

道“锂”系列专题三——锂盐的提炼与转化

投资咨询业务资格：
证监许可【2012】669号

报告要点

全球锂资源主要集中于盐湖卤水矿和伟晶岩矿等，这也是全球锂盐供应的主力。从这些原料中提取出我们需要的基础锂盐产品需要经历复杂的流程，而且由于种类、禀赋的不同，不同的锂矿需要采用不同的提锂方法，这点在盐湖提锂中表现得尤为明显，因此也造成了成本和生产周期的差异。此外，基础锂盐一般包含碳酸锂、氢氧化锂和氯化锂，它们最终用途有差异，一般可以相互转化，由于原料、技术和价差等因素影响，碳酸锂苛化生产氢氧化锂是主要的转化工艺。

摘要：

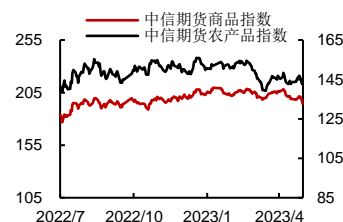
从产业链来看，基础锂盐主要包括碳酸锂、氢氧化锂和氯化锂三种，它们性质和用途各不相同。碳酸锂和氢氧化锂可以用作电池正极材料的生产原料，是目前产量最大的基础锂盐。

矿石提锂可直接生产碳酸锂、氢氧化锂和氯化锂，2022年全球锂矿提锂占原生锂产量的54%左右，仍是最主要的锂供应源。从矿石中提取得到锂资源一般需要经过采矿、选矿、冶炼等环节，其中选矿和冶炼中又分别有不同的技术路线。选矿中浮选法应用较广，而在冶炼中多使用硫酸焙烧法。

盐湖提锂技术路线较多，方法选择主要取决于盐湖中锂离子浓度和镁锂比等。盐田浓缩-沉淀法是世界盐湖提锂最主流和成熟的工艺，采取这种工艺的项目主要集中在南美锂离子浓度高，镁锂比低的盐湖项目中。而对于禀赋较差，难以使用传统方法提锂的盐湖，吸附法是一个广泛使用的技术。

目前碳酸锂主要用在生产磷酸铁锂和NCM三元材料中的中低镍正极上，而氢氧化锂主要用于生产NCM三元材料中的高镍正极和NCA材料，主要原因是生产高镍三元材料要求较低烧结温度才能得到优异的性能，而碳酸锂熔点过高，因此熔点较低的氢氧化锂成为高镍三元的较好选择。碳酸锂生产氢氧化锂一般采用苛化法。

风险因素：终端消费不及预期；政策变动。



有色与新材料团队

研究员：
沈照明
021-80401745
shenzhaoming@citicsf.com
从业资格号：F3074367
投资咨询号：Z0015479

李苏横
0755-82723054
lisuheng@citicsf.com
从业资格号：F03093505
投资咨询号：Z0017197

郑非凡
zhengfeifan@citicsf.com
从业资格证：F03088415
投资咨询号：Z0016667

目录

摘要:	1
一、基础锂盐介绍	4
1.1 基础锂盐在产业链有重要地位	4
1.2 锂盐产能分布集中于中国	5
二、锂矿石提锂技术	6
2.1 锂矿选矿工艺	6
2.2 锂精矿提锂工艺	7
2.3 锂云母精矿提锂	9
2.4 其他类型锂矿提锂技术	10
2.5 矿石提锂成本——以澳洲 Greenbushes 锂矿为例	10
三、盐湖提锂技术	11
3.1 盐湖提锂工艺概述	11
3.2 盐田浓缩-沉淀法是优质盐湖首选方法	12
3.3 吸附法工艺极具应用前景	13
3.4 盐湖提锂成本——以智利 Atacama 为例	14
四、碳酸锂和氢氧化锂	15
4.1 二者差别与联系	15
4.2 碳酸锂转化氢氧化锂	16
免责声明	17

图表目录

图表 1: 基础锂盐在产业链中的位置	4
图表 2: 基础锂盐介绍	4
图表 3: 中国碳酸锂产能分布	5
图表 4: 中国氢氧化锂产能分布	5
图表 5: 海外主要锂矿企业新增冶炼项目	6
图表 6: 锂矿选矿工艺	7
图表 7: 锂矿选矿流程	7
图表 8: 锂辉石矿提锂工艺	8
图表 9: 锂辉石精矿硫酸焙烧法提锂工艺	8
图表 10: 锂云母矿提锂工艺	9
图表 11: 锂云母精矿复盐法提锂工艺	10
图表 12: 2022 年格林布什精矿生产成本	11
图表 13: 格林布什生产规划成本	11
图表 14: 全球主要卤水提锂技术	12
图表 15: 盐梯度太阳池结构	13
图表 16: 吸附法工艺流程	14
图表 17: 2021 年智利锂盐湖碳酸锂生产成本构成	15
图表 18: 2020 年国内某锂盐湖碳酸锂生产成本构成	15
图表 19: 碳酸锂和氢氧化锂区别及联系	15

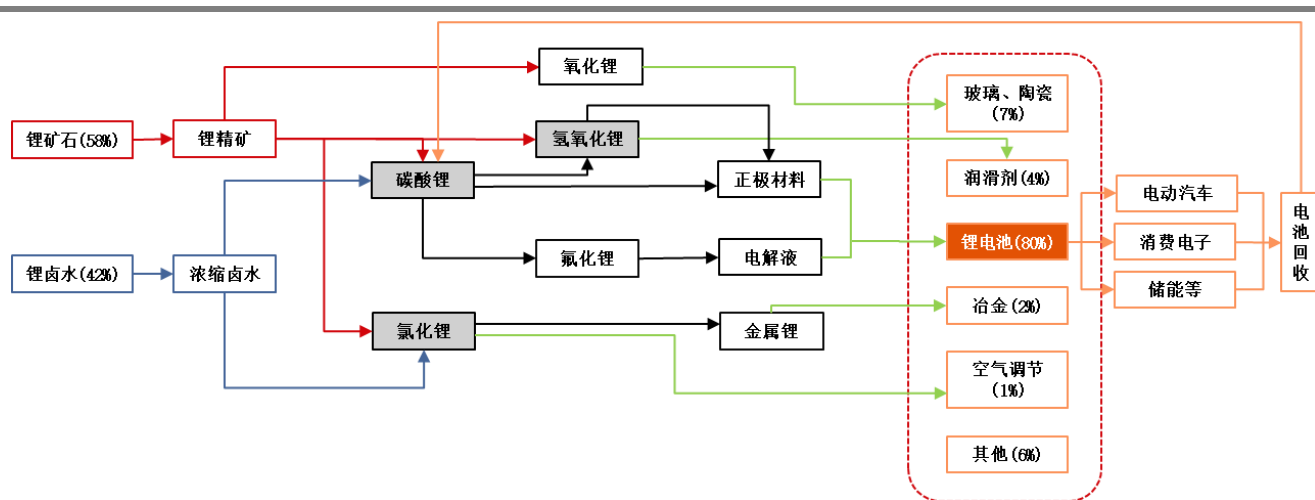
图表 20：碳酸锂制取氢氧化锂流程 16

一、基础锂盐介绍

1.1 基础锂盐在产业链有重要地位

从产业链来看，锂资源一般从锂矿石和锂卤水中提取，先是生产成碳酸锂、氢氧化锂和氯化锂等产品，再通过这些产品制备其他各种含锂产品，最终应用于电动汽车等产品终端。在这个过程中，氢氧化锂、氯化锂和即将上市广期所的碳酸锂被我们称为基础锂盐。

图表 1：基础锂盐在产业链中的位置



资料来源：USGS 中信期货研究所

基础锂盐性质和用途各不相同。碳酸锂用途较广，在电池、玻璃、陶瓷、医药和食品等工业中应用广泛，亦可用于合成橡胶、染料、半导体、军事国防工业、电视机、原子能、医药、催化剂等方面，在新能源时代碳酸锂的主要用途是制作磷酸铁锂电池、中低镍三元电池、钴酸锂电池、锰酸锂电池等的锂原料。氢氧化锂主要用于化工原料、化学试剂、电池工业等行业，是生产高级锂基润滑脂的主要原料之一，同时也是国防工业、原子能工业和航天工业的重要原料。目前主要应用于生产中高镍三元电池等。氯化锂主要用于电解制备金属锂、铝的焊剂及非冷冻型空调机中的吸湿（脱湿）剂等。

图表 2：基础锂盐介绍

类别	简介	用途
碳酸锂	无机化合物，无色单斜晶系结晶体或白色粉末	特种玻璃、陶瓷、电子等工业用途及 3C、电动车、基站储能等能源用途
氢氧化锂	无机化合物，白色结晶体粉末，强碱性	锂基润滑脂、耐腐蚀性染料等工业用途及高端电动车等用途
氯化锂	无机化合物，白色晶体	生产金属锂、电池电解液，铝焊接剂、空调除湿剂和特种水泥原料等

资料来源：公开资料 中信期货研究所

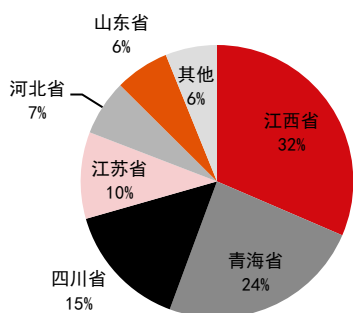
1.2 锂盐产能分布集中于中国

除南美盐湖直接提锂外，全球锂的冶炼产能主要集中于中国。除中国外，全球锂矿主要来自于澳大利亚，2022 年澳大利亚锂精矿产量约为 265 万实物吨，其中，263.5 万吨运往中国进行加工，而像巴西、尼日尼亚等国的锂矿石也几乎全部在国内加工冶炼。据中国有色金属工业协会锂业分会统计，2022 年我国基础锂盐产量如下：碳酸锂产量 39.50 万吨（产能约 60 万吨），同比增幅约为 32.5%；氢氧化锂产量 24.64 万吨（产能约 36 万吨），同比增幅约为 29.5%；氯化锂产量 2.22 万吨（产能约 3.5 万吨），同比下降约 27.2%。

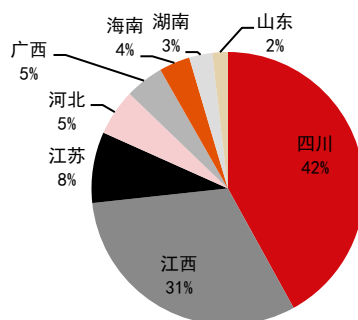
根据钢联统计数据，2022 年全国碳酸锂产能达到 63 万吨，规划中产能达到 39 万吨，预计到 2026 年全国碳酸锂总的冶炼厂达到 100 万吨。从具体分析来看，江西省碳酸锂产能 20 万吨占比达到 32%，其次是青海和四川，占比分别为 24%和 15%。从规划的产能来看，国内 2023 年到 2026 年投产产能总体呈现上升趋势。且其中江西新待投产占比高达 62%。

此外，2022 年全国氢氧化锂产能达到 54.65 万吨，规划中产能达到 29.9 万吨，预计到 2025 年全国氢氧化锂总的冶炼厂可达 85 万吨。具体分析来看，四川省氢氧化锂产能 22.95 万吨占比达到 42%，其次是江西和江苏，占比分别为 31%和 5%。

图表 3：中国碳酸锂产能分布



图表 4：中国氢氧化锂产能分布



资料来源：Mysteel 中信期货研究所

资料来源：Mysteel 中信期货研究所

目前海外锂盐精炼项目及一体化项目大多正在建设中。海外目前在产的锂精炼项目较少，新建的也主要是部分锂矿商为了向下游延伸而做的配套项目，为了提升企业自身的竞争力，部分矿企在自身拥有锂矿或者锂盐湖情况下，就近建设氢氧化锂精炼厂实现一体化生产。这些企业除了在中国建设的冶炼厂外，在产的主要包括 SQM 的 Carment、Allkem 的 Naraha。目前在建的项目较多，合计达到 24 万吨氢氧化锂，这与海外动力电池三元占比较高有关，对矿企而言，此举可以提高利润，降低生产成本。IRA 法案的实施会推动海外冶炼项目快速增长。

图表 5：海外主要锂矿企业新增冶炼项目

企业	项目	氢氧化锂产能(万吨)	位置	投产时间
SQM	Carmen	3	智利	在产
ALB	Kemerton	5	澳洲	2023H2
Livent	Bessemer	0.5	美国	
Livent	Nemaska	3.4	加拿大	2026
IGO	Kwinana	4.8	澳洲	2022 年底
Allkem	Naraha	1	日本	在产
PLS	光阳工厂	4.3	韩国	2023-10
AMG	Bitterfeld	2	德国	2024
合计		24		

资料来源：Wind 中信期货研究所

二、锂矿石提锂技术

锂矿石提锂曾是世界上生产锂盐的主要方法，经过一百多年的发展，相关的工艺已经非常成熟，可以生品质优良的各种类型锂盐产品。据我们测算，2022 年全球锂矿提锂占原生锂产量的 54%左右，仍是最主要的锂供应源。

锂在矿石中主要以锂辉石、锂云母、透锂长石、磷铝石矿等形式存在，对应不同的原料也有了相应的提锂工艺。从矿石中提取得到锂资源一般需要经过采矿、选矿、冶炼等环节，其中选矿和冶炼中又分别有不同的技术路线。

2.1 锂矿选矿工艺

开采的原矿一般需要通过选矿的环节。锂矿石的选矿就是利用锂矿石的物化性质，采用不同的方法，将有锂矿石与脉石矿物分开，并使共生的有用矿物尽可能的相互分离，除去或降低有害杂质，以获得冶炼锂矿石所需原料的分选过程。一般而言，通过选矿环节从含氧化锂 1%-2%的锂辉石矿选出 5%以上的锂辉石精矿，或从 0.3%-0.6%的锂云母矿选出 1.5%以上的锂云母精矿。

原矿选矿可以分为选别前的准备、选别和选别后的脱水 3 个阶段。选别前的准备作业包括锂矿石的破碎和筛分、磨矿和分级，其目的是使矿石中各种有用矿物颗粒全部或大部分达到单体分离，以便进行选别，并使其粒度符合选别作业的要求。选别作业是使已解离的锂矿物与脉石矿物（或不同的有用矿物）实现分离的作业，根据锂矿物不同的性质，选用一种或多种选矿方法。选别后的脱水作业通常由浓缩、过滤和干燥 3 个阶段组成，目的是脱出锂精矿的水分，以便于储存、运输和出售。

选别作业是选矿中最关键的环节，目前常见的锂矿石选矿工艺流程主要有手选工艺、浮选法工艺、重选法工艺、磁选法工艺、热裂法工艺、及联合选矿法工艺等。

图表 6：锂矿选矿工艺

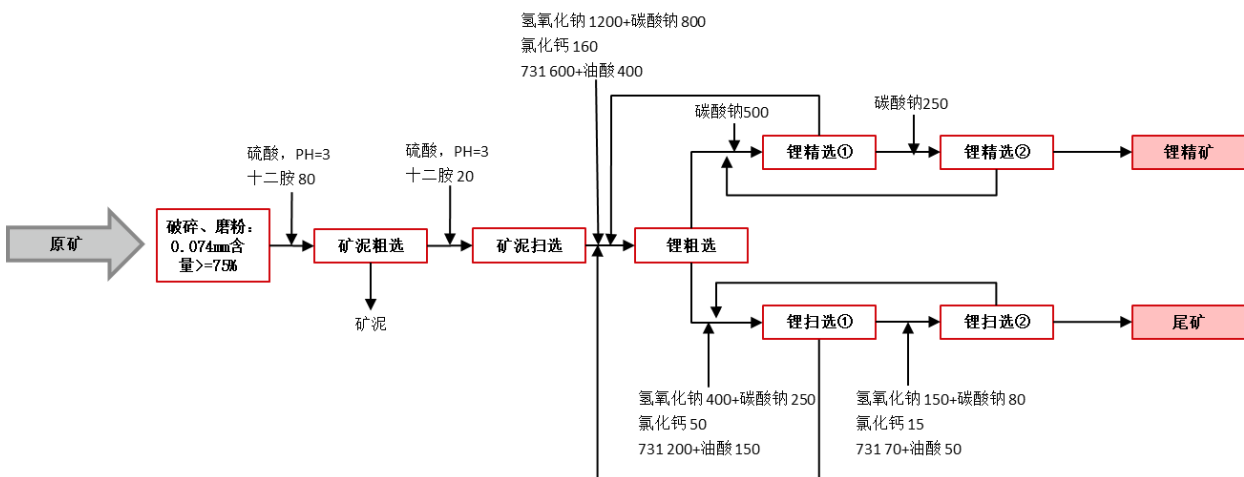
工艺方法	流程及特点
手选法	手选法是利用锂辉石与脉石的外观差异，通过人工捡选来分离。方法简单，人工成本高，可作为初选。
磁选法	可用来去除磁性脉石矿物，一般为含铁杂质或具有弱磁性的杂质，常见的有铌钽铁矿、电气石、铁锂云母、磁铁矿等。可去除的杂质种类有限。
重选法	重选法主要用来去除石英、长石等脉石矿物，其原理是利用锂辉石的密度比脉石矿物比重大，锂辉石的密度为 3.2g/cm ³ 左右。
浮选法	浮选法是利用锂辉石与脉石矿物表面化学性质的差异来分离脉石矿物的，主要用来去除锂辉石中掺杂的硫化矿、石英、云母、长石、绿柱石等脉石矿物。
热裂法	热裂法属于化学选矿方法。锂辉石在一定的高温条件下焙烧时，由原来的 α 型锂辉石转变成 β 型锂辉石，而脉石矿物却没有发生变化。β 型锂辉石具有疏松的特点，可通过破碎、筛分或借助风力分选与石英等脉石分开，得到锂辉石精矿。此法可把含二氧化锂 0.8%–2.0% 的锂辉石原矿富集到含二氧化锂 4%–6% 的锂精矿，其回收率为 70%–80%。需要很高的温度，并且对其他有用金属组分不能综合回收。
联合选矿法	联合选矿法主要用于选别一些伴生组分复杂的锂辉石，且单一选矿方法无法有效回收锂精矿的矿物。因此可通过联合选矿方法实现选别，如浮选–磁选联合工艺、浮选–重选–磁选联合工艺、浮选–化学处理联合工艺等。

资料来源：公开资料 中信期货研究所

手选和浮选是选别锂辉石的主要方法，其他方法在锂精矿生产中起着辅助的和次要的作用。以浮选法为例，浮选是利用锂矿物表面物理化学性质的不同来分选锂矿的选矿方法，被选用较多，具体工艺流程为：浓缩脱泥后的锂矿浆会进入到浮选机内进行一次粗选。粗选后，锂粗精矿则会进入到下一步的精选作业。而粗尾矿则会进行扫选作业。精选锂时，一般采用 2–3 次精选，以提高锂精矿的回收率，避免物料的浪费。精选之后的锂即为精矿产品，可运送至精矿库进行储存以待下一步的处理。

图表 7：锂矿选矿流程

单位：g/t



资料来源：鑫海矿装 中信期货研究所

2.2 锂精矿提锂工艺

提锂工艺主要有硫酸法、石灰烧结法、硫酸盐烧结法、氯化焙烧、纯碱压煮法等方法，根据原料的不同提锂工艺也会有相应的差别。

中信期货有色与新材料专题报告（锂）

图表 8：锂辉石矿提锂工艺

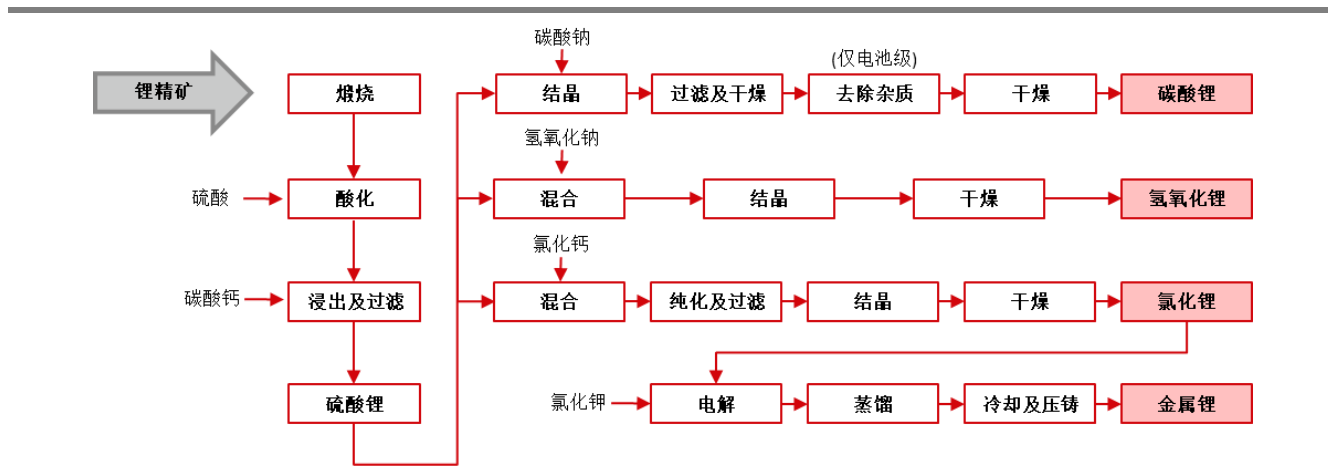
工艺方法	工艺流程	特点
硫酸焙烧	锂辉石→950~1100 °C 转化焙烧→250~300 °C 硫酸化焙烧→溶出→除杂→沉锂→碳酸锂产品	工艺成熟简单, 适应多种原料, 锂收率高, 能耗大, 产生影响环境的废气、废渣, 消耗硫酸副产硫酸钠, 生产成本较高
石灰烧结	锂精矿+石灰→825~1050 °C 焙烧→溶出→蒸发结晶或沉锂→氢氧化锂或碳酸锂产品	流程简单, 生产成本较低, 锂回收率低, 物料流量大, 蒸发量大, 能耗高, 产生影响环境的废气、废渣
硫酸盐焙烧	锂矿石+硫酸盐 850 °C~1000 °C 焙烧→溶出→除杂→浓缩除杂→沉锂→碳酸锂产品	锂回收率较高, 工艺流程长, 蒸发量大, 耗能高, 生产成本高, 产生影响环境的废气、废渣
氯化焙烧	锂精矿+氯盐→950~1100 °C 焙烧→烟气冷却收尘→浸出→浓缩除杂→沉锂→碳酸锂产品	锂回收率较高, 工艺流程简单, LiCl 气体的收集难度大, 炉气腐蚀性强, 对设备要求高, 产生影响环境的废气、废渣
纯碱压煮法	锂辉石→950~1100 °C 转化焙烧→225 °C 与碳酸钠溶液进行压煮反应→二氧化碳反应, 制备出碳酸氢锂→加热析出碳酸锂	流程简单, 生产效率较高, 反应耗时较短, 但该工艺存在的问题是反应条件苛刻, 技术水平较高, 反应容器内易结块, 清洗难。

资料来源：CNKI 中信期货研究所

锂辉石精矿以硫酸硫酸焙烧法为主。该方法是《GB/T 51382-2019 锂冶炼厂工艺 设计标准》唯一推荐的方法。硫酸法工艺提取锂的路线为：(1) 将 α-锂辉石进行粉碎后在高温 (约 950~1100 °C) 下进行焙烧转变成 β-锂辉石, β-锂辉石的活性较高, 更易于 H⁺ 离子进入晶体中与 Li 发生置换反应; (2) 将 β-锂辉石与浓 H₂SO₄ 进行混合, 在 300 °C 左右下进行焙烧; (3) 水浸得硫酸锂溶液; (4) 加入石灰粉中和过量的硫酸并调节 pH 值至中性, 除去浸液中的 Fe、Al、Mg、Ca 等杂质; (5) 蒸发浓缩得到硫酸锂净化液, 而后再加入碳酸钠溶液发生复分解反应, 反应后的沉淀物质即碳酸锂。

采用该工艺提取锂最大的优点是工艺简单、过程可控性强、锂回收率高 (可达 80% 以上), 但存在的问题是生产中会消耗大量的硫酸, 对设备的耐酸腐蚀性要求较高, 且废渣难以回收利用对环境污染严重, 环保压力大。尽管硫酸法工艺是目前被大多企业产业化应用, 但由于不利于环保, 该工艺已遇到发展瓶颈。锂辉石精矿还可以通过纯碱焙烧法、压煮法、硫酸盐焙烧法、氯化焙烧法, 专利和论文较多, 未见工业化生产报道, 石灰石烧结也已经被淘汰。

图表 9：锂辉石精矿硫酸焙烧法提锂工艺



2.3 锂云母精矿提锂

锂云母是锂矿的主要来源之一，锂云母是一种层状铝硅酸盐矿物，化学式为 $K(Li_5Al)_4O_{10}(F, OH)_2$ ，呈短柱体、小薄片集合体或大板状晶体。常伴生 MgO 、 FeO 、 MnO 、 CaO 、 Na_2O 、 Cs_2O 、 Rb_2O 和有害元素 F ， F 在 Li 的回收过程中通过形成 HF 或氟化物使锂的回收变得复杂，锂、钾、铷、铯以氟铝硅酸盐的形态存在，矿物结构致密，化学活性差，常温常压很难与酸碱反应，为了能够有效地综合开发利用锂云母矿，国内外科研工作者进行了大量的研究，综合开发利用锂云母资源，不仅能够满足国内锂盐的缺口，还能将有价值的 Rb 、 Cs 、 K 等作为副产品回收。

宜春是全球锂云母提锂的主要地区，对云母提锂的研究经历十多年的发展也在不断进步，至今已发展三代。

图表 10：锂云母矿提锂工艺

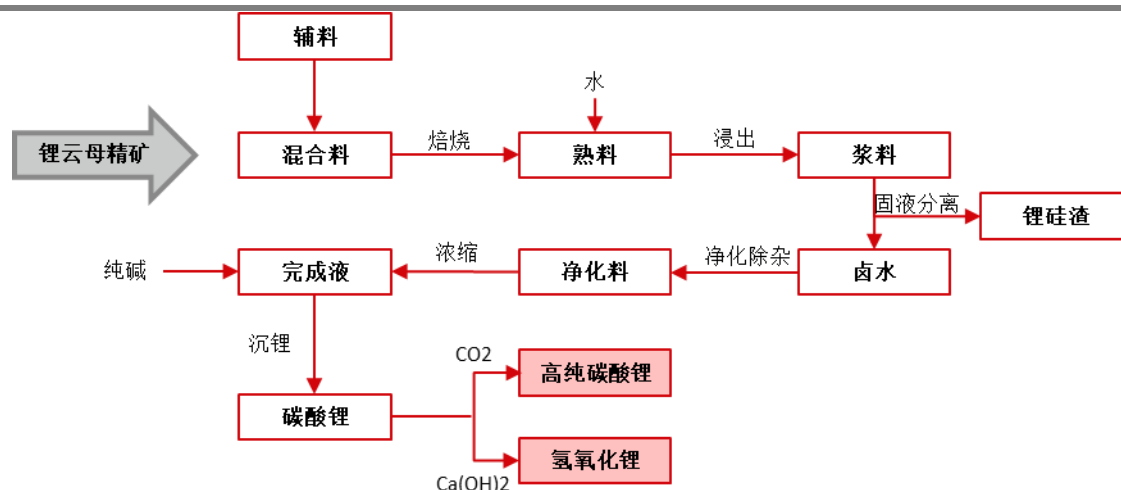
工艺方法	工艺流程	特点
氧化钙法	倍锂云母+倍氧化钙于 900°C 左右煅烧，冷却后水浸取得到氢氧化锂，通入二氧化碳，可得到碳酸锂	第一代方法，收率低，小于 70%；渣量大，1 吨碳酸锂近 100 吨锂渣；溶液锂浓度低，成本高，物料流通量大
硫酸法	锂云母 + 55% 的硫酸，于 100°C 反应 8h，将锂钠钾铷铯铝等金属阳离子溶解至酸液中。除钾铷铯矾后，加碳酸钙得到硫酸锂液，作为生产碳酸锂的原料	产量低，一天只有 3 吨；收率低，小于 70%；氢氟酸腐蚀能力太强，设备严重腐蚀，对环境不友好；渣量大，1 吨碳酸锂近 80 吨锂渣；溶液锂浓度低，成本高，物料流通量大
盐酸法	锂云母 + 10% 的盐酸，于 100°C 反应 8h，将锂钠钾铷铯铝等金属阳离子溶解至酸液中。喷雾干燥使氯化铝分解，得到氯化盐氯化锂，作为生产碳酸锂的原料	氢氟酸+盐酸 腐蚀能力太强，设备严重腐蚀，对环境不友好；杂质含量（钾）高；生产成本低
压煮法	锂云母 + 复盐+水，于 235°C 高压反应 2h 以上，将锂钾铷铯铝等金属阳离子溶解至水液中。得到的溶液为碳酸氢锂溶液，直接加热分解，可得到碳酸锂	氟化物高温高压下腐蚀能力强，设备严重腐蚀生产效率低，难以规模化生产高温高压对设备要求高
复盐法	锂云母精矿与复盐在 900°C 焙烧 2h，然后在 90 度水浸出 3h。浸出液中的 Li 可以通过溶剂萃取直接回收	金属的综合回收效果较好，工艺简单，在锂云母提锂的工业生产中得到了广泛应用。

资料来源：公开资料整理 中信期货研究所

目前，复盐法占绝对主流。与酸浸法等其他锂云母提锂工艺相比，渣量减少，锂回收率提高，工艺流程短、不需要用到浓硫酸、物料对设备腐蚀性程度较低。但也面临一些需要改进的缺点：如锂云母中珍贵的钾、铷、铯均未综合利用，钾很难除杂，影响产品品质，浸出液中钠含量较高，浓缩液浓度较低，一次沉锂率较低，导致产量较低等。

中信期货有色与新材料专题报告（锂）

图表 11：锂云母精矿复盐法提锂工艺



资料来源：银锂新能源 中信期货研究所

2.4 其他类型锂矿提锂技术

磷锂铝石是稀有金属花岗岩和花岗伟晶岩中常见的原生磷酸盐矿物，其 Li_2O 理论含量为 10.23%，是已知的氧化锂含量最高的天然锂矿物，在非洲、江西九岭等地区均有发现。主要提取方法包括硫酸法、复盐法、碱溶法等，该类矿物由于锂含量高，故可以带来很高的收率，但由于矿源较少，所以难以大规模利用。

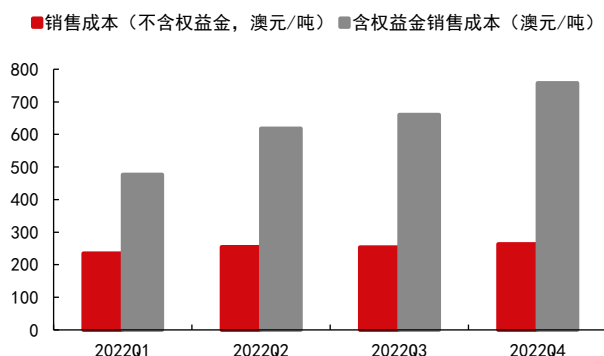
黏土型锂矿在自然界中含量较高，但由于黏土型锂矿发现较晚、锂赋存状态复杂，还未被大规模的开发利用。随着锂资源需求的持续增加，为缓解锂资源紧张局面，黏土型锂矿的开发利用必将成为未来的重点，目前在建设或有规划的项目包括墨西哥 Sonora 项目和塞尔维亚 Jadar 等项目，均有较高的设计产能。黏土型锂矿的提锂工艺主要为焙烧—浸出法和直接酸浸法等。

2.5 矿石提锂成本——以澳洲 Greenbushes 锂矿为例

锂精矿成本部分。如果不考虑权益金的影响，2022 年第四季度 Greenbushes 锂精矿现金成本为 263 澳元/吨，含权益金成本为 757 澳元/吨，其中权益金占比约 60%。西澳锂精矿现行的特许权使用费随着锂价变动时有调整，从格林布什在生命期内的生产规划来看，运营成本约为 284 澳元/吨锂精矿，运输及营销为 52 澳元，特权费为 78 澳元，占比分别为 68.6%、12.6%和 18.8%。

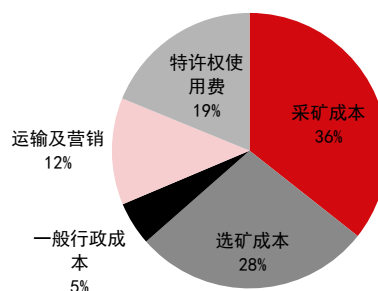
精矿提锂成本部分。对于硫酸法提锂而言，焙烧阶段对能源需求较高，生产一吨碳酸锂成本包括约 8 吨 6%品位的锂辉石成本、纯碱、硫酸、能源、折旧和人工等，该部分除锂精矿外约 2.5 万元/吨 LCE，总成本约为 4-5 万元/吨 LCE。其他地区和种类的矿石将面临更高的成本，其中低品位的锂云母矿成本可高达 15 万元/吨 LCE 以上。

图表 12：2022 年格林布什精矿生产成本



资料来源：IGO 中信期货研究所

图表 13：格林布什生产规划成本



资料来源：天齐锂业 H 股招股书 中信期货研究所

三、盐湖提锂技术

新能源对锂的需求与日俱增，矿石资源难以满足需求，盐湖卤水中含有的大量锂资源。目前全球锂资源中约 60% 以盐湖卤水形式存在，而我国锂资源中卤水锂占比更高，根据自然资源部发布的《中国矿产资源报告 2019》，我国锂矿潜在资源量约 1 亿吨，其中卤水锂约 9250 万吨，占比高达 91%。作为一个锂资源严重依赖海外的国家，盐湖锂提取技术是保障我国盐湖锂资源可持续利用的关键，是制约盐湖资源综合、平衡利用的“卡脖子”技术。

由于全球不同地区盐湖的禀赋不同，提锂难度也有差异。与矿石提锂不同，盐湖端工艺一般因湖施策，没有固定的模板。由于我国大部分盐湖卤水镁锂比值高，提取技术难度大，锂提取率低，对提锂技术的研究也已经十分丰富。

3.1 盐湖提锂工艺概述

根据中国锂冶炼工业设计标准，以氯化物—硫酸盐型等含锂盐湖卤水为原料提锂时，应根据自然条件及建设条件、地方环境保护要求，选择相适用的先进工艺提取基础锂盐。以碳酸盐型含锂盐湖卤水为原料提锂时，应根据自然条件及建设条件、地方环境保护要求，选择冷冻—日晒制卤工艺制取成卤、盐度梯度太阳池结晶技术或兑卤沉锂等技术路线。

盐湖提锂的工艺设计需要因湖施策。但总体而言，经过多年的探索，目前使用较多的除了传统的盐田浓缩—沉淀法，也有萃取法、吸附法、膜法等在内的新技术工艺。从这些技术来看，均以锂元素的富集和除杂为目的，尤其所要解决的核心问题是分离其中的镁锂离子，锂离子的浓度和其中的镁锂离子比成为工艺选择的重要影响因素。

从盐湖禀赋方面来看，一般锂浓度高，杂质含量低的盐湖多使用盐田浓缩—沉淀法，而其他禀赋较差的盐湖多使用吸附法、膜法、萃取法等或者两种工艺组合进行提取。由于萃取法对萃取剂要求较高，对环境的影响较大，故直接使用较少，吸附+膜法成了重要的发展方向。此外，电化学脱嵌法和电渗析法等新式方法也进入使用中。

中信期货有色与新材料专题报告（锂）

图表 14：全球主要卤水提锂技术

主要方法	使用盐湖	技术特点	适用盐湖	优点	缺点
盐田浓缩-沉淀法	Atacama、Silver Peak、Cauchari、Olaroz、扎布耶	卤水经过盐田浓缩, 分离钠盐、钾盐, 加石灰分离镁, 酸化萃取硼, 再净化, 加入化学沉淀剂沉淀锂盐	较高锂含量, 低镁锂比	工艺成熟可靠, 生产成本低	不适用于处理高镁、高钙卤水及低锂含量 卤水, 生产周期长
吸附交换法	Fenix、SDLA、察尔汗、大柴旦、一里坪	卤水通过对锂有选择性的吸附剂吸附, 再用淡水解吸与其他杂质成分分离并富集, 再通过小型盐田浓缩后化学沉淀锂	各类卤水	对卤水的适应性强, 工艺简单、锂的回收率高、选择性好, 对环境的影响小	工艺控制要求高, 各公司的吸附剂都基于其专有技术专门生产, 成本高
膜分离法	西台吉乃尔-恒信融/中信国安、一里坪	利用多种类型的滤膜, 逐步将卤水中杂质成分分离, 并富集浓缩锂后化学沉淀锂	各类卤水	对卤水的适应性强, 工艺简单、锂的回收率高、选择性好, 对环境的影响小	需要多种滤膜配合, 对滤膜要求高, 滤膜研发和生产成本高, 使用寿命短, 工艺成熟度不够, 多在工业试验阶段
萃取法	大柴旦盐湖	通过有机溶剂萃取锂实现锂与其他杂质成分的分离和浓缩, 高浓度反萃液进一步生产各种锂盐	高锂含量、高镁锂比	可以处理高镁锂比卤水, 易于工业化	高性能萃取剂研究投入大, 进展慢, 目前的萃取工艺腐蚀性大; 回收率较低, 生产成本低, 不够成熟
煅烧浸取法	西台吉乃尔-中信国安	通过对提硼后的高锂高镁老卤浓缩干燥、煅烧分解为氧化镁, 用水溶出氧化镁中的可溶性锂盐, 再沉淀出碳酸锂产品	高锂、高镁锂比	工艺简单, 综合利用	能耗大, 腐蚀性强, 环境影响大, 副产大量盐酸, 成本较高

资料来源：《全球提锂技术进展》 中信期货研究所

3.2 盐田浓缩-沉淀法是优质盐湖首选方法

盐田浓缩-沉淀法是世界盐湖提锂最主流和成熟的工艺, 采取这种工艺的项目主要集中在南美锂离子浓度高, 镁锂比低的盐湖项目中, 中国西藏的扎布耶盐湖由于其仅次于 Atacama 的锂浓度和仅 0.01 的镁锂比也使用盐田沉淀法。盐田工艺有很多的优点, 如成熟可靠、成本低等, 但是该工艺一般要求原料卤水锂含量要高, 以减少盐田蒸发浓缩压力, 还要求卤水镁锂比低于 8, 使锂镁分离能够顺行, 否则该工艺的经济性和技术可行性就会有很大问题, 此外该工艺需要的建设周期长, 前期投资大, 且回收率仅 40%左右。由于各盐湖卤水成分不同, 各个盐湖回收的共伴生组成也不尽相同, 工艺路线略有差异, 但核心都是通过盐田富集浓缩锂, 化学沉淀分离出锂产品。

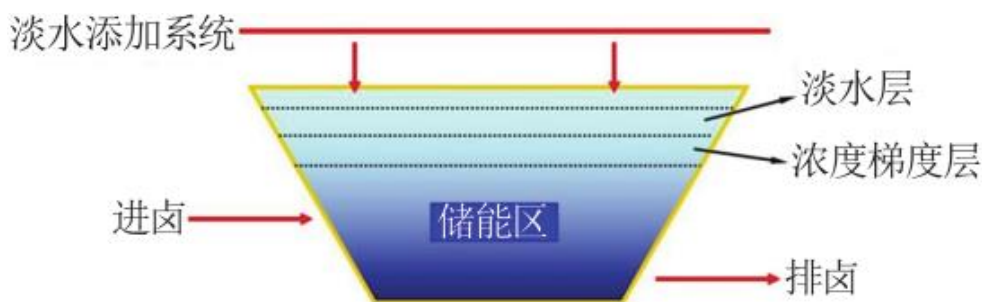
以国内盐湖扎布耶太阳池工艺为例。太阳池提锂工艺操作简单、成本低, 但只适用于碳酸盐型盐湖卤水提锂, 要求卤水镁锂比极低, 而且该工艺易受制于气候条件, 淡水消耗偏高。该方法工艺流程是将盐湖卤水在多级盐田中分级滩晒浓

缩，制得达到要求的高锂成卤后，在盐梯度太阳池中加热该卤水，使其中的锂以碳酸锂形式结晶析出，得到碳酸锂精矿产品。

锂精矿经过苛化法或碳化法等加工，可获得工业级或电池级碳酸锂产品。太阳池法提锂工艺的核心在于其中的盐梯度太阳池，其从上往下由 3 层组成，上层为上对流层（淡水层），由淡水组成，其温度与环境温度相近，主要起形成和保护其下盐梯度层的作用；下层为下对流层（储能区），由饱和盐溶液组成，主要起吸热和储热的功能；中部为非对流层（盐梯度层），其盐浓度随深度增加不断增加，不仅起到阻止热量散失于池面的作用，而且还利用淡水与卤水折射率的不同，使热能蓄存于池底卤水中，使下对流层的温度较上对流层高出许多，达到收集和储存太阳能、提高卤水温度的功效。

以盐梯度太阳池作为碳酸锂的结晶池，由于形成盐梯度层，不仅使下对流层的高锂卤水增温，而且盐梯度层抑制下对流层卤水的蒸发，而使其他盐类难于析出，从而易于碳酸锂在池底大量集中沉淀，提高碳酸锂品位。另外，盐梯度太阳池还可以跨季节储存热量，在冬季池底仍可维持一定的温度，再加上冬季卤水中的锂浓度较高，因此，碳酸锂依然可以在盐梯度太阳池中沉淀析出，由此达到全年连续生产的目的。

图表 15：盐梯度太阳池结构



资料来源：《中国盐湖卤水提锂产业化技术研究进展》中信期货研究所

3.3 吸附法工艺极具应用前景

尽管沉淀法具有成本低的优势，但使用局限较大，我们在本系列专题一中提到，国内盐湖集中在青海西藏，其中青海盐湖禀赋普遍较差，难以使用传统方法提取其中的锂离子。在诸多新方法中，吸附法提锂技术具有工艺流程简单、稳定性强、回收率高、选择性好、产品纯度高、能耗及成本低、易于产业化、对环境无污染等优势，且对盐湖卤水的镁锂比没有苛刻的要求等优势，还可大幅缩减盐田面积，适合于从原卤直接提锂或从高镁锂比盐湖卤水中提锂。

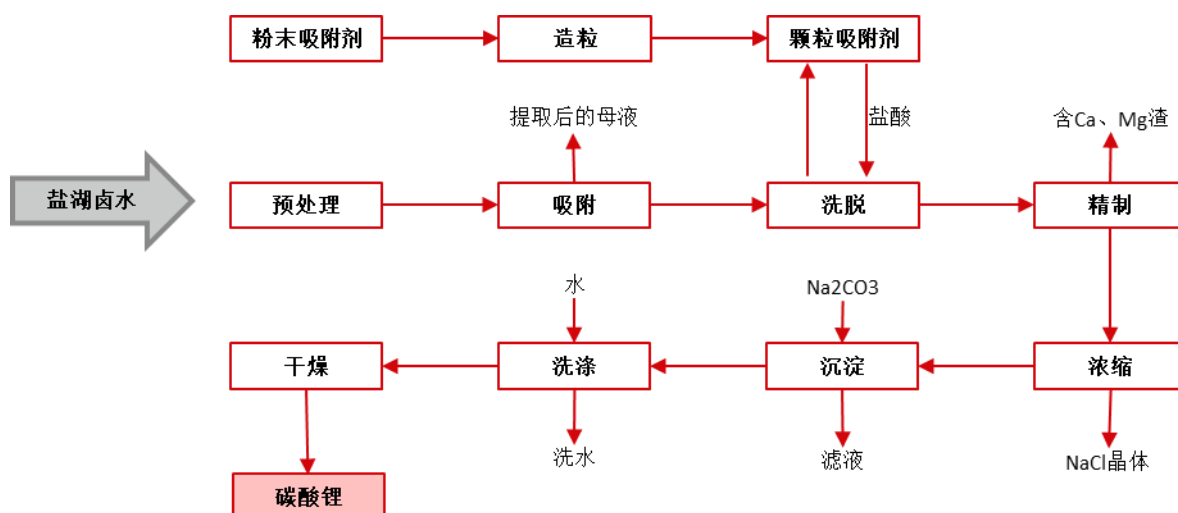
吸附法是利用具有选择性吸附功能的吸附剂直接从盐湖卤水中吸附 Li 离子，然后在洗脱剂的作用下，获得富锂溶液，从而实现锂的分离提纯。吸附剂分为有机离子交换吸附剂和无机离子交换吸附剂，其中有机树脂制造工艺复杂、价格昂贵，缺乏应用价值。无机离子吸附剂对 Li 的选择性强并有特定的记忆效应，可有效从稀溶液中选择性提锂。无机离子交换吸附剂可分为铝基吸附剂和离子筛型

吸附剂等。

常用的吸附提锂工艺流程：向盐湖卤水中投加制备好的离子筛吸附剂，进行充分的接触和反应。达到吸附饱和和时间后，对固相吸附剂进行水洗，洗脱液为含锂溶液，剩余溶液返回盐湖中，进行循环提锂。脱锂再生后的吸附剂返回吸附阶段，进行循环吸附。对含锂溶液进行蒸发、过滤等纯化操作，获得富锂溶液。最后向其中投加碳酸钠，获得 Li_2CO_3 产品。

目前铝系吸附剂是目前较为成熟、且唯一得到产业化应用的吸附剂，代表企业包括蓝科锂业等，吸附法提锂技术的成功产业化应用对于加快盐湖卤水锂资源开发利用、推进原卤提锂、实现盐湖资源综合利用和可持续发展将起到积极的推动作用。

图表 16：吸附法工艺流程



资料来源：《青海盐湖锂资源及提锂技术概述》 中信期货研究所

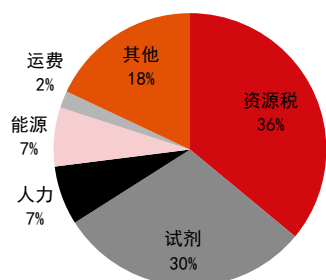
3.4 盐湖提锂成本——以智利 Atacama 为例

相对于澳洲锂矿端，盐湖端生产成本更低。盐湖提锂的成本主要来自是各种试剂、吸附剂或者纳滤膜等。单从运营成本来看，南美盐湖大多在 3000-4000 美元/吨 LCE 附近，而国内则是集中在 3-5 万元/吨 LCE。

除了生产成本，资源税对盐湖生产碳酸锂的成本有较大影响，尤其在智利。锂在智利属于一种战略金属，智利境内的盐湖矿权均属于智利政府机构 CORFO 所有，包括 ALB 和 SQM 等智利在产资源商均与 CORFO 签订长期租约，缴纳资源税。

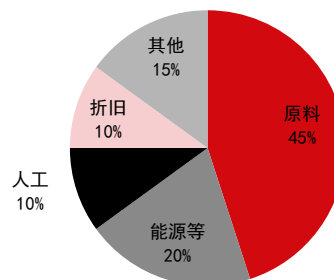
此前我们曾介绍智利最高至 40% 的资源税，根据 2021 年数据统计，智利盐湖碳酸锂生产成本中，资源税占比高达 36%，主要的生产材料试剂仅占比 30%。据 SQM 公告，公司 2022 年合计向 Corfo 上缴 33 亿美元资源税，折合单吨资源税成本 2.1 万美元，而单吨其他成本仅 2550 美元。国内来看，生产成本则主要来自于卤水试剂等原料、能源和水等。

图表 17：2021 年智利锂盐湖碳酸锂生产成本构成



资料来源：SQM 中信期货研究所

图表 18：2020 年国内某锂盐湖碳酸锂生产成本构成



资料来源：公开资料整理 中信期货研究所

四、碳酸锂和氢氧化锂

4.1 二者差别与联系

碳酸锂和氢氧化锂均可应用于生产电池正极材料，但二者性质和应用方向不同。氢氧化锂具有强腐蚀性，属于危险化学品，且在空气中极易吸收水及二氧化碳，故生产和存储难度高于碳酸锂。两种锂盐都是生产锂电池正极材料时的锂源，目前碳酸锂主要用在生产磷酸铁锂和三元材料中的中低镍正极材料上（NCM 111、523 以及部分 622），而氢氧化锂主要用于生产三元材料中的高镍正极材料（部分 NCM622，全部的 NCM811、9 系以及 NCA），主要原因是生产高镍三元材料要求较低烧结温度才能得到优异的性能，而碳酸锂熔点过高，因此熔点较低的氢氧化锂成为高镍三元的较好选择。

图表 19：碳酸锂和氢氧化锂区别及联系

项目	内容
来源	可同由锂辉石提取，氢氧化锂也可以通过盐湖卤水提锂先生产出粗制碳酸锂，再苛化制取。
成本	锂辉石制备成本差异不大，盐湖卤水制备氢氧化锂的成本则比制备碳酸锂的要高很多。
碳酸锂转氢氧化锂	技术难度小，但是成本和建设周期等较为麻烦。碳酸锂转氢氧化锂采用的是“苛化法”，在碳酸锂中加入氢氧化钙反应生产氢氧化锂，工艺上相对比较成熟，但是需要建设专门的产线，不考虑折旧等生产成本每吨至少在 6000 元以上，建设周期至少在 1-2 年。
氢氧化锂转碳酸锂	氢氧化锂制备碳酸锂更简单，在氢氧化锂溶液中加入二氧化碳，即可得到碳酸锂溶液，再进行析出、沉淀、烘干便可得到碳酸锂。同样该工艺需要建设专门的产线，也需要额外的增加成本。
用途区别	氢氧化锂主要用于生产 NCA 和 NCM8 系及以上正极，部分 NCM6 系。NCA 和 NCM811 必须采用电池级氢氧化锂，而 NCM622 和 NCM523 既可以采用氢氧化锂，也可以采用碳酸锂。碳酸锂主要用在磷酸铁锂、钴酸锂、锰酸锂以及部分三元锂（3 系、5 系、部分 6 系）等的正极材料。

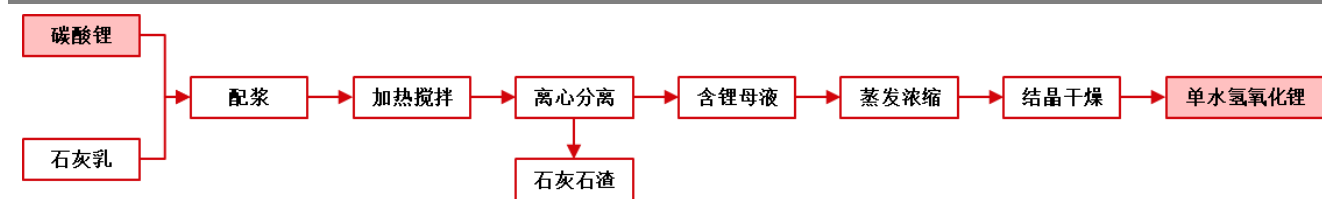
资料来源：公开资料整理 中信期货研究所

4.2 碳酸锂转化氢氧化锂

由于生产更简单，一般而言碳酸锂的供应更充足，在氢氧化锂供应不及时使用碳酸锂进行转化是一个很好的办法。**碳酸锂生产氢氧化锂一般采用苛化法**，该方法将碳酸锂和精制石灰乳按摩尔比 1:1.08 混合，调节苛化液浓度为 18-20g/L，加热至沸腾并强力搅拌，控制苛化时间为 30min，经离心分离得到碳酸钙沉淀以及浓度约为 3.5%的氢氧化锂母液，将母液蒸发浓缩、结晶干燥，制得单水氢氧化锂产品。

碳酸锂苛化工艺相对比较成熟，但是需要建设专门的产线，不考虑折旧等生产成本每吨至少在 6000 元以上，建设周期至少在 1-2 年。所以在碳酸锂和氢氧化锂价差极负的时候，苛化产能一般会有较高的开工率，这对平抑价差有所助益。

图表 20：碳酸锂制取氢氧化锂流程



资料来源：《氢氧化锂制备工艺进展》 中信期货研究所

免责声明

除非另有说明，中信期货有限公司（以下简称“中信期货”）拥有本报告的版权和/或其他相关知识产权。未经中信期货有限公司事先书面许可，任何单位或个人不得以任何方式复制、转载、引用、刊登、发表、发行、修改、翻译此报告的全部或部分材料、内容。除非另有说明，本报告中使用的所有商标、服务标记及标记均为中信期货所有或经合法授权被许可使用的商标、服务标记及标记。未经中信期货或商标所有权人的书面许可，任何单位或个人不得使用该商标、服务标记及标记。

如果在任何国家或地区管辖范围内，本报告内容或其适用与任何政府机构、监管机构、自律组织或者清算机构的法律、规则或规定内容相抵触，或者中信期货未被授权在当地提供这种信息或服务，那么本报告的内容并不意图提供给这些地区的个人或组织，任何个人或组织也不得在当地查看或使用本报告。本报告所载的内容并非适用于所有国家或地区或者适用于所有人。

此报告所载的全部内容仅作参考之用。此报告的内容不构成对任何人的投资建议，且中信期货不会因接收人收到此报告而视其为客户。

尽管本报告中所包含的信息是我们于发布之时从我们认为可靠的渠道获得，但中信期货对于本报告所载的信息、观点以及数据的准确性、可靠性、时效性以及完整性不作任何明确或隐含的保证。因此任何人不得对本报告所载的信息、观点以及数据的准确性、可靠性、时效性及完整性产生任何依赖，且中信期货不对因使用此报告及所载材料而造成的损失承担任何责任。本报告不应取代个人的独立判断。本报告仅反映编写人的不同设想、见解及分析方法。本报告所载的观点并不代表中信期货或任何其附属或联营公司的立场。

此报告中所指的投资及服务可能不适合阁下。我们建议阁下如有任何疑问应咨询独立投资顾问。此报告不构成任何投资、法律、会计或税务建议，且不担保任何投资及策略适合阁下。此报告并不构成中信期货给予阁下的任何私人咨询建议。

深圳总部

地址：深圳市福田区中心三路8号卓越时代广场（二期）北座13层1301-1305、14层

邮编：518048

电话：400-990-8826

传真：(0755) 83241191

网址：<http://www.citicsf.com>