality Indices

空度增加时,废水温度低,对盐分的溶解度降低,所以在蒸发后期蒸汽夹带的冷凝水(已饱和)中盐分

比常压蒸发时低<sup>[15]</sup>。在蒸发压力为-75 kPa 时,得到的各项水质指标最低;pH 值为 7.5,氨氮、COD 和 TDS 质量浓度分别为 1.1、77.0 mg/L 和 6.0 mg/L。在 -85~-75 kPa 的蒸发压力内,各项指标均符合上海市《污水综合排放标准》(DB31/ 199—2018)三级标准。

在蒸发压力为-75、-80 kPa 和-85 kPa 条件下进行试验,原水中有机的去除率分别为 99.9%、99.9%和 99.8%,减重率分别为 69.5%、67.5%和 69.2%,蒸发时长分别是 7.5、3.0 h 和 2.5 h(表 3),总体来说,一般情况下,随着蒸发压力的升高,原水中有机的截留率呈下降态势,蒸发浓缩所耗费的时间也呈减少趋势。原水中的有机物截留率低与冷凝水中的 COD 含量高是相对应的,这是因为采用减压蒸发,可明显降低废水的沸点,即真空度越高,沸点越低<sup>[16]</sup>。

表 3 废水蒸发浓缩分离特性试验结果

Tab. 3 Experimental Results of Characteristics of Wastewater Evaporative and Concentrative Separation

| 反应条件                    | 原水质量/g | 冷凝水质量/g | 有机物去除率 | 含固率   | 浓缩比  | 蒸发结晶耗时/h |
|-------------------------|--------|---------|--------|-------|------|----------|
| 95 ℃、-75 kPa、pH 值为 10.5 | 109.2  | 75.9    | 99.9%  | 30.5% | 3.28 | 7.5      |
| 95 ℃、-80 kPa、pH 值为 10.5 | 105.3  | 71.1    | 99.9%  | 32.5% | 3.08 | 3.0      |
| 95 ℃、-85 kPa、pH 值为 10.5 | 108.0  | 75.1    | 99.8%  | 30.8% | 3.46 | 2.5      |

在试验过程中,当真空度较高时,所蕴含的能量也会相应的增大,这就对真空泵提出了更高的要求。鉴于此,最终确定选择蒸发压力为-80 kPa。

2.2.3 原水 pH 的影响

图 4 展示了蒸发温度为 95 ℃,蒸发压力为 -80 kPa,原水 pH 值为 4.5、7.5 和 10.5 时,冷凝水水质指标 TDS、COD、氨氮的含量随蒸发温度的变化。由图 4 可知,随着碱性的增强,冷凝水中 COD、TDS、氨氮的含量降低,所以冷凝水中氨氮、COD 和 TDS 与废液 pH 是负相关的。在原水 pH 值为 10.5 时,TDS、COD 和氨氮的质量浓度最低,分别是 11.0、88.0 mg/L 和 0.3 mg/L。在酸性条件下,随着原水的不断浓缩富集,废水中逐渐产生起泡现象,甚至出现剧烈翻腾的情况。废水中的低沸点有机物以

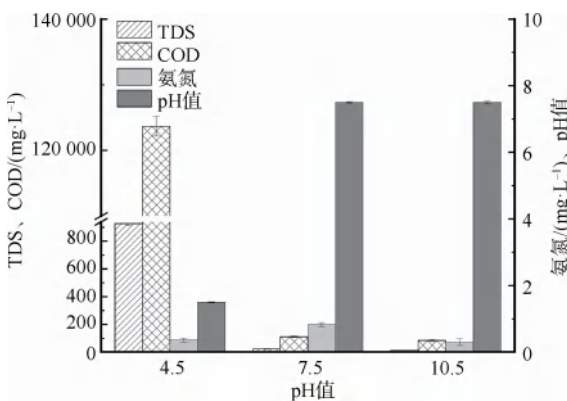


图 4 pH 值对冷凝水水质指标含量的影响  
Fig. 4 Effect of pH Value on Content of Condensate  
Water Quality Indices

酸性形式被蒸发,并随着泡沫被夹带出系统,导致冷

凝水中的水质超出标准<sup>[17]</sup>。COD 的含量变化相对于原废水变化不明显,COD、TDS 和氨氮质量浓度分别为 120 000、937 mg/L 和 0.3 mg/L。在碱性条件下,随 pH 升高,冷凝水 COD 含量下降,废水中低沸点的有机物以钠盐形式存在,不易蒸出。在中性和碱性条件下,TDS、氨氮、pH 和 COD 均满足上海市《污水综合排放标准》(DB31/ 199—2018)三级标准的限值。

表 4 废水蒸发浓缩分离特性试验结果

Tab. 4 Experimental Results of Characteristics of Wastewater Evaporative and Concentrative Separation

| 反应条件                    | 原水质量/g | 冷凝水质量/g | 有机物去除率 | 含固率   | 浓缩比  | 蒸发结晶耗时/h |
|-------------------------|--------|---------|--------|-------|------|----------|
| 95 ℃、-80 kPa、pH 值为 4.5  | 105.5  | 73.1    | 25.0%  | 30.7% | 3.27 | 1.8      |
| 95 ℃、-80 kPa、pH 值为 7.5  | 105.6  | 72.7    | 99.9%  | 31.2% | 3.21 | 2.6      |
| 95 ℃、-80 kPa、pH 值为 10.5 | 105.3  | 71.1    | 99.9%  | 32.5% | 3.08 | 2.8      |

### 3 经济性分析

本试验在温度为 95 ℃、蒸发压力为-80 kPa 和 pH 值为 10.5 的最优条件下,由上海市发展和改革委员会制定的《上海市政府定价的经营服务性收费目录清单(2023 版)》可知,危险废物处理价格中,工业废物为 2 340 元/t<sup>[18]</sup>,在此基础上,本文对比了直接委外处理固废的传统方式,发现本试验在处理每吨废液时,能够节约 1 624 元,并且可产生 675 kg 的冷凝水。

### 4 结论与展望

本文聚焦真空蒸发结晶技术在高盐化工碱性废液处理中的应用。该技术能够实现对高盐化工碱性废液的有效处理,其中有机物的截留效果与多个参数密切相关,如蒸发温度、蒸发压力及浓缩液的 pH 等。有机物截留率随蒸发压力、废水 pH 的升高而增大,随蒸发温度升高而减小。在酸性条件下,废水蒸发沸腾剧烈,有大量蒸发泡沫夹带导致出水超标。在中性和碱性条件下,TDS、COD 和氨氮均满足上海市《污水综合排放标准》(DB31/ 199—2018)三级标准。通过控制系统真空度、温度和 pH 处理高盐废碱液废水,有机物去除率和减重率分别高达 99.9% 和 67.5%,可以显著减少危废的处理量,提高有机物去除率。冷凝液中盐含量比较低,TDS、氨氮、pH 和 COD 均符合上海市《污水综合排放标准》(DB31/ 199—2018)三级标准要求,对环境有积极的影响。

在大规模工业领域,真空蒸发技术展现出显著的应用可行性,整体优势突出。该技术在实际应用

为研究废水实现达标排放的可行性,开展了在不同初始酸碱性条件下的试验。在 pH 值分别为 4.5、7.5 和 10.5 的条件下,对原水有机物截留率分别为 25.0%、99.9% 和 99.9%,减重率分别为 69.3%、68.8% 和 67.5%,蒸发浓缩耗时分别为 1.8、2.6 h 和 2.8 h(表 4)。综合来看,随着废水 pH 的升高,对有机物的截留效果逐渐增强。蒸发结晶耗时也随着 pH 的升高有所增加。

中确实面临一些挑战。在操作条件上,该技术具备非凡的适应性。借助调节真空度,能够极为灵活地控制溶液沸点,这一特性使其在处理各类工业废水时游刃有余。无论是应对对温度极为敏感的物料,确保其有效成分不被破坏,还是面对水质波动频繁且复杂的废水,都能维持稳定且高效的运行状态。大规模应用时对真空度、温度、物料流速等参数的控制要求极高,需要专业素养深厚的人员及完善的监测系统来保障运行。在能耗方面,多效蒸发与 MVR 等节能技术的蓬勃发展,为真空蒸发技术的大规模应用注入了强大动力。这些先进技术的应用,使得能耗得以有效优化,大幅降低了大规模工业生产中的能源消耗成本。在经济性方面,从长远规划来看,它对高质量浓度废水的处理效果显著,能够极大地减少后续处理量与成本。同时,前期设备投资巨大,运行中的维护、检修等成本也不容小觑。然而,随着技术的持续进步与规模化应用,设备成本正逐步降低,维护技术也日益成熟,成本有望得到进一步控制。若废水处理规模足够大,或者回收物质价值较高,真空蒸发技术所带来的经济效益将远远超过这些挑战所带来的影响,实现经济与环境效益的双赢。

### 参考文献

- [1] 穆玉娟,方小琴,庞瑞华.高碱度高盐工业废水资源化利用[J].净水技术,2023,42(增刊2):75-79.  
Mu Y J, Fang X Q, Pang R H. Resource utilization of high alkalinity and high salinity wastewater[J]. Water Purification

- Technology, 2023, 42(S2): 75-79.
- [ 2 ] 王瑜, 许越, 曹艳美, 等. 高含盐废水热力法处理技术的综述与优选[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(1): 26-39.  
Wang Y, Xu Y, Cao Y M, et al. Review and optimization of thermodynamic treatment technology for high-salinity wastewater [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(1): 26-39.
- [ 3 ] Chen Q, Burhan M, Shahzad M W, et al. A zero liquid discharge system integrating multi-effect distillation and evaporative crystallization for desalination brine treatment [J]. Desalination, 2021, 502: 114928. DOI: 10.1016/j.desal.2020.114928.
- [ 4 ] 张营. 膜蒸馏技术在高含盐废水中的应用[J]. 水资源开发与管理, 2021, 7(6): 45-47, 58.  
Zhang Y. Application of membrane distillation technology in high salinity wastewater [J]. Water Resources Development and Management, 2021, 7(6): 45-47, 58.
- [ 5 ] 曾光荣, 李健. MBR 工艺在制药行业高盐高浓度有机废水中的应用案例[J]. 净水技术, 2023, 42(1): 153-159, 173.  
Zeng G R, Li J. Application case of MBR process in high salinity and high concentration organic wastewater treatment in pharmaceutical industry [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(1): 153-159, 173.
- [ 6 ] 袁婧, 常凤民, 鞠雪敏, 等. 精细化工行业高盐、高浓度有机废水无害化处理现状及发展趋势[J]. 科技导报, 2021, 39(17): 24-31.  
Yuan J, Chang F M, Ju X M, et al. Status quo of high-salt high-concentration organic wastewater treatment in fine chemical industry and its development trend [J]. Science & Technology Review, 2021, 39(17): 24-31.
- [ 7 ] 孙钰林, 刘凤洋, 武斌斌, 等. 煤化工高盐废水处理系统运行与优化研究[J]. 工业水处理, 2022, 42(7): 192-198.  
Sun Y L, Liu F Y, Wu B B, et al. Operation and optimization of coal chemical high salinity wastewater treatment system [J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(7): 192-198.
- [ 8 ] 邱立萍, 张晓凤. 高盐废水处理技术研究及应用进展[J]. 无机盐工业, 2023, 55(2): 1-9.  
Qiu L P, Zhang X F. Research and application progress of high-salt wastewater treatment technology [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2023, 55(2): 1-9.
- [ 9 ] 刘丹, 刘琼琼, 周滨, 等. 工业高盐废水零排放与资源化利用的研究进展[J]. 现代化工, 2021, 41(10): 19-22.  
Liu D, Liu Q Q, Zhou B, et al. Research progress on zero discharge and utilization of industrial high-salt wastewater [J]. Modern Chemical Industry, 2021, 41(10): 19-22.
- [ 10 ] HJ/T 399—2007 水质 化学需氧量的测定 快速消解分光光度法[S].  
HJ/T 399—2007 Water quality—Determination of the chemical oxygen demand—Fast digestion-spectrophotometric method[S].
- [ 11 ] HJ 536—2009 水质 氨氮的测定 水杨酸分光光度法[S].  
HJ 536—2009 Water quality—Determination of ammonia nitrogen—Salicylic acid spectrophotometry[S].
- [ 12 ] HJ 51—2024 水质 全盐量的测定 重量法[S].  
HJ 51—2024 Water quality —Determination of total salt —Gravimetric method[S].
- [ 13 ] GB/T 6920—1986 水质 pH 值的测定 玻璃电极法[S].  
GB/T 6920—1986 Water quality—Determination of pH value—Glass electrode method[S].
- [ 14 ] 侯超, 蔺雪军, 陶磊, 等. 高盐、高浓度有机废水蒸发特性实验[J]. 科技导报, 2021, 39(17): 39-44.  
Hou C, Lin X J, Tao L, et al. Experimental research on characteristics in evaporation process of organic industrial wastewater with high salinity and concentration [J]. Science & Technology Review, 2021, 39(17): 39-44.
- [ 15 ] 李彩翎, 郭文霞. 低温蒸发处理核工业废水的研究[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版), 2013, 32(1): 39-43.  
Li C L, Guo W X. Study on treatment of nuclear wastewater with low-temperature evaporation [J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology (Natural Science Edition), 2013, 32(1): 39-43.
- [ 16 ] 洪永强. 高盐有机废水蒸馏压缩过程污染物迁移研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.  
Hong Y Q. Study on pollutant migration for saline organic wastewater in distillation compression process [D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [ 17 ] 徐腾, 张有贤, 施仲扬. pH 对蒸发技术处理高盐高氨氮废水的影响[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2016, 32(6): 83-88.  
Xu T, Zhang Y X, Shi Z Y. The influence of different pH on evaporation technology to treat high salt high ammonia nitrogen wastewater [J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2016, 32(6): 83-88.
- [ 18 ] 上海市发展和改革委员会. 关于印发《上海市人民政府定价的经营服务性收费目录清单(2023 版)》[R/OL]. (2022-12-06) [2024-11-02]. [https://fgw.sh.gov.cn/fgw\\_jjjctk/20221212/dc11d92edaf642ae9cf709dae1b1a98e.html](https://fgw.sh.gov.cn/fgw_jjjctk/20221212/dc11d92edaf642ae9cf709dae1b1a98e.html).  
Shanghai Municipal Development & Reform Commission. Circular on issuing the *Catalogue List of Government-Priced Operational Service Charges of Shanghai* (2023 edition) [R/OL]. (2022-12-06) [2024-11-02]. [https://fgw.sh.gov.cn/fgw\\_jjjctk/20221212/dc11d92edaf642ae9cf709dae1b1a98e.html](https://fgw.sh.gov.cn/fgw_jjjctk/20221212/dc11d92edaf642ae9cf709dae1b1a98e.html).