

盐湖卤水提锂技术研究进展

杨春香

青海盐湖蓝科锂业股份有限公司 青海 格尔木 816000

摘要：随着新能源汽车、储能等行业的快速发展，锂资源的需求急剧增加。盐湖卤水作为重要的锂资源来源，其提锂技术的研究备受关注。本文综述了盐湖卤水提锂技术的现状，包括沉淀法、吸附法、溶剂萃取法、膜分离法等主要方法，分析了各种方法的原理、优缺点及研究进展，并对盐湖卤水提锂技术的发展趋势进行了展望，旨在为盐湖卤水提锂技术的进一步研究和应用提供参考。

关键词：盐湖卤水；提锂技术；研究进展；发展趋势

引言

锂是一种重要的战略资源，广泛应用于电池、陶瓷、玻璃、润滑剂等众多领域。近年来，随着新能源汽车、储能等行业的迅猛发展，对锂的需求呈现出爆发式增长。据统计，2022年全球锂需求量约为60万吨（以碳酸锂当量计），预计到2025年将超过150万吨。全球锂资源主要分为盐湖卤水型和矿石型，其中盐湖卤水型锂资源储量丰富，占全球锂资源总量的约60%以上。我国盐湖锂资源储量占全球总量的12%，位居世界第三，主要分布在青海、西藏等地区。因此，从盐湖卤水中提取锂具有重要的经济和战略意义。

盐湖卤水成分复杂，含有多种金属离子（如锂、钠、钾、镁、钙等）和非金属离子（如氯离子、硫酸根离子等），锂含量相对较低，且与镁、钙等离子共存，分离难度较大。如何高效、环保地从盐湖卤水中提取锂，一直是研究的热点和难点。经过多年的发展，盐湖卤水提锂技术取得了显著进展，多种方法得到了广泛应用和研究。

1 主要盐湖卤水提锂技术

1.1 沉淀法

1.1.1 原理

沉淀法是利用锂与其他离子在特定条件下化学性质的差异，通过加入沉淀剂使锂以沉淀的形式从卤水中分离出来。常见的沉淀法有碳酸盐沉淀法、铝酸盐沉淀法等。碳酸盐沉淀法是向卤水中加入碳酸钠等碳酸盐，使锂以碳酸锂的形式沉淀析出，其反应方程式为： $\text{Li}^+ + \text{CO}_3^{2-} = \text{Li}_2\text{CO}_3 \downarrow$ ；铝酸盐沉淀法则是利用铝酸钠与锂反应生成难溶的锂铝化合物沉淀，如 $\text{LiCl} + \text{NaAlO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{LiAlO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \downarrow + \text{NaCl}$ 。

1.1.2 优缺点

沉淀法的优点是工艺成熟、操作简单、成本较低，适合大规模生产。然而，该方法也存在一些明显的缺

点。由于盐湖卤水中锂与镁、钙等离子的化学性质相似，沉淀过程中容易受到这些离子的干扰，导致锂的沉淀选择性不高，产品纯度较低^[1]。此外，沉淀法需要消耗大量的沉淀剂，且会产生大量的废渣，对环境造成一定的压力。

1.1.3 研究进展

为了提高沉淀法提锂的选择性和效率，研究人员进行了大量的改进研究。例如，通过预处理卤水，采用多级沉淀、加入助沉淀剂等方法去除部分镁、钙等杂质离子，降低其对锂沉淀的干扰。有研究报道，在沉淀前加入适量的磷酸钠，可使镁离子形成磷酸镁沉淀，从而提高锂的沉淀选择性，使锂的沉淀率提高至92%以上，产品纯度达到97%。开发新型沉淀剂也是研究热点之一，如有机沉淀剂的使用，能够提高锂的沉淀率和产品纯度。优化沉淀工艺条件，如采用变温沉淀、分段沉淀等方法，也可实现锂的高效分离。近年来，一些研究还将沉淀法与其他方法相结合，如沉淀-吸附联合法，先通过沉淀法去除部分杂质，再利用吸附法进一步提纯锂，取得了较好的效果。

1.2 吸附法

1.2.1 原理

吸附法是利用吸附剂对锂离子具有选择性吸附的特性，将锂从盐湖卤水中分离出来。常用的吸附剂有锰系吸附剂、钛系吸附剂、铝系吸附剂等。这些吸附剂表面具有特定的活性位点，能够与锂离子发生物理或化学吸附作用，从而实现锂的选择性分离。以锰系吸附剂为例，其吸附锂的原理是基于锂离子与吸附剂表面锰氧化物的特殊相互作用，锂离子能够嵌入到锰氧化物的晶格结构中，形成稳定的吸附态。吸附过程一般包括吸附和解吸两个步骤，吸附剂吸附锂离子后，通过洗脱剂将锂离子解吸下来，得到富锂溶液。

1.2.2 优缺点

吸附法的优点是选择性高、操作简单、对环境友好，能够直接从低品位的盐湖卤水中提取锂，尤其适用于高镁锂比卤水的提锂。此外，吸附剂可以循环使用，降低了生产成本。但是，吸附法也存在一些不足之处，如吸附剂的吸附容量有限，需要频繁进行吸附 - 解吸操作，增加了生产周期和成本；部分吸附剂的稳定性和机械强度较差，容易在使用过程中发生磨损和破碎，影响吸附效果和使用寿命。

1.2.3 研究进展

为了提高吸附法的性能，研究人员在吸附剂的开发和改进方面做了大量工作。一方面，通过改变吸附剂的组成和结构，提高其吸附容量和选择性。例如，采用纳米技术制备纳米级吸附剂，增大吸附剂的比表面积，提高锂离子的吸附效率^[2]。有研究报道，纳米级锰系吸附剂的比表面积可达 $100 - 200\text{m}^2/\text{g}$ ，对锂的吸附容量比传统吸附剂提高了 30% - 50%。对吸附剂进行表面改性，引入特定的功能基团，增强其对锂离子的吸附能力。另一方面，优化吸附工艺条件，如吸附时间、温度、卤水流量等，提高锂的吸附率和解吸率。此外，研究人员还在探索新型吸附剂，如离子筛型吸附剂，该吸附剂具有更高的选择性和吸附容量，有望成为未来吸附法提锂的主流吸附剂。

1.3 溶剂萃取法

1.3.1 原理

溶剂萃取法是利用锂在两种互不相溶的溶剂中分配系数的差异，将锂从盐湖卤水中萃取到有机相中，然后再通过反萃取将锂从有机相中转移到水相中，从而实现锂的分离和富集。常用的萃取剂有磷酸三丁酯（TBP）、中性协萃体系、冠醚类化合物等。萃取过程中，锂离子与萃取剂发生络合反应，形成络合物进入有机相，而其他杂质离子则留在水相中。例如，以 TBP 为萃取剂，在特定条件下，锂离子与 TBP 形成络合物 $\text{Li}(\text{TBP})_{n3-n}$ 进入有机相。

1.3.2 优缺点

溶剂萃取法的优点是分离效率高、选择性好、操作灵活，能够快速实现锂与其他离子的分离。该方法适用于处理各种成分的盐湖卤水，尤其对于高镁锂比卤水具有较好的分离效果。然而，溶剂萃取法也存在一些缺点，如萃取剂成本较高、易乳化、对设备腐蚀性大等。此外，萃取过程中需要使用大量的有机溶剂，存在一定的安全隐患和环境污染问题。

1.3.3 研究进展

为了克服溶剂萃取法的缺点，研究人员开展了大量的研究工作。在萃取剂方面，开发新型高效、低毒、低成本的萃取剂是研究的重点。例如，一些研究将多种萃取剂进行复合，形成协同萃取体系，提高了锂的萃取率和选择性；研发新型绿色萃取剂，如离子液体萃取剂，具有挥发性低、热稳定性好、对环境友好等优点，有望替代传统有机萃取剂。在工艺方面，优化萃取和反萃取条件，如萃取剂浓度、相比、温度等，提高锂的萃取和反萃取效率；采用新型萃取设备，如离心萃取器、微通道萃取器等，提高萃取过程的传质效率，减少萃取剂的用量和乳化现象。

1.4 膜分离法

1.4.1 原理

膜分离法是利用膜的选择性透过性能，将盐湖卤水中的锂与其他离子分离。根据膜的性质和分离机制的不同，膜分离法可分为电渗析、纳滤、反渗透等多种方法。电渗析是利用离子交换膜的选择透过性，在直流电场的作用下，使锂离子和其他离子发生定向迁移，从而实现锂的分离和浓缩；纳滤和反渗透则是利用半透膜对不同粒径分子的截留作用，将锂离子与其他大分子离子或杂质分离^[3]。例如，纳滤膜对二价及以上离子具有较高的截留率，而对一价离子（如锂离子、钠离子等）的截留率较低，从而实现锂与镁、钙等二价离子的分离。

1.4.2 优缺点

膜分离法具有操作简单、能耗低、无二次污染等优点，能够在常温下进行分离，对热敏性物质具有良好的分离效果。该方法可以实现对锂的选择性分离和浓缩，产品纯度较高。但是，膜分离法也存在一些局限性，如膜的成本较高、易污染和堵塞、使用寿命较短等。此外，膜的性能受温度、压力、pH 值等因素的影响较大，需要严格控制操作条件。

1.4.3 研究进展

为了提高膜分离法的性能和应用范围，研究人员在膜材料的开发和膜工艺的优化方面进行了大量研究。在膜材料方面，开发新型高性能膜材料是关键。例如，制备具有高选择性、高通量、抗污染性能好的离子交换膜和纳滤膜，提高锂的分离效率和膜的使用寿命。近年来，一些新型膜材料如石墨烯膜、共价有机框架膜等逐渐应用于锂的分离领域，显示出良好的应用前景。在膜工艺方面，优化膜分离操作条件，如膜组件的设计、操作压力、流速等，提高膜分离过程的稳定性和效率；将膜分离法与其他方法相结合，如膜 - 吸附联合法、膜 - 沉淀联合法等，发挥各种方法的优势，实现锂的高效提取。

2 盐湖卤水提锂技术的发展趋势

2.1 多种方法联合应用

盐湖卤水成分复杂，含有多种金属离子和杂质，单一提锂方法在面对如此复杂的体系时，往往难以兼顾高效、低成本和环保等多方面要求。因此，多种方法联合应用将成为未来盐湖卤水提锂技术的主流方向。例如，沉淀法与吸附法相结合。沉淀法可先对卤水进行初步处理，去除其中大部分的钙、镁离子，有效降低卤水的镁锂比。这一步骤为后续提锂创造了更有利的条件，因为过高的镁锂比会干扰锂的提取，增加提锂难度和成本。经过沉淀法处理后的卤水，再利用吸附法进行进一步提纯。吸附法能够选择性地吸附锂离子，对锂具有较高的亲和力和吸附容量，从而显著提高锂的回收率和产品纯度。又如，溶剂萃取法与膜分离法结合。溶剂萃取法可以利用有机溶剂对锂的选择性萃取作用，将锂从卤水中分离出来。而膜分离法则凭借其独特的分离原理，能够根据膜孔径的大小和膜表面的性质，对锂离子和其他杂质进行有效分离。二者结合，可充分发挥各自优势，提高锂的提取效率和分离效果，同时降低生产成本和环境污染。

2.2 开发新型提锂技术和材料

科技的持续进步为盐湖卤水提锂技术带来了新的发展机遇，开发新型提锂技术和材料成为研究的重要方向。在新型材料方面，研究人员致力于研发具有更高选择性和吸附容量的吸附剂、萃取率更高的萃取剂以及分离效率更优的膜材料。例如，新型吸附剂可以通过对分子结构和表面性质的优化，增强其对锂离子的特异性吸附能力，提高锂的吸附容量和选择性，从而在复杂的盐湖卤水体系中更精准地提取锂。在新型提锂原理和方法上，电化学提锂和生物提锂展现出巨大潜力。电化学提锂利用电极反应选择性地吸附或析出锂离子，具有选择性高、能耗低等显著优点^[4]。通过合理设计电极材料和电解液体系，能够实现对锂离子的高效分离和富集。生物提锂则是借助某些微生物或生物材料对锂的特异性吸附作用来实现锂的分离。这种技术具有环境友好、成本低等潜在优势，符合可持续发展的要求，有望在未来得到广泛应用。

2.3 绿色可持续发展

随着环保要求的日益严格，盐湖卤水提锂技术必须朝着绿色可持续发展的方向迈进。研究开发低能耗、低污染、资源循环利用的提锂工艺是关键所在。在能源

利用方面，采用清洁能源为提锂过程提供动力，如太阳能、风能等，可有效减少对传统化石能源的依赖，降低生产过程中的碳排放。在资源循环利用方面，对提锂过程中产生的废渣进行综合利用，可用于制备建筑材料、化工原料等，实现废渣的资源化。对废水进行处理后回用，既能减少水资源的消耗，又能避免废水排放对环境造成的污染。通过这些措施，可最大程度地降低盐湖卤水提锂对环境的影响，实现经济效益和环境效益的双赢。

2.4 智能化和自动化控制

为了提高盐湖卤水提锂生产的效率和稳定性，实现智能化和自动化控制是未来的必然趋势。利用先进的传感器、控制系统和数据分析技术，对提锂过程进行实时监测和优化控制。通过安装在线监测设备，能够实时获取卤水的成分、温度、压力等关键参数。根据这些监测结果，控制系统可自动调整生产工艺参数，确保生产过程始终处于稳定运行状态。同时，利用大数据分析和人工智能技术，对生产过程中积累的大量数据进行深入挖掘和分析，找出影响生产效率和产品质量的关键因素，优化生产流程，降低生产成本，提高产品的市场竞争力。

结语

盐湖卤水作为重要的锂资源来源，其提锂技术的研究对于保障我国锂资源供应安全、推动新能源汽车和储能等产业发展具有重要意义。目前，沉淀法、吸附法、溶剂萃取法和膜分离法等是主要的盐湖卤水提锂方法，每种方法都有其优缺点和适用范围。随着研究的不断深入，多种方法联合应用、开发新型提锂技术和材料、绿色可持续发展以及智能化和自动化控制将成为盐湖卤水提锂技术的发展趋势。未来，需要进一步加强产学研合作，加大研发投入，突破关键技术瓶颈，推动盐湖卤水提锂技术的不断创新和进步，实现我国锂资源的高效开发和利用。

参考文献

- [1]付煜,邓觅,黄冬根,等.盐湖卤水提锂技术研究进展[J].无机盐工业,2023,55(09):9-16+65.
- [2]李昌文,詹鸿龙,乔英钧,等.盐湖卤水电化学提锂技术研究进展[J].无机盐工业,2025,57(07):1-13.
- [3]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.
- [4]葛涛,徐亮,孟金伟,等.盐湖卤水提锂工艺技术研究进展[J].有色金属工程,2021,11(02):55-62.