

赵旭,李清鸿,王振刚,等. 离子交换法对盐湖产工业级硼酸中痕量杂质离子的去除及纯化研究[J]. 盐湖研究, 2025, 33(6): 97-104.
Zhao X, Li Q H, Wang Z G, et al. Study on the removal and purification of trace impurity ions in industrial boric acid produced in salt lake by ion exchange method[J]. Journal of Salt Lake Research, 2025, 33(6): 97-104.
DOI: 10.3724/j.yhj.2025010
CSTR: 32273.14.j.yhj.2025010

离子交换法对盐湖产工业级硼酸中痕量杂质离子的去除及纯化研究

赵旭^{1,4}, 李清鸿², 王振刚², 权彩兄², 马彦龙^{1,4}, 李陇岗^{3*}, 周红霞^{1*},
朱发岩⁴, 张永明⁴

(1. 青海大学机械工程学院, 青海 西宁 810016; 2. 青海中信国安锂业发展有限公司, 青海 格尔木 816000; 3. 中信(北京)盐类产业技术创新研究院有限公司, 北京 100020; 4. 中国科学院青海盐湖研究所, 盐湖资源绿色高值利用重点实验室, 青海 西宁 810008)

摘要: 硼酸作为一种关键的战略资源,其微量杂质去除技术仍存在不足,亟需开发高效且清洁的技术以提升资源利用率。文章针对工业硼酸中微量杂质的去除难题,采用阳离子交换树脂(LX-650)对盐湖老卤酸化法制备的粗硼酸进行了深度纯化研究。通过系统的表征和工艺优化,发现该树脂对 Mg^{2+} 具有显著的选择性去除能力,动态吸附效率可达99.99%,且硼的损失率低于0.5%。纯化后的硼酸纯度大于99.99%,树脂在经过5次循环使用后,吸附效率仍保持稳定,且吸附前后未出现明显的溶损现象。研究表明,LX-650树脂对硼酸体系的吸附行为符合Langmuir等温模型,吸附过程主要由准一级和准二级动力学共同主导。该技术实现了硼酸纯化工艺的绿色化与高效化,对于硼资源的高值化利用以及保障我国战略资源安全具有重要意义。

关键词: 离子交换法; 硼酸; 吸附动力学; 等温吸附

中图分类号: TQ128.54

文献标志码: A

文章编号: 1008-858X(2025)06-0097-08

近年来,我国高新科技领域发展迅猛,对硼资源的需求日益增长。硼酸是盐湖中富集硼元素最多的物质之一,作为一种具有重要战略意义的功能性化工原料,其在多个行业中发挥着关键作用。由于硼的缺电子性等特性,硼酸不仅在玻璃、电镀、冶金等传统行业中广泛应用,还是航空航天、核电工业等高端制造业的主要原料^[1-7]。高品质硼酸更是高端制造业不可或缺的原材料之一。在玻璃制造行业,硼酸可降低熔点并延长使用寿命;在电镀行业,它能提升镀层的光滑度和耐腐蚀性;在冶金行业中,硼酸可增强钢材的强度和抗腐蚀性;在航空航天领域,硼酸作为高温耐受材料的重要成分,可提高材料在极端温度下的稳定性。此外,硼酸还作为中子吸收剂,用于控制核反应速率。硼酸的纯度直接决定了产品价格,因此,对硼酸

中微量/痕量金属杂质离子的去除研究已成为行业焦点。目前,硼酸的纯化方法主要包括沉淀法^[8]、电化学法^[9]、膜分离法^[10]、吸附法^[11]和溶剂萃取法^[12]等。

龚殿婷^[13]将732#和717#树脂按1:3的体积比混合后填充至自制树脂柱中,树脂层高度为80 mm,并在上方保留5~10 mm的水柱,以防止树脂与空气接触,从而避免影响分离效果。实验中设定出口流速为8 mL/min,收集的溶液经低温浓缩后,使用微孔滤膜过滤,并在10℃恒温槽中冷却结晶。通过石英砂漏斗进行真空抽滤,用少量去离子水喷雾洗涤后烘干,最终硼酸纯度达到99.90%。张国才等^[14]研究了强酸性苯乙烯系阳离子交换树脂在处理硼酸时的相关参数,并采用紫外-分光光度法测定了杂质Fe的含量。研究发现,在25~80℃的温度范围内,温度对

收稿日期: 2025-02-09; 修回日期: 2025-03-01

基金项目: 青海省重点研发项目(2022-GX-152); 国家重点研发计划项目(2023YFC2906603)

作者简介: 赵旭(2000—),男,在读硕士,研究方向: 硼资源高值化利用。Email: zx082966@163.com。

通信作者: 李陇岗(1980—),男,教授级工程师,主要从事矿产资源化学研究。Email: unifile@163.com。

周红霞(1983—),女,副教授,主要从事盐湖资源综合利用等方面研究。Email: zhouhxxhit@163.com。

树脂的分离效果影响较小,实际应用中可灵活调整交换温度。随着处理时间的延长,去除率逐渐提高,约在 40 min 时达到系统交换平衡。当处理硼酸的量达到 150 g 时,树脂达到饱和状态,需进行再生处理。潘欣艾等^[15]对 001 × 7 和 201 × 7 树脂进行预处理后将其用于工业硼酸的纯化。结果表明,经过阳离子交换柱处理后,金属杂质含量显著降低,且产率与重结晶产率相符。然而,在阴离子交换柱中,大量的硼酸根离子与阴离子杂质同时被吸附,导致产物产率降低。这主要是因为高价的硼酸根离子易于被树脂吸附,从而影响了除杂效果。

本研究以盐湖老卤粗制得到的硼酸为原料,采用离子交换-结晶法去除其中的金属杂质离子。选用阳离子交换树脂(LX-650)作为吸附剂,系统研究了其静态与动态吸附性能,为硼酸的高值化利用提供了有力支持。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

盐湖老卤经酸化粗制得到的工业硼酸,其主要成分为硼酸,同时含有钾、钠、钙、镁、氯离子以及硫酸根等杂质。表 1 列出了粗硼酸中硼酸的含量及其杂质离子的含量。实验中所使用的阳离子交换树脂(LX-650)购自西安蓝晓科技新材料股份有限公司,实验用水为去离子水。

表 1 粗硼酸主要杂质含量
Table 1 Main impurities content in crude boric acid

杂质	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	H ₃ BO ₃
含量	0.008 4	0.015 3	0.012 9	0.021 5	0.013 0	0.054 0	99.5

1.2 实验方法

1.2.1 实验方案

将适量 LX-650 树脂置于 4% 的盐酸溶液中浸洗,过程中避免接触空气,并通过搅拌确保树脂浸洗充分。随后用去离子水洗涤至中性,并保持湿润状态储存待用。在双功能水浴恒温振荡器中,以不同固液比研究 LX-650 树脂对粗硼酸溶液中 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 的静态吸附性能。通过吸附动力学和等温吸附模型对实验数据进行拟合,以表征吸附性能。动态吸附实验在自制树脂柱中进行,收集过柱后的溶液并自然结晶 6 h。随后,使用循环水式真空泵进行抽滤,所得固体用高纯度饱和硼酸溶液冲洗,最后置

于电热恒温鼓风干燥箱中干燥,备用。

1.2.2 杂质去除率的计算

使用 ICP-OES (Avio 200) 检测 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 的浓度,去除率的公式(1)为:

$$E(\%) = \frac{(C_0 - C_1)}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $E(\%)$ 为杂质去除率; $C_0(\text{mg/L})$ 为杂质初始浓度; $C_1(\text{mg/L})$ 为除杂后溶液中杂质浓度。

1.2.3 静态吸附实验

按照不同固液比(0.2 g/L、0.5 g/L、1 g/L、2 g/L、5 g/L)称取一定量处理后的 LX-650,配制质量分数约为 5% 的粗硼酸溶液,在 50 °C、150 r/min 条件下,于恒温水浴振荡器中进行吸附实验。吸附容量 $q_e(\text{mg/g})$ 基于等式(2):

$$q_e = \frac{(C_0 - C_t)V}{m} \quad (2)$$

式中, C_0 代表杂质初始浓度; C_t 表示 t 时刻下的浓度; $m(\text{g})$ 是 LX-650 的质量。

在吸附动力学研究中,通过将 LX-650 与粗硼酸溶液按照不同固液比进行混合,考察吸附性能,并针对不同接触时间(5 ~ 60 min)条件下的平衡吸附容量进行了计算:

Pseudo-first-order^[16,17]:

$$q_t = q_e \left(1 - e^{(-k_1 t)}\right) \quad (3)$$

Pseudo-second-order^[18]:

$$q_t = \frac{k_2 t q_e^2}{1 + k_2 t q_e} \quad (4)$$

式中, $q_t(\text{mg/g})$ 是 t 时刻下的吸附量; $q_e(\text{mg/g})$ 是平衡吸附容量; k_1 和 $k_2(\text{g/mg} \cdot \text{min})$ 分别是拟一阶和拟二阶模型的速率常数。

在 0.1 ~ 500 mg/L 含 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 的氯化物溶液下分别进行吸附实验,采用 Langmuir、Freundlich 模型拟合:

Langmuir isotherm:

$$q_e = \frac{K_L q_m C_e}{1 + K_L C_e} \quad (5)$$

Freundlich isotherm:

$$q_e = K_F C_e^{(1/n)} \quad (6)$$

式中, $q_m(\text{mg/g})$ 为最大吸附容量; K_F 和 K_L 为平衡吸附常数; $C_e(\text{mg/L})$ 为平衡浓度。

1.2.4 动态吸附实验

量取 50 mL 经预处理的 LX-650 树脂,装填于自

制树脂柱内。借助蠕动泵,以 4 BV/h 的流速将质量分数约为 5% 的粗硼酸溶液通过树脂柱,收集流出液并测定其中杂质离子浓度。由于硼酸溶解度较小,为避免其在冷却过程中结晶堵塞树脂柱,实验全程对树脂柱、连接管路及二级出口进行了保温操作。

2 结果与讨论

2.1 吸附动力学

图 1(a~d)分别为 LX-650 对 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 吸附动力学曲线拟合结果,表 2 列出了相应的拟合参数。由图 1 和表 2 可知,LX-650 树脂可快速吸附杂质离子,其吸附过程既符合准一级动力学模型,又表现出准二级动力学特征。这表明吸附过程同时涉及离子交换的物理吸附机制以及化学吸附机制^[19,20],两种机制共同作用于吸附过程。对于 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ,LX-650 的平衡吸附容量(q_e)随吸附时间延长而显著增加。当固液比为 0.2 g/L 时, K^+ 在 10 min 内快速达到吸附平衡,最终去除效率为

88.83%;而当固液比为 0.5 g/L 时,25 min 内去除效率达到 94.42%,30 min 后 K^+ 浓度已降至检测限以下,表明 LX-650 对 K^+ 具有良好的去除效果。即使固液比提高至 2 g/L, K^+ 在 15 min 内浓度即可降至检测限以下,但由于所需吸附剂量较大,工业应用中会显著增加成本,因此不具备经济性。对于 Na^+ ,当固液比为 0.2 g/L 时,最终去除效率为 51.04%;而当固液比为 0.5 g/L 时,45 min 内达到吸附平衡,去除效率为 69.17%。对于 Ca^{2+} ,在固液比为 0.5 g/L 时,30 min 内达到吸附平衡,去除效率为 48.49%。对于 Mg^{2+} ,在固液比为 0.5 g/L 时,50 min 内去除效率达到 90.51%,55 min 后 Mg^{2+} 浓度已降至检测限以下,表现出良好的去除效果。

综上所述,LX-650 对 K^+ 和 Mg^{2+} 的去除效果显著。在固液比为 0.5 g/L 时,吸附 50 min 即可完全去除粗硼酸溶液中的 K^+ 和 Mg^{2+} 。对于 Na^+ 和 Ca^{2+} ,去除效果较好,固液比为 0.5 g/L 时,吸附 45 min 即可去除粗硼酸溶液中大部分的 Na^+ 和 Ca^{2+} 。因此,综合考虑实际工业应用中的成本与效率,确定 LX-650 的最佳工业除杂固液比为 0.5 g/L。

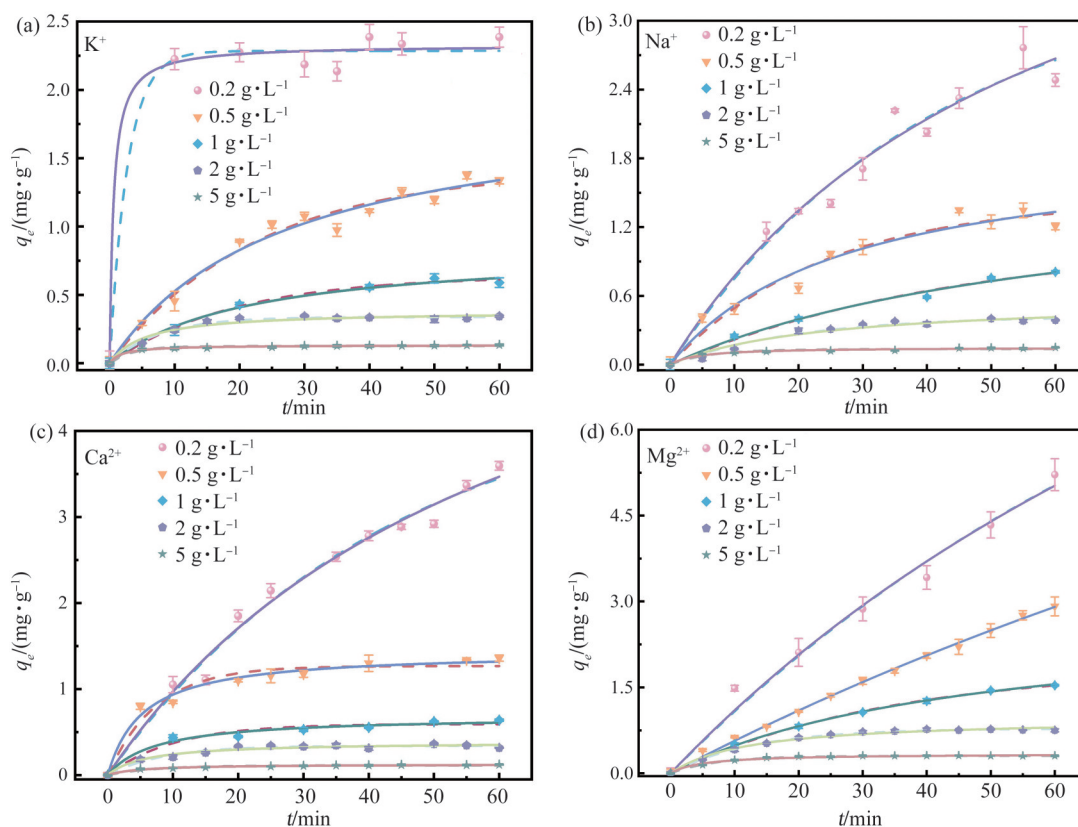


图1 树脂上的吸附动力学曲线(a) K^+ 、(b) Na^+ 、(c) Ca^{2+} 、(d) Mg^{2+}

Fig. 1 Adsorption kinetics curve on resin (a) K^+ , (b) Na^+ , (c) Ca^{2+} , (d) Mg^{2+}

表2 不同固液比下LX-650吸附K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺的动力学参数

Table 2 Kinetic parameters of adsorption of K ⁺ , Na ⁺ , Ca ²⁺ and Mg ²⁺ by LX-650 at different solid-liquid ratios		Pseudo-first-order			Pseudo-second-order		
Solid-liquid ratio/(g/L)	Ions	$q_m/(mg \cdot g^{-1})$	$k_1/(g \cdot mg^{-1} \cdot min^{-1})$	r^2	$q_m/(g \cdot mg^{-1} \cdot min^{-1})$	$k_2/(g \cdot mg^{-1} \cdot min^{-1})$	r^2
0.2	K ⁺	2.28	0.363	0.988	2.33	0.730	0.989
	Na ⁺	3.45	0.024	0.967	5.27	0.003	0.967
	Ca ²⁺	4.60	0.023	0.984	7.15	0.002	0.985
	Mg ²⁺	10.52	0.011	0.985	17.53	0.000	0.985
0.5	K ⁺	1.42	0.044	0.977	1.94	0.019	0.978
	Na ⁺	1.43	0.042	0.961	1.95	0.019	0.960
	Ca ²⁺	1.27	0.136	0.951	1.44	0.130	0.982
	Mg ²⁺	9.09	0.006	0.997	16.57	0.000	0.997
1	K ⁺	0.64	0.052	0.994	0.85	0.055	0.989
	Na ⁺	1.08	0.023	0.991	1.66	0.009	0.992
	Ca ²⁺	0.59	0.099	0.954	0.69	0.195	0.976
	Mg ²⁺	1.85	0.029	0.999	2.80	0.007	0.999
2	K ⁺	0.34	0.131	0.989	0.38	0.467	0.964
	Na ⁺	0.42	0.051	0.974	0.58	0.073	0.962
	Ca ²⁺	0.34	0.119	0.960	0.39	0.435	0.952
	Mg ²⁺	0.78	0.077	0.997	0.96	0.085	0.986
5	K ⁺	0.13	0.283	0.969	0.13	3.95	0.990
	Na ⁺	0.14	0.159	0.938	0.15	1.553	0.973
	Ca ²⁺	0.11	0.139	0.962	0.13	1.565	0.988
	Mg ²⁺	0.30	0.138	0.998	0.34	0.573	0.982

2.2 等温吸附

图2(a~d)为LX-650吸附数据的等温模型非线性拟合结果,表3列出了相关拟合参数。由表3可知,在Freundlich等温线模型中,K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺的1/n

值分别为0.381、0.374、0.313和0.413,表明LX-650吸附过程更倾向于化学吸附机制。同时,实验数据与Langmuir等温线模型的拟合度更高,表明杂质离子在树脂表面发生单层吸附^[21,22]。LX-650对K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺的最大吸附量分别为86.62 mg/g、

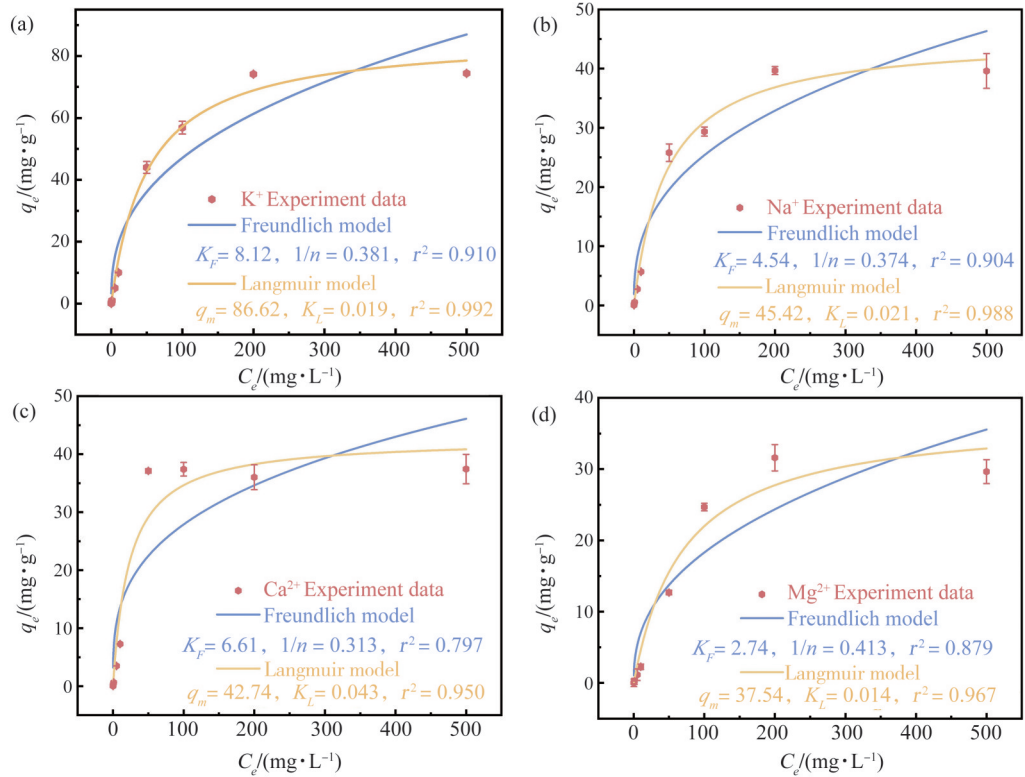


图2 (a) K⁺ (b) Na⁺ (c) Ca²⁺ (d) Mg²⁺吸附实验数据用Langmuir和Freundlich模型拟合
Fig. 2 (a) K⁺ (b) Na⁺ (c) Ca²⁺ (d) Mg²⁺ adsorption experimental data were fitted with Langmuir and Freundlich models

表3 树脂吸附K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺的等温线参数
Table 3 Isotherm parameters of adsorption of K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ by resin

T/°C	Langmuir model			Freundlich model		
	$q_m/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	$K_L/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	r^2	$K_F/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	$1/n$	r^2
K ⁺	86.62	0.019	0.992	8.12	0.381	0.910
Na ⁺	45.42	0.021	0.988	4.54	0.374	0.904
Ca ²⁺	42.74	0.043	0.950	6.61	0.313	0.797
Mg ²⁺	37.54	0.014	0.967	2.74	0.413	0.879

45.42 mg/g、42.74 mg/g 和 37.54 mg/g,表明其对杂质离子具有较强的吸附能力。

2.3 循环实验

为探究 LX-650 的再生性能,我们进行了回收与解吸实验。吸附完成后,使用质量分数为 4% 的盐酸溶液作为洗脱液对 LX-650 进行解吸处理。为提升解吸效率,实验在超声环境中进行,并确保全程避免与空气接触。图 3 为 LX-650 在 5 次吸附-解吸循环中对 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 的吸附效率变化。由图 3 可知,在 5 次循环过程中,LX-650 对上述离子的吸附效率保持稳定。其中,Mg²⁺ 的吸附率高于 98.23%,K⁺ 的吸附率高于 94.70%,而 Ca²⁺ 和 Na⁺ 也维持了一定的吸附效率。经过 5 次循环后,LX-650 的吸附效率略有下降,可能是由于再生和回收过程中 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 未能完全解吸所致。上述结果表明,LX-650 是一种高效且可行的吸附材料,具备良好的可重复使用性。

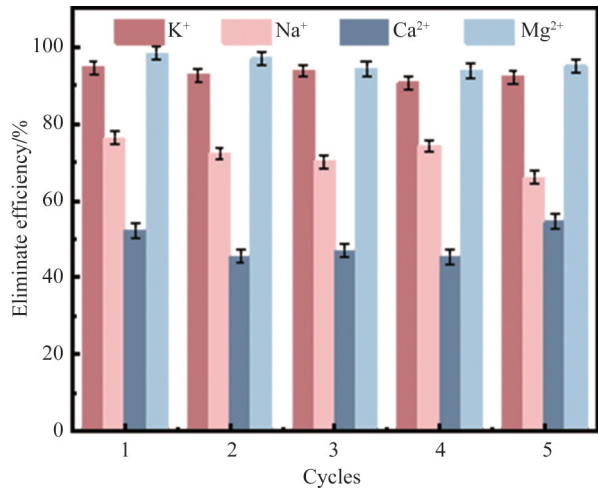


图3 LX-650在五次吸附-解吸循环中对K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺的吸附效率

Fig. 3 Adsorption efficiency of LX-650 for K⁺, Na⁺, Ca²⁺ and Mg²⁺ during five sorption-desorption cycles

2.4 动态吸附

图 4 为不同床体积(Bed Volume)下,硼酸溶液过柱后杂质离子浓度的变化情况,表 4 给出了具体值。由图 4 和表 4 可知,过柱处理后杂质离子浓度显著降低,这表明 LX-650 在连续除杂过程中有着出色的吸附性能。在动态吸附实验中,LX-650 对 Mg²⁺ 的吸附效率高达 99.99%,对 Na⁺ 的去除效率为 84.40%,对 K⁺ 的去除效率为 83.03%。相比之下,LX-650 对 Ca²⁺ 的吸附效果相对较弱,主要原因在于 Ca²⁺ 较大的离子半径和较强的水化壳限制了其与树脂表面的有效接触。此外,Ca²⁺ 较低的电荷密度以及树脂对不同离子的选择性吸附特性,也进一步影响了其吸附效率。

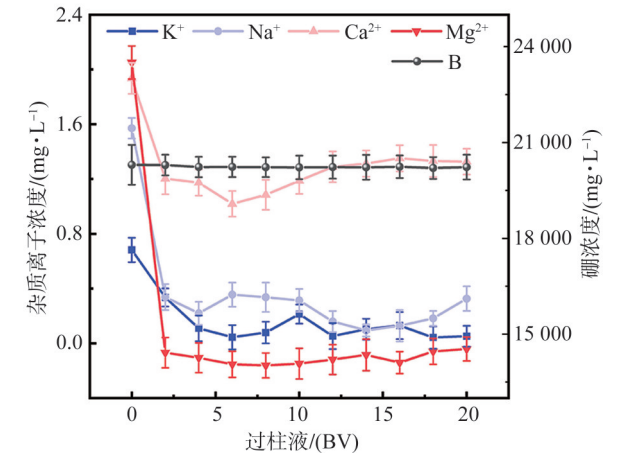


图4 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺动态吸附实验数据
Fig. 4 Dynamic adsorption data of K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺

表4 动态吸附过程中K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺浓度的变化
Table 4 Changes in concentrations of K⁺, Na⁺, Ca²⁺ and Mg²⁺ during dynamic adsorption

过柱液/BV	mg/L				B
	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	
0	0.681 9	1.570 9	1.935 5	2.051 5	20 300.86
2	0.334 9	0.337 7	1.202 7	-0.068 6	20 293.03
4	0.108 8	0.219 0	1.173 6	-0.106 0	20 232.27
6	0.044 4	0.355 2	1.018 8	-0.153 8	20 235.99
8	0.078 3	0.335 9	1.084 6	-0.161 8	20 226.05
10	0.213 2	0.313 1	1.187 8	-0.148 8	20 220.68
12	0.052 7	0.159 1	1.288 5	-0.118 8	20 228.96
14	0.102 7	0.093 9	1.312 9	-0.084 9	20 224.55
16	0.129 0	0.127 4	1.351 5	-0.141 3	20 240.59
18	0.042 3	0.182 2	1.331 7	-0.059 4	20 203.83
20	0.051 1	0.326 0	1.326 8	-0.042 3	20 229.40
平均浓度	0.115 7	0.245 0	1.227 9	-0.108 6	20 239.66
去除效率	83.03%	84.40%	36.56%	99.99%	0.3%

注:离子浓度<0.000 1 的以 0.000 1 计。

在动态吸附过程中,硼(B)含量保持稳定,表明 LX-650 在吸附杂质离子时不会导致硼的损失。对连续过柱收集的溶液进行降温结晶处理后,通过抽滤得到的样品经干燥处理。表 5 列出了所得固体中杂质离子的含量及样品纯度。根据表 5 的数据分析,最终样品的纯度高于 99.99%。

2.5 树脂形貌

为评估 LX-650 吸附杂质离子前后的溶损情况,图 5 为经烘干与喷金处理后的 LX-650 在扫描电子显微镜(SEM)下的微观形貌。吸附前(a)与吸附后(b~e)的 LX-650 树脂表面形貌未发生显著变化,且无明显溶损迹象,这表明 LX-650 在吸附过程中表现出良好的结构稳定性(图 5)。其表面的微小凹凸结

表 5 连续过柱除杂后所得最终样品杂质含量与纯度
Table 5 Impurity content and purity of the final sample obtained after continuous column removal

杂质离子	树脂吸附后含量/%
K ⁺	0.001 5
Na ⁺	0.002 0
Ca ²⁺	0.004 7
Mg ²⁺	< 0.000 1
Cl ⁻	0.000 6
SO ₄ ²⁻	0.000 4
Fe	0.000 2
As	< 0.000 1
Hg	< 0.000 1
样品纯度	99.990 3

注:离子含量<0.000 1% 的以 0.000 1% 计。

构增加了与溶液的接触面积,从而提升了吸附效率,使其能够高效地进行特定离子的交换。能量色散光

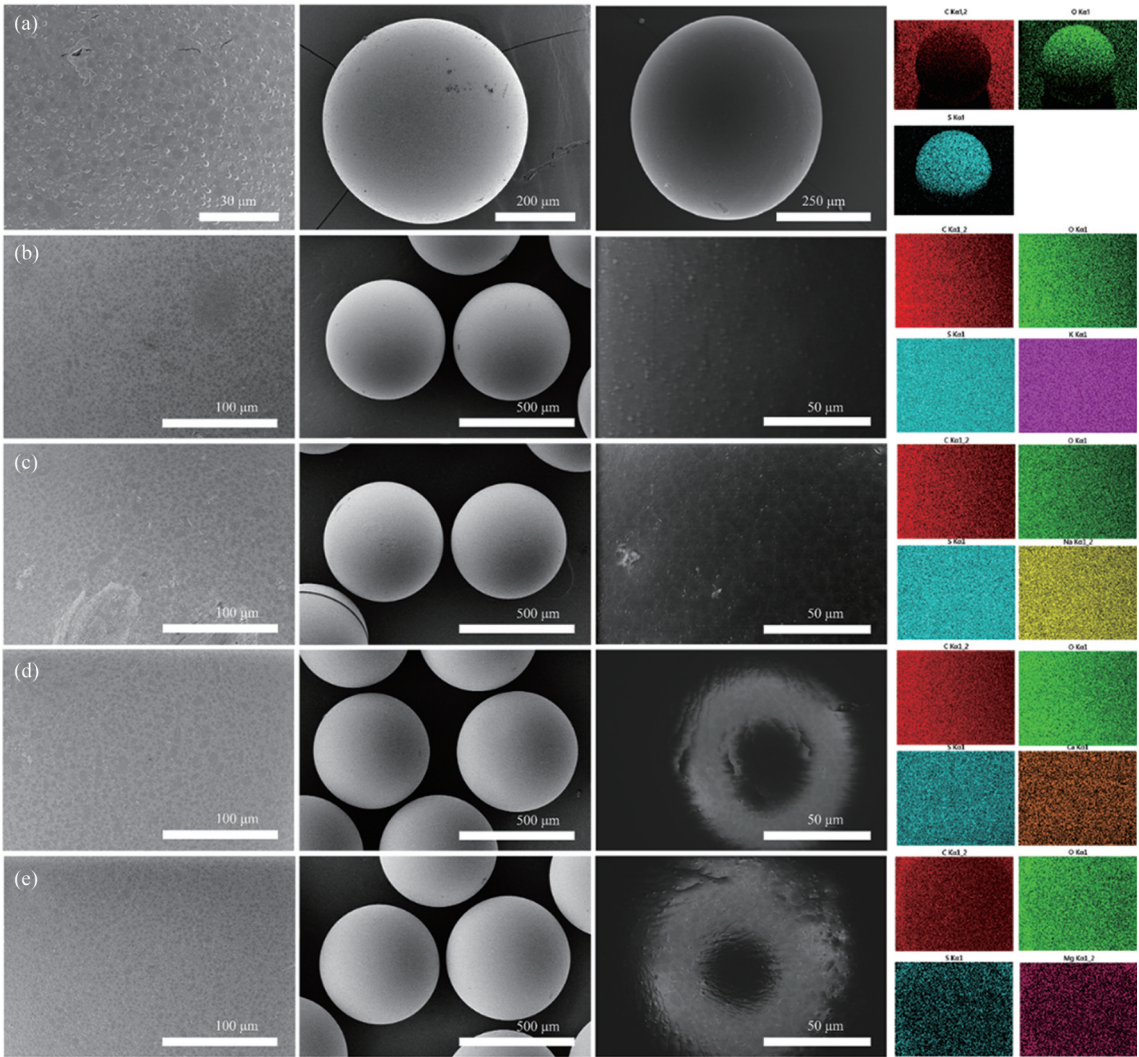


图 5 (a)树脂吸附前 SEM 图及 EDS 能谱图; (b~e)树脂吸附 K⁺、Na⁺、Ca²⁺和 Mg²⁺后 SEM 图及 EDS 能谱图
Fig. 5 (a) SEM and EDS spectra before resin adsorption; (b~e) SEM and EDS spectra after resin adsorption K⁺, Na⁺, Ca²⁺and Mg²⁺

谱(EDS)分析结果表明,吸附前树脂主要由C、O、S组成,是有机聚合物基体的典型特征;吸附后,EDS能谱检测到树脂表面存在K、Na、Ca、Mg元素,表明杂质离子已被树脂有效吸附。由此可见,LX-650的吸附过程既包含离子交换的物理吸附机制,也涉及化学吸附机制,二者的协同作用显著增强了树脂的吸附性能。

3 结 论

本研究通过离子交换-结晶法对盐湖老卤酸化粗制的工业硼酸进行纯化,纯化后样品纯度达到99.99%。动力学实验结果表明,LX-650树脂可快速捕获杂质离子,其吸附过程既包含离子交换的物理吸附机制,也涉及化学吸附机制。实验确定的最佳固液比为0.5 g/L。 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的吸附数据与Langmuir等温线模型拟合度更高,离子在树脂表面主要发生单层吸附。LX-650对 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的最大吸附量分别为86.62 mg/g、45.42 mg/g、42.74 mg/g和37.54 mg/g。在动态吸附过程中,LX-650对 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 的连续处理效果较好,而对 Ca^{2+} 的处理效果较差,硼(B)含量保持不变。吸附前后的LX-650未出现溶损现象,且在5个循环后吸附能力保持稳定。本研究简化了硼酸纯化工艺,达到了节约成本与绿色环保的要求,促进了盐湖硼资源在高新科技领域的高效利用,为硼资源的可持续开发提供了重要指导。

未来应深入探讨多离子共存条件下离子交换树脂对杂质的竞争吸附规律,优化吸附剂性能;系统研究树脂原位再生过程中的界面反应机制及其循环稳定性。针对痕量重金属杂质,通过分子设计调控树脂功能基团以提高选择性吸附性能,同时结合工业级中试试验验证工艺放大可行性,并开展全流程技术经济评价。这将会为硼酸绿色纯化技术的工程化应用及硼资源高值化开发提供理论依据与实践基础,也可以保障硼资源的高效利用和战略资源的安全供应。

参考文献

- [1] Bashir N Z, Krstic M. Boric acid as an adjunct to periodontal therapy: A systematic review and meta-analysis [J]. International Journal of Dental Hygiene, 2021, 19(2): 139-52.
- [2] Colakoglu G, Colak S, Aydin I, *et al.* Effect of boric acid treatment on mechanical properties of laminated beech veneer lumber[J]. Silva Fennica, 2003, 37(4): 505-510.
- [3] Du S S, Luo X F, An J X, *et al.* Exploring boron applications in modern agriculture: Antifungal activities and mechanisms of phenylboronic acid derivatives [J]. Pest Management Science, 2023, 79(8): 2748-2761.
- [4] Prentice L H, Tyas M J, Burrow M F. The effects of boric acid and phosphoric acid on the compressive strength of glass-ionomer cements [J]. Dental Materials, 2006, 22(1): 94-97.
- [5] Skelton W T W, Dowling M F, Abdelkhalik S I. Effect of boric acid on the severity of vapor explosions in pure water and surfactant solutions [J]. Nuclear Engineering and Design, 1995, 155(1/2): 359-368.
- [6] Vidyawathi S S, Amaresh R, Satapathy L N. Effect of boric acid sintering aid on densification of barium ferrite [J]. Bulletin of Materials Science, 2002, 25(6): 569-572.
- [7] Yang S H, Xue H G, Guo S P. Borates as promising electrode materials for rechargeable batteries [J]. Coordination Chemistry Reviews, 2021, 427: 213551.
- [8] Xu Y L, Jiang J Q. Technologies for boron removal [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2008, 47(1): 16-24.
- [9] Yilmaz A E, Boncukcuoglu R, Kocakerim M M. A quantitative comparison between electrocoagulation and chemical coagulation for boron removal from boron-containing solution [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 149(2): 475-481.
- [10] Hyung H, Kim J H. A mechanistic study on boron rejection by sea water reverse osmosis membranes [J]. Journal of Membrane Science, 2006, 286(1-2): 269-278.
- [11] Inukai Y, Tanaka Y, Matsuda T, *et al.* Removal of boron(III) by N-methylglucamine-type cellulose derivatives with higher adsorption rate [J]. Analytica Chimica Acta, 2004, 511(2): 261-265.
- [12] Peng X W, Li L J, Shi D, *et al.* Recovery of boric acid from salt lake brines by solvent extraction with 2-butyl-1-n-octanol [J]. Hydrometallurgy, 2018, 177: 161-167.
- [13] 龚殿婷. 高纯硼酸的制备及制备过程中影响因素研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2009.
- [14] 张国才. 高纯度硼酸的制备研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [15] 潘欣艾. 光电/核电级高纯硼酸的制备及结晶形貌研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [16] Lagergren S. About the theory of So-Called adsorption of soluble substances [J]. Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar, 1898, 24(4): 1-39.
- [17] Qiu H, Lv L, Pan B C, *et al.* Critical review in adsorption kinetic models [J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2009, 10(5): 716-724.
- [18] Murphy O P, Vashishtha M, Palanisamy P, *et al.* A review on the adsorption isotherms and design calculations for the optimization of adsorbent mass and contact time [J]. ACS Omega, 2023, 8(20): 17407-17430.
- [19] Holiski C K, Payne R, Wang M J, *et al.* Adsorption of terbium (III) on DGA and LN resins: Thermodynamics, isotherms, and kinetics [J]. Journal of Chromatography A, 2024, 1732: 465211.
- [20] Zhang J H, Zhang M, Bai B Q, *et al.* Studies on adsorption ki-

- netics and thermodynamics of macroporous resin for rosmarinic acid[J]. *Journal of Oleo Science*, 2021, 70(3):439-451.
- [21] Callura J C, Perkins K M, Baltrus J P, *et al.* Adsorption kinetics, thermodynamics, and isotherm studies for functionalized lanthanide-chelating resins[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2019, 557:465-477.
- [22] Xue F, Xu Y T, Lu S Z, *et al.* Adsorption of cefocelis hydrochloride on macroporous resin: Kinetics, equilibrium, and thermodynamic studies[J]. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 2016, 61(6):2179-2185.

Study on the Removal and Purification of Trace Impurity Ions in Industrial Boric Acid Produced in Salt Lake by Ion Exchange Method

ZHAO Xu^{1,4}, LI Qinghong², WANG Zhengang², QUAN Caixiong², MA Yanlong^{1,4},
LI Longgang^{3*}, ZHOU Hongxia^{1*}, ZHU Fayan⁴, ZHANG Yongming⁴

(1. *School of Mechanical Engineering, Qinghai University, Xining, 810016, China*; 2. *Qinghai CITIC Guoan Lithium Industry Development Co., Ltd., Geermu, 816000, China*; 3. *CITIC (Beijing) Institute of Salt Technology & Industry Co., Ltd., Beijing, 100020, China*; 4. *Key Laboratory of Green and High-end Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China*)

Abstract: Boric acid is a critical strategic resource, yet current technologies for removing trace impurities remain insufficient, necessitating efficient purification methods to improve resource utilization. To address this challenge, we utilized cation exchange resin (LX-650) to purify the crude boric acid obtained through the acidification of salt lakes brine. Through systematic characterization and process optimization, the LX-650 resin demonstrated exceptional selectivity for Mg^{2+} removal, achieving 99.99% dynamic adsorption efficiency with less than 0.5% boron loss. The purified boric acid exceeded 99.99% purity, and the resin maintained stable adsorption efficiency over five cycles without noticeable dissolution. The adsorption behavior follows the Langmuir isotherm model, and the adsorption process is governed by pseudo-first-order and pseudo-second-order kinetics. This technology enables green and efficient boric acid purification, offering significant potential for high-value boron resource utilization and strategic resource security.

Key words: Ion exchange method; Boric acid; Adsorption kinetics; Isotherm adsorption