

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.13.013

多段纳滤运行方式对高盐废水脱盐分质的影响

杜永亮¹, 孙增旭¹, 何少林^{2,3}, 苑宏英^{1,3}, 乔红伟¹, 李梦凯⁴

(1. 天津城建大学环境与市政工程学院 天津市水质科学与技术重点实验室, 天津 300384; 2. 北京中陆咨询有限公司<中国石油规划总院>, 北京 100089; 3. 国家油页岩生态环境分中心, 北京 100089; 4. 天津辰创环境工程科技有限责任公司, 天津 300384)

摘 要: 为考察多段纳滤系统对高盐废水的脱盐分质效果,采用时代沃顿 VNF1-4040 型纳滤膜搭建了不同运行方式的多段纳滤装置。结果显示,在相同运行条件下,当膜通量变化时多段纳滤系统产水分流运行方式对 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的截留率整体上高于产水并流运行方式。膜通量增加,进水温度和浓度降低,可提高系统的离子截留率。多段纳滤系统对不同组成含盐溶液的脱盐分质效果差异较大,产水分流运行方式的分质效果优于产水并流。当原水中 $\text{NaCl}:\text{Na}_2\text{SO}_4$ (质量比) 为 1:9 和 1:4 时,产水分流运行方式产水侧 NaCl 和浓水侧 Na_2SO_4 的占比分别达到 94.6% 和 97.0% 以上,经过浓缩干燥后无机盐含量可达到相关工业产品标准。

关键词: 高盐废水; 多段纳滤; 运行方式; 脱盐; 分盐

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)13-0092-07

Influence of Multi-stage Nanofiltration Operation Mode on Desalination and Salt Separation of High-salinity Wastewater

Du Yongliang¹, Sun Zengxu¹, He Shaolin^{2,3}, Yuan Hongying^{1,3}, Qiao Hongwei¹,
Li Mengkai⁴

(1. Tianjin Key Laboratory of Aquatic Science and Technology, School of Environmental and Municipal Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. Beijing Zhonglu Consulting Co. Ltd. <PetroChina Co. Ltd. Planning Headquarter>, Beijing 100089, China; 3. The Ecology and Environment Branch of State Center for Research and Development of Oil Shale Exploitation, Beijing 100089, China; 4. Tianjin Chenchuang Environment Engineering Science & Technology Co. Ltd., Tianjin 300384, China)

Abstract: In order to investigate the desalination and salt separation performance of a multi-stage nanofiltration (NF) system for high-salinity wastewater, a multi-stage NF unit with different operation modes was constructed using VONTRON VNF1-4040 NF membranes. The results showed that under the same operating conditions and varying membrane flux, the rejection rates of Cl^- and SO_4^{2-} in the split-flow operation mode were generally higher than those in the parallel-flow operation mode. Increasing the membrane flux, as well as decreasing the influent temperature and concentration, the ion rejection rate of the system was improved. The desalination and salt separation performance of the multi-stage NF system

基金项目: 国家重点研发计划“政府间国际创新合作”专项(2019YFE0122400); 中国石油天然气股份有限公司科技项目(2024DJ26)

通信作者: 苑宏英 E-mail: yuanhy_00@163.com

varied significantly for salt-containing solutions of different compositions, and the split-flow operation mode exhibited better separation performance than the parallel-flow mode. When the mass ratio of NaCl to Na_2SO_4 in the raw water were 1:9 and 1:4 under the split-flow operation mode, the mass concentration ratios of NaCl in the produced water and that of Na_2SO_4 in the concentrated water exceeded 94.6% and 97.0%, respectively. After concentration and drying, the inorganic salt content could meet the relevant industrial product standards.

Keywords: high-salinity wastewater; multi-stage nanofiltration; operation mode; desalination; salt separation

在“双碳”目标背景下,高盐废水直接浓缩后形成的废盐若按照危废处理要求进行焚烧或填埋^[1]的方式处置已不能满足未来发展需要,而将高盐废水中混合杂质分离提纯进行资源化回收利用已成为高盐废水处理处置发展的方向^[2]。目前,我国对高盐废水的处理方法主要有热浓缩法、湿式氧化法、离子交换法、电渗析法和膜处理法等。其中,膜处理法中的纳滤技术由于对一价和多价态离子具有优异的分选性能,在含盐废水资源化处理处置领域得到了广泛的应用。纳滤膜由于具有特殊的孔径和膜表面的荷电基团,使其具有筛分作用及独特的道南效应,能够有效分离不同价态的阴离子^[3]。贾萌等^[4]采用纳滤膜处理工业园区含盐废水,实现了零排放废水处理,水回收率在96%以上,系统出水盐分含量达到10%。郭爱芝^[5]利用纳滤膜的特殊分离性能处理含盐废水,使NaCl在产水侧富集、 Na_2SO_4 在浓水侧富集,然后通过后续浓缩处理得到纯度较高的氯化钠和硫酸钠的结晶固体。可见,利用纳滤技术深度处理高盐废水已成为较有前景的方法之一。

基于纳滤系统进行高盐废水处理已有较多探究,但传统一段式纳滤系统的分盐效果不太理想,浓水侧氯离子比例较高,不利于后续结晶,而多段纳滤则是有效提高分盐效果的途径^[6],本研究以产水分流和产水并流两种运行方式,探讨多段纳滤系统对高盐废水脱盐和分质效果的影响。

1 材料与方法

1.1 试验材料、试剂及仪器

试验材料:负电荷纳滤膜(VNF1-4040,时代沃顿科技有限公司),有效膜面积为 7.5 m^2 ,产水回收率为15%;进水pH为3~10,最高操作压力为4.14 MPa,NaCl截留率为30%~50%, MgSO_4 截留率 $\geq 98\%$

(测试温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 、测试压力为690 kPa)。

试验试剂:NaCl和 Na_2SO_4 均为分析纯;去离子水为实验室自制;高盐废水为实验室配水,该配水NaCl与 Na_2SO_4 的质量比分别为1:9、1:4、1:1、4:1、9:1。

试验仪器:电子天平、电导率仪、阴离子色谱仪等。

1.2 试验流程

多段纳滤系统装置的工艺运行流程如图1所示。原水箱(150 L)中设置有恒温装置,所储存的含盐溶液(原水)通过高压变频泵加压,经活性炭过滤器与精密过滤器吸附残留的微量有机物和悬浮物后,输送至多段纳滤膜组件,膜组件进水压力为0.6 MPa,单次测试时间为0.5 h。在高压驱动下,电解质溶液通过多段纳滤膜组件进行脱盐分质,一次运行中原水在水箱的停留时间为0.3 h。浓缩液(浓水)和渗透液(产水)回流至原水箱,以保持原水浓度恒定,减少原水中离子浓度变化引起的试验误差。系统运行稳定后,间隔5 min取样一次,并采用阴离子色谱仪测定溶液中 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的浓度。

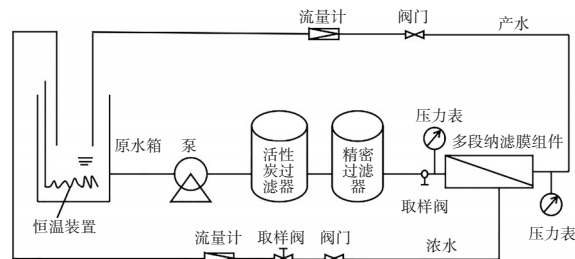


图1 多段纳滤装置脱盐分质流程示意

Fig.1 Flow diagram of multi-stage NF device desalination and salt separation

多段纳滤膜组件由4支纳滤膜元件串联组成。其中,产水分流运行方式[见图2(a)]为上一支膜元件的浓水作为下一支膜元件的进水,每支膜元件的

产水单独流出,最后在系统末端汇流。产水并流运行方式[见图2(b)]为上一支膜元件的浓水作为下一支膜元件的进水,上一支膜元件的产水进入下一支膜元件的产水侧,最后分别从系统末端流出。

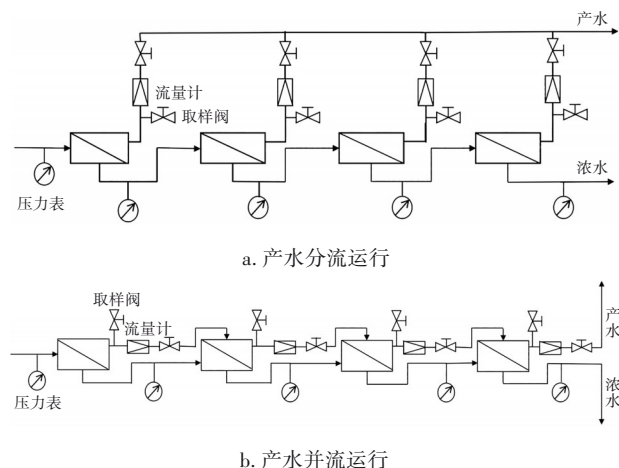


图2 多段纳滤膜组件产水分流和并流运行示意

Fig.2 Schematic diagram of split-flow and parallel-flow operation modes for produced water from multi-stage nanofiltration membrane modules

2 结果与讨论

2.1 多段纳滤系统的脱盐效果

2.1.1 膜通量对多段纳滤系统脱盐效果的影响

多段纳滤装置在原水浓度为6 g/L、温度为20℃和系统回收率为70%的条件下,产水分流和产水并流运行方式在不同膜通量下对不同组成含盐溶液中 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的截留效果如图3所示。从图3(a)、(b)可以看出,不同质量比($\text{NaCl}:\text{Na}_2\text{SO}_4$)原水在多段纳滤系统产水分流和产水并流运行方式下,产水侧 Cl^- 的截留率均与膜通量呈显著正相关,且产水分流运行方式对 Cl^- 展现出更优的截留性能。当原水组成中 NaCl 占比最大时,即 $\text{NaCl}:\text{Na}_2\text{SO}_4$ 为9:1, Cl^- 截留率最大。当 $\text{NaCl}:\text{Na}_2\text{SO}_4$ 为1:9和1:4时,对 Cl^- 出现负截留现象,这缘于 SO_4^{2-} 优先吸附引发的电荷屏蔽效应及 Cl^- 的反离子扩散机制。从图3(c)、(d)可以看出,随着膜通量的升高,多段纳滤系统产水分流和产水并流运行方式下,产水侧 SO_4^{2-} 的截留率也均呈上升趋势,产水分流运行方式对 SO_4^{2-} 的截留率高于产水并流,且产水侧 SO_4^{2-} 截留率显著高于 Cl^- 截留率。与 Cl^- 不同,当原水组成中 NaCl 占比最小时,即 $\text{NaCl}:\text{Na}_2\text{SO}_4$ 为1:9, SO_4^{2-} 的截留率最高,均高于98.5%。

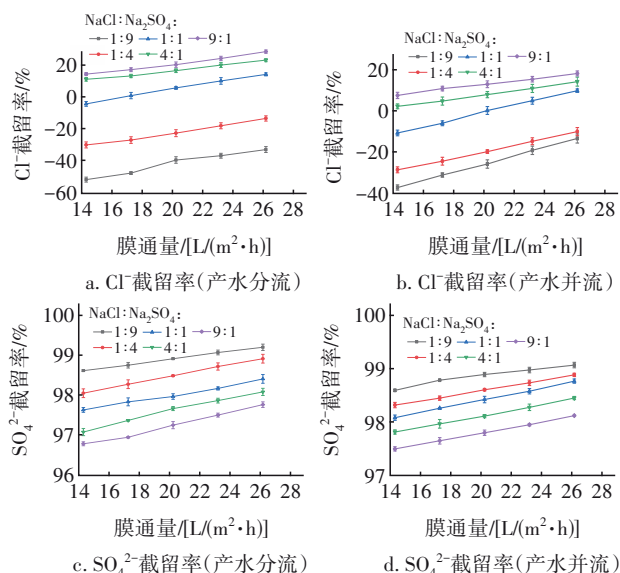


图3 不同运行方式下 Cl^- 和 SO_4^{2-} 截留率随膜通量的变化

Fig.3 Changes in rejection rates of Cl^- and SO_4^{2-} with membrane flux under different operation modes

当纳滤膜的膜通量升高时,膜两侧压力差也会相应增大^[7],使得膜两侧驱动力增加,促进了离子传质,溶剂分子(水)和 Cl^- 可以透过纳滤膜,但水的渗透通量变化相对更大。因此,出现不同组成原水的纳滤脱盐过程中产水侧 Cl^- 截留率和 SO_4^{2-} 截留率均随膜通量的升高而增加,但 SO_4^{2-} 截留率始终高于 Cl^- 截留率^[8]。对于多段纳滤系统不同产水运行方式下的截留率和脱盐效果存在明显差异,与其不同运行方式下膜元件两侧的压力差相关。试验过程中,产水分流和产水并流运行方式下末端膜元件的进水压力分别为0.42和0.37 MPa。产水分流运行方式下,各段膜元件的产水单独流出,而产水并流运行方式的各段膜元件产水进入下一级膜元件产水侧,使得产水分流运行方式下各膜元件两侧的压力差大于产水并流运行方式,因此,多段纳滤系统产水分流运行方式对 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的截留率较高,脱盐效果更好。 SO_4^{2-} 是二价阴离子,对于荷负电纳滤膜,由于膜表面负电荷排斥作用阻碍了 SO_4^{2-} 穿过纳滤膜进入产水侧,而 Cl^- 的离子半径小,纳滤膜对该离子的截留率较低,其在水中的迁移速度快,能快速透过膜,故纳滤膜对 Cl^- 的截留率相对较低^[9]。在原水组成中 NaCl 占比较小的情况下,即 $\text{NaCl}:\text{Na}_2\text{SO}_4$ 为1:9和1:4时,多段纳滤系统对 Cl^- 呈负截留状态,这表明产水中 NaCl 的浓度高于原水,可见负截留现象的出现将有助于纳滤分盐。

2.1.2 温度对多段纳滤系统脱盐效果的影响

多段纳滤装置在膜通量为 $20 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、原水浓度为 6 g/L 和系统回收率为 70% 的条件下,产水分流和产水并流运行方式在不同温度下对不同组成含盐溶液中 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的截留效果如图4所示。从图4(a)、(b)可知,随着进水温度升高,不同组成的原水在多段纳滤系统产水分流和产水并流运行方式下,产水侧 Cl^- 截留率均呈下降趋势。当 $\text{NaCl}:\text{Na}_2\text{SO}_4$ 为 $9:1$ 时,产水分流运行方式下随温度升高 Cl^- 的截留率由 25% 降至 12% 。与 Cl^- 相同,多段纳滤系统产水分流和产水并流运行方式下产水侧 SO_4^{2-} 的截留率也随温度升高呈下降趋势,如图4(c)、(d)所示。朱安娜等^[10]认为,随着纳滤系统温度的上升,溶液的黏度下降,扩散系数增加,降低了浓差极化的影响,进而使离子截留率降低。此外,温度改变还使得纳滤膜结构发生改变,当温度升高时,纳滤膜的孔径会随之增加,膜通量逐渐增大^[11],更多的电解质离子能够透过纳滤膜;同时温度升高也会促进溶质分子的活跃度,导致盐溶液的黏度降低,电解质与水分子形成的水合离子在温度升高的情况下其半径会减小,使得之前不能通过的溶质分子或电解质透过膜到达产水侧^[12]。因此,当温度升高时,溶质透过量增加,相应透盐率增加,进而导致纳滤系统对 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的截留率出现下降趋势。

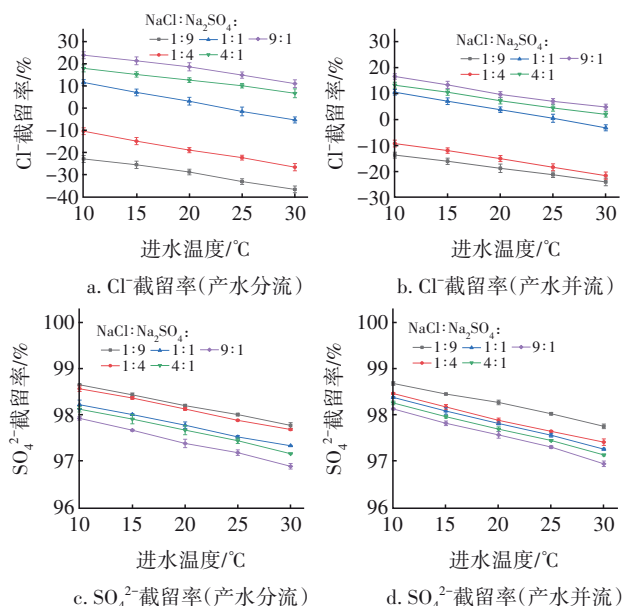


图4 不同运行方式下 Cl^- 和 SO_4^{2-} 截留率随温度的变化

Fig.4 Changes in rejection rates of Cl^- and SO_4^{2-} with temperature under different operation modes

2.1.3 进水浓度对多段纳滤系统脱盐效果的影响

多段纳滤装置在膜通量为 $20 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、温度为 20°C 和系统回收率为 70% 的条件下,产水分流和产水并流运行方式在不同进水浓度下对不同组成含盐溶液中 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的截留效果如图5所示。可以看出,随着混盐溶液进水浓度的增加,不同组成的原水在多段纳滤系统产水分流和产水并流运行方式下,产水侧 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的截留率均呈下降趋势。从图5(a)可知,当 $\text{NaCl}:\text{Na}_2\text{SO}_4$ 为 $1:9$ 时, Cl^- 截留率较低,且出现负截留现象,在产水分流运行方式下,随进水浓度的增加 Cl^- 截留率从 -12% 降到 -31% 。同样,当 $\text{NaCl}:\text{Na}_2\text{SO}_4$ 为 $1:9$ 时,在产水并流运行方式下,随进水浓度的增加 Cl^- 截留率从 -11% 降低至 -24% 。进水中无机盐浓度增大使得产水侧与浓水侧之间的浓度梯度增加,促进了离子在纳滤膜中的传输作用,使更多离子穿过纳滤膜进入产水侧,从而使离子截留率下降;当进水料液浓度变大时,混盐溶液中 Na^+ 随之增加,试验所用 VNF1-4040 型纳滤膜材质主要为聚哌嗪,纳滤膜表面荷负电,在道南作用的影响下对阴离子有截留作用; SO_4^{2-} 所带电荷为 Cl^- 的 2 倍,因此道南效应的影响更强,纳滤系统对 SO_4^{2-} 的截留率高于对 Cl^- 的^[13]。

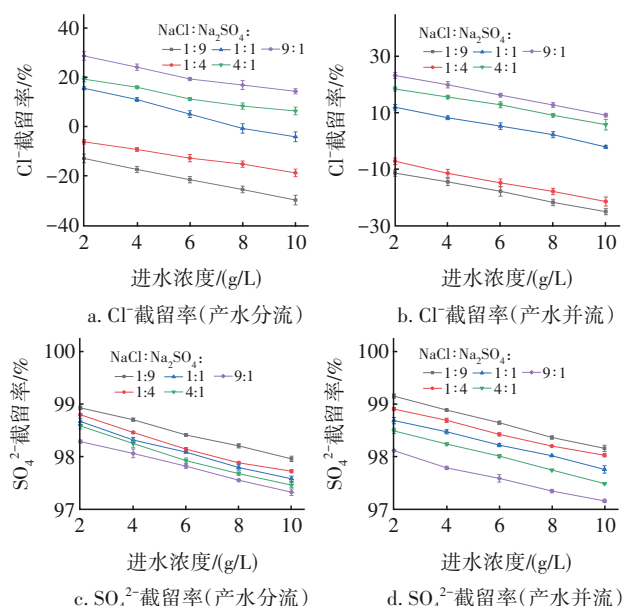


图5 不同运行方式下 Cl^- 和 SO_4^{2-} 截留率随进水浓度的变化

Fig.5 Changes in rejection rates of Cl^- and SO_4^{2-} with influent concentration under different operation modes

随着进水溶液中 NaCl 和 Na_2SO_4 浓度的增加, Na^+ 浓度也随之增加,纳滤膜两侧存在较大的浓度差

和道南效应,促使产水侧 Na^+ 浓度增加,需要对应的 Cl^- 或 SO_4^{2-} 平衡电荷,以维持溶液的电中性。VNF1-4040纳滤膜对 SO_4^{2-} 和 Cl^- 的截留率不同,产水侧 Na^+ 与易透膜的 Cl^- 相结合来维持溶液电荷平衡,导致产水侧 NaCl 增多,在进水混盐溶液中 NaCl 占比较小的情况下,纳滤系统对 Cl^- 呈现出负截留现象,而系统对 SO_4^{2-} 的截留率增大,因此负截留的出现也有利于脱盐^[14-15]。

2.2 多段纳滤系统的分质效果

2.2.1 膜通量对多段纳滤系统分质效果的影响

多段纳滤装置在原水浓度为6 g/L、温度为20℃和系统回收率为70%的条件下,产水分流和产水并流运行方式在不同膜通量下对不同组成含盐溶液分质效果的影响如图6所示。

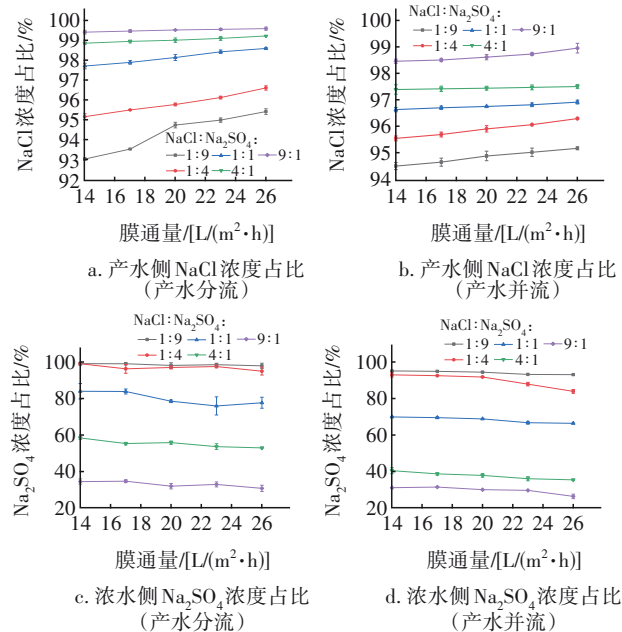


图6 不同运行方式下产水侧NaCl和浓水侧 Na_2SO_4 浓度占比随膜通量的变化

Fig.6 Changes in mass concentration ratios of NaCl in produced water and Na_2SO_4 in concentrated water with membrane flux under different operation modes

由图6可以看出,不同组成的原水在多段纳滤系统产水分流和产水并流运行方式下,产水侧NaCl浓度占比随着膜通量的增加而升高,且产水分流运行方式对NaCl的分质效果整体上优于产水并流。纳滤系统对 Cl^- 和 SO_4^{2-} 具有很好的分离效果^[16],当 $\text{NaCl}:\text{Na}_2\text{SO}_4$ 为9:1的原水在膜通量为26 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,产水分流运行方式下产水侧NaCl浓度占比最高

达到99.5%,如图6(a)所示;产水并流运行方式下产水侧NaCl浓度占比最高达到99.1%,如图6(b)所示。膜通量增大意味着系统压力的增加,压力增加促进了离子在纳滤膜中的传质过程,使得产水侧离子浓度增加,而在 NaCl 和 Na_2SO_4 混盐溶液系统中,由于氯离子的半径小于硫酸根离子,且对于荷负电纳滤膜,膜表面的负电荷会对溶液中的阴离子产生静电排斥作用,理论上 SO_4^{2-} 所带电荷数为 Cl^- 的2倍,荷负电纳滤膜对 SO_4^{2-} 的静电排斥作用要高于对 Cl^- 的,所以 Cl^- 更容易透过纳滤膜到达产水侧,使得产水侧NaCl浓度提高^[17]。

与产水侧不同,多段纳滤系统产水分流和产水并流运行方式下,浓水侧 Na_2SO_4 浓度占比随膜通量的增加而下降,产水分流运行方式对 Na_2SO_4 的分质效果优于产水并流,如图6(c)、(d)所示。当原水中 $\text{NaCl}:\text{Na}_2\text{SO}_4$ 为1:9和1:4时,多段纳滤系统在浓水侧可以获得较好的分质效果。其中, $\text{NaCl}:\text{Na}_2\text{SO}_4$ 为1:9的原水在所考察膜通量范围内,产水分流运行方式下浓水侧 Na_2SO_4 浓度占比均高于99%。

2.2.2 进水组成对多段纳滤系统分质效果的影响

多段纳滤系统对不同混盐比例原水的脱盐和分质效果差异较大。在膜通量为20 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、原水浓度为6 g/L、温度为20℃和系统回收率为70%的条件下,产水分流和产水并流运行方式对不同组成含盐溶液的分质效果如图7所示。可以看出,随着混盐比例 $\text{NaCl}:\text{Na}_2\text{SO}_4$ 的增加,即原水无机盐组成中NaCl占比增加,多段纳滤系统在两种运行方式下产水侧NaCl浓度占比呈上升趋势,浓水侧 Na_2SO_4 浓度占比呈下降趋势,产水分流运行方式对含盐溶液中NaCl和 Na_2SO_4 的分质效果整体优于产水并流。在所考察的混盐比例范围内,多段纳滤系统产水分流运行方式在产水侧的分质效果较好,NaCl浓度占比均达到94.6%以上,产水若经后续浓缩干燥、蒸发结晶处理后^[18],NaCl含量能达到《工业盐》(GB/T 5462—2015)中日晒工业盐二级标准氯化钠产品。浓水侧 Na_2SO_4 浓度占比随混盐比例变动的变化较大,当 $\text{NaCl}:\text{Na}_2\text{SO}_4$ 为1:9和1:4时,多段纳滤系统产水分流运行方式在浓水侧的分质效果较好,相应浓水侧 Na_2SO_4 浓度占比达到97.0%以上,同样浓水若经后续浓缩干燥、蒸发结晶处理后,能够达到《工业无水硫酸钠》(GB/T 6009—2014)中Ⅲ类合格品标准的无水硫酸钠产品。随着原水无机盐中NaCl占

比进一步增加,浓水侧 Na_2SO_4 浓度占比显著降低,当 $\text{NaCl}:\text{Na}_2\text{SO}_4$ 为 9:1 时,最低可降至 30% 左右。

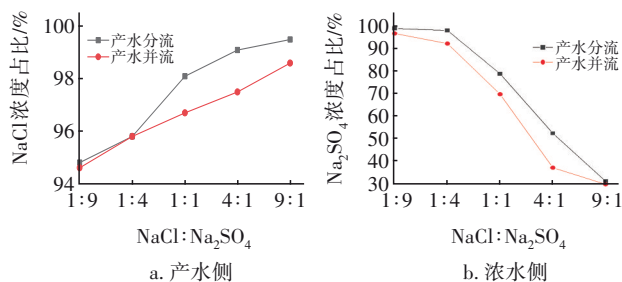


图7 不同进水条件下产水侧和浓水侧的分质效果

Fig.7 Separation effect of produced water and concentrated water under different influent conditions

综上所述,当含盐废水中 NaCl 的占比较低时,多段纳滤系统产水分流运行方式可分别在产水侧和浓水侧同时取得较好的分质效果。在含盐废水中 NaCl 占比较高的情况下,可以通过将纳滤系统浓水作为进水重复进行分盐过程,能够进一步提高浓水侧 Na_2SO_4 的浓度占比,即通过增加纳滤膜组件数来提高对 Na_2SO_4 的分质效果^[6]。例如当原水中 $\text{NaCl}:\text{Na}_2\text{SO}_4$ 为 4:1 时,浓水中 Na_2SO_4 浓度占比为 75% 对应的 $\text{NaCl}:\text{Na}_2\text{SO}_4$ 接近于 1:4,如果将此浓水作为进水再次进行纳滤,在浓水侧将会得到较好的 Na_2SO_4 分质效果。

3 结论

① 多段纳滤系统在产水分流和产水并流运行方式下,对 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的截留率都随系统膜通量的增加而增大,随进水温度和浓度上升而下降。当原水无机盐组成中 NaCl 占比较大时,多段纳滤系统对 Cl^- 的截留率较高,对 SO_4^{2-} 的截留率较低。

② 多段纳滤系统对不同组成含盐溶液的脱盐分质效果差异较大。随着膜通量的变化,多段纳滤系统产水分流运行方式对 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的截留率和分质效果优于产水并流运行方式。

③ 当含盐废水中 NaCl 占比低于 20% 时,产水分流运行方式多段纳滤系统在产水侧和浓水侧均可取得较好的分质效果,相应产水侧和浓水侧溶液经浓缩干燥后可分别得到符合标准的工业盐和工业无水硫酸钠产品。

参考文献:

[1] 周艳丽. 硫酸钠和氯化钠高盐废水分盐工艺研究[J]. 煤炭与化工, 2020, 43(6): 134-136, 140.

Zhou Yanli. Study on salt separation technology of sodium sulfate and sodium chloride high salt wastewater [J]. Coal and Chemical Industry, 2020, 43 (6): 134-136, 140 (in Chinese).

[2] 孙小淇, 郝泽伟, 陈家斌, 等. 碳中和背景下高盐废水中盐分的高效分离和资源化[J]. 工业水处理, 2023, 43(2): 14-22.

Sun Xiaoqi, Hao Zewei, Chen Jiabin, et al. Efficient separation and resource of salts in highly saline wastewater in the context of carbon neutrality [J]. Industrial Water Treatment, 2023, 43 (2): 14-22 (in Chinese).

[3] 李存玉, 刘莉成, 金立阳, 等. 基于道南效应和扩散-扩散效应分析低浓度乙醇中绿原酸的纳滤分离规律[J]. 中国中药杂志, 2017, 42(14): 2670-2675.

Li Cunyu, Liu Licheng, Jin Liyang, et al. Analyze nanofiltration separation rule of chlorogenic acid from low concentration ethanol by Donnan effect and solution-diffusion effect [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2017, 42(14): 2670-2675 (in Chinese).

[4] 贾萌, 杨郭, 袁基刚, 等. 膜组合工艺处理工业园区含盐废水中试研究[J]. 中国给水排水, 2018, 34(11): 84-87.

Jia Meng, Yang Guo, Yuan Jigang, et al. Pilot-scale treatment of salty wastewater from industrial parks by membrane combination process [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(11): 84-87 (in Chinese).

[5] 郭爱芝. 高盐废水处理及资源回收利用的工程设计[J]. 化工安全与环境, 2022, 35(43): 21-24.

Guo Aizhi. Engineering design of high salt wastewater treatment and resource recycling [J]. Chemical Safety & Environment, 2022, 35(43): 21-24 (in Chinese).

[6] 陆至彬, 谢星, 鲁思达, 等. 基于代理模型的含盐废水多级纳滤系统的过程优化设计[J]. 化工学报, 2021, 72(3): 1400-1408.

Lu Zhibin, Xie Xing, Lu Sida, et al. Surrogate model-based optimal design of multi-stage nanofiltration separation system for saline wastewater [J]. CIESC Journal, 2021, 72(3): 1400-1408 (in Chinese).

[7] 潘永宝, 何龙, 孙婷, 等. 纳滤分离水中阿莫西林及影响因素[J]. 应用化工, 2023, 52(9): 2605-2609.

Pan Yongbao, He Long, Sun Ting, et al. Separation performance of amoxicillin in water by nanofiltration and the influencing factors [J]. Applied Chemical Industry, 2023, 52(9): 2605-2609 (in Chinese).

[8] 王进, 陈青柏, 王建友, 等. 压力驱动及电驱动膜法

- 水软化技术研究现状与展望[J]. 化工进展, 2022, 41(5): 2649-2661.
- Wang Jin, Chen Qingbai, Wang Jianyou, et al. Research status and prospect of water softening technology based on pressure-driven and electro-driven membrane processes [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(5): 2649-2661 (in Chinese).
- [9] 葛光荣, 吴一平, 张全. 高矿化度矿井水纳滤膜适度脱盐技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(3): 208-214.
- Ge Guangrong, Wu Yiping, Zhang Quan. Research on technology and process for moderate desalination of high-salinity mine water by nanofiltration [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(3): 208-214 (in Chinese).
- [10] 朱安娜, 祝万鹏, 张玉春. 纳滤过程的污染问题及纳滤膜性能的影响因素[J]. 膜科学与技术, 2003, 23(1): 43-49.
- Zhu Anna, Zhu Wanpeng, Zhang Yuchun. Fouling problems of nanofiltration and influence factors of nanofiltration membrane performance [J]. Membrane Science and Technology, 2003, 23(1): 43-49 (in Chinese).
- [11] 贾雨萌, 秦英杰, 许玉壮, 等. 低脱钙纳滤膜用于非常规饮用水源的达标处理[J]. 膜科学与技术, 2022, 42(1): 129-137.
- Jia Yumeng, Qin Yingjie, Xu Yuzhuang, et al. Low-calcium-retention nanofiltration membrane for treatment of unconventional drinking water sources[J]. Membrane Science and Technology, 2022, 42(1): 129-137 (in Chinese).
- [12] 郭佩, 赵黎明, 刘鲁杰, 等. 利用纳滤膜技术分离秸秆发酵液中糖和乳酸的研究[J]. 膜科学与技术, 2023, 43(3): 104-115.
- Guo Pei, Zhao Liming, Liu Lujie, et al. Investigation on separation of residual sugar and lactic acid from straw fermentation broth by nanofiltration technology [J]. Membrane Science and Technology, 2023, 43(3): 104-115 (in Chinese).
- [13] 陈伟, 刘丹, 刘琼琼, 等. 纳滤-反渗透集成膜用于高盐废水脱盐分质的中试研究[J]. 现代化工, 2021, 41(12): 208-212.
- Chen Wei, Liu Dan, Liu Qiongqiong, et al. Pilot study on application of nanofiltration-reverse osmosis integrated membrane in desalination and separation of high-salinity wastewater [J]. Modern Chemical Industry, 2021, 41(12): 208-212 (in Chinese).
- [14] 刘佳音, 盛宇星, 宁友吉, 等. 纳滤膜在废水脱盐应用中的分盐行为研究[J]. 能源化工, 2018, 39(4): 13-18.
- Liu Jiayin, Sheng Yuxing, Ning Youji, et al. Study on the salt separation behavior of nanofiltration membrane in the application of wastewater desalting [J]. Energy Chemical Industry, 2018, 39(4): 13-18 (in Chinese).
- [15] 李燕, 王敏, 赵有璟, 等. 纳滤膜对高镁锂比盐湖卤水镁锂分离性能研究[J]. 化工学报, 2021, 72(6): 3130-3139.
- Li Yan, Wang Min, Zhao Youjing, et al. Study on separation of magnesium and lithium from salt lake brine with high magnesium-to-lithium mass ratio by nanofiltration membrane [J]. CIESC Journal, 2021, 72(6): 3130-3139 (in Chinese).
- [16] 赛世杰, 李买军, 党平, 等. 高分离纳滤系统在煤化工高盐废水零排放中的应用[J]. 环境工程, 2021, 39(7): 173-178.
- Sai Shijie, Li Maijun, Dang Ping, et al. Application of high separation nanofiltration process in zero discharge of high salt wastewater from coal chemical industry [J]. Environmental Engineering, 2021, 39(7): 173-178 (in Chinese).
- [17] Zhang Y, Chung T S. Graphene oxide membranes for nanofiltration [J]. Current Opinion in Chemical Engineering, 2017, 16: 9-15.
- [18] 陈发源, 田小军, 范飞, 等. 纳滤膜分离浓缩煤化工高盐废水[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(3): 126-132.
- Chen Fayuan, Tian Xiaojun, Fan Fei, et al. Separation of coal-chemical brine using nanofiltration membranes [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(3): 126-132 (in Chinese).

作者简介: 杜永亮(1985—), 男, 山西吕梁人, 博士, 讲师, 主要研究方向为污水污泥处理、固废资源化处置。

E-mail: du.smile@163.com

收稿日期: 2025-05-11

修回日期: 2025-07-17

(编辑: 任莹莹)