

察尔汗盐湖老卤锂富集多级精控盐田工艺扩大实验

吕学成¹, 史忠录², 唐永全³, 李志伟^{4,5}

(1. 青海盐湖镁业有限公司 青海 格尔木 816000; 2. 青海盐湖工业股份有限公司 青海 格尔木 816000; 3. 青海盐湖元通钾肥有限公司 青海 格尔木 816000; 4. 中国科学院青海盐湖研究所, 中国科学院盐湖资源综合高效利用重点实验室, 青海 西宁 810008; 5. 青海省盐湖资源化学重点实验室, 青海 西宁 810008)

摘要: 这是一篇矿业工程领域的论文。针对察尔汗盐湖老卤中锂离子的浓缩富集, 采用蒸发结晶、分步分离的方法完成了老卤锂富集多级精控盐田工艺扩大实验, 研究了锂、硼在蒸发过程中的富集规律, 使锂离子浓度达到 1 g/L 以上, 并获得了高品质的水氯镁石。对盐田蒸发过程进行了物料衡算, 得到了各析盐阶段的实际成卤量和锂收率, 以及日晒盐田的生产能力和各级盐田面积分配比例等, 能够为今后实现察尔汗盐湖提钾老卤的综合开发利用提供可靠的数据支持。

关键词: 矿业工程; 盐湖卤水; 锂; 水氯镁石; 赋存状态; 盐田工艺

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.04.007

中图分类号: TD982 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 04-0050-07

引用格式: 吕学成, 史忠录, 唐永全, 等. 察尔汗盐湖老卤锂富集多级精控盐田工艺扩大实验[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(4): 50-56.

LYU Xuecheng, SHI Zhonglu, TANG Yongquan, et al. Expansion experiment of multi-stage precision control process for lithium enrichment in qarhan salt lake brine[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(4): 50-56.

盐湖是蕴含多种无机盐的宝库, 不仅与人们的生活息息相关, 而且几乎涉及国民经济的各个方面^[1-2]。锂作为电池重要原材料之一, 我国锂离子电池行业对锂的需求量较大, 而盐湖卤水中储存大量的锂资源, 但卤水中浓度较低, 因此对卤水中的锂进行有效的浓缩有利于对其进一步的开发利用^[3-5]。

卤水的蒸发浓缩是卤水资源开发利用不可或缺的过程, 而特殊的自然环境为人们利用自然能源进行卤水的蒸发浓缩提供了有利的条件^[6]。盐田日晒工艺是借助湖区丰富的自然能, 利用广阔的湖边滩地修建多级日晒盐田, 将原卤分阶段蒸发浓缩和获得盐类, 节能环保, 经济效益高^[7-8]。由

于固体锂资源矿将无法满足未来的发展需求, 开发利用卤水锂资源已经成为国内外的研究热点。盐湖提钾老卤是后续盐湖提镁、提锂的重要原料。盐湖卤水提锂过程通常包括三个阶段: 富锂卤水制备、镁锂分离和碳酸锂沉淀^[9]。富锂卤水制备通过盐田的蒸发使锂在卤水中富集, 此时卤水中仍存在着大量的镁、硼等离子, 使其后续提锂十分困难。目前经过对盐湖卤水镁锂分离与锂提取技术的研究, 形成了以沉淀、溶剂萃取、离子交换吸附、膜分离等方法为主的盐湖提锂工艺, 但存在锂资源利用率低、资源综合利用性不足等问题^[3,10]。

本文基于实验室自然蒸发实验的相关结果,

收稿日期: 2023-10-27

基金项目: 中国科学院 STS 区域重点项目 (KFJ-STG-QYZD-2021-06-002); 青海省科技厅重点研发与转化计划 (2021-GX-C04)。

作者简介: 吕学成 (1985-), 男, 工程师, 主要从事盐田日晒工艺相关工作。

通信作者: 李志伟 (1996-), 男, 工程师, 主要从事盐湖资源综合利用工作。

在察尔汗盐湖盐田区设计、选址并修建了近中试规模的六级日晒盐田，研究了锂、硼在蒸发过程中的富集规律，获得了高品质的水氯镁石，这些都为今后实现察尔汗盐湖提钾老卤中镁、锂的高效分离，盐湖资源综合利用提供可靠的数据支持。

1 实验

1.1 盐田工艺设计

1.1.1 湖区气象条件

察尔汗盐湖属大陆高原气候区，日照时间长，多风少雨，昼夜温差大。空气湿度年平均

33.9%，最高气温 34℃，最低气温-28.9℃，年均气温 8.2℃，年均日照时间 3 358 h，年平均降水量 284.4 mm，年蒸发量 2 836.7 mm，最高蒸发量通常在每年的 6~7 月。表 1 为 2019—2021 年察尔汗盐湖区年及各月平均气象要素统计结果。

1.1.2 工艺设计依据

现场盐田蒸发实验所用原料为察尔汗盐湖提钾老卤，根据表 2 卤水组成，卤水蒸发路线以 25℃ 下 Li^+ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$ - H_2O 体系相图为理论依据^[1]。见图 1，卤水蒸发结晶过程中析盐主要为 $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ，含有极少量 $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 NaCl 。

表 1 察尔汗湖区年及各月平均气象要素统计

Table 1 Statistics of annual and monthly average meteorological elements in Qarhan lake

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年平均值
温度/℃	-7.24	-2.2	2.8	12.8	13.9	19.0	19.7	21.5	16.8	9.1	1.1	-6.7	8.20
蒸发量/mm	41.30	74.4	166.2	224.0	373.8	392.5	541.8	467.8	285.1	149.0	84.0	36.7	2 836.70
风速/(m/s)	3.80	4.1	4.8	5.7	5.6	6.0	5.5	5.2	4.8	4.7	4.2	3.2	4.76
日照时间/h	194.40	191.5	264.2	161.3	296.9	301.7	302.0	289.9	268.4	232.2	193.2	189.1	3 358.00
相对湿度/%	44.90	36.0	32.4	30.1	28.6	36.5	33.6	28.6	27.3	33.4	33.8	40.2	33.90

表 2 盐田蒸发实验老卤化学组成

Table 2 Chemical composition of old halogenation in evaporation test of salt pan

$\text{Mg}^{2+}/\%$	$\text{Cl}^-/\%$	$\text{SO}_4^{2-}/\%$	$\text{Li}^+/\%$	B/%	$\text{Li}^+/(\text{mg/L})$	B/(mg/L)
8.34	24.85	0.020 1	0.014 2	0.019 5	188.27	259.04

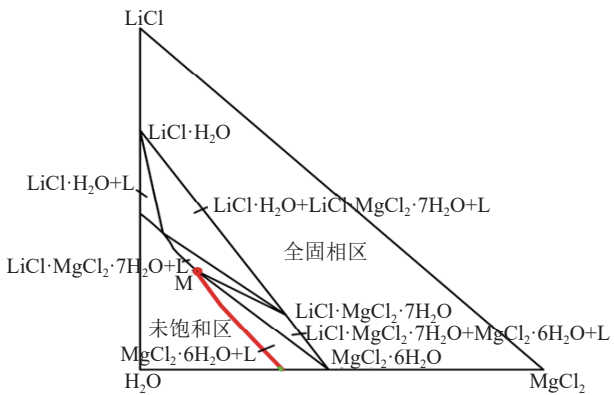


图 1 察尔汗老卤蒸发理论结晶路线（25℃ 下 Li^+ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$ - H_2O 相图）

Fig.1 Theoretical crystallization roadmap of Qarhan brine evaporation (phase diagram of Li^+ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$ - H_2O at 25℃)

根据 25℃ Li^+ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$ - H_2O 相图理论分析， Li^+ 富集老卤蒸发路线理论过程见图 1 红色线，最

高可浓缩至相图中 M（理论点）点位置处，继续蒸发， $\text{LiCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 将析出，此时液相中 Li^+ 理论含量可达 46 944 mg/L，即针对原始 188.27 mg/L 的理论浓缩倍数为 249 倍。本实验结合收率因素，设计蒸发浓缩至 Li^+ 理论含量大于 1 000 mg/L 浓缩 5.6 倍。依据室内分级精控蒸发实验结论，目标组分浓缩 5 倍，5~7 级分离可以得到较高收率指标，因此实验盐田设计 6 级分离。盐田日晒工艺流程见图 2。

为尽量降低动力消耗，按卤水浓缩规律设计的日晒盐田结构分为 6 块盐田，其中包括 1 级钾盐区、5 级浓缩区。

1.1.3 盐田工艺计算

根据相关气象数据，每年 4 月到 9 月实验盐田所处地区卤水温度高，相对湿度低，老卤蒸发量大， Li^+ 浓缩速率较快。原料老卤 Li^+ 浓度由 180 mg/L 浓缩至 Li^+ 1 000 mg/L，经计算，采用 6 级盐田蒸发，每级浓缩倍数 1.34 倍，母液夹带按 25% 计，渗漏及机械损失按 2% 计，每级盐田物料量及组成见表 3。

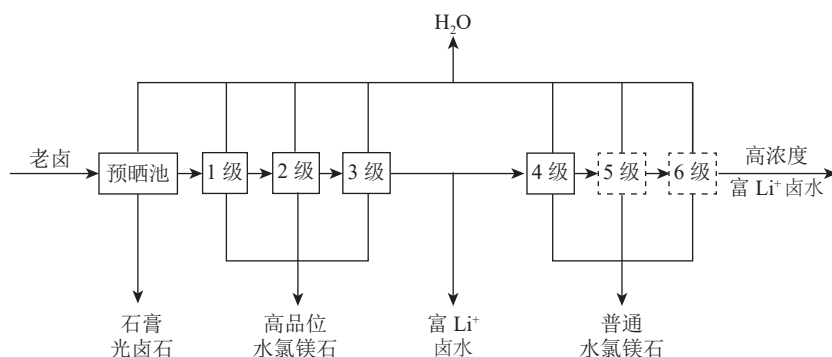


图2 多级精控盐田日晒工艺流程

Fig.2 Multi-stage fine control of salt pan sun drying process

表3 各级盐田物料配比及面积

Table 3 Salt pan material ratio and area at all levels

	进口卤水量/t	出口卤水量/t	进卤Li ⁺ 浓度/(mg/L)	出卤Li ⁺ 浓度/(mg/L)	盐田面积百分率/%	理论面积/m ²
1级	100.00	68.47	180.0	241.2	35.2	1 889.2
2级	68.47	46.88	241.2	323.2	23.9	1 284.9
3级	46.88	32.10	323.2	433.1	16.5	885.6
4级	32.10	21.98	433.1	580.3	11.3	606.5
5级	21.98	15.05	580.3	777.6	7.8	418.6
6级	15.05	10.31	777.6	1 042.0	5.3	284.4

1.1.4 实验盐池的修建

根据盐田工艺计算，在青海盐湖股份公司镁业盐田区选址并修建了总面积约 5 367 m² 的六级实验盐田。池体底土经翻松滚压后平整夯实，边坡由粘土堆砌而成，并用铁铲拍打结实^[12]，池体内壁及底部均铺有聚乙烯土工膜衬垫。六级实验盐田的平面布置见图3。

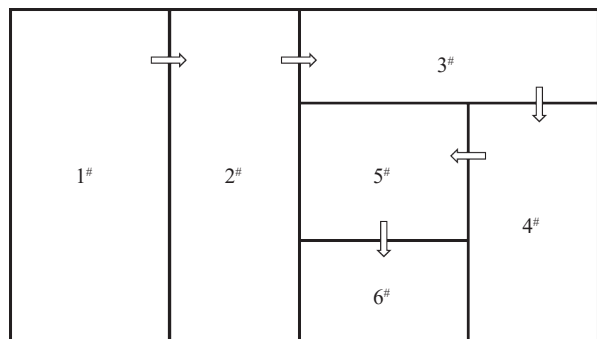


图3 六级实验盐田平面布置

Fig.3 Level 6 test layout of salt pan

1.2 实验方案

本次盐田实验卤水为提钾后的高镁老卤，2019年11月，实验盐田建设完成，灌入提钾老卤开展蒸发实验。串级走水，依次经过1#~6#盐

田自然蒸发。共灌入 1 600 t 卤水，历时 12 个月自然蒸发，2020 年 11 月完成实验，其中跨越一个冬季。蒸发过程中定期对池内卤水进行常规观测，包括气温、湿度、卤温、卤深、密度、盐度、pH 值和结晶析盐情况，每间隔 2~3 天取样一次，做化学分析，监测镁、锂、硼、氯、硫酸根等离子的浓度变化。待卤水参数达到工艺设计的倒池要求时，及时将上级盐池卤水全部泵入下级盐池。

1.3 分析测量方法

实验过程中所取固、液样的阴阳离子化学分析方法^[12]：Cl⁻采用硝酸银莫尔法容量分析；Mg²⁺，采用 EDTA 络合滴定法；Li⁺、B、SO₄²⁻采用 ICP-OES 等离子发射光谱仪。

2 实验结果与讨论

2.1 蒸发过程中各元素的富集析盐规律

将卤水中 Li⁺浓度从 188.27 mg/L 蒸发至 1 000 mg/L，需浓缩约 5.6 倍。设计分 6 级蒸发浓缩，每级需浓缩 1.33 倍。通过取样检测液相 Li⁺、B 含量变化，控制每一级盐田导卤节点，设计导卤点 Li⁺浓度及实际导卤浓度见表4。各级分级点 Li⁺浓度与设计的分级实验控制点浓度数据较为吻合，盐田扩大实验与实验室小试结果相一致。

每级盐田蒸发过程中 Li⁺和 B 的浓度变化见图4、5。从图中可知，在老卤盐田日晒蒸发过程中，由于卤水 Li⁺和 B 的浓度较低，中前期 Li⁺和 B 的浓度增长较为缓慢，蒸发时间较长。随着 Li⁺和 B 的浓度的升高，到蒸发中后期，Li⁺和 B 的富集速度明显加快，液相中的 Li⁺浓度从 188.27 mg/L 蒸发至 1 105.00 mg/L，增幅约 1 g/L，B 浓度从

259.04 mg/L 蒸发至 1 311.50 mg/L, 增幅约 1.1 g/L, 浓缩后的卤水可以直接用于后续提取锂、硼的原

料, 同时在蒸发过程中析出了大量品质较高的水氯镁石, 可用于电解生产金属镁。

表4 盐田蒸发实验各分级点 Li^+ 浓度/(mg/L)
Table 4 Li^+ concentration at each stage of evaporation test in salt pans

	原卤	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]
计算分级控制点	188.27	250.40	333.03	442.93	589.10	783.50	1 042.05
实验分级控制点	188.27	236.15	319.50	419.75	642.75	865.75	1 105.00

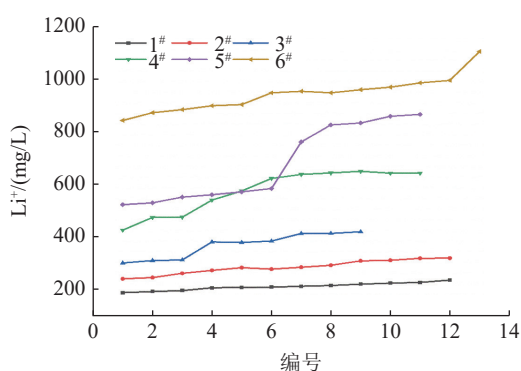


图4 各级盐田蒸发过程中 Li^+ 浓度

Fig.4 Li^+ concentration in evaporation process of all levels of salt pans

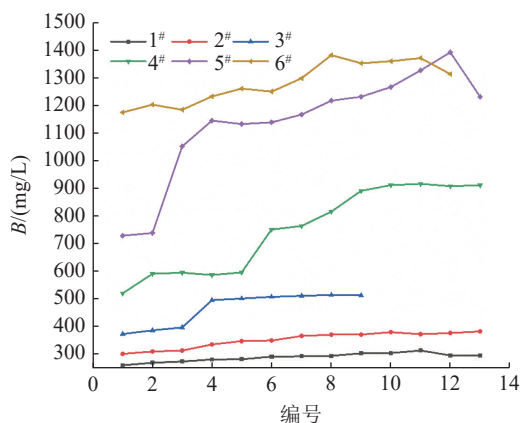


图5 各级盐田蒸发过程中 B 浓度

Fig.5 Boron concentration in evaporation process of all levels of salt pans

2.2 水氯镁石组成及杂质含量

每级盐田蒸发浓缩 Li^+ 含量达到浓缩点时, 液相依次导入下一级盐田继续蒸发。取固样分析离子含量, 结果见表5。

由各级盐田固样分析结果可知, 各级盐田 $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的平均品位大于 95%。固相 SO_4^{2-} 含量无明显规律, SO_4^{2-} 主要以硫酸钙晶体存在于固相中, 1[#]~6[#]盐田水氯镁石中 SO_4^{2-} 含量均远小于 2 000 mg/L, 满足电解要求。随着蒸发过程进行,

卤水中 Ca^{2+} 浓度不断增加, 导致 SO_4^{2-} 含量不断降低, 两者浓度积与石膏溶度积相近, 提高老卤中 Ca^{2+} 有利于 SO_4^{2-} 浓度降低, 从而降低水氯镁石中 SO_4^{2-} 杂质含量。水氯镁石中 B 含量随液相中 B 含量升高而增加, 表明 B 主要通过母液夹带存在于水氯镁石固相中。相对于原盐田摊晒水氯镁石关键杂质离子含量与控制量 ($\text{B} \leq 100 \text{ mg/L}$ 、 $\text{SO}_4^{2-} \leq 2\,000 \text{ mg/L}$) 相比, 水氯镁石中 SO_4^{2-} 、B 的浓度降低幅度均值分别为 89.6%、59.9%, 能够显著降低后续电解金属镁精制水氯镁石过程氯化钡、B 吸附剂等原料消耗, 降低水氯镁石原料杂质去除过程成本, 提高企业经济效益。

表5 盐田水氯镁石矿组成/%
Table 5 Composition of bischofite in salt pans

名称	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	B (1)	干基 MgCl_2
1 [#] 盐田	11.38	33.69	0.0144	6.5×10^{-4}	45.13
2 [#] 盐田	11.33	33.78	0.0269	2.3×10^{-3}	44.93
3 [#] 盐田	11.45	34.19	0.0079	4.0×10^{-3}	45.55
4 [#] 盐田	11.29	33.59	0.0341	4.6×10^{-3}	45.05
5 [#] 盐田	11.44	33.45	0.0253	8.7×10^{-3}	45.41
6 [#] 盐田	11.41	33.39	0.0152	1.2×10^{-2}	45.25
平均	11.38	33.68	0.0206	5.37×10^{-3}	45.22

对各级盐田获得的水氯镁石矿依次经 2.36、1.40、0.84、0.42 mm 标准筛完成筛分, 不同粒径水氯镁石组成和粒度分布见表6和图6。由图6可知, 分级盐田蒸发得到的水氯镁石粒径+0.25 mm 80% 以上, 粒度较大。由于 Li^+ 和 B 在蒸发前中期和后期的浓缩速度不同, 1、2 和 3 级盐田蒸发时间较长, 水氯镁石平均粒径均高于 4、5 和 6 级盐田, 除此之外, 1、2、3 级盐田水氯镁石品位也稍高于 4、5、6 级盐田, 粒径-0.25 mm 水氯镁石品位低于其他粒径。

表 6 各级盐田水氯镁石矿离子含量/%
Table 6 Composition of bischofite in different levels of salt pans

粒径/mm	1 [#]				2 [#]				3 [#]			
	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	B	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	B	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	B
+2.36	11.19	33.58	0.0124	0.0026	11.29	33.20	0.0182	0.0030	11.24	33.61	0.0083	0.0053
-2.36+1.40	11.46	33.73	0.0096	0.0009	11.32	33.57	0.0166	0.0036	11.50	33.81	0.0045	0.0041
-1.40+0.84	11.43	34.06	0.0068	0.0002	11.53	34.74	0.0106	0.0015	11.57	34.62	0.0020	0.0036
-0.84+0.42	11.38	33.54	0.0072	0.0002	11.47	33.89	0.0053	0.0021	11.61	34.35	0.0000	0.0033
-0.42	11.45	33.55	0.0669	0.0008	11.06	33.48	0.0974	0.0009	11.34	34.54	0.0491	0.0031
平均值	11.38	33.69	0.0206	0.0009	11.33	33.78	0.0296	0.0022	11.45	34.19	0.0128	0.0039

粒径/mm	4 [#]				5 [#]				6 [#]			
	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	B	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	B	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	B
+2.36	10.99	32.11	0.0270	0.0074	11.45	32.94	0.0442	0.0175	11.16	32.31	0.0168	0.0163
-2.36+1.40	11.17	33.35	0.0206	0.0056	11.48	33.26	0.0322	0.0120	11.48	33.27	0.0143	0.0106
-1.40+0.84	11.53	34.62	0.0307	0.0024	11.55	33.55	0.0236	0.0049	11.50	33.94	0.0152	0.0082
-0.84+0.42	11.53	33.95	0.0144	0.0014	11.49	33.91	0.0169	0.0022	11.69	33.68	0.0120	0.0064
-0.42 mm	11.22	33.91	0.1509	0.0013	11.24	33.58	0.0021	0.0021	11.21	33.73	0.0119	0.0105
平均值	11.29	33.59	0.0487	0.0036	11.44	33.45	0.0238	0.0077	11.41	33.87	0.0140	0.0140

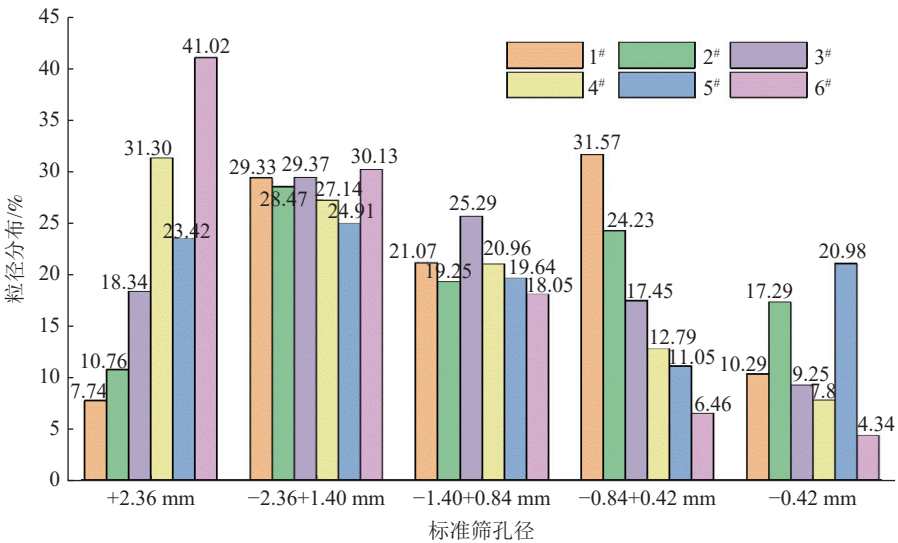


图 6 各级盐田水氯镁石矿粒径分布
Fig.6 Particle size distribution of bischofite in different levels of salt pans

2.3 物料衡算

卤水在日晒盐田中自然蒸发时，不可避免会有漏失，在实际分离扒盐操作中也会引起带失，致使浓缩残存卤水量与小型自然蒸发结果之间不完全相符。表 7 中列出了日晒蒸发过程中每一级盐田的进卤量、出卤量、成矿量和 Li⁺收率等各项参数的统计结果。

由密度 1.324 3 g/cm³，Li⁺浓度为 188.27 mg/L 的原料卤水经过 6 级盐田实际蒸发浓缩至 1 105.00 mg/L，浓缩 5.9 倍。说明通过多级精控蒸发工艺，

天然蒸发老卤，能够高浓度提锂卤水原料，同时最大程度提高浓缩过程 Li⁺收率，若不计机械损失，Li⁺总回收率为 65.97%，B 总回收率 50.50%。

实验过程中损失水率较大的原因主要有：

（1）盐池在经导卤后挖取盐矿时池底铺设的防渗漏膜易被划破；（2）在倒卤过程中由于现场实验设备条件有限，上级池内卤水很难能够全部泵入下级池中；（3）进行固液分离操作时，由于堆放时间较短，水氯镁石矿中夹带母液量比较多，也导致了一定的损失。

表7 盐田日晒蒸发过程中物料衡算
Table 7 Material balance in evaporation process of salt pan

	密度/(g/cm ³)	Li ⁺ /(mg/L)	B/(mg/L)	进卤量/t	Li ⁺ 浓缩倍数	成矿量/t	出卤量/t	Li ⁺ 回收率/%
原料卤水	1.324 3	188.27	259.04					100.00
1 [#]	1.339 3	236.15	294.75	1 601.0	1.25	300.1	1220.0	94.73
2 [#]	1.347 9	319.50	377.50	1 220.0	1.35	296.5	844.4	88.11
3 [#]	1.339 9	419.75	511.75	864.7	1.31	187.3	607.1	83.73
4 [#]	1.348 1	642.75	910.00	629.4	1.53	197.2	357.4	75.01
5 [#]	1.339 2	865.75	1 017.50	387.7	1.35	86.9	247.4	70.40
6 [#]	1.350 5	1 105.00	1 311.50	265.8	1.28	50.74	183.1	65.97

3 结 论

(1) 首次在察尔汗盐湖盐田区历时一年开展了察尔汗盐湖提钾老卤盐田日晒工艺扩大实验研究,研究了卤水在盐田自然蒸发过程中B、Li⁺的浓缩富集规律。蒸发前期Li⁺和B的浓度增长较为缓慢,到蒸发中后期,Li⁺的富集速度明显加快,液相中的Li⁺浓度从188.27 mg/L蒸发至1 105.00 mg/L。

(2) 采用多级盐田蒸发结晶、分步分离的方法,获得了粒径+0.25 mm 80%以上高品质的水氯镁石,以及Li⁺浓度1 105.00 mg/L的富锂卤水;

(3) 在实际生产过程中,可提高盐田建设成本投入进行设备设施提升,如平整池体,铺设结实耐用的防漏衬垫,再通过盐田工艺优化,减少盐田蒸发过程中的损失水量,从而有效提高生产效率。

参考文献:

[1] 张苏江,张琳,姜爱玲,等.中国盐湖资源开发利用现状与发展建议[J].无机盐工业,2022,54(10):13-21.
ZHANG S J, ZHANG L, JIANG A L, et al. Current situation and development suggestions of development and utilization of salt lake resources in China[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2022, 54(10):13-21.
[2] 熊增华,王石军,薛红魁.察尔汗镁资源开发SWOT分析及发展构想[J].矿产综合利用,2021(5):45-51.
XIONG Z H, WANG S J, XUE H K. SWOT analysis and development conception of magnesium resources development in Qarhan[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(5):45-51.
[3] 李燕,王敏,赵有璟,等.盐湖卤水锂资源提取技术及开发现状[J].盐湖研究,2023,31(2):71-80.
LI Y, WANG M, ZHAO Y J, et al. Technology and development of lithium extraction from salt lake brine[J]. Journal of Salt Lake Research, 2023, 31(2):71-80.
[4] 熊增华,王兴富,王石军,等.青海盐湖锂资源综合利用规模探讨[J].盐湖研究,2020,28(4):125-131.
XIONG Z H, WANG X F, WANG S J, et al. Discussion on comprehensive utilization scale of lithium resources in Qinghai salt lakes[J]. Journal of Salt Lake Research, 2020, 28(4):125-131.

[5] 徐正震,梁精龙,李慧,等.含锂资源中锂的提取研究现状及展望[J].矿产综合利用,2021(5):32-37.

XU Z Z, LIANG J L, LI H, et al. Research status and prospects of lithium extraction from lithium containing resources[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(5):32-37.

[6] 杨小东,赵宏彦.内陆盐湖滩晒盐田的设计与应用[J].四川建材,2021,47(6):240-241.

YANG X D, ZHAO H Y. Design and application of inland salt lake beach salt field[J]. Sichuan Building Materials, 2021, 47(6):240-241.

[7] 王冀洛,乜贞,樊馥,等.西台吉乃尔盐湖盐田与模拟蒸发过程卤水钾、锂的损失研究[J].无机盐工业,2023,55(5):31-38.

WANG J M, NIE Z, FAN F, et al. Study on potassium and lithium resource loss in brine of west taijinar salt lake and simulated evaporation process[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2023, 55(5):31-38.

[8] 陈文祥.盐田工艺控制管理系统的初探与研究[J].盐科学与化工,2021,50(7):29-32.

CHEN W X. Preliminary exploration and research on process control and management system of salt field[J]. Journal of Salt Science and Chemical Industry, 2021, 50(7):29-32.

[9] 乜贞,伍倩,丁涛,等.中国盐湖卤水提锂产业化技术研究进展[J].无机盐工业,2022,54(10):1-12.

NIE Z, WU Q, DING T, et al. Research progress on industrialization technology of lithium extraction from salt lake brine in China[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2022, 54(10):1-12.

[10] 王琪,赵有璟,刘洋,等.高镁锂比盐湖镁锂分离与锂提取技术研究进展[J].化工学报,2021,72(6):2905-2921+3433.

WANG Q, ZHAO Y J, LIU Y, et al. Recent advances in magnesium/lithium separation and lithium extraction technologies from salt lake brine with high magnesium/lithium ratio[J]. CIESC Journal, 2021, 72(6):2905-2921+3433.

[11] 牛自得,程芳琴.水盐体系相图及其应用[M].天津:天津大学出版社,2002.

NIU Z D, CHENG F Q. Phase diagram of water and salt system and its application[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2002.

[12] 中国科学院青海盐湖研究所分析室.卤水和盐的分析方法[M].第二版.北京:科学出版社,1988.

Qinghai Salt Lake Research Institute. Chinese Academy of Sciences. Methods for the analysis of brine and salt[M]. 2nd Ed. Beijing: Science Press, 1988.

Expansion Experiment of Multi-stage Precision Control Process for Lithium Enrichment in Qarhan Salt Lake Brine

LYU Xuecheng¹, SHI Zhonglu², TANG Yongquan³, LI Zhiwei^{4,5}

(1.Qinghai Salt Lake Magnesium Industry Co., Ltd., Golmud 816000, Qinghai, China; 2.Qinghai Salt Lake Industry Group Co., Ltd., Golmud 816000, Qinghai, China; 3.Qinghai Salt Lake Yuantong Potash Fertilizer Co., Ltd., Golmud 816000, Qinghai, China; 4.Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lake, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, Qinghai, China; 5.Key Laboratory of Salt Lake Resources Chemistry of Qinghai Province, Xining 810008, Qinghai, China)

Abstract: This is an article in the field of mining engineering. In view of the concentration and enrichment of lithium ions in old halide in Qerhan Salt Lake, the expansion experiment of the multi-stage precision control process of old halide enrichment was completed by means of evaporation crystallization and step separation. The enrichment law of lithium and boron during evaporation was studied. The concentration of lithium ions reached more than 1 g/L, and high quality hydrochloromagnite was obtained. The material balance of the evaporation process of the salt pan was carried out, and the actual halogen yield and lithium yield of each phase of salt extraction were obtained, as well as the production capacity of the sun salt pan and the area distribution ratio of each level of the salt pan, which can provide reliable data support for the comprehensive development and utilization of potassium old brine extraction in Qerhan Salt Lake in the future.

Keywords: Mining engineering; Salt lake brine; Lithium; Bischofite; Existing state; Salt field process

////////////////////////////////////
(上接第 26 页)

Development Status and Research Progress of Unconventional Brine-type Lithium Resources

LIU Xue, ZHENG Junwei, LIU Wenhao, WANG Liwei

(Literature and Information Center of Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730010, Gansu, China)

Abstract: This is an article in the field of mining engineering. As an important battery raw material in the field of new energy, the global demand for lithium is accelerating. For a long time, China has needed to import a large amount of lithium raw materials, and there is still expected to be a significant demand gap in the future. Unconventional brine sources such as geothermal brine, oil and gas field brine, and desalination wastewater in seawater containing contain considerable lithium resources and may become an effective supplement to conventional lithium resources. As a green and sustainable method for extracting lithium resources, the development of unconventional brine-type lithium resources faces significant opportunities. The discovery of abundant unconventional brine-type lithium resources in Sichuan, Xizang, Yunnan and other places in China will be of great help to solve the shortage of lithium raw material supply in China. By summarizing the current status and progress of unconventional brine-type lithium resource development and its key technologies both domestically and internationally, this article provides a reference for the development of unconventional brine-type lithium resources in China.

Keywords: Mining engineering; Lithium; Geothermal brines; Oil (gas) fieldbrines; Seawater; Critical minerals; Strategic minerals