

中国盐湖锂资源的产业化现状

——以西台吉乃尔盐湖和扎布耶盐湖为例

乜 贞^{1,2,3)}, 卜令忠^{1,2,3)}, 郑绵平^{1,2,3)}

1)中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

2)国土资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037;

3)中国地质科学院盐湖与热水资源研究发展中心, 北京 100037

摘 要: 锂对国民经济和国家安全具有重要意义, 是 21 世纪的能源金属。近 10 年, 中国主要从国外进口碳酸锂产品。中国是一个多盐湖的国家, 盐湖锂占锂资源工业总储量的 85%。现代第四纪盐湖主要分布在我国西北的青海、西藏、新疆和内蒙古四省区, 具有很好的开发前景。经过多年科研后, 目前国内已经在西台吉乃尔和扎布耶两个盐湖建立了卤水提锂产业。本文对比研究了这两个盐湖资源状况和地理气候条件, 以及由此而决定的盐湖资源开发工艺流程, 探讨了其工艺优化方向。并指出这两个盐湖具有锂资源储量大, 品位高的优势, 但是受盐湖类型或地理气候条件限制, 工艺上有待改善。建议继续加强对盐湖开发技术优化和对盐湖提锂产业的扶持。

关键词: 盐湖; 锂; 产业化; 西台吉乃尔盐湖; 扎布耶盐湖

中图分类号: P967; TQ131.11; O611.65 文献标志码: A 文章编号: 1006-3021(2010)01-095-07

Lithium Resources Industrialization of Salt Lakes in China: a Case Study of the Xitaijinaier Salt Lake and the Zabuye Salt Lake

NIE Zhen^{1,2,3)}, BU Ling-zhong^{1,2,3)}, ZHENG Mian-ping^{1,2,3)}

1) Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environment, Ministry of Land and Resources, Beijing 100037;

3) R & D Center for Saline Lakes and Epithermal Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

Abstract: Lithium, an energy metal of 21st century, is of great significance to domestic economy and national security. In the past decade, China has mainly relied on import to meet domestic requirement of lithium carbonate products. Salt lakes are well developed in China, which possess 85% of the total industrial lithium reserves. The Quaternary salt lakes, which have good exploitation prospects, are mainly distributed in northwestern China regions such as Qinghai, Tibet, Xinjiang and Inner Mongolia. Through years of scientific research, the extraction of lithium products from salt lake brine has been achieved industrially in the Xitaijinaier Salt Lake and the Zabuye Salt Lake located in Qinghai and Tibet respectively. The resources, geography and climatic conditions as well as climate-dependant exploitation process flows of the two salt lakes are summarized and compared with each other in this paper, with a discussion on their optimized processing flows. Though the two salt lakes have the superiority of big reserves and high content of lithium resources, their process flows still need to be improved because of limitation of salt lake types and geographic and climatic conditions. The support to the process optimization of salt lake exploitation and salt lake-based lithium industry need to be further emphasized.

Key words: salt lake; lithium; industrialization; Xitaijinaier Salt Lake; Zabuye Salt Lake

本文由中国地质科学院矿产资源研究所基金项目 K0722 和中国地质科学院重点实验室项目 C0903 资助。

收稿日期: 2009-11-16; 改回日期: 2010-01-20。

第一作者简介: 乜贞, 男, 1972 年生。高级工程师。主要从事盐湖资源综合利用研究。通信地址: 100037, 北京市百万庄大街 26 号。

电话: 010-68992231; Email: nieezhen518@163.com。

锂是对国民经济及国防具有重要意义的元素。半个世纪以来, 锂在玻璃和陶瓷工业、有色冶金行业及空调、医药、有机合成等方面获得了广泛应用。近年来, 由于信息技术和电动汽车的迅猛发展, 锂离子电池成为目前发展最为迅速的领域之一(赵健等, 2000)。随着锂合金的发展, 锂在航天航空工业得到了大量应用。随着全球矿物能源的逐渐枯竭, 和对能源安全的担忧, 世界强国普遍重视对核聚变反应电站和锂动力汽车的研究和推广。锂已经成为二十一世纪能源和轻质合金的理想材料, 被称为推动世界前进的重要元素(袁复怀, 1999)。

锂在自然界中主要以固体矿物资源和液体矿床资源存在。已知锂矿物有 150 多种, 其中主要锂矿石为锂辉石、锂云母、透锂长石等。液态锂主要附存于盐湖卤水、海水、油田水和井卤中。全球锂资源工业储量约为 1 100 万吨(以金属计), 其中盐湖锂资源占 69% 以上(宋彭生, 2000)。

中国是一个多盐湖的国家, 全国多数省区均有古代或现代盐湖分布。现代第四纪盐湖主要分布在我国西北的青海、西藏、新疆和内蒙四省区, 大小盐湖有一千多个(郑喜玉等, 2002)。现代盐湖中贮藏着大量国民经济所必需的天然无机盐资源和生物资源(郑绵平, 1999; 孔凡晶等, 2007), 其中最重要的化学元素是钾、硼和锂。钾盐是重要的化工原料之一, 在工业上有着广泛的用途, 但是对农业生产的作用更加重要。目前, 中国建立了青海察尔汗钾肥生产基地和新疆罗布泊硫酸钾生产基地, 年产钾肥能力达到 300 多万吨, 但还是远远满足不了国内钾肥需求(陈永志等, 2001; 李浩等, 2008)。硼及其化合物在国民经济建设中的用途也极为广泛(高世扬等, 2007)。中国盐湖锂资源占锂工业储量的 85%, 研究盐湖锂资源及其开发技术, 并将其推向产业化, 具有十分重要的意义。

国际上前期基本开采固体锂资源, 俗称硬岩锂业。九十年代中期, 中国开始成为锂工业大国, 但是 1997 年智利阿塔卡玛盐湖卤水提锂成功后, 其低廉的价格极大地冲击了中国的锂工业(马培华等, 1998; 封国富等, 2003; 李昱昀等, 2005)。从此时起, 国内盐湖提锂技术研究和产业化也加快了步伐。

中国前期盐湖锂资源的开发研究主要集中在青海台吉乃尔盐湖和西藏扎布耶盐湖, 两个盐湖都经过了二十多年的科研和产业化过程(张宝全等, 1994a, 1994b; 杨建元等, 1995, 1996; 刘喜方等, 1999; 乜贞等, 2001; 郑绵平, 2001; 赵元艺等, 2003,

2005; 罗莎莎等, 2004)。2005 年扎布耶盐湖碳酸锂矿和精加工厂投产, 2007 年西台吉乃尔盐湖碳酸锂生产线投产(黄维农等, 2008), 至此, 中国建立了两家盐湖提锂企业。本文拟对比研究这两个盐湖的资源状况和地理气候条件, 以及由此而决定的盐湖资源开发工艺流程, 并探讨其工艺优化方向。

1 资源状况和地理气候环境

1.1 西台吉乃尔盐湖

西台吉乃尔盐湖位于青海柴达木盆地中部, 地理位置: 东经 $93^{\circ}13'-93^{\circ}34'$, 北纬 $37^{\circ}33'-37^{\circ}53'$, 行政区划属海西州大柴旦镇, 距离青海化工城市柴达木仅 160 km, 交通便利。西台吉乃尔盐湖海拔高度 2 680 m, 为典型的内陆干旱气候, 年均气温 4.47, 蒸发强降雨少, 淡水年蒸发量为 2505.9 mm, 年降水量为 17.8 mm(曹文虎等, 2004)。

西台吉乃尔盐湖是一个以液体锂矿为主、固液共生的特大型锂矿床, 同时还富产钾肥、硼矿、镁矿、石盐等矿产。液体矿床主要由四部分组成: 地表卤水矿、晶间潜卤水矿层、孔隙潜卤水矿层和晶间承压卤水矿层。锂资源量以 LiCl 计为 308 万吨, 可采储量约 130 万吨。钾盐资源量以 KCl 计为 2609 万吨, B_2O_3 资源量为 163 万吨(魏新俊, 2002; 曹文虎等, 2004)。

表 1 西台吉乃尔盐湖卤水矿一览表
Table 1 Brine ore data of the Xitaijinaier Salt Lake

矿种	LiCl 品位(g/L)	矿化度(g/L)	相对密度	水化学类型	作者
地表卤水	3.82	326.2-345.2	1.218	硫酸镁亚型	曹文虎等, 2004
晶间卤水	3.85	350.0-360.0	1.245	硫酸镁亚型	曹文虎等, 2004
孔隙卤水	3.60	320.0-350.0	1.236	氯化物型	曹文虎等, 2004
晶间承压卤水	1.88	320.0-330.0	1.225	硫酸镁亚型	曹文虎等, 2004

1.2 扎布耶盐湖

扎布耶盐湖为一富锂碳酸盐型盐湖, 面积 247 km², 位于西藏高原腹地, 地理位置: 东经 $84^{\circ}04'$, 北纬 $31^{\circ}21'$, 行政区划属日喀则地区仲巴县。扎布耶盐湖距离拉萨市 1100 km, 道路多为沙土路面, 交通不便。湖面海拔 4 422 m, 年降水量 196.2 mm, 年蒸发量 2269.1 mm, 年平均气温 -0.4 (郑绵平等, 1989)。扎布耶盐湖富含锂、钾、硼、铷、铯、溴等多种矿物元素, 含量较高, 属国内外罕见。

表 2 扎布耶盐湖卤水矿一览表
Table 2 Brine ore data of the Zabuye Salt Lake

矿种	Li ⁺ 品位 (g/L)	矿化度 (g/L)	相对密度	水化学类型
南湖地表卤水	0.42-0.71	250.0-430.0	1.250-1.310	碳酸盐型
南湖晶间卤水	0.92-1.61	287.0-460.0	1.280-1.330	碳酸盐型
北湖地表卤水	0.89-1.32	330.0-440.0	1.260-1.280	碳酸盐型

注: 表中数据据中国地质科学院盐湖中心, 2000. 西藏自治区仲巴县扎布耶盐湖资源勘查报告(内部资料); 曹文虎等, 2004.

扎布耶盐湖分为南、北两湖, 北湖为卤水湖, 矿产主要以地表卤水为主, 南湖为半干盐湖, 以地表卤水和晶间卤水形式共存。扎布耶盐湖水化学类型属碳酸盐型, 卤水矿化度高, 湖水演化已经达到石盐饱和阶段, 矿化度随季节变化幅度较大, 夏季高, 冬季低。卤水中 Li⁺浓度高, 在盐湖中呈现不同分布带, 总体为北湖地表卤水和南湖晶间卤水 Li⁺浓度比较高, 南湖地表卤水 Li⁺浓度比较低。扎布耶盐湖已勘探南湖地表卤水、晶间卤水和北湖地表卤水储量, 锂资源量以 Li₂CO₃ 计为 183 万吨, 钾肥资源量以 KCl 计为 1592 万吨, B₂O₃ 资源量为 963 万吨(曹文虎等, 2004)。

2 资源、环境条件对比

2.1 资源优势

西台吉乃尔盐湖主要以液体矿为主, 固液共存, 是一锂、硼的大型矿床, 具有埋藏浅, 品位高的特点, 易于进行资源综合利用开发, 钾、硼资源开发已形成成熟工艺。该盐湖资源缺点是镁锂比高达 50 以上, 镁锂分离是其工艺开发的难点所在。

扎布耶盐湖是一液体矿为主、固液共存的锂、硼大型矿床。该矿床主要为地表卤水, 品位高, 易于开发。卤水水化学类型为碳酸盐型, 镁锂比很低, 只有 0.02, 因此, 锂资源开发工艺可以比较简单。

2.2 开发条件

西台吉乃尔盐湖湖面海拔 2680 m, 气候地理条件尚可, 煤、电、天然气供给方便, 太阳能资源丰富, 交通便利, 向东 210 km 到达达布逊火车站, 距离青海大型化工城市格尔木也仅 160 km。这些自然地理条件和该湖资源特点, 使该湖易于形成钾、硼、锂、镁资源综合利用的开发工艺路线, 并且可以在湖区或在格尔木市生产高附加值精细化工产品。

扎布耶盐湖湖面海拔 4422 m, 气候条件恶劣,

盐湖当地缺乏矿物能源, 没有电力资源。但是, 扎布耶盐湖当地有丰富的太阳能、风能和冷资源, 利于使用盐田技术晒制卤水。扎布耶盐湖交通不便, 距离西藏首府拉萨 1100 km, 距离格尔木市 1750 km。受当地交通条件和地理气候条件所限, 扎布耶盐湖开发应该优先考虑高附加值矿种, 采取在湖区生产矿产品, 在内地进行化工精加工的产品策略。

3 资源技术路线

3.1 西台吉乃尔盐湖

西台吉乃尔盐湖卤水水化学特性主要为硫酸盐型, 如图 1 所示, 卤水组成点在 Na⁺、K⁺、Mg²⁺//Cl⁻、SO₄²⁻-H₂O 五元水盐体系 25 °C 介稳相图中位于泻利盐相区(盐类矿物见表 3, 下同), 靠近软钾镁矾和钾石盐相区共结线部位(金作美等, 1980)。该卤水 25 °C 等温蒸发析盐顺序为: 石盐、泻利盐、软钾镁矾、钾石盐、光卤石、水氯镁石(张宝全等, 1994a, 1994b)。西台吉乃尔盐湖卤水中锂离子含量较高, 但是其镁锂比达到 50 以上, 镁锂分离是西台吉乃尔盐湖提锂工艺的关键环节。针对这一难点, 中国科学院青海盐湖研究所、成都理工大学等单位做了大量的科研工作, 终于攻克了这个难关。西台吉乃尔盐湖由中信国安集团公司开发, 在锂盐的生产工艺中采用了成都理工大学的“煅烧法”来分离锂、镁。煅烧法的原理是把锂接近饱和的硫酸盐型卤水蒸干, 让锂、镁分别以硫酸锂和水氯镁石盐矿物与少量其它盐混合结晶析出, 然后将该混盐在 550 °C 以上温度煅烧, 使水氯镁石脱水形成 MgO。然后, 用淡水浸取煅烧后产物, 因 MgO 不溶于水, 而硫酸锂进入

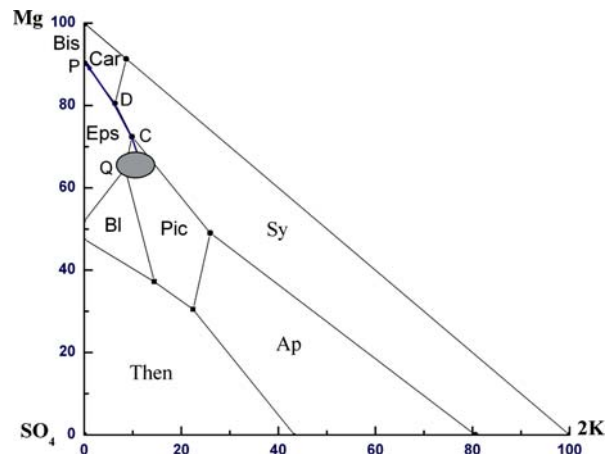


图 1 西台吉乃尔盐湖卤水在 Na⁺、K⁺、Mg²⁺//Cl⁻、SO₄²⁻-H₂O 五元体系 25 °C 介稳相图中的走向
Fig. 1 Crystallization sequence of brine from the Xitaijinaier Salt Lake in the metastable phase diagram of the Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ and H₂O system

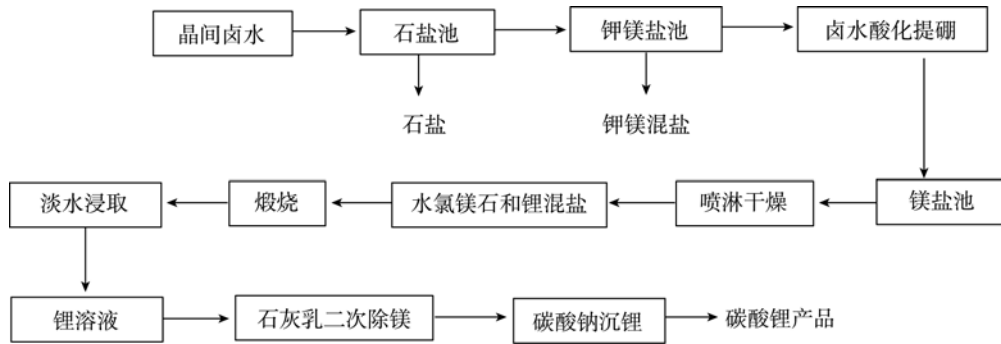


图 2 西台吉乃尔盐湖卤水沉锂工艺路线图

Fig. 2 Flow chart for producing lithium carbonate with Xitaijinaier Salt Lake brine

表 3 本文中有关盐类矿物一览表
Table 3 Salt minerals in this paper

英文名称	英文缩写	矿物名称	化学分子式
Aphthitalite	Ap	钾芒硝	$K_3Na(SO_4)_2$
Bischofite	Bis	水氯镁石	$MgCl_2 \cdot 6H_2O$
Bloedite	Bl	白钠镁矾	$Na_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 4H_2O$
Borax	Bo	硼砂	$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$
Burkeite	Bu	碳钠矾	$Na_6CO_3(SO_4)_2$
Carnallite	Car	光卤石	$KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$
Epsomite	Eps	泻利盐	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$
Halite	H	石盐	$NaCl$
Mirabilite	M	芒硝	$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$
Natron	Nt	泡碱	$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$
Picromerite	Pic	软钾镁矾	$K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 6H_2O$
Sodium Carbonate Heptahydrate	Sch	七水碳酸钠	$Na_2CO_3 \cdot 7H_2O$
Sylvite	Sy	钾石盐	KCl
Thenardite	Then	无水芒硝	Na_2SO_4
Thermomartite	Th	水碱	$Na_2CO_3 \cdot H_2O$
Trona	Tr	天然碱	$Na_2CO_3 \cdot NaHCO_3 \cdot 2H_2O$
Zabuyelite	Zb	扎布耶石	Li_2CO_3

液相, 从而使镁、锂得到分离(杨建元等, 1995; 祝增虎等, 2008)。

中信国安集团公司的硫酸钾镁肥项目于 2003 年动工, 针对西台吉乃尔盐湖的资源特点和地理气候条件, 计划建设年产硫酸钾镁肥 30 万吨、硼酸 2 万吨、碳酸锂 1 万吨生产线, 首先开发晶间承压卤水矿。西台生产工艺概图见图 2。其流程是将晶间承压卤水抽至石盐池, 自然蒸发晒制使石盐析出, 至软钾镁矾饱和; 将卤水倒入钾镁盐池, 析出钾镁混盐, 然后卤水酸化提硼; 卤水倒入镁盐池, 蒸发至硫酸锂接近饱和, 母液喷淋干燥, 使水氯镁石和硫酸锂混盐析出, 煅烧使水氯镁石脱水形成 MgO , 冷却至常温, 然后用淡水浸取过滤得到锂溶液, 用石灰乳二次除镁, 母液浓缩后用碳酸钠沉淀锂, 分离得到工业

级碳酸锂产品(杨建元等, 1995; 祝增虎等, 2008)。

3.2 扎布耶盐湖

扎布耶盐湖卤水水化学特性为碳酸盐型, 夏季卤水在 $Na^+、K^+//Cl^-、CO_3^{2-}、SO_4^{2-} - H_2O$ 25 介稳相图中位于钾芒硝区, 卤水 25 等温蒸发盐矿物析出顺序为石盐、钾芒硝、扎布耶石、水碱、钾石盐, 见图 3(房春晖等, 1991; 杨建元等, 1996)。冬季卤水在五元介稳相图中位于钾石盐与芒硝及泡碱的交界处。卤水在冬季自然蒸发过程中的析盐顺序为: 石盐、钾石盐、芒硝、天然碱、泡碱、硼砂、扎布耶石(也贞等, 2005)。在扎布耶盐湖的开发工艺中, 制卤阶段利用了当地冬季丰富的冷资源, 从卤水中除去大量芒硝和泡碱, 从而使卤水中的锂得到快速富集。在结晶阶段, 主要采用了太阳池技术, 利用青藏高原丰富的太阳能资源来加热锂饱和卤水, 直接得到品位 70% 左右的碳酸锂矿产品。太阳池又叫盐梯度太阳池, 为一个天然或人工的贮水池, 一般由三个区域构成, 最上层区域称为上对流层, 是一层

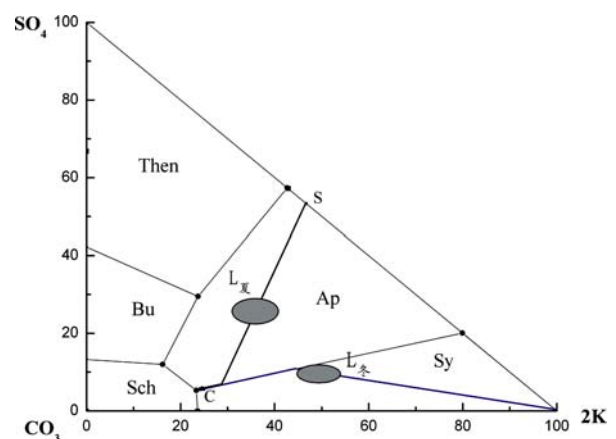


图 3 扎布耶盐湖卤水在 $Na^+、K^+//Cl^-、CO_3^{2-}、SO_4^{2-} - H_2O$ 25°C 五元介稳相图中的走向

Fig. 3 Crystallization sequence of brine from the Zabuye Salt Lake in the metastable phase diagram of the $Na^+、K^+、Cl^-、CO_3^{2-}、SO_4^{2-}$ and H_2O system

淡水, 中间区域称为浓度梯度层, 下层是贮能区。在浓度梯度层中, 盐溶液的比重随池深逐渐增大, 使该层没有对流运动。所以浓度梯度层就具有防止下层热量向上散发的作用, 使太阳能量蓄存于池底储能区, 是太阳池关键所在。卤水在太阳池内可升温 40~60 , 满足碳酸锂高温结晶的条件, 使碳酸锂能够集中沉淀, 图 4 所示为扎布耶正在生产中的结晶池。

扎布耶盐湖由西藏矿业发展股份有限公司开发, 其锂资源项目于 2003 年动工, 项目建设地分西藏仲巴县扎布耶湖区和甘肃白银市两处。受扎布耶盐湖地理气候条件和交通条件所限, 目前, 只考虑开发锂, 湖区产品为碳酸锂精矿, 其中碳酸锂含量为 70%, 白银锂厂产品为工业级碳酸锂和单水氢氧化锂, 生产规模为年产 5000 t 工业级碳酸锂(黄维农等, 2008)。湖区生产原料选用北湖地表卤水, 该卤水已经达到石盐饱和阶段。扎布耶盐湖的生产工艺概图见图 5。其流程为将盐湖地表卤水抽至预晒池, 自然蒸发析出石盐, 至钾盐饱和, 在冬季并已清除一部分泡碱和芒硝。然后将卤水倒入晒池, 继续蒸发

至 Li_2CO_3 接近饱和。将 Li_2CO_3 饱和卤水抽入结晶池, 利用太阳池原理升温加热卤水, 结晶析出锂精矿, 其碳酸锂品位达到 70%。锂精矿干燥后送白银锂厂精加工, 尾卤返回晒池循环利用。



图 4 正在运行中的扎布耶盐湖结晶池
Fig. 4 Crystallization pond in operation at Zabuye Salt Lake

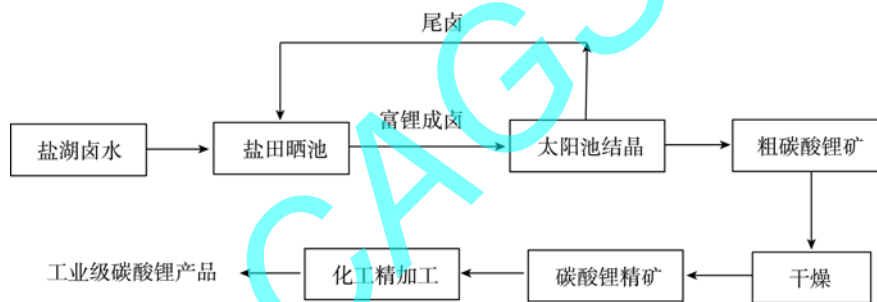


图 5 扎布耶盐湖卤水沉锂工艺路线图
Fig. 5 Flow chart for producing lithium carbonate with Zabuye salt lake brine

4 技术优化方向

西台吉乃尔盐湖的资源劣势是其高镁锂比, 但是, 盐湖周边有方便的交通, 丰富的电、气供给。因此, 在实现镁锂分离时, 主要采用煅烧法, 巧妙地让镁和锂分别进入固液相, 从而实现分离。但是, 该工艺方法要产生大量氯化氢气, 容易腐蚀设备, 增加成本。而且, 该法需要消耗大量矿物能源。因此, 从节能减排、加强环保和增加企业效益的方向考虑, 还需要对该分离方法进行优化, 并加强设备选型。

扎布耶盐湖具有很好的资源优势, 但是受恶劣的地理气候和交通条件制约, 在形成盐湖资源的综合利用方面有一定困难。扎布耶盐湖目前只有单一锂产品, 在生产锂产品的过程中浪费了钾、硼等资源, 还会造成环保问题。而扎布耶盐湖碳酸锂的储

量只有氯化钾储量的约八分之一。因此, 从提倡资源综合利用, 可持续发展的角度, 考虑进行扎布耶锂、钾、硼资源综合利用开发是一条必经之路。

5 结语

中国是一个多盐湖的国家, 在我国西北的青海、西藏、新疆和内蒙古四省区分布着上千个盐湖, 这些盐湖有很好的开发前景。我国盐湖锂资源占锂资源工业总储量的 85%, 研究和开发锂盐湖, 对于我国锂产业的发展具有重要的意义。经过多年科研后, 西台吉乃尔盐湖和扎布耶盐湖实现了卤水提锂产业化。这两个盐湖锂资源储量大, 品位高, 而且还富含多种其它矿物资源, 可以实现资源综合利用。由于两个盐湖资源状况和地理气候条件各异, 采取了具有各自特点的不同开发工艺路线。但是, 中

国锂盐湖所处的特殊地理位置和其卤水特性使提锂工艺路线还有许多有待改进之处,西台吉乃尔盐湖应加强节能减排和设备选型,扎布耶盐湖应开展锂、钾、硼资源综合利用开发。

迄今,中国的锂产品市场受着国外集团公司的控制,价格为国外所左右。通过国内盐湖提锂研究和产业化过程,以及技术优化升级,中国必将由锂盐进口国变成出口国,参与国际锂盐的激烈竞争。建议继续加强对盐湖开发技术优化和提锂产业的扶持,加快我国盐湖锂业的发展步伐。

参考文献:

- 曹文虎,吴蝉. 2004. 卤水资源及其综合利用技术[M]. 北京:地质出版社, 82-189.
- 陈永志,王弭力,杨志琛. 2001. 罗布泊硫酸镁亚型卤水制取钾混盐工艺试验研究[J]. 地球学报, 22(5): 465-470.
- 房春晖,牛自得,刘子琴,陈敬清. 1991. $\text{Na}^+, \text{K}^+//\text{Cl}^-, \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}-\text{H}_2\text{O}$ 五元体系 25 介稳相图的研究[J]. 化学学报, 49: 1062-1070.
- 封国富,张晓. 2003. 世界锂工业发展格局变化对中国锂工业的影响和对策[J]. 稀有金属, 27(1): 57-61.
- 高世扬,宋彭生,夏树屏,郑绵平. 2007. 盐湖化学 新类型硼锂盐湖[M]. 北京:科学出版社.
- 黄维农,孙之南,王学魁,乜贞,卜令忠. 2008. 盐湖提锂研究和工业化进展[J]. 现代化工, 28(2): 14-19.
- 金作美,肖显志,梁式梅. 1980. $\text{Na}^+, \text{K}^+, \text{Mg}^{2+} \text{Cl}^-, \text{SO}_4^{2-}-\text{H}_2\text{O}$ 五元体系 25 介稳相图研究[J]. 化学学报, 38(4): 313-321.
- 孔凡晶,郑绵平. 2007. 盐湖生物化学研究进展 第二届盐湖生物学及嗜盐生物与油气生成学术研讨会综述[J]. 地球学报, 28(6): 603-608.
- 李浩,唐中凡,刘传福,雷光元. 2008. 新疆罗布泊盐湖卤水资源综合利用研究[J]. 地球学报, 29(4): 517-524.
- 李昱昀,狄晓亮,高洁. 2005. 国内外盐湖卤水锂资源及开发现状[J]. 海湖盐与化工, 34(5): 31-35.
- 刘喜方,郑绵平. 1999. 西藏扎布耶超大型锂、硼矿床地质背景及其形成演化[J]. 化工矿产地质, 21(2): 65-68.
- 罗莎莎,郑绵平. 2004. 西藏地区盐湖锂资源的开发现状[J]. 地质与勘探, 40(3): 11-14.
- 马培华,王政存,徐刚,宋作忠. 1998. 阿塔卡玛盐湖的综合开发[J]. 盐湖研究, 6(1): 61-66.
- 乜贞,郑绵平. 2001. 西藏扎布耶盐湖夏季卤水盐田晒制研究[J]. 地球学报, 22(3): 271-275.
- 乜贞,张永生,卜令忠,黄维农,郑绵平. 2005. 西藏扎布耶盐湖卤水冬季制卤试验研究[J]. 地质通报, 24(4): 386-390.
- 宋彭生. 2000. 盐湖及相关资源开发利用进展(续一) [J]. 盐湖研究, 8(2): 33-58.
- 魏新俊. 2002. 柴达木盆地盐湖钾硼锂资源概况及开发前景[J]. 青海国土经略, (增刊): 64-69.
- 杨建元,程温莹,张勇,邓天龙. 1995. 东台吉乃尔湖晶间卤水综合利用途径研究[J]. 矿物岩石, 15(1): 81-85.

- 杨建元,张勇,程温莹,蒋秀川. 1996. 西藏扎布耶盐湖冬季卤水 25 等温蒸发研究[J]. 海湖盐与化工, 25(5): 21-24.
- 袁复怀. 1999. 国际锂盐最新需求[J]. 盐湖研究, 7(1): 70-73.
- 张宝全,刘铸唐,符廷进,王萍. 1994a. 东台吉乃尔盐湖卤水的相化学研究(1)—25 等温蒸发实验[J]. 盐湖研究, 2(2): 57-60.
- 张宝全,刘铸唐,符廷进,王萍,张军,李永华. 1994b. 东台吉乃尔盐湖卤水的相化学研究()—冬夏季卤水蒸发实验[J]. 盐湖研究, 2(3): 27-34.
- 赵健,杨维芝,赵佳明. 2000. 锂离子电池的应用开发[J]. 电池工业, 5(1): 31-36.
- 赵元艺,郑绵平,卜令忠. 2003. 西藏扎布耶盐湖盐田高品位 Li_2CO_3 混盐的制取试验及意义[J]. 地球学报, 24(4): 459-462.
- 赵元艺,郑绵平,卜令忠,乜贞,刘喜方. 2005. 西藏碳酸盐型盐湖卤水锂盐提取盐田工艺研究[J]. 海湖盐与化工, 34(2): 1-6.
- 郑绵平,向军,魏新俊,郑元. 1989. 青藏高原盐湖[M]. 北京:北京科学技术出版社, 192-256.
- 郑绵平. 1999. 论盐湖学[J]. 地球学报, 20(4): 395-401.
- 郑绵平. 2001. 青藏高原盐湖资源研究的新进展[J]. 地球学报, 22(2): 97-102.
- 郑喜玉,张明刚,徐昶,李秉孝. 2002. 中国盐湖志[M]. 北京:科学出版社.
- 祝增虎,朱朝梁,温现明,诸葛芹,凌宝萍. 2008. 碳酸锂生产工艺的研究进展[J]. 盐湖研究, 16(3): 64-72.

References:

- CAO Wen-hu, WU Chan. 2004. Brine resources and the technology of their comprehensive utilization [M]. Beijing : Geology Publisher, 82-189(in Chinese).
- CHEN Yong-zhi, WANG Mi-li, YANG Zhi-chen, LIU Cheng-lin, JIAO Peng-cheng. 2001. The Making of Potash-Bearing Salts Mixtures Through the Processing of Magnesium Sulfate Sub-type Brine in Lop Nur Saline Lake, Xinjiang[J]. Acta Geoscientica Sinica, 22(5): 465-470 (in Chinese with English abstract).
- FANG Chun-hui, NIU Zi-de, LIU Zi-qing, CHEN Jing-qing. 1991. Studies on the Metastable Phase Diagram in the Quinary system of $\text{Na}^+, \text{K}^+//\text{Cl}^-, \text{CO}_3^{2-}, \text{SO}_4^{2-}$ and H_2O at 25°C [J]. Acta Chemica Sinica, 49: 1062-1070(in Chinese with English abstract).
- FENG Guo-fu, ZHANG Xiao. 2003. Variation in Feature of World Lithium Industry and Its Influence on Lithium Industry in China[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 27(1): 57-61 (in Chinese with English abstract).
- GAO Shi-yang, SONG Peng-sheng, XIA Shu-ping, ZHENG Mian-ping. 2007. Salt Lake Chemistry New Style Boron and Lithium Saline Lake [M]. Beijing: Beijing Science Publisher (in Chinese).
- HUANG Wei-nong, SUN Zhi-nan, WANG Xue-kui, NIE Zhen, BU Ling-zhong. 2008. Progress in industrialization for lithium extraction from salt lake[J]. Modern Chemical Industry, 28(2):

- 14-19 (in Chinese with English abstract).
- JIN Zuo-mei, XIAO Xian-zhi, LIANG Shi-mei. 1980. Studies of the Metastable Equilibrium for Pentanary System of Na^+ , K^+ , Mg^{2+} // Cl^- , SO_4^{2-} and H_2O at 25°C [J]. *Acta Chemica Sinica*, 38(4): 313-321 (in Chinese with English abstract).
- KONG Fan-jing, ZHENG Mian-ping. 2007. Research Progress in Saline Lake Biology: A Review of the 2nd Conference of Saline Lake Biology and Its Relationship with Petroleum Generation[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 28(6): 603-608 (in Chinese with English abstract).
- LI Hao, TANG Zhong-fan, LIU Chuan-fu, LEI Guang-yuan. 2008. Comprehensive exploitation and research of brine resources in the Lop Nur salt lake, Xinjing[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 29(4): 517-524 (in Chinese with English abstract).
- LI Yu-yun, DI Xiao-liang, GAO Jie. 2005. The status of saline lake lithium resources and its present situation of exploitation[J]. *Journal of Sea-Lake Salt and Chemical Industry*, 34(5): 31-35 (in Chinese with English abstract).
- LIU Xi-fang, ZHENG Mian-ping. 1999. Geological setting and mineralizing evolution of super large Li, B deposit, Zabuye, Tibet[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 21(2): 65-68 (in Chinese with English abstract).
- LUO Sha-sha, ZHENG Mian-ping. 2004. Exploitation actuality of saline lake lithium resources in Tibet[J]. *Geology and Prospecting*, 40(3):11-14(in Chinese with English abstract).
- NIE Zhen, ZHENG Mian-ping. 2001. A Study of the Brine Solarizing Behavior in Solar Ponds of Zabuye Salt Lake[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 22(3): 271-275 (in Chinese with English abstract).
- NIE Zhen, ZHANG Yong-sheng, BU Ling-zhong, HUANG We-nong, ZHENG Mian-ping. 2005. Experimental study on concentration of winter brines in Zabuye Salt Lake, Tibet[J]. *Geological Bulletin of China*, 24(4): 386-390 (in Chinese with English abstract).
- MA Pei-hua, WANG Zheng-cun, XU Gang, SONG Zuo-zhong. 1998. Comprehensive exploitation of Ei Salar de Atacama Salt Lake[J]. *Journal of Salt Lake Science*. 6(1): 61-66 (in Chinese with English abstract).
- SONG Peng-shen. 2000. Comprehensive Utilization of Salt Lake and Related Resources (Continuation I) [J]. *Journal of Salt Lake Science*, 8(2): 33-58 (in Chinese with English abstract).
- YANG Jian-yuan, CHEN Wen-yeng, ZHANG Yong, DENG Tian-long. 1995. A research on the comprehensive utilization channels of intercrystalline brines from Jilaier lake of Dongtai[J]. *J Mineral Petrol*, 15(2): 81-85 (in Chinese with English abstract).
- YANG Jianyuan, ZHANG Yong, CHEN Wenyeng, JIANG Xiuchang. 1996. 25°C isothermal evaporating research in winter brine of Zabuye salt lake in Tibet [J]. *Journal of Sea- Lake Salt and Chemical Industry*, 25(5): 21-24 (in Chinese with English abstract).
- YUAN Fu-huai. 1999. Recent Report about Lithium industry in the World [J]. *Journal of Salt Lake Science*,7(1): 70-73 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG Bao-quan, LIU Zhu-tang, FU Ting-jin, WANG Ping. 2004a. Study of the phase chemistry of Dongtaijinarer salt lake brine (I)—Isothermal evaporation at 25°C [J]. *Journal of Salt Lake Science*, 2(1): 57 - 60 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG Bao-quan, LIU Zhu-tang, FU Ting-jin, WANG Ping, ZHANG Jun, LI Yong-hua. 2004b. Study of the phase chemistry of Dongtaijinarer salt lake brine (II)—Solar evaporation in summer and winter [J]. *Journal of Salt Lake Science*, 2(3): 27-34 (in Chinese with English abstract).
- ZHAO Jian, YANG Wei-zi, ZHAO Jia-ming. 2000. Application and Development of Lithium ion Battery [J]. *Battery Industry*, 5(1): 31-36 (in Chinese with English abstract).
- ZHAO Yuan-yi, ZHENG Mian-ping, BU Ling-zhong. 2003. Experiments on the Preparation of Mixed Salt with High Content of Li_2CO_3 in Solar Pan of Zhabuye Saline Lake, Tibet, and Its' Significance[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 24(4): 459-462 (in Chinese with English abstract).
- ZHAO Yuan-yi, ZHENG Mian-ping, BU Ling-zhong, NIE Zhen, LIU Xi-fang. 2005. Study on salt pan technology of lithium salt extracting from carbonate-type saline lakes, Tibet [J]. *Journal of Sea-Lake Salt and Chemical Industry*, 34(2): 1-6 (in Chinese with English abstract).
- ZHENG Mian-ping, XIANG Jun, WEI Xin-jun, ZHENG Yuan. 1989. *Saline lakes of Tibet and Qinghai* [M]. Beijing: Beijing Science and Technology Publisher, 192-256 (in Chinese).
- ZHENG Mian-ping. 1999. Initial Discussion of Salinology [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 20(4): 395-401 (in Chinese with English abstract).
- ZHENG Mian-ping. 2001. Study Advances in Saline Lake Resources on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 22(2): 97-102 (in Chinese with English abstract).
- ZHENG Xi-yu, ZHANG Ming-gang, XU Chang, LI Bing-xiao. 2002. *Salt lakes of China* [M]. Beijing: Beijing Science Publisher (in Chinese).
- ZHU Zeng-hu, ZHU Chao-liang, WEN Xian-ming, ZHU Ge-qin, LING Bao-ping. 2008. Progress in production process of lithium carbonate[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 16(3): 64-72 (in Chinese with English abstract).