

Integrated Reverse Osmosis-Nanofiltration Process for Lithium Concentration and Extraction from Salt Lake Brine

Shibao Yuan

Qinghai Salt Lake Huixin New Materials Technology Co., Ltd., Golmud, Qinghai, 816000, China

Abstract

China's salt lake brine is rich in lithium resources but faces the technical bottleneck of "high magnesium and low lithium" (Mg/Li mass ratio of 50-500), making magnesium-lithium separation difficult. This paper systematically investigates the reverse osmosis-nanofiltration integrated process for lithium concentration and extraction from salt lake brine. The nanofiltration stage achieves magnesium-lithium separation and simultaneous boron removal, while the reverse osmosis stage accomplishes efficient lithium concentration. The optimal operating parameters were determined: nanofiltration at pH 9-10, pressure 1.2-1.5 MPa, temperature 25-30°C, achieving a magnesium-lithium separation factor of 19.2 and simultaneous boron removal rate of 60%-75%; reverse osmosis with recovery rate of 75%-78%, lithium enrichment factor of 5.53, and energy consumption reduced by 50% with energy recovery devices. The whole-process material balance shows that the integrated process achieves a total lithium recovery rate >75%, freshwater reuse rate of 75%, and concentrated lithium concentration >30 g/L meeting precipitation requirements. The obtained lithium carbonate product has a purity of 99.78%, meeting battery-grade standards (GB/T23853-2022). Techno-economic analysis indicates a total cost of 20000-40000 RMB/ton and carbon emission of 17.7 kg CO₂-eq/kg LCE, demonstrating good economic viability and environmental advantages. This study provides a feasible technical solution for lithium extraction from high Mg/Li ratio salt lake brine.

Keywords

Salt lake brine; Reverse osmosis-nanofiltration integration; Magnesium-lithium separation; Lithium concentration; Battery-grade lithium carbonate

反渗透-纳滤集成工艺用于盐湖卤水浓缩提锂

袁世宝

青海盐湖汇信新材料科技有限公司, 中国·青海 格尔木 816000

摘要

我国盐湖卤水锂资源丰富,但存在“高镁低锂”(镁锂比50~500)的技术瓶颈,导致镁锂分离困难。本论文针对上述问题,系统研究反渗透-纳滤集成工艺用于盐湖卤水浓缩提锂。通过纳滤段实现镁锂分离与同步除硼,反渗透段完成锂的高效浓缩。实验确定了最优操作参数:纳滤段pH 9~10、压力1.2~1.5 MPa、温度25~30°C,镁锂分离因子达19.2,同步除硼率60%~75%;反渗透段回收率75%~78%,锂富集倍数5.53,配置能量回收装置可节能50%。全流程物料衡算表明,集成工艺锂总回收率>75%,淡水回用率75%,浓缩液锂浓度>30 g/L满足沉锂要求。所得碳酸锂产品纯度99.78%,达到电池级标准(GB/T23853-2022)。技术经济分析显示,完全成本20000~40000元/吨,碳排放17.7 kg CO₂-eq/kg LCE,具有良好经济性和环保优势。本研究为高镁锂比盐湖卤水提锂提供了可行的技术方案。

关键词

盐湖卤水; 反渗透-纳滤集成; 镁锂分离; 锂浓缩; 电池级碳酸锂

1 绪论

1.1 研究背景与意义

锂作为“白色石油”,是新能源产业的关键战略资源。我国锂资源超80%赋存于盐湖卤水,但以“高镁低锂”为主要特征,镁锂比高达50~500,且二者离子半径相近、物

化性质相似,镁锂分离成为长期技术瓶颈。开发适用于高镁锂比盐湖卤水的高效提锂技术,对保障国家锂资源安全、支撑新能源产业发展意义重大。

1.2 盐湖卤水提锂技术现状

盐湖提锂工艺主要包括沉淀法、吸附法、萃取法和膜分离法。单一膜法工艺难以兼顾分离与浓缩:纳滤可实现镁锂分离但浓缩倍数有限,反渗透可浓缩锂但无法有效除杂。集成多种膜过程的耦合工艺成为研究热点。2025年,盐湖股份在察尔汗盐湖项目中成功集成纳滤、反渗透、电渗析工艺,制备出纯度99.80%的电池级碳酸锂,标志该技术进入

【作者简介】袁世宝(1992-),男,土族,中国青海海东人,本科,初级,从事盐湖提锂、纳滤反渗透、电渗析、树脂除硼除钙镁研究。

工程化突破阶段。

1.3 集成工艺的研究定位

反渗透-纳滤集成工艺的核心思路：纳滤利用二价离子截留特性实现镁锂分离，反渗透利用单价离子浓缩效应实现锂富集，协同解决“分离”与“浓缩”两大问题。但现有研究多聚焦单一膜过程优化，对两段工艺的耦合机制、参数匹配、能耗优化等系统性问题关注不足。本论文拟针对上述问题开展系统研究，为工艺工程应用提供理论支撑。

1.4 研究内容与技术路线

主要研究内容：高镁锂比卤水纳滤分离特性、反渗透浓缩行为、两段工艺耦合优化、全过程技术经济评价。技术路线：以典型盐湖卤水为对象，采用实验与理论分析相结合，阐明分离机理与浓缩规律，建立优化设计方法，通过物料衡算与能耗分析验证工艺可行性。

2 反渗透-纳滤集成工艺理论基础

2.1 盐湖卤水化学组成与资源特征

我国盐湖卤水以高镁锂比（50~500）、伴生硼（0.5~3 g/L）为特征，典型卤水中锂浓度 2~6 g/L。镁锂离子水合半径相近（Li⁺ 0.38 nm, Mg²⁺ 0.43 nm），物化性质相似，导致分离困难。

2.2 纳滤分离机理与镁锂分离机制

纳滤膜的分离由空间位阻效应和道南效应（Donnan effect）协同控制。荷负电膜对二价镁离子的静电排斥弱，不利于镁锂分离；荷正电膜则通过强静电排斥截留镁离子，同时允许一价锂离子透过，实现选择性分离。溶质透过膜的运输涉及空间效应、静电排斥、介电效应等，高选择性膜需合理耦合上述机理。硼的去除依赖于 pH 调控：pH<9 时硼以中性分子 H₃BO₃ 存在，截留率低；pH>9 时解离为 B(OH)₄⁻，与荷负电膜产生静电排斥，截留率提高。

2.3 反渗透浓缩机理与传质过程

反渗透依靠压力驱动水分子透过半透膜，实现锂浓缩。水通量和溶质通量分别由溶解-扩散模型描述：

$$J_w = A(\Delta P - \Delta \pi)$$

$$J_s = B(C_m - C_p)$$

其中， J_w 为水通量， A 为水渗透系数， ΔP 为操作压差， $\Delta \pi$ 为渗透压差； J_s 为溶质通量， B 为溶质渗透系数， C_m 和 C_p 分别为膜表面和透过液溶质浓度。浓差极化 $\beta = \frac{C_m}{C_b}$ 导致膜表面浓度升高，渗透压增加，有效驱动力下降，限制浓缩倍数。

2.4 集成工艺的协同效应与过程强化

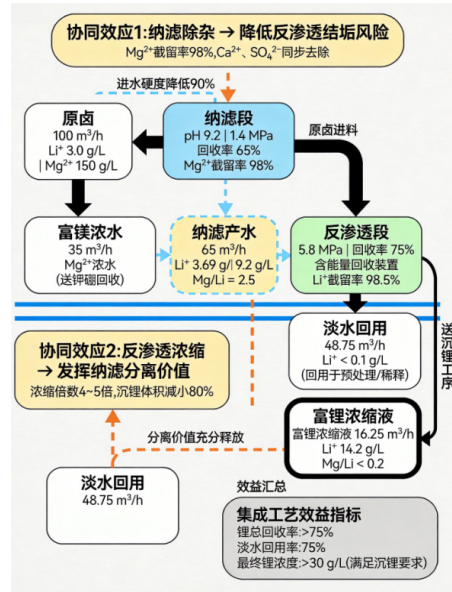
反渗透-纳滤集成工艺通过功能分工实现协同增效：纳滤段去除二价离子（镁、钙、硫酸根），降低后续反渗透段结垢风险；反渗透段浓缩锂，减小沉锂工段体积。两段工艺通过物料衡算耦合：

$$Q_p C_p = Q_f C_f R_{Li}$$

$$C_c = \frac{C_p}{r}$$

其中， Q_f 、 C_f 为纳滤进料流量和锂浓度， R_{Li} 为纳滤锂收率， Q_p 、 C_p 为纳滤产水（反渗透进水）流量和锂浓度， r 为反渗透回收率， C_c 为反渗透浓缩液锂浓度。沉锂工序要求 $C_c \geq C_{min}$ ，即 $r \geq \frac{C_p}{C_{min}}$ ，此关系将两段参数直接耦合。

两段工艺的协同机制可概括为下图所示流程：纳滤段分离镁锂并产出低镁富锂液，反渗透段将此液浓缩至沉锂所需浓度，同时反渗透产水（淡水）可回用于预处理或稀释，实现水资源循环。纳滤段的除杂效果保障了反渗透段的长期稳定运行，而反渗透段的高效浓缩则充分发挥了纳滤段的分离价值。



通过优化匹配两段工艺参数，可在锂总回收率 >75%、浓缩液锂浓度 >30 g/L 的指标下实现资源高效利用。

3 纳滤分离特性与工艺优化研究

3.1 实验材料与方法

选取 NF270 聚酰胺纳滤膜（荷负电）及实验室自制荷正电改性膜进行实验，并以文献报道的分级界面聚合膜、冠醚调控膜作性能对比。模拟卤水组成为 Li⁺ 2~6 g/L, Mg²⁺ 按镁锂比 20~200 配制，硼酸 0.5~3 g/L。采用错流过滤装置，考察 pH、压力、温度及进料浓度对分离性能的影响。评价指标包括锂透过率、镁截留率、镁锂分离因子 S 和膜通量。

3.2 操作参数对分离性能的影响

pH: pH<4 时镁截留率 <65%, S<5; pH 6~8 时镁截留率 >85%, S=10~15; pH 10~11 时镁截留率 >92%, S=18~22, 同时硼截留率由 10%~20% 升至 60%~75% (硼酸解离为 B(OH)₄⁻)。压力: 1.2~1.5 MPa 区间 S 最佳 (约 18), 过高压力加剧浓差极化。温度: 25~30°C 为优选区间, 过高则选择性下降。镁锂比: 由 20 升至 150 时, S 由 20 降

至8,高镁锂比下锂透过率下降明显。

3.3 镁锂分离效率的影响因素分析

膜荷电特性:荷负电膜(NF270)在镁锂比50时S=15~20,锂透过率80%~85%;荷正电膜S=10~12,锂透过率50%~60%。双机理协同:分级界面聚合膜在镁锂比50时S~50;冠醚调控纳滤膜引入苯并-15-冠-5醚,S达57.2,察尔汗卤水测试中经两级分离可将Mg/Li从928.6降至1.9。响应曲面法优化得到最佳条件:pH 9.2、压力1.4 MPa、温度26°C,S=19.2,回归模型为:

$$S=18.2+2.5X_1+1.8X_2-1.2X_3-0.8X_1X_2+0.5X_1X_3-0.6X_2X_3-2.1X_1^2-1.3X_2^2-0.9X_3^2$$

不同类型纳滤膜镁锂分离性能对比如下表:

膜类型	镁锂分离因子	水通量 (L·m ² ·h ⁻¹) ¹	测试条件
荷负电商品膜(NF270)	15~20	40~50	镁锂比50,总盐50 g/L
荷正电改性膜(PEI)	10~12	30~40	镁锂比50,总盐50 g/L
分级界面聚合膜	~50	35~45	镁锂比50,总盐20 g/L
冠醚调控纳滤膜	57.2	8.2L·m ² ·h ⁻¹ ·bar	镁锂比50,总盐~30 g/L

¹ 通量值为1.0 MPa下测定

3.4 纳滤过程模型建立与验证

采用DSPM-DE模型描述多离子竞争透过行为,该模型综合考虑空间位阻、道南效应和介电排斥。扩展Nernst-Planck方程为:

$$j_i = -D_{i,p} \frac{dc_i}{dx} - \frac{z_i c_i D_{i,p}}{RT} F \frac{d\psi}{dx} + c_i J_v$$

通过实验拟合膜结构参数:膜孔半径r_p=0.72 nm,有效膜厚/孔隙率δ/A_k=180 μm,pH 8时表面电荷密度σ=-12 mC/m²。

在镁锂比50、总盐120 g/L条件下验证模型:预测镁截留率87.5%(实验值86.2%),锂透过率72.3%(实验值70.8%),分离因子13.8(实验值13.2),相对误差<8%。模型预测表明,回收率由20%升至80%时,分离因子由15.6降至9.8,建议纳滤段回收率控制在60%~70%。

4 反渗透浓缩行为与集成工艺耦合

4.1 反渗透浓缩特性研究

选取SW30XLE反渗透膜(锂截留率98.5%,通量较高)进行研究。在纳滤产水(Li⁺ 3.69 g/L, Mg²⁺ 9.2 g/L,总盐45 g/L)条件下,考察操作压力和回收率对浓缩性能的影响。

操作压力5.5 MPa时,水通量62.3 L·m²·h⁻¹,锂截留率98.3%。回收率由50%升至80%时,浓缩液Li⁺浓度由9.8 g/L增至35.8 g/L,富集倍数5.53;回收率超80%后通量急剧下降,渗透压升高限制进一步浓缩。确定经济可行回收率

75%~78%,对应锂浓度30~35 g/L。

进料中残留Mg²⁺对反渗透性能影响显著:Mg²⁺浓度由0.5 g/L升至3.5 g/L时,锂富集倍数由5.2降至4.6,通量衰减率由18%增至31%,验证纳滤段分离效率对下游的关键作用。

4.2 浓缩过程能耗分析与优化

反渗透单位体积产水能耗(含能量回收)为:

$$SEC = \frac{P_{op} Q_f}{Q_p \eta_p} - \frac{P_{op} Q_c \eta_{ERD}}{Q_p \eta_p}$$

回收率75%时,单位产水能耗2.1 kWh/m³,单位锂产品能耗5.1 kWh/kg Li(配置效率92%能量回收装置)。无能量回收时单位锂产品能耗10.3 kWh/kg Li,节能幅度达50%。

正渗透技术利用盐湖老卤作驱动液,可由太阳能驱动,是进一步降低浓缩能耗的潜力方向。

4.3 膜污染机制与控制策略

膜污染是影响反渗透长期稳定运行的核心问题。采用SEM-EDX对运行120 h后的反渗透膜表面进行分析,结果显示污染层厚度约5~12 μm,主要元素组成为Ca、Mg、Si、S、C,局部区域出现片状结晶,判定为硫酸钙和硫酸镁的复合垢与有机物凝胶层的复合污染。

尽管纳滤段已去除绝大部分二价离子,反渗透段进水中仍残留Ca²⁺ 20~50 mg/L、SO₄²⁻ 80~150 mg/L。在浓差极化作用下,膜面离子浓度可达主体浓度的3~5倍,局部过饱和度和超过溶度积10倍以上,诱发结晶成核。此外,卤水中残留的腐殖质等有机物通过疏水作用吸附于膜面,与无机垢交织形成致密凝胶层,进一步增加传质阻力。

针对上述污染特征,采取以下控制策略:

(1) 阻垢剂添加:在进水中投加5 mg/L有机膦酸阻垢剂,通过螯合作用与晶体畸变效应抑制垢晶生成,可使临界回收率由78%提升至85%以上。

(2) 化学清洗:采用碱性清洗(pH 11~12, 0.2% EDTA+0.1% SDS, 30 min)去除有机污染和部分无机垢,再以酸性清洗(pH 2~3, 0.2% HCl或柠檬酸, 20 min)去除残余无机垢,通量恢复率达92%~95%。

(3) 预处理优化:配置紫外消毒或非氧化性杀菌剂控制微生物滋生,进一步减轻生物污染风险。

(4) 智能化监控:结合CFD模拟与人工神经网络建立污染预测模型,可提前预警污染趋势,实现运行参数的动态优化。

通过上述综合控制策略,可保障反渗透段在75%回收率下长期稳定运行,膜清洗周期延长至3个月以上。

4.4 集成工艺物料衡算与参数匹配

以处理100 m³/h原卤为基准,集成工艺全流程物料衡算如表4-1所示。纳滤段回收率65%、锂透过率80%、镁截留率92%;反渗透段回收率75%、锂截留率98.5%。

反渗透-纳滤集成工艺全流程物料衡算如下表:

物流节点	流量 (m ³ /h)	Li ⁺ (g/L)	Mg ²⁺ (g/L)	Mg/Li	去向
原卤	100	3.0	150	50	纳滤段进水
纳滤浓水	35	0.6	400	667	钾硼回收
纳滤产水	65	3.69	9.2	2.5	反渗透段进水
反渗透产水	48.75	<0.1	<0.1	—	淡水回用
反渗透浓缩液	16.25	14.2	2.3	0.16	沉锂工序

参数匹配关系：纳滤段产水锂浓度 C_p 与反渗透回收率 r 需满足 $r \geq \frac{C_p}{C_{\min}}$ (C_{\min} 为沉锂要求浓度)。优化匹配区间：纳滤段回收率 60%~70%、pH 8.5~9.5；反渗透段回收率 75%~78%、操作压力 5.5~6.0 MPa。集成工艺锂总回收率 >75%，淡水回用率 75%，浓缩液锂浓度 >30 g/L 满足沉锂要求。

5 集成工艺技术经济分析与展望

5.1 产品指标与电池级碳酸锂标准对标

集成工艺所得富锂浓缩液经沉锂制备的碳酸锂产品纯度达 99.78%，镁含量 32 ppm，硼含量 45 ppm，各项指标均满足 GB/T23853-2022《卤水碳酸锂》I 型标准（主含量 ≥99.5%，镁 ≤50 ppm，硼 ≤100 ppm）。盐湖股份中试项目同样制备出纯度 99.80% 的电池级碳酸锂，验证了本工艺的产品质量可行性。

5.2 技术经济可行性分析

以年处理 100 万 m³ 原卤（年产碳酸锂 5000 吨）计，总投资约 5300 万元（膜元件 1000 万元、泵阀及能量回收 2000 万元、预处理 800 万元、土建安装 1500 万元）。运行成本包括：电耗 215 万元/年（430 万 kWh，0.5 元/kWh）、膜更换 280 万元/年、药剂 150 万元/年、人工 120 万元/年，合计运行成本 1530 元/吨 LCE。完全成本约 8000~9000 元/吨 LCE，与溶剂萃取法相当，低于吸附法（约 12000 元/吨）。膜工艺碳排放 17.7 kg CO₂-eq/kg LCE，显著低于萃取法（52.7）和吸附法（47.9）。

5.3 集成工艺的工程应用前景

本工艺适用于镁锂比 20~200、锂浓度 2~6 g/L、硼浓度 0.5~3 g/L 的盐湖卤水。针对超高镁锂比盐湖（Mg/Li~500），需采用吸附-膜耦合工艺；针对高硼卤水，可在纳滤段调控 pH 同步除硼；针对低锂浓度卤水，可采用两级反渗透或正渗透强化浓缩。膜集成工艺可实现淡水回用率 75%，较传统工艺节水 30% 以上，契合盐湖资源绿色开发方向。

5.4 主要结论

本论文系统研究了反渗透-纳滤集成工艺用于盐湖卤水提锂，主要结论如下：（1）纳滤段最优操作参数为 pH 9~10、压力 1.2~1.5 MPa、温度 25~30℃，镁锂分离因子可达 19.2，同步除硼率 60%~75%；（2）反渗透段经济回收率 75%~78%，锂富集倍数 5.53，配置能量回收装置可节能 50%；（3）全流程锂总回收率 >75%，淡水回用率 75%，浓缩液锂浓度 >30 g/L 满足沉锂要求；（4）产品纯度 99.78%

达电池级标准，完全成本 8000~9000 元/吨，具有良好经济性和环保优势。后续研究方向包括高性能锂选择性膜开发、多膜过程深度集成及盐湖资源综合利用。

参考文献

- [1] 姜小毛, 陈金兰, 希域格. 盐湖股份: 卤水直接提锂技术取得重大突破[N]. 中国化工报, 2025-10-17.
- [2] 秦春刚. 唯赛勃“膜法”技术实现突破 助力盐湖提锂降低水耗 [N]. 上海证券报, 2025-11-24.
- [3] 曹晓敏. 突破“渗透性—选择性”瓶颈 新型纳滤膜实现盐湖镁锂高效分离[N]. 中国化工报, 2025-09-29.
- [4] 刘科, 夏应杰, 陈曦, 等. 具有双Li⁺传输通道的冠醚调控纳滤膜用于盐湖卤水Mg²⁺/Li⁺分离[J]. Water Research, 2025, 123924. DOI: 10.1016/j.watres.2025.123924.
- [5] He Y, Li G, Lin H, et al. Enhanced Mg²⁺/Li⁺ separation by amino crown ether composite nanofiltration membrane with Mg²⁺ transport barrier[J]. Journal of Membrane Science, 2024, 123137. DOI: 10.1016/j.memsci.2024.123137.
- [6] Yong M, Yang Y, Sun L, et al. Nanofiltration membranes for efficient lithium extraction from salt-lake brine: A critical review[J]. ACS Environmental Au, 2025, 5(1): 12-34. DOI: 10.1021/acsenvironau.4c00061.
- [7] 中国科学院上海高等研究院. Interests on lithium extraction from the Chinese salt-lake brines[EB/OL]. (2025-04-24).
- [8] Yang F R, Yong M, Li Z K, et al. Breaking the trade-off between lithium purity and lithium recovery: A comprehensive mathematical modeling based on membrane structure-property-performance relationships[J]. Water Research, 2025, 281: 123678. DOI: 10.1016/j.watres.2025.123678.
- [9] 董守龙, 杨尚明, 张世春, 等. 纳滤和反渗透组合回收盐湖提锂尾液中锂的研究[J]. 无机盐工业, 2019, 51(12): 53-57. DOI: 10.11962/1006-4990.2019-0031.
- [10] Li Z, Zhao Y, Li Y, et al. Reverse osmosis process: combining energy consumption analysis and mass transfer in the concentration of lithium-enriched brine[J]. Desalination, 2025, 594: 118309. DOI: 10.1016/j.desal.2024.118309.
- [11] Sun H, Wang Y, Liu C, et al. Polyethylene separator supported thin-film composite forward osmosis membranes for concentrating lithium enriched brine[J]. Water Research, 2022, 216: 118297. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118297.
- [12] Liu Y, Ran J, Guo Q, et al. Advancements in nanofiltration fouling phenomenon: From water treatment to salt lakes environments[J]. Desalination, 2024, 583: 117649. DOI: 10.1016/j.desal.2024.117649.
- [13] Unlocking industrial-scale lithium extraction from salt lake brines: A comprehensive sustainability, life cycle, and techno-economic comparative analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2025, 525: 146535. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.146535.