文章编号:1674-2869(2025)02-0119-08

盐湖资源综合利用技术进展

裴志杰[1],余荣光[1],李浩勋[1],熊 芸[1],丁一刚[1],刘生鹏[1],侯建华*[2]
1.武汉工程大学化工与制药学院,湖北 武汉 430205;
2.国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司,新疆 哈密 839000

摘 要:盐湖作为重要自然资源,蕴含着丰富的无机盐资源,受到全球广泛关注。阐述了近年来国内外对盐湖中钾、镁、锂和硼等盐产品的开发利用现状,系统梳理了浮选法提钾、电解法产镁、沉淀法收锂、酸化法析硼等主流提取工艺,还指出了盐湖产业开发中面临的主要问题,不合理的开采方法导致尾矿堆积和资源品位下降。针对未来盐湖资源的综合利用前景,建议构建智能化生产体系,集成清洁工艺与资源循环技术,重点突破低品位盐湖元素提取设备创新,推动盐湖资源向高效化、低碳化、全元素联产方向转型升级,实现生态保护与资源价值最大化协同发展。

关键词:盐湖;钾;镁;锂;硼;综合利用;研究现状
中图分类号:TS396.1 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202406032

Progress in comprehensive utilization of salt lake resources

PEI Zhijie[1], *YU Rongguang*[1], *LI Haoxun*[1], *XIONG Yun*[1], *DING Yigang*[1], *LIU Shengpeng*[1], *HOU Jianhua**[2]
1. School of Chemical Engineering & Pharmacy, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;
2. State Development Investment Corporation Xinjiang Luobupo Potash Co., Ltd, Hami 839000, China

Abstract: Salt lakes, as critical natural repositories of inorganic salt resources, have attracted global attention due to their strategic mineral reserves. This paper systematically reviews recent advances in exploiting potassium, magnesium, lithium, and boron salt from salt lakes, detailing mainstream extraction methodologies: flotation for potassium, electrolysis for magnesium, precipitation for lithium, and acid leaching for boron. And it further identifies key challenges in salt lake industrial development, particularly suboptimal extraction methods that induce tailings accumulation and a decline in resource quality. To address the future comprehensive utilization of salt lake resources, it is suggested to build an intelligent production system that integrates environmentally benign processes and resource recycling technologies, and focuses on innovative equipment for the extraction of low-grade salt lake elements. This will promote the transition toward high-efficiency, low-carbon, and multi-element co-production paradigms. Such integrated approaches help achieve coordinated development of ecological preservation and resource value maximization in salt lake ecosystems.

Keywords: salt lake; potassium; magnesium; lithium; boron; comprehensive utilization; research status

盐湖中蕴藏多达200种盐类矿物,是世界上重要的矿物来源。除了常见的食用盐,还富含石膏、镁盐、碱性化合物等资源。部分盐湖更赋存有锂、硼、钾、铯、铷、锶、溴等战略矿产,以及铀等稀有元素。随着科技和经济发展,这些资源被广泛应用于化工、农业、轻工业、冶金和医药等领域[1]。

收稿日期:2024-06-26
基金项目:武汉工程大学第十五届研究生教育创新基金(CX2023020)
作者简介:裴志杰,硕士研究生。Email:pei1790777101@163.com
***通信作者**:侯建华,高级工程师。Email:lbphjh@126.com
引文格式:裴志杰,余荣光,李浩勋,等.盐湖资源综合利用技术进展[J].武汉工程大学学报,2025,47(2):119-126,186.

目前各国对盐湖资源开展了差异化开发[2]，美国大盐湖通过浮选/电解法生产钾肥与镁锭；中国柴达木盐湖（镁锭产能占全球80%）及南美锂三角采用电解/沉淀法提取镁锂；阿塔卡玛湖与柴达木盐湖实施酸化法提硼，而西尔斯湖则通过分级结晶-萃取联用技术分离硼资源。这些差异化不仅体现了资源禀赋的约束性，也反映了技术选择与产业链布局的灵活性。

本文综述了近年来各国盐湖资源开发研究进展，重点分析卤水中钾、镁、锂、硼元素的提取技术，并对未来高效提取技术发展作出展望。

1 盐湖钾资源的开发利用技术

钾（K）是农作物必需营养元素，被称为粮食的“食粮”[3]，是维持和推动农产品产量的必要条件之一。质量分数95%的钾盐[4]用于钾肥生产，其主要成分为氯化物及硫酸盐矿物[5]。

截至2020年，全球钾盐储量129亿t（以氯化钾计，下同），主要分布在俄罗斯、加拿大以及白俄罗斯，3国占比超全球总储量的73.57%，详见表1。

表1 全球钾盐（氯化钾）储量主要分布国家

Tab. 1 Distribution of global potassium salt (potassium chloride) reserves by country

排名	国家	储量/万t	质量分数占比/%
1	俄罗斯	491 459	38.16
2	加拿大	326 910	25.38
3	白俄罗斯	129 147	10.03
4	土库曼斯坦	98 062	7.61
5	中国	31 700	2.46
6	老挝	23 736	1.84
7	巴西	22 880	1.78
8	德国	20 940	1.63
9	美国	8 248	0.64
10	英国	6 462	0.50
11	其他	128 395	9.97
	总计	1 287 939	100.00

钾盐提取工艺多样。传统萃取、溶析、沉淀法[6]因高污染、高能耗、低效率等问题（表2）难以工业化。当前浮选法作为主要生产技术，需针对不同盐湖钾资源差异，选择合适的工艺路线。

1.1 国外分离提取钾盐的技术

1.1.1 *加拿大提钾工艺* 加拿大作为世界上钾盐品位高且储量最大的国家，以加拿大的萨斯喀彻温钾盐生产厂为例，在该地区的Vanscoy矿区，水不溶物仅占5.5%[7-8]，因此生产工艺较为简单。如图1所示，原料通过磨矿-水力旋流分级系统实现矿物解离与粒度调控，再经浮选完成KCl分选。该流程大幅降低了试剂的消耗量。

表2 传统提钾方法危害

Tab. 2 Hazards of traditional potassium extraction methods

方法	缺点
萃取法	回收率低，萃取剂昂贵
溶析法	对原料要求高，腐蚀设备，污染环境
沉淀法	药剂昂贵难回收，易爆、有毒

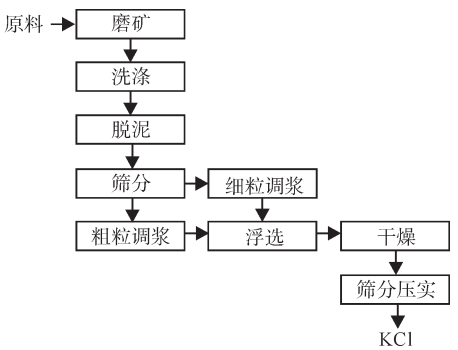

图1 加拿大氯化钾生产工艺流程

Fig. 1 Production process of potassium chloride in Canada

1.1.2 *美国大盐湖提钾工艺* 美国大盐湖硫酸钾生产工艺[9]采用钾盐镁矾转化法：卤水与硫酸钾母液混合析出钾盐镁矾，经浮选脱钠-旋流浓缩-母液纯化获得高纯软钾镁矾，最终与KCl复分解生成硫酸钾。该工艺母液循环量大，K^+回收率低，依赖外购KCl导致成本高，生产能力不稳定。

1.1.3 *死海提钾工艺* 死海作为含盐度最高的天然湖（盐度345 g/L，为海水10倍[10]），卤水富含NaCl、KCl、$MgCl_2$等矿物[11-12]，其KCl提取工艺（图2）采用“盐田蒸发-调控池组分优化-光卤石富集（84%）[11]-冷结晶联产”技术路线：蒸发浓缩后KCl含量达2%[11]，经浮选剂Armoflot-619分离获得粗KCl，再通过饱和液溶解$MgCl_2$实现KCl纯化。该工艺虽实现钾回收，但存在蒸发周期长、能耗高等问题[13]。

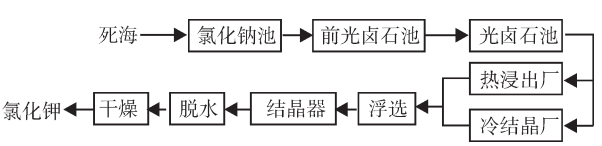

图2 氯化钾生产工艺

Fig. 2 Potassium chloride production process

1.2 国内分离提取钾盐的技术

1.2.1 *察尔汗盐湖提钾工艺* 察尔汗盐湖是中国最大的钾盐矿山，国内钾肥产能约1 000万t/a，青海盐湖占比60%（600万t）[14]。氯化钾的加工工艺

有多条技术路线[15]，应用较多的是反浮选-冷结晶法和冷分解-浮选法[16]。

反浮选-冷结晶工艺流程（图3）具体为：矿浆经反浮选脱钠→过滤脱水→冷结晶注水→粒度分选→洗涤干燥，最终获得工业级KCl。该工艺通过结晶与粒度梯度分离，实现产品纯度与颗粒形态的协同优化。

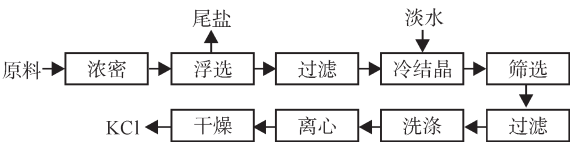

图3　青海盐湖钾肥股份有限公司生产KCl工艺流程

Fig. 3　Production process of potassium chloride by QingHai Salt Lake Industry Co.，Ltd.

1.2.2　罗布泊盐湖提钾工艺　罗布泊盐湖是我国第二大含钾量最多的盐湖（KCl储量2.5亿t[17]）采用冷分解-浮选法提钾（图4）：原卤蒸发分为钾盐镁矾池与光卤石池。钾盐镁矾池经浓缩研磨-一段转化（加饱和母液生成软钾镁矾）-浮选得到软钾镁矾；光卤石池通过磨矿分解-浮选除钠获得粗KCl。两种产物经混合洗涤-二段转化-结晶干燥工序，最终制得硫酸钾产品。该工艺通过“分池预处理-双段转化”实现钾镁钠多元素协同提取与硫酸钾合成。

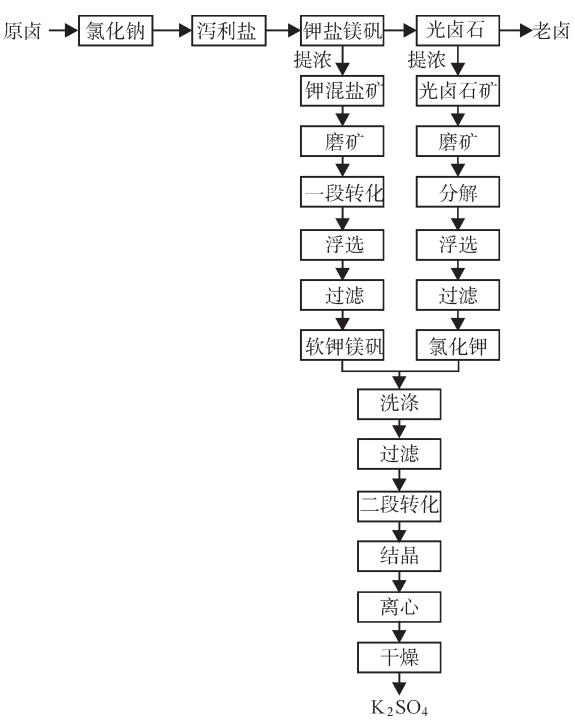

图4　国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司K_2SO_4生产工艺

Fig. 4　Production process of K_2SO_4 by SDIC Xinjiang Luobupo Hoevellite Co.，Ltd

尽管提钾工艺已在多国进行生产，但生产工艺流程长、过程繁琐，且生产的钾盐品位低，回收率不高，尾矿钾含量高，因此需要开发新工艺，可以引入智能技术提升效率与资源回收率，利用含钾废弃物减少对原矿依赖，推动循环经济。

2　盐湖镁资源的开发利用技术

镁（Mg）作为21世纪绿色材料[18]，广泛应用于航天、军工及3C电子领域。盐湖镁资源可开发金属镁、氢氧化镁等产品，其中$Mg(OH)_2$作为核心镁基材料，在阻燃、环保处理等领域发挥重要作用[19]。我国拥有全球最丰富的镁资源，镁锭产量占世界85.8%（图5）。

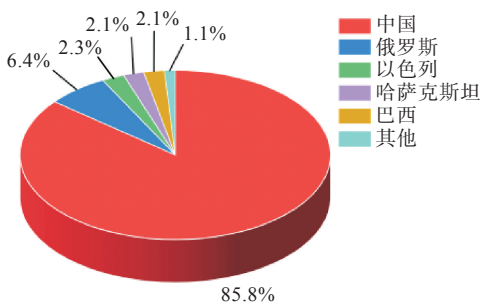

图5　2021年全球镁锭产量占比

Fig. 5　Global magnesium ingot production share in 2021

世界上含镁量较高的大型盐湖有：美国大盐湖、玻利维亚乌尤尼盐湖、中国察尔汗盐湖。目前从盐湖中提取镁的方法主要为电解法和沉淀法，其中电解法已实现工业化。

2.1　国外分离提取镁盐的技术

2.1.1　美国大盐湖提镁工艺　美国大盐湖卤水含氯化镁质量分数0.45%[20]，经浓缩提镁至质量分数8.4%后，通过$CaCl_2$-辛醇体系去除硫酸根与硼。净化卤水干燥生成含$Mg(OH)_xCl$的氯化镁粉末，经氯气-碳高温熔融获得高纯$MgCl_2$熔盐。电解环节实现氯气循环回用，阴极金属镁经真空收集后成型加工。该工艺集成预处理、氧化控制、熔融净化与电解提镁4大系统[21]，实现资源高效利用与氯气闭路循环。

2.1.2　乌尤尼盐湖提镁工艺　玻利维亚乌尤尼盐湖卤水镁含量达13.3 g/L[22]，常采用沉淀法提取镁盐。Tran等[22-23]分别以草酸除钙后制备碳酸镁与草酸镁：前者在25 ℃下先形成草酸钙，调节pH至4~7后通过碳酸钠沉淀转化得碳酸镁；后者在20 ℃下直接控制pH回收草酸镁沉淀。两种工艺均经洗涤、干燥纯化（Kim工艺含100 ℃干燥），核心差异在于产物转化方式，但均通过固液分离纯

化获得目标镁盐。

2.2 国内分离提取镁盐的技术

我国盐湖镁资源主要分布在青海柴达木盆地(占全国储量99%),其$MgCl_2$储量达40.6亿t,占全球40%[24]。

青海盐湖工业股份有限公司以钾肥废液为原料,经盐田滩晒获得含33.7%水氯镁石的卤水,采用卤水电解镁技术,通过氯化氢气氛脱水制备无水氯化镁,再经电解槽电解生产高纯度金属镁。工艺集成除杂-精制-电解流程,副产氯气用于聚氯乙烯生产,并采用天然气清洁能源与光伏发电降低碳排。该模式实现氯气闭路循环与清洁冶炼,同步提升产品环保性与经济效益。

提钾、锂工艺会产生大量$MgCl_2$与$Mg(OH)_2$副产物[25],未经利用就被排放,不仅造成了浪费,还限制了其他元素的提取并引发盐湖生态恶化("镁害")。目前研究较多的是采用沉淀法或水热法添加碱液生成$Mg(OH)_2$[26],然而,碱性试剂的使用,不仅增加了生产成本,还引入了其他的杂质,水热法需在高温高压下进行,具有一定的危险性。当前亟需开发低成本、高收率提镁技术,如优化浮选、膜分离或溶剂萃取工艺,以减少试剂依赖及能耗,同步实现镁资源化利用,推动盐湖综合开发。

3 盐湖锂资源的开发利用技术

锂(Li)作为"21世纪战略元素"[27],被誉为"白色石油",在新能源、医药、燃料[28]及核工业等领域具有核心元素战略价值。全球卤水锂资源约为5 230万t(以Li元素计)[29],可采量2 320万t,主要富集于智利、阿根廷、玻利维亚组成的"锂三角"[30],2020年全球锂资源分布详见表3。

表3 全球锂矿(以碳酸锂计)资源量主要分布国家

Tab. 3 Distribution of global lithium ore (lithium carbonate) reserves by country

排名	国家	资源量 / 万t	质量分数 / %
1	玻利维亚	11 176	31.98
2	阿根廷	7 934	22.71
3	美国	5 492	15.72
4	澳大利亚	2 062	5.90
5	中国	1 914	5.48
6	刚果(金)	1 628	4.66
7	加拿大	1 462	4.18
8	捷克	656	1.88
9	埃塞俄比亚	617	1.77
10	智利	580	1.66
11	其他	1 422	4.07
	合计	34 943	100.00

从盐湖中提锂的方法多样[31],例如沉淀法[32]、溶剂萃取[33]、电渗析[34]和吸附法[35-36],然而,溶剂萃取因试剂成本高、反应机理不明及工业化壁垒,而仍局限在实验室阶段,目前常用沉淀法、电渗析和吸附法从卤水中提取锂。

3.1 国外分离提取锂盐的技术

3.1.1 乌尤尼盐湖提锂工艺 乌尤尼盐湖锂资源储量达10.2亿t,其卤水因高镁(1 518 g/L)、高硫酸盐及低锂(0.7~0.9 g/L)特性[37]使传统提锂工艺受阻,故开发采用两阶段沉淀法提锂。首先加入石灰[38]实现Mg^{2+}/SO_4^{2-}共沉淀为$Mg(OH)_2$和石膏,在pH<11.3时吸附回收硼;随后添加草酸盐沉淀残余Ca/Mg,经煅烧转化为生石灰循环利用。富集后卤水中LiCl质量浓度提升至20 g/L[39],经碳酸钠沉淀得到纯度为99.55%的碳酸锂产品。副产物$Mg(OH)_2$、石膏及硼可加工为高纯度镁、硼产品,实现资源综合利用。形成的"分步除杂-闭环循环"工艺体系,高效解决了高镁硫酸盐卤水提锂难题。

3.1.2 阿根廷翁布雷穆埃尔托盐湖提锂工艺 阿根廷翁布雷穆埃尔托盐湖锂资源达1.93亿t(全球第二),传统碱石灰提锂法依赖蒸发浓缩工艺,贫锂盐水排放会加剧环境负担。对此,Marchini等[40]提出电化学法:采用锂锰氧化物(化学式为$LiMn_2O_4$,LMO)薄膜阴极与聚吡咯(polyprrole,PPy)阳极构建系统,对含低浓度Li^+(975×10^{-6}~$1\ 280\times10^{-6}$)的卤水施加<1 V电压,通过LMO晶格选择性吸附Li^+、PPy可逆交换Cl^-;电极反转后释放Li^+与Cl^-形成富LiCl溶液。该技术无需蒸发步骤,实现锂回收率与纯度双提升,规避了传统工艺对高寒缺水生态的破坏。

3.1.3 美国大盐湖提锂工艺 美国大盐湖卤水含Li^+(18 mg/L)及高浓度Na^+(质量分数4.11%)、Mg^{2+}(质量分数0.4%)等组分[41]。Marthi等[31, 42]采用吸附法提锂,开发出DLMO@DE吸附剂:以硅藻土(diatomaceous earth,DE)为载体,经$KMnO_4$水热合成MnO_2@DE,650 ℃煅烧Li_2CO_3制得尖晶石LMO@DE,酸洗后形成活性吸附剂(图6)。在液固比0.05 L/g碱性卤水中实现95%锂吸附率,采用$S_2O_3^{2-}$洗脱液高效回收锂并控制锰溶损。该工艺通过载体改性与再生循环,实现高镁卤水锂选择性提取与吸附剂稳定性协同优化的目标。

3.2 国内分离提取锂盐的技术

柴达木盐湖具有高品位,大储量,以钾钠镁锂硫多组分共生著称,西台吉乃尔盐湖LiCl储量达

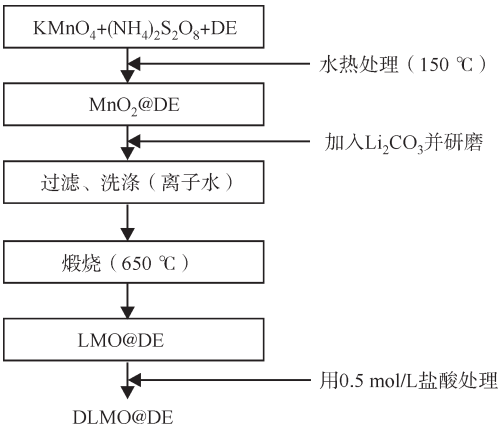

图6　DLMO@DE吸附剂制备流程

Fig. 6　Preparation process of DLMO@DE adsorbent

308万t(品位1 236 mg/L)[43]。提锂工艺采用“钠钾盐田蒸发-老卤富集”流程：经多级盐田蒸发析出水氯镁石后，富锂老卤通过LiCl转化纯化制得电池级碳酸锂(图7)。我国主流工艺通过蒸发结晶与化学法联用实现镁锂分离，国投罗钾正推进吸附法技术升级，提升锂资源提取效率与产品附加值。

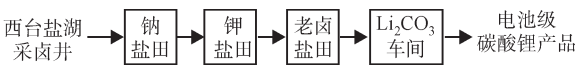

图7　西台吉乃尔盐湖碳酸锂生产工艺流程图

Fig. 7　Lithium carbonate production process at West Taijinar Salt Lake

一里坪盐湖采用膜法[44]提锂工艺：预处理老卤后经多级膜分离同步获取氢氧化镁副产品，滤料经蒸发浓缩-沉锂转化及洗涤干燥制得碳酸锂(图8)。该工艺通过"膜分离-沉锂"短流程实现锂镁高效分离与资源综合利用。

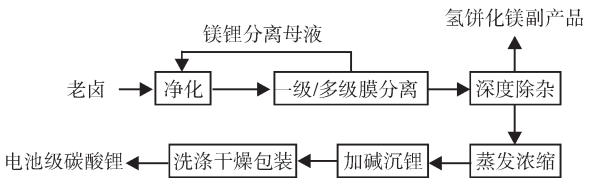

图8　膜法提锂工艺流程图

Fig. 8　Lithium extraction process using membrane technology

近年来，随着锂电池需求的急剧增长，从盐湖中回收锂已成为重要趋势。为确保锂资源供应，为提高提取效率和速率，增强Li^+对Mg^{2+}或Na^+的选择性，改善循环性能，并优化操作条件。新兴的有机系统和锂离子筛(lithium-ion sieve，LIS)技术展现出良好的提取性能，具有优异的选择性和循环稳定性。利用LIS作为电极结合电化学回收锂取得突破，具有商业化前景。液膜电渗析技术展现出潜力，但需进一步研究以处理高镁/锂比的卤水。然而，萃取法商业化面临萃取剂成本高和反应机理认知缺口等挑战。总之，研究界致力于开发低成本、环保高效、可持续的锂提取工艺，以满足锂资源日益增长的需求。

4　盐湖硼资源的开发利用技术

硼及其化合物作为战略资源，横跨能源、材料及国防领域[45]，在玻璃制造、半导体等场景发挥关键作用，尤其在国防、核工业等战略领域具有不可替代性[46-48]。含硼卤水资源化需通过湿法冶金分离技术[49]，实现硼与镁/锂等金属离子的高效分离，同步回收高值元素。

4.1　国外分离提取硼盐的技术

4.1.1　乌尤尼盐湖提硼工艺　Nishihama等[50]基于玻利维亚乌尤尼盐湖卤水，开发葡糖胺基螯合吸附剂技术：通过选择性吸附-盐酸洗脱-蒸发结晶工艺，获得高纯硼酸产品，硼回收率达81.7%。

4.1.2　阿塔卡玛湖提硼工艺　阿塔卡玛湖硼资源储量达1 580万t(以BB_2O_3计)，卤水含硼酸35 g/L。工艺以饱和$MgCl_2$卤水为原料，经H_2SO_4酸化析出硼酸，通过过滤-洗涤-干燥制得硼酸产品。实现盐湖伴生资源综合利用。

世界上硼含量和储量较大，并已经开发的盐湖有2处[51]：位于南美洲的阿塔卡玛湖，以及位于美国的西尔斯湖。

4.1.3　西尔斯湖提硼工艺　西尔斯湖按卤水KCl浓度分层[52]开发：上层卤水经蒸发除盐后氨冷冻(24 ℃)析出硼砂；下层则通过炭化转化为硼酸氢钠，经酸度调控后冷冻制备硼砂。两种工艺均基于不同卤水层特性差异，通过结晶过程优化实现硼砂定向制备。

表4　美国西尔斯盐湖卤水化学组成质量分数

Tab. 4　Chemical composition of brine from the Searles Lake, USA　　%

层界	KCl	$Na_2B_4O_7$	LiO_2	NaCl
上层	5.02	1.63	0.015	16.1
下层	2.74	1.69	0.006	15.5

采用萃取法从西尔斯湖稀卤水中提硼(图9)：煤油基螯合萃取剂与稀卤水混合实现硼选择性富集，H_2SO_4洗涤实现萃取剂再生，含硼洗提液浓缩结晶获得99.9%高纯H_3BO_3。该工艺通过“萃取-再生-结晶”流程，实现硼酸高效提纯与萃取剂循环利用。

Jamis等[53]将西尔斯湖盐湖天然卤水中的硼

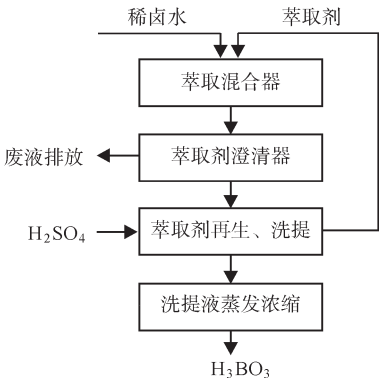

图9 萃取法提取硼酸流程图

Fig. 9 Extraction process for obtaining boric acid

酸盐与碱性试剂(如$Mg(OH)_2$和$Ca(OH)_2$)混合反应,生成低溶解度的硼酸盐,使用$Ca(OH)_2$作为沉淀剂形成$Ca_2B_2O_5·H_2O$,已被认为是更有效的方法。硼酸盐和$Ca(OH)_2$在水中发生如下反应[52,54]:

$$2Ca(OH)_2 + 2H_3BO_3 \rightarrow Ca_2B_2O_5·H_2O(s) + 4H_2O \quad (1)$$

$$2Ca^{2+} + 2B(OH)_4^- + 2OH^- \rightarrow Ca_2B_2O_5·H_2O(s) + 4H_2O \quad (2)$$

该工艺通过酸化-结晶-纯化流程实现$Ca_2B_2O_5·H_2O$中硼的回收(回收率60%)。研究发现,采用废弃生物材料[55]替代传统金属氢氧化物沉淀剂,可构建环境友好型硼回收技术路径。

4.2 国内分离提取硼盐的技术

我国盐湖硼资源开发经长期技术积累,已形成酸化法为主生产工艺[56]。沉淀、萃取等技术仍处于试验阶段,产业化转化仍需工艺优化支撑。2017年国内主要硼酸企业[57]依托该技术实现规模化生产,如表5所示。

东台吉乃尔盐湖采用盐酸法提硼(图10):盐田浓缩脱除钠钾后的富硼卤水[c(B)≥9 g/L,以多硼酸根形式存在],经梯度盐酸酸化水解生成粗硼酸[58]。粗硼酸通过"高温溶解-冷却结晶"精制工艺,利用硼酸溶解度温度梯度特性(表6),分离可溶盐及不溶杂质,最终获得工业级高纯硼酸。该技术通过酸度与温度双调控,实现杂质分离与产品纯度协同优化。盐酸和硼酸钠反应如下:

$$Na_2B_4O_9 + 2HCl + H_2O \rightarrow H_2B_4O_9 + 2NaCl + H_2O \quad (3)$$

$$H_2B_4O_7 + 8H_2O \rightarrow 4H_3BO_3 + 3H_2O \quad (4)$$

表5 部分硼酸生产企业情况

Tab. 5 Overview of some borax production enterprises

企业名称	生产能力/万t	所用原料	生产工艺
大石桥宏益精品化工厂	2.0	进口五水硼砂	硝酸法
泰誉威新材料科技有限公司	2.0	进口矿石	硫酸法
淄博义弘科技化工有限公司	5.0	进口五水硼砂	硝酸法
山东中纤越弘化工科技有限公司	5.0	进口五水硼砂	硝酸法
青海中天硼锂矿业有限公司	5.0	地产硼镁石	硫酸法
凤城化工集团有限公司	5.0	进口硬硼钙石	硫酸法
宽甸民政庆兴化工厂	1.5	地产硼镁矿石	硫酸法

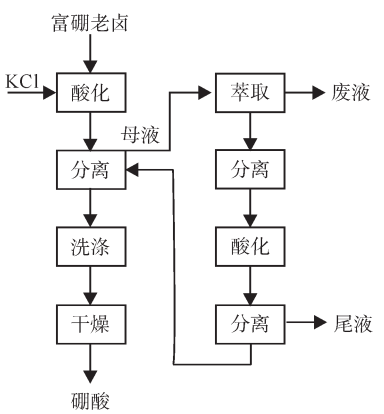

图10 硼酸生产工艺流程

Fig. 10 Boric acid production process

目前各国对从盐湖中提取硼元素进行了大量的研究。盐湖提硼技术聚焦于离子交换、溶剂萃取及电化学方向。离子交换法虽污染小但面临树脂成本高、再生难瓶颈;溶剂萃取选择性优但存在溶剂泄漏风险;双极膜电渗析经济性突出但工业化待突破。当前绿色技术趋势显著:电凝聚法耦合废弃生物材料(牡蛎壳等)兼具环保与经济性。多技术联用虽提升回收率却受制于高成本。未来

表6 不同温度下硼酸的溶解度

Tab. 6 Solubility of boric acid at different temperatures

溶解度/%	温度/℃	溶解度/%	温度/℃
2.77	0	8.90	40
3.65	10	11.39	50
4.87	20	14.89	60
5.74	25	23.54	80
6.77	30	38.00	100

双极膜电渗析（硼锂共提）与吸附法（低浓度硼处理）潜力显著，技术迭代需协同生态友好性、经济性与工艺稳定性，驱动盐湖硼资源清洁高效开发，以实现盐湖硼资源的高效清洁利用。

5　总结和展望

盐湖资源是一种宝贵的自然资源，蕴藏着丰富的无机元素，具有巨大的经济价值和应用潜力。随着科技的进步和创新，盐湖资源的开发和综合利用已经取得了一系列重要成就。其综合开发依托浮选、沉淀、电化学等多技术耦合体系驱动产业升级，为当地经济发展和产业升级做出了重要贡献。然而由于不合理的开采方法导致大量尾矿堆积和盐湖品位下降。因此，开发出新的工艺和设备从低品位盐湖提取有用元素是未来盐湖资源综合利用的目标。未来研究可以通过以下几点来尝试。

（1）建立清洁的生产技术体系，建立资源综合利用工艺技术体系，将不同元素提取工艺结合在一起，以便于降低生产成本，减少不必要的工序，提高生产效率，实现零排放或少排放；

（2）注入知识、培育自动化和智能化工序，例如，采矿区建立自动检测系统，替代人工长期观测数据及样品采集分析和预测；

（3）开发反污染工序，严格控制废水的排放，例如引入离子膜电渗析技术，对加工过程中的废水处理，建立反污染工序，使废水转化为工业用水，再循环使用。

参考文献

[1] YAN S M, SUN J Q. Assessing China's salt lake resources R&D based on bibliometrics analysis [J]. Scientometrics, 2015, 105(2): 1141-1155.

[2] 马仁锋，梁贤军，庄佩君. 基于文献计量视角的中国船舶工业及其技术研发动态[J]. 世界科技研究与发展，2014(4)：446-452.

[3] 李守江. 罗布泊硫酸盐型盐湖钾盐浮选的理论与工艺研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2019.

[4] CHEN W, GENG Y, HONG J L, et al. Life cycle assessment of potash fertilizer production in China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 138: 238-245.

[5] 胡刚，刘爽，周宾，等. 伊朗霍尔木兹海峡沿岸钾盐矿地质特征、成因分析及提取技术[J]. 矿产综合利用，2024，45(1)：8-14.

[6] 李长红，李海民. 盐湖卤水、海水中钾盐的提取方法、研究现状及发展趋势[J]. 盐湖研究，2010，18(1)：64-69.

[7] 马凯，马培华，王礼龙. 世界钾盐生产贸易现状[J]. 现代化工，2009，29(12)：82-86.

[8] 鲍荣华，刘树臣，闫卫东. 世界钾盐资源分配态势及我们的应对策略[J]. 国土资源情报，2010(8)：44-47.

[9] 邹松，方霖，沈善强，等. 国内外典型硫酸盐型盐湖卤水资源现状及提钾工艺综述[J]. 矿产保护与利用，2017(5)：113-118.

[10] ABU-HAMATTEH Z S H, AL-AMR A M. Carnallite froth flotation optimization and cell efficiency in the Arab potash company, Dead Sea, Jordan[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2008, 29(3): 232-257.

[11] AL-ZOUBI A, BRINK U S T. Salt diapirs in the Dead Sea basin and their relationship to Quaternary extensional tectonics [J]. Marine & Petroleum Geology, 2001, 18(7): 779-797.

[12] SHANI J, SHARON R, KOREN R, et al. Effect of Dead-Sea brine and its main salts on cell growth in culture[J]. Pharmacology, 1987, 35(6): 339-347.

[13] GAVRIELI I. Massive-scale dissolution, conveyance, and disposal of Dead Sea Potash Industry Halite waste [J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(22): 11.

[14] 陈文祥，张强，赵小刚，等. 察尔汗盐湖钾矿资源利用探讨[J]. 盐科学与化工，2022，51(8)：50-54.

[15] 谭秀民，张利珍，张秀峰. 浅析我国盐湖资源的综合利用[J]. 盐业与化工，2012，41(5)：5-7.

[16] 程芳琴，成怀刚，崔香梅. 中国盐湖资源的开发历程及现状[J]. 无机盐工业，2011，43(7)：1-4.

[17] 乜贞，卜令忠，刘建华，等. 我国盐湖钾盐资源现状及提钾工艺技术进展[J]. 地球学报，2010，31(6)：869-874.

[18] 毕秋艳，党力，曹海莲，等. 青海盐湖镁资源开发与利用研究进展[J]. 盐湖研究，2022，30(1)：101-109.

[19] LIN S N, ZHANG T G, FU D X, et al. Utilization of magnesium resources in salt lake brine and catalytic degradation of dye wastewater by doping cobalt and nickel [J]. Separation and Purification Technology, 2021, 270: 118808.

[20] 何扬. 美国大盐湖钾盐生产概况[J]. 化工矿物与加工，2000(7)：29-30.

[21] TRIPP T G. Production of magnesium from Great Salt Lake, Utah USA [J]. Natural Resources and Environmental Issues, 2009, 15(1): 10.

[22] TRAN K T, HAN K S, KIM S J, et al. Recovery of magnesium from Uyuni salar brine as hydrated magnesium carbonate [J]. Hydrometallurgy, 2016, 160: 106-114.

[23] TRAN K T, VAN L T, AN J W, et al. Recovery of magnesium from Uyuni salar brine as high purity

magnesium oxalate [J]. Hydrometallurgy, 2013, 138: 93-99.

[24] 刘国建,杨晓东,李鹏业,等.察尔汗盐湖镁资源在新材料、新能源领域的应用与发展[J].世界有色金属,2024(19):226-228.

[25] 阿旦春.盐湖镁盐制备镁水泥用活性MgO工艺研究[D].西宁:中国科学院大学(中国科学院青海盐湖研究所),2020.

[26] 汪衢.基于菱镁矿制备不同性能氧化镁及其对水化产品氢氧化镁的影响[D].唐山:华北理工大学,2022.

[27] ZHANG Y, HU Y H, WANG L, et al. Systematic review of lithium extraction from salt-lake brines via precipitation approaches [J]. Minerals Engineering, 2019, 139: 105868.

[28] 姜小萍,马龙.探究青海察尔汗盐湖卤水中钙、镁、锂三种元素提取工艺[J].安徽化工,2019,45(5):60-63.

[29] YAKSIC A, TILTON J E. Using the cumulative availability curve to assess the threat of mineral depletion: the case of lithium [J]. Resources Policy, 2009,34(4): 185-194.

[30] 王万航.新型杂多酸类共萃剂用于盐湖卤水萃取提锂的应用基础研究[D].北京:北京化工大学,2022.

[31] MARTHI R, SMITH Y R. Selective recovery of lithium from the Great Salt Lake using lithium manganese oxide-diatomaceous earth composite [J]. Hydrometallurgy, 2019,186: 115-125.

[32] LI Y H, ZHAO Z W, LIU X H, et al. Extraction of lithium from salt lake brine by aluminum-based alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015,25(10): 3484-3489.

[33] GAO D L, GUO Y, YU X P, et al. Extracting lithium from the high concentration ratio of magnesium and lithium brine using imidazolium-based ionic liquids with varying alkyl chain lengths [J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 2016, 49(2): 104-110.

[34] JI Z Y, CHEN Q B, YUAN J S, et al. Preliminary study on recovering lithium from high Mg^{2+}/Li^{+} ratio brines by electrodialysis [J]. Separation and Purification Technology, 2017, 172: 168-177.

[35] LIMJUCO L A, NISOLA G M, LAWAGON C P, et al. H_2TiO_3 composite adsorbent foam for efficient and continuous recovery of Li^{+} from liquid resources[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2016, 504: 267-279.

[36] LEMAIRE J, SVECOVA L, LAGALLARDE F, et al. Lithium recovery from aqueous solution by sorption/desorption [J]. Hydrometallurgy, 2014, 143: 1-11.

[37] AN J W, KANG D J, TRAN K T, et al. Recovery of lithium from Uyuni salar brine [J]. Hydrometallurgy, 2012,117/118(1): 64-70.

[38] KARIDAKIS T, AGATZINI-LEONARDOU S, NEOU-SYNGOUNA P. Removal of magnesium from nickel laterite leach liquors by chemical precipitation using calcium hydroxide and the potential use of the precipitate as a filler material [J]. Hydrometallurgy, 2005,76(1/2): 105-114.

[39] OGAWA Y, KOIBUCHI H, SUTO K, et al. Effects of the chemical compositions of salars de uyuni and atacama brines on lithium concentration during evaporation [J]. Resource Geology, 2014, 64(2): 91-101.

[40] MARCHINI F, RUBI D, dee POZOM, et al. Surface chemistry and lithium-ion exchange in $LiMn_2O_4$ for the electrochemical selective extraction of LiCl from natural salt lake brines [J]. The Journal of Physical Chemistry C,2016,120(29):15875-15883.

[41] JONES B F, NAFTZ D L, SPENCER R J, et al. Geochemical evolution of Great Salt Lake, Utah, USA [J]. Aquatic Geochemistry, 2009, 15(1/2): 95-121.

[42] MARTI R, SMITH Y R. Recovery of lithium from brine with MnO_2 nanowire ion sieve composite. Rare Metal Technology[C].Berlin: Springer Group, 2018: 209-214.

[43] 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.

[44] 白燕祥,王松博,国爽,等.青海柴达木盆地盐湖资源元素利用及研究现状[J].盐科学与化工,2023,52(3): 1-6.

[45] ZTÜRK N E, K SE T E. Boron removal from aqueous solutions by ion-exchange resin: batch studies[J]. Desalination, 2008,227(1/2/3):233-240.

[46] JIANG T, ZHANG Q, LIU Y, et al. Influence of microwave irradiation on boron concentrate activation with an emphasis on surface properties [J]. Applied Surface Science, 2016,385(11): 88-98.

[47] WANG B, GUO X, BAI P. Removal technology of boron dissolved in aqueous solutions: a review [J]. Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects, 2014,444: 338-344.

[48] ENVER G, KAYA C, NALAN K, et al. Boron removal from seawater: state-of-the-art review [J]. Desalination: the International Journal on the Science and Technology of Desalting and Water Purification, 2015,356: 85-93.

(下转第186页)