



移动扫码阅读

谢毫,申礼鹏.矿井水典型水化学组分纳滤模拟试验研究[J].能源环境保护,2021,35(4):21-26.

XIE Hao, SHEN Lipeng. Experimental study on the nanofiltration simulation of typical hydrochemical components in mine water[J]. Energy Environmental Protection, 2021, 35(4): 21-26.

矿井水典型水化学组分纳滤模拟试验研究

谢 毫^{1,2}, 申礼鹏²

(1. 合肥工业大学 化学与化工学院, 安徽 合肥 230009;

2. 煤矿生态环境保护国家工程实验室, 安徽 淮南 232001)

摘要:为揭示纳滤对高矿化度矿井水的处理机制,选取 NaCl、MgCl₂、Na₂SO₄、MgSO₄ 作为矿井水典型化学组分,通过模拟试验研究了溶液浓度和操作压力对分离性能的影响。结果表明:纳滤膜通量主要取决于膜两侧的操作压力差和溶质的渗透压差,分别呈现正相关和负相关关系;质量浓度为 1 000 mg/L 时,氯化物最低膜通量和硫酸盐最高膜通量分别为 16.5 L/h 和 15 L/h;质量浓度为 2 500 mg/L 时,氯化物最低膜通量和硫酸盐最高膜通量分别为 13 L/h 和 12 L/h;截留率受 Donnan 效应与筛分作用的共同影响,影响程度分别取决于离子荷电量和离子水合半径;在操作压力为 0.1~0.4 MPa 的条件下增大操作压力提高溶液浓度,NaCl 截留率由 38.9% 逐步降低到 19.5%,MgCl₂ 截留率由 34.0% 逐步上升到 62.4%,硫酸盐在 96.2%~98.0% 之间波动;在操作压力为 0.1~0.4 MPa 的条件下增大操作压力,NaCl 和 MgCl₂ 截留率均呈现先升高再降低的趋势,最大值分别为 33.9% 和 51.5% (0.3 MPa 时),最小值分别为 27.6% 和 41.9% (0.1 MPa 时),硫酸盐截留率在 96.2%~99.0% 之间波动。

关键词:矿井水;纳滤;膜通量;截留率

中图分类号:X703

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2021)04-0021-06

Experimental study on the nanofiltration simulation of typical hydrochemical components in mine water

XIE Hao^{1,2}, SHEN Lipeng²

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. National Engineering Laboratory of Coal Mine Ecological Environment Protection, Huainan 232001, China)

Abstract: In order to reveal the mechanism of nanofiltration during high salinity mine water treating, NaCl, MgCl, Na₂SO₄ and MgSO₄ were selected as the typical chemical components of mine water. The effects of solution concentration and operating pressure on separation performance were studied through simulation test. The results show that the membrane flux of nanofiltration depended on the operating pressure difference between the both sides of membrane and the osmotic pressure difference of solute. The membrane flux was positively correlated with the operating pressure difference and negatively correlated with the osmotic pressure difference. When the mass concentration was 1 000 mg/L, the minimum membrane flux of chloride was 16.5 L/h and the maximum membrane flux of sulfate was 15 L/h. When the mass concentration was 2 500 mg/L, the minimum membrane flux of chloride was 13 L/h, and the maximum membrane flux of sulfate was 12 L/h. The rejection rate was affected by Donnan effect and screening effect, and the degree of influence depended on the ionic charge and ionic hydration radius, respectively. When the operating pressure was 0.1~0.4 MPa, the rejection rate of NaCl decreased from

收稿日期:2021-02-19;责任编辑:蒋雯婷

第一作者简介:谢毫(1981-),男,河南洛阳人,高级工程师,主要从事煤矿区环境监测分析与煤矿生态环境科研工作。

E-mail: xh0554@163.com

38.9% to 19.5% the rejection rate of $MgCl_2$ increased from 34.0% to 62.4%, and the rejection rate of sulfate fluctuated from 96.2% to 98.0% with the increase of the operating pressure and the concentration of the solution. The rejection rate of NaCl and $MgCl_2$ increased first and then decreased with the increase of operating pressure which was in the range of 0.1~0.4 MPa. The maximum rejection rates were 33.9% and 51.5% when the operating pressure was 0.3 MPa. The minimum rejection rates was 27.6% and 41.9% when the operating pressure was 0.1 MPa. The rejection rate of sulfate fluctuated between 96.2% and 99.0%.

Key Words: Mine water; Nanofiltration; Membrane flux; Rejection rate

0 引 言

纳滤膜拥有介于反渗透膜和超滤膜之间的截留分子量,对无机盐的截留率随着盐的种类和浓度而改变,被广泛应用于各种水净化处理和产品精制分离过程^[1],近年来成为膜分离技术领域研究的热点。矿井水是由煤矿开采过程中产生的地下涌水及采掘生产中的排水汇集而成,其主要特征污染物有人类活动带来的悬浮物、COD以及天然含水层富集的 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 等组成。对于矿井水的处理,常采用混凝-沉淀工艺用以去除水中的悬浮物、COD 等污染物,但对矿井水中的溶解性总固体、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 等指标不具备处理能力。随着国家对生态环境保护要求的不断提高,对矿井水资源重视程度的不断提升,不少煤矿企业将膜分离技术应用于矿井水的处理中,并将其作为实现矿井水深度处理和零排放的主要技术方法。纳滤对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 等二价离子具有较高截留效

果^[2],对 Cl^- 、 Na^+ 、 K^+ 等一价离子的截留效果较低,利用这一特性可实现矿井水的分盐提纯、低压降盐等工艺操作,同时具有较低的操作压力、更高的透过通量等特点。本文参照潘谢矿区矿井水水质特点,择选氯化钠、氯化镁、硫酸钠、硫酸镁进行模拟配水,研究纳滤对各水化学组分的纳滤特性,为纳滤用于矿井水分盐和降盐提供理论依据和参考。

1 潘谢矿区矿井水水质特性

根据淮南潘谢矿区已实施的开采方案,确定其矿井水来源主要为下含水和砂岩水,通过对下含水和砂岩水历史数据进行收集和分析,确定淮南潘谢矿区矿井水中 TDS 含量范围为 169.01~5 409.63 mg/L、 Cl^- 含量范围为 21.27~1 791.00 mg/L、 SO_4^{2-} 含量范围为 0~786.36 mg/L,结合四分位数 75% 可判定淮南潘谢矿区矿井水具有水化学含量变化幅度较大、大概率属高矿化度矿井水的特点,详见图 1、表 1 和表 2。

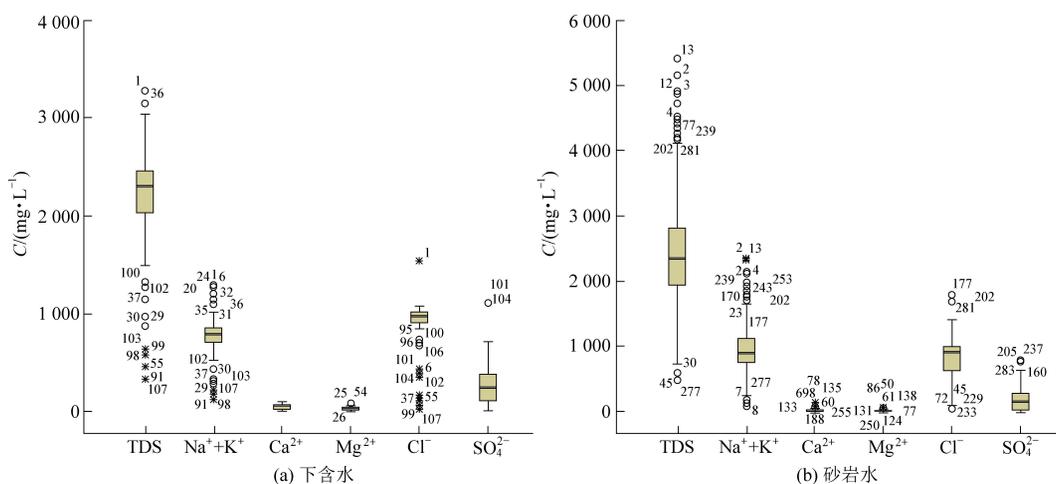


图 1 下含水、砂岩水化学指标箱图

Fig.1 Chemical index box diagram of lower aquifer water and sandstone water

表 1 下含水化学指标含量分析表

Table 1 Content analysis table of chemical index of lower aquifer water

	TDS	Na ⁺ +K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
最大值	3 285.35	1 273.06	95.62	77.43	1 538.53	1 112.24
最小值	169.01	62.65	1.60	0	21.27	2.47
平均值	2 131.92	750.67	43.97	27.18	863.48	251.71
四分位数 25%	2 009.82	689.55	22.44	13.48	905.12	105.67
四分位数 50%	2 304.56	782.81	45.63	29.43	964.32	239.96
四分位数 75%	2 460.71	842.13	61.72	37.70	1 006.59	373.55

表 2 砂岩水化学指标含量分析表

Table 2 Content analysis table of chemical index of sandstone water

	TDS	Na ⁺ +K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
最大值	5 409.63	2 352.18	144.29	49.73	1 791.00	786.36
最小值	471.97	83.65	0.80	0	45.02	0
平均值	2 422.75	966.14	21.08	9.74	796.45	171.48
四分位数 25%	1 941.41	753.01	7.62	2.55	626.45	23.87
四分位数 50%	2 342.37	888.56	15.03	6.27	901.76	148.69
四分位数 75%	2 775.58	1 102.32	24.45	12.65	998.27	272.48

2 实验仪器材料和方法

2.1 实验仪器材料

DDSJ-308A 电导仪(上海雷磁公司)、MS204S 电子天平(瑞士梅特勒-多利多公司)、Direct-Q3 超纯水制备机(法国密理博公司)、MSM2013 实验室膜分离设备(上海摩速公司),1812 型 NF-270 卷式纳滤膜(上海摩速公司,其膜材料为芳香聚酰胺、有效膜面积 S 为 0.2 m^2 、膜表面带负电荷、截留分子量为 $400 \sim 600 \text{ D}$),NaCl、MgCl、Na₂SO₄、Mg-SO₄等试剂均采用的是分析纯试剂。

2.2 实验方法

膜通量是指单位时间内通过单位膜面积上的流体量,一般以 J_v 表示;表观截留率又称实测截留率,通常略去“表观”二字,是指膜阻止料液中某组分通过或截留其中某一组分的能力,一般以 R 表示。

在实验温度恒定为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 下,配制若干系列质量浓度的氯化钠、氯化镁、硫酸钠和硫酸镁溶液。为模拟水化学组分浓度更加贴近矿井水真实浓度,把各水化学组分的实验浓度控制在了 $250 \sim 2\,500 \text{ mg/L}$ 。以 MSM2013 实验室膜分离设备的隔膜泵为动力源,溶液通过 $0.22 \text{ }\mu\text{m}$ 过滤保护装置后以错流方式通过 1812 型 NF-270 卷式纳滤膜。为便于分析,直接读取设备上压力表的数据作为操作压力(P),流量数据作为膜通量(J_v)进

行试验分析;表观截留率 R 可以用 $R = (1 - C_p/C_f) \times 100\%$ 进行表示和计算^[3],其中 C_f 为原溶液浓度, C_p 为透过液浓度,通过测定溶液及其滤过液的电导率获得 C_f 、 C_p 。通过调节循环阀调整纳滤操作压力与膜通量,考察不同操作压力和溶液浓度下,膜通量及截留率的变化规律。

3 结果和讨论

3.1 溶液浓度对纳滤分离性能的影响

3.1.1 溶液浓度对膜通量的影响分析

图 2 给出了在操作压力恒定为 0.4 MPa 时,膜通量随溶液质量浓度的变化关系。在浓度分别为 250 、 500 、 $1\,000$ 、 $2\,500 \text{ mg/L}$ 时,四种溶液膜通量之间的极差值分别为 2.5 、 4.0 、 5.5 、 6.5 L/h ,通过

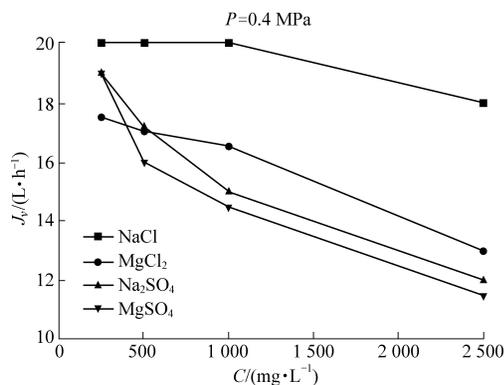


图 2 膜通量随溶液浓度变化趋势图

Fig.2 Trend of membrane flux with solution concentration

对实验数据和趋势走势分析可以看出四种溶液的膜通量极差值随浓度的增大而增大,说明膜通量受溶液浓度的影响,其中硫酸盐膜通量受到的浓度影响要大于氯化物。

根据非平衡热力学模型中的溶剂透过通量公式,当操作压力、溶液质量浓度一定时,由于硫酸盐中的 SO_4^{2-} 较氯化物中的 Cl^- 受到更强的 Donnan 效应,具有更高的渗透压差,因此硫酸盐的膜通量较氯化物要小。根据实验结果,质量浓度分别为 1 000 mg/L 和 2 500 mg/L 时,氯化物最低膜通量分别为 MgCl_2 的 16.5 L/h 和 13 L/h,而硫酸盐最高膜通量分别为 Na_2SO_4 的 15 L/h 和 12 L/h,四种溶液膜通量大小关系均是 $\text{NaCl} > \text{MgCl}_2 > \text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{MgSO}_4$ 。但在 250 mg/L 时却出现了 MgCl_2 膜通量为 17.5 L/h、 Na_2SO_4 与 MgSO_4 均为 19 L/h 的情况,即出现 Na_2SO_4 和 MgSO_4 的膜通量大于 MgCl_2 的例外情况,推测其缘由可能是在低浓度下,被截留的 SO_4^{2-} 、 Cl^- 浓度较低,即便硫酸盐中的 SO_4^{2-} 较氯化物中的 Cl^- 受到更强的 Donnan 效应,但最终形成的渗透压差差异并不大,故在操作压力一样的情况下膜通量较为接近。从四个浓度点上膜通量最大值和最小值之间的极差值来看,也是随浓度的升高而增大,也进一步证明了 Donnan 效应对离子渗透压差的影响是随离子浓度的增大而增大;同时可能又受 Mg^{2+} 的离子价态、扩散性能等离子特性的影响^[4], Mg^{2+} 截留效果提升,渗透压差增大,膜通量减小。

在实验浓度范围内,随着溶液浓度的升高,膜反射系数 σ 出现降低趋势,而溶质渗透压力差 $\Delta\pi$ 则呈现较大增强,在渗透压力差 $\Delta\pi$ 与膜反射系数 σ 共同作用下,其乘积逐步向增大的方向发展,故出现了在操作压力恒定和实验浓度范围下,随着溶液浓度的升高,膜通量逐渐降低的趋势。从实验的表现来看, Na_2SO_4 、 MgSO_4 、 MgCl_2 和 NaCl 四种溶液的膜通量变化趋势基本也随浓度的升高而降低。

3.1.2 溶液浓度对表观截留率的影响分析

图 3 给出了在操作压力恒定为 0.4 MPa 时截留率随溶液质量浓度的变化关系。由图可知,纳滤对 NaCl 、 MgCl_2 、 Na_2SO_4 和 MgSO_4 的平均截留率分别为 29.3%、47.2%、97.6% 和 96.7%,通过对实验数据进行分析可知,纳滤对硫酸盐溶液有着较高的截留效果,且远高于氯化物。推测其缘由为:氯化物溶液在纳滤过程中,由于实验所采用的纳

滤膜核负电,根据 Donnan 平衡模型理论,受 Cl^- 的价态、离子半径等离子特性影响, Cl^- 受到的 Donnan 效应作用以及空间位阻作用均较小,从而产生了 Cl^- 在纳滤系统中的强透过性、低截留性。

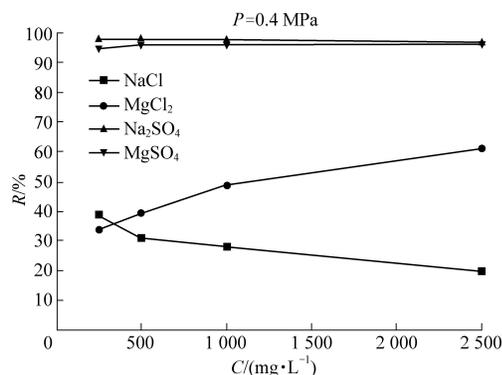


图 3 截留率随溶液浓度变化趋势图

Fig.3 Trend of rejection rate with solution concentration

同时可以看出纳滤对硫酸盐的平均截留率达 96% 以上,有着较高的截留效果,且在实验浓度范围内硫酸盐的截留率相对稳定,没有明显的升降趋势。在硫酸盐纳滤过程中,受 SO_4^{2-} 的价态、离子半径等离子特性影响^[4], SO_4^{2-} 受到的 Donnan 效应作用以及空间位阻作用均较大,致使 SO_4^{2-} 在纳滤系统中的透过性极弱,截留效果极高的特点。在此条件下阳离子的离子特性对硫酸盐溶液的截留效果影响作用已较小,甚至可近似认为在硫酸盐溶液中,溶质的截留效果主要取决于 SO_4^{2-} 。而纳滤对 NaCl 和 MgCl_2 的平均截留率分别为 29.3% 和 47.2%,纳滤对 MgCl_2 溶液的截留效果要高于 NaCl 。由于 Cl^- 的低截留效果,纳滤对氯化物的最终截留效果就必须考虑阳离子的影响,以 Na^+ 和 Mg^{2+} 为例, Na^+ 和 Mg^{2+} 的离子水合半径分别为 0.183 nm 和 0.345 nm,扩散系数分别为 $1.33 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 和 $0.71 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[5], Na^+ 离子的水合半径小于 Mg^{2+} ,扩散系数大于 Mg^{2+} 的扩散系数,由此可知 Na^+ 在膜孔中的扩散传质受到空间位阻的影响比 Mg^{2+} 小,其受到的膜筛分作用更小,其透过能力要大于 Mg^{2+} 。

对氯化物纳滤的截留率趋势走势进行分析,随着溶液浓度的提高, NaCl 溶液的截留率由 38.9% 逐步下降到 19.5%,其实验结果与付升等^[6]研究的 KCl 溶液截留率随溶液浓度的变化关系相一致;对于 NaCl 溶液,基于 Na^+ 的水合离子半径、扩散性能等离子特性,其受空间立体阻碍作用的影响很小,在纳滤时,其截留效果主要是受 Donnan 效应所决定。随着 NaCl 溶液浓度的提高,虽然

Donnan 效应也逐渐增强,但截留率变化趋势最终是取决于截留量增速与溶液浓度增速的比值,从 NaCl 截留率的变化趋势明显可以看出,NaCl 截留量的增速是要小于溶液浓度的增速,故 NaCl 溶液的截留率随着浓度的提高而降低。而 $MgCl_2$ 溶液则呈现出与氯化钠溶液完全相反的变化趋势,随着溶液浓度的提高,其截留率由 34.0% 逐步上升到 62.4%。对于 $MgCl_2$ 溶液,基于 Mg^{2+} 的水合离子半径、扩散性能等离子特性, Mg^{2+} 受到的空间立体阻碍作用和 Donnan 效应的影响均较强;随着 $MgCl_2$ 溶液浓度的提高,溶液中离子密度升高、筛分作用增强、截留性增大,同时 Donnan 效应影响也随浓度增大而增强,从 $MgCl_2$ 截留率的变化趋势明显可以看出, $MgCl_2$ 截留量的增速是要大于溶液浓度的增速,故 $MgCl_2$ 溶液的截留率随着浓度的提高而升高。综上可知,氯化物截留率随溶液浓度最终变化趋势是受 Donnan 效应与筛分作用的共同影响所决定,两种作用一直存在,只是在作用大小在不同条件下表现不同。

3.2 操作压力对纳滤分离性能影响分析

3.2.1 操作压力对膜通量的影响分析

图 4 给出了溶液浓度为 1 000 mg/L 时膜通量随操作压力的变化关系。由图可知,在溶液浓度恒定下,NaCl、MgCl、 Na_2SO_4 和 $MgSO_4$ 四种溶液的膜通量分别由 5.2、4.5、3.2、3.8 L/h 逐步上升到 20、16.5、15、14.5 L/h,通过对实验数据和趋势走势分析可以看出,四种溶液膜通量均是随操作压力的增大而增大^[7],其膜通量与操作压力的 R^2 值分别为 0.997、0.987、0.992、0.986,具有良好的线性相关性。根据非平衡热力学模型中的溶剂透过通量公式 $J_v = L_p (\Delta p - \sigma \Delta \pi)$ ^[8],当溶液浓度恒定时,溶质渗透压差 $\Delta \pi$ 变化不大,膜通量 J_v 可视为操作压力差 Δp 的函数,随着 Δp 进行单调变化。

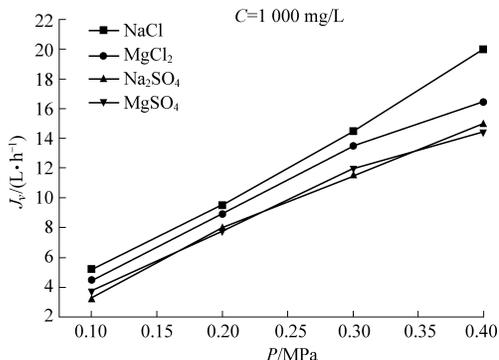


图 4 膜通量随操作压力变化趋势图

Fig.4 Trend of membrane flux with operating pressure

故当操作压力增大时,膜两侧的操作压力差 Δp 增大,膜通量 J_v 增大。

3.2.2 恒定溶液浓度下操作压力对表观截留率的影响分析

图 5 给出了溶液浓度为 1 000 mg/L 时截留率随操作压力的变化关系。由图可知,NaCl 截留率的平均值为 30.7%,最大值为 33.9%,出现在操作压力为 0.3 MPa 时,最小值为 27.6%,出现在操作压力为 0.1 MPa 时; $MgCl_2$ 截留率的平均值为 47.9%,最大值为 51.5%,出现在操作压力为 0.3 MPa 时,最小值为 41.9%,出现在操作压力为 0.1 MPa 时。通过对实验数据和趋势走势分析可以看出,在实验操作压力范围内,随着操作压力的增大,氯化物截留率先上升后下降。由于溶质通量主要取决于溶质特性,当操作压力增大时,溶质通量基本不随压力变化而变化^[9];而根据非平衡热力学模型,当操作压力增大时,膜通量增大,因此,随着操作压力的增大出现了滤出液溶度降低的现象,从而促使截留率上升。考虑到纳滤实验过程中存在着浓差极化现象,随着操作压力的增加和运行时间的增长,膜面溶液浓度持续升高,同时膜通量降低、透过液的溶质浓度升高,从而导致透过液浓度提高、截留率下降。

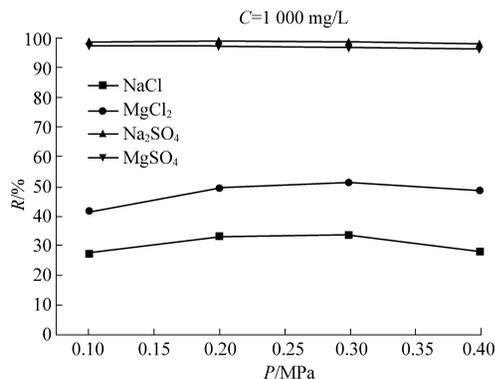


图 5 截留率随操作压力的变化趋势

Fig.5 Trend of rejection rate with operating pressure

而 Na_2SO_4 截留率的平均值为 98.5%,最大值为 99.0%,出现在操作压力为 0.2 MPa 时,最小值为 97.8%,出现在操作压力为 0.4 MPa 时; $MgSO_4$ 截留率的平均值为 96.9%,最大值为 97.5%,出现在操作压力为 0.1 MPa 时,最小值为 96.2%,出现在操作压力为 0.4 MPa 时。相对于氯化物,硫酸盐的截留率无明显的趋势变化走向,且稳定位于高截留率状态。由于 SO_4^{2-} 的离子特性,纳滤对硫酸盐具有极高的截留率,而由操作压力增大带来的截留率上升的影响和浓差极化带来的截留率下

降的影响,对硫酸盐截留率产生的影响均有限,因此,无论压力如何增大, SO_4^{2-} 离子的截留率始终位于高截留状态。

4 结 论

(1) 硫酸盐膜通量通常小于氯化物的膜通量。当质量浓度为 1 000 mg/L 时氯化物最低膜通量 16.5 L/h 大于硫酸盐最高膜通量 15 L/h,质量浓度为 2 500 mg/L 时氯化物最低膜通量 13 L/h 大于硫酸盐最高膜通量 12 L/h,决定其主要因素是由于 Donnan 效应促使带电离子的渗透压差增大,而 Donnan 效应对二价离子的作用更强;但在低浓度时,Donnan 效应减弱,由其产生的带电离子的渗透压差差异也减小,此时,膜通量主要取决于操作压力、工作环境等外部因素。

(2) 膜通量随浓度的变化趋势为膜通量随浓度提高而降低、随压力增大而增大。决定其主要因素是由于膜通量的变化符合非平衡热力学模型中的溶剂透过通量方程式,膜通量的变化主要取决于膜两侧的操作压力差以及溶质的渗透压差。

(3) Na_2SO_4 、 MgSO_4 、 MgCl_2 、 NaCl 截留率大小关系为:硫酸盐 > 90%,氯化物 < 50%, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \approx \text{MgSO}_4$, $\text{MgCl}_2 > \text{NaCl}$ 。

(4) 截留率的变化趋势为:操作压力为 0.4 MPa 时,随着溶液浓度由 250 mg/L 提高到 2 500 mg/L, NaCl 截留率由 38.9% 逐步降低到 19.5%, MgCl_2 截留率由 34.0% 逐步上升到 62.4%, Na_2SO_4 在 96.8% ~ 98.0% 之间波动, MgSO_4 在 96.2% ~ 96.9% 之间波动;浓度恒定为 1 000 mg/L 时,随操作压力由 0.1 MPa 提高到 0.4 MPa, NaCl 和 MgCl_2 截留率均呈现先升高再降低,其截留率最大值均出现在 0.3 MPa 其值分别为 33.9%、51.5%,其最

小值均出现在操作压力 0.1 MPa 时,其值分别为 27.6%、41.9%, Na_2SO_4 在 97.8% ~ 99.0% 之间波动, MgSO_4 在 96.2% ~ 97.5% 之间波动。

(5) 截留率受 Donnan 效应与筛分作用的共同影响,且始终作用于各离子,只是在不同条件下表现不同;其中 Donnan 效应影响大小主要取决于离子的荷电量,筛分作用影响大小主要取决于离子水合半径;随着溶液浓度增大,Donnan 效应对离子的作用增强、离子截留量增大,但截留率变化趋势最终是增是减取决于截留量增速与溶液浓度增速的比值。

参考文献

- [1] 王晓琳,涂丛慧,方彦彦,等. 纳滤膜孔结构、荷电性质、分离机理及动电性质研究进展 [J]. 膜科学与技术, 2011, 31 (3): 127-134.
- [2] 李晓明,王铎,柴涛,等. 纳滤海水软化的实验研究 [J]. 高校化学工程学报, 2009, 23 (4): 582-586.
- [3] 王大新,廖卓丹,伍灵,等. 用纳滤膜分离混合无机电解质溶液的性能评价方法 [J]. 化工学报, 2007 (3): 673-678.
- [4] 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 (1): 43-49.
- [5] 汪伟宁,王大新,王晓琳,等. 无机盐溶液体系的纳滤膜分离实验研究 [J]. 高校化学工程学报, 2002 (3): 257-262.
- [6] 付升,于养信,高光华,等. 纳滤膜对电解质溶液分离特性的理论研究 (I): 单一电解质溶液 [J]. 化学学报, 2006 (22): 2241-2246.
- [7] 焦相伟. 纳滤处理苦咸水的实验研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018: 21-24+35-37.
- [8] 姜华,方建慧,沈霞,等. 纳滤膜对无机盐溶液脱盐性能的研究 [J]. 过滤与分离, 2004 (4): 15-18.
- [9] 张莉娜. 纳滤膜脱盐及其在海水软化中的应用 [D]. 上海: 华东理工大学, 2011: 42-48.