熔融氯化锂中氧化锑的电解还原与锂热还原比较①

任广治，徐纪瑭，姚本林，肖益群，贾艳虹，陈辉，沈振芳，李斌，何辉，李佳
（中国原子能科学研究院 放射化学研究所，北京 102413）

摘　要：为了探索氧化锑（Sb_2O_3）在高温氯化锂熔盐中的还原过程，采用电解还原技术和锂热还原法将 Sb_2O_3 还原为 Sb，并通过 XRD 对产物结构进行了表征。通过金属钼空腔电极准确测定了氧化锑粉末的电化学信号，结合热力学分析和 E-pO^{2-} 图，发现 Sb_2O_3 可以通过电解的方式被还原，实验中控制电位低于 1.65 V（vs. Li/Li^+）可以获得金属单质 Sb，电位 0.94 V（vs. Li/Li^+）、电解时间 6 h 条件下，锑还原率可达 82.0%。锂热还原条件为：Li 金属加入量为理论用量、反应温度 923 K、反应时间 6 h，在此条件下，锑还原率可达 77.0%。

关键词：电解还原；锂热还原法；熔融氯化锂；氧化锑；金属锑
中图分类号：TF111.5　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.03.035
文章编号：0253-6099（2026）03-0232-06

Comparison Between Electrolytic Reduction and Lithothermal Reduction of Antimony Oxide in Molten Lithium Chloride

REN Guangzhi, XU Jitang, YAO Benlin, XIAO Yiqun, JIA Yanhong, CHEN Hui,
SHEN Zhenfang, LI Bin, HE Hui, LI Jia
(*Department of Radiochemistry*, *China Institute of Atomic Energy*, *Beijing* 102413, *China*)

Abstract: To explore the reduction process of antimony oxide (Sb_2O_3) in high-temperature molten lithium chloride, Sb_2O_3 was reduced to metallic antimony by electrolytic reduction and lithothermal reduction process respectively. The phase structure of products was analyzed by XRD, and electrochemical signals of Sb_2O_3 powder were accurately measured using molybdenum cavity electrode. Based on thermodynamic analysis and E-pO^{2-} diagrams, it is confirmed that Sb_2O_3 can be effectively reduced by electrolysis, yielding metallic Sb at potentials below 1.65 V (vs. Li/Li^+). With a potential of 0.94 V (vs. Li/Li^+) and electrolysis duration of 6 h, the antimony reduction rate can reach 82.0%. The conditions for lithium thermal reduction are as follows: metallic lithium is added at the theoretical dosage, reaction temperature of 923 K, and reaction time of 6 h. And the antimony reduction rate can reach 77.0% under these conditions.
Key words: electrolytic reduction; lithothermal reduction process; molten lithium chloride; antimony oxide; metallic antimony

锑是一种重要的战略性金属资源，在国民经济发展中占有重要地位[1]，早在 2009 年，我国就对锑的开采实施了严格控制[2]。锑广泛应用于医药、军工、半导体等行业[3-4]。氧化锑是生产锑的中间产物，目前主要采用火法冶金工艺（反射炉工艺）还原氧化锑，即以碳粉为还原剂在高温下将氧化锑还原为金属锑。但该工艺存在还原温度高、易产生有毒气体、泡渣中锑含量高的问题，特别是冶炼产生的泡渣需要人工扒渣，劳动强度大、生产成本高[5-7]。为了克服火法冶金工艺存在的不足，急需探索新的氧化锑还原方法。

电解还原技术是电化学方法之一，在金属冶炼中起着重要作用[8-10]，其中熔盐电脱氧制备工艺具有简单、简洁、易于操作等特点，有效解决了合金生产中常见的氧化、偏析和活性金属合金化等问题。目前，该技术已在各种金属氧化物和不同熔盐体系中得到研究和应用。从金属氧化物或混合物中获得金属元素的另一种方法是火法冶金还原法，该方法以前用于还原锕系元素氧化物，其中“锂热还原法”是火法冶金还原法中

① **收稿日期**：2025-11-20
作者简介：任广治（1993—），男，河北沧州人，博士，助理研究员，主要从事乏燃料干法后处理工作。E-mail：renguangzhi@ cnncmail.cn
通信作者：姚本林（1993—），男，贵州凯里人，博士，副研究员，主要从事乏燃料干法后处理工作。E-mail：yaobenlin@ cnncmail.cn

的一个经典工艺,该工艺采用金属锂作为还原剂,氯化锂作为溶剂。锂热还原工艺具有容器适应性强、工艺简单等优点,在金属冶炼领域占有重要地位。本文采用电解还原技术和锂热还原法对 LiCl 熔盐中的氧化锑(Sb_2O_3)进行直接还原从而得到金属锑(Sb),重点研究了还原时间和投料比等因素对还原效果的影响,并探讨了 Sb_2O_3 电解还原机理。

1　实验

1.1　实验材料

实验材料包括无水氯化锂(LiCl,99.5%,上海中锂实业有限公司)、氧化锑(Sb_2O_3,99%,上海麦克林生化股份科技有限公司)、钼丝(Mo,99.99%)、银丝(Ag,99.99%)、钨丝(W,99.99%)、镍丝(Ni,99.99%)、锂块(Li,0.13~0.15 g,99.99%)、石墨棒(>99.9%)。

1.2　实验方法

1.2.1　熔盐电解液的净化

电化学实验之前,将 100 g 锂盐加入刚玉坩埚中,然后在 923 K 加热炉中进行高温净化,保温 4 h 以上。将熔盐冷却到室温,用于后续的电化学实验。每次更换坩埚时,都要净化熔盐。

1.2.2　电极制备

将镍丝的一端缠绕在金属钼空腔电极上,用于固定和导电;镍丝的另一端穿过刚玉管,抽出,作为与电源电极相连的接触端;在手套箱中,通过挤压将氧化物粉末填充到金属钼空腔电极的小圆孔中,钼电极的圆孔完全浸入熔盐中即可使用。电解还原在三电极系统中进行。工作电极用镍丝与氧化镁坩埚相连,在电解还原前将 Sb_2O_3 放入坩埚中,以钨丝作为导电丝。对电极由石墨电极制成,外覆刚玉管进行隔热保护。参比电极以银丝为导电丝,将 1%的 AgCl/LiCl 装入莫来石管中。

1.2.3　电化学实验

电化学实验在 Autolab PGSTAT302N 电化学工作站上进行,使用三电极系统。采用 Nova 2.1 采集程序处理实验数据。整个电化学装置放置在一个手套箱中,由高纯度氩气(99.999%)保护。严格控制手套箱中水分和氧气浓度(低于 10×10^{-6})。采用循环伏安法和恒电位电解法进行电化学实验。采用 HSC Chemistry 6.0 软件[11]进行热力学理论分析。电解产物经蒸馏水洗涤,真空干燥,进行 X 射线衍射(XRD)表征。

1.2.4　锂热还原实验

所有熔盐实验均在高纯氩气手套箱中进行,用于实验的 LiCl 和 Li_2O 均经脱水后保存在手套箱中。首先将颗粒状金属锂和 Sb_2O_3 粉末加入小坩埚中,然后将小坩埚放入大坩埚中,最后加入熔盐(熔盐必须超过小坩埚顶部,以确保搅拌过程中只有上层熔盐被搅拌),然后放入电炉加热。升温程序为:先将熔盐加热到 250 ℃,保持 30 min,然后继续升温至 650 ℃,达到预定温度 5 min 后开启搅拌,进行反应。将金属锂与 Sb_2O_3 预先放置是为了促进其相互接触,避免金属锂在熔盐中过于分散导致部分蒸发逸出。实验结束后,将坩埚冷却至室温,破碎坩埚,分离残盐与反应产物,对还原产物进行称量以及 XRD 表征。采用 HSC Chemistry 6.0 软件[11]进行反应热力学数据计算。

2　结果与讨论

2.1　电化学反应的热力学分析

2.1.1　理论还原电势

923 K 时,氧化锑电解还原过程中可能发生的反应及相关参数如表 1 所示。其中分解电压可以作为每个反应的还原电位参考值。

表 1　923 K 时氧化锑电解还原过程中可能发生的反应及相关参数

Table 1　Reactions and related parameters during electrolytic reduction of Sb_2O_3 at 923 K

反应式	ΔG/(kJ·mol^{-1})	分解电压/V	阴极电位/V
$2LiCl = 2Li+Cl_2$	667	3.459	0
$2Li_2O = 4Li+O_2$	952	2.465	0
$4SbO_2 = 2Sb_2O_3+O_2$	199	0.514	1.951
$2Sb_2O_3 = 4Sb+3O_2$	934	0.807	1.658

2.1.2　E-pO^{2-} 相图

E-pO^{2-} 相图用于确定在反应过程中获得稳定产物的条件。本文建立的 Sb_2O_3 相图主要包括 3 种类型的反应。

1) Sb^{3+} 氯化反应:

$$SbCl_3 + 3e \longrightarrow Sb + 3Cl^- \quad (1)$$

$$E^0 = -\frac{\Delta G^0}{3F} \quad (2)$$

式(1)的电势方程表达式为:

$$E = E^0 + \frac{2.303RT}{3F}\lg X_{Sb^{3+}} \quad (3)$$

式中:E 为电势,V;F 为法拉第常数,96 485 C/mol;R 为摩尔气体常数,8.314 J/(mol·K);T 为热力学温度,K;E^0 为标准电极电势,V;ΔG^0 为反应的标准吉布斯自由能变,kJ/mol;$X_{Sb^{3+}}$ 为体系中 Sb^{3+} 的活度。

Sb 和 Cl_2 的反应:

$$2Sb + 3Cl_2 \longrightarrow 2SbCl_3 \quad (4)$$

923 K 时，以 Cl^-/Cl_2 为基准，纯 Sb 的活度为 1，式(1)的 $\Delta G^0 = 242.152$ kJ，代入式(2)，计算可得：$E^0 = 2.622$ V(vs. Li/Li^+)。根据文献[12]，$X_{Sb^{3+}} = 0.01$。

2) 氧化锑的还原反应：

$$Sb_2O_3 + 6e \longrightarrow 2Sb + 3O^{2-} \quad (5)$$

式(5)的电势方程表达式为：

$$E^1 = E^0 + \frac{2.303RT}{6F} pK_s(Sb_2O_3) \quad (6)$$

$$pK_s(Sb_2O_3) = \lg K_1 - 6\lg\alpha_{LiCl} + 2\lg\gamma_{SbCl_3} + 3\lg\gamma_{Li_2O} \quad (7)$$

$$Sb_2O_3 + 6LiCl \rightleftharpoons SbCl_3 + 3Li_2O \quad (8)$$

式中：K_1 为式(8)的反应平衡常数；α_{LiCl} 为 LiCl 的活度，由于体系为纯 LiCl 熔盐，其活度设为 1；γ_{SbCl_3} 和 γ_{Li_2O} 分别为 $SbCl_3$ 和 Li_2O 的活度系数。根据文献[13]，在纯 LiCl 熔盐中，$\lg\gamma_{Li_2O}$ 的值趋于 0；pK_s 为反应平衡常数的负对数。

式(5)的平衡势可以表示为：

$$E = E^1 + \frac{2.303RT}{3F} pO^{2-} \quad (9)$$

3) 氯化氧化锑与氯离子交换的反应：

$$SbOCl + 2LiCl \longrightarrow SbCl_3 + O^{2-} + 2Li^+ \quad (10)$$

式(10)的电势方程表达式为：

$$E^2 = E^0 + \frac{2.303RT}{3F} pK_s(SbOCl) \quad (11)$$

$$pK_s(SbOCl) = \lg K_2 - 2\lg\alpha_{LiCl} + \lg\gamma_{SbCl_3} + \lg\gamma_{Li_2O} \quad (12)$$

$$SbOCl + 2LiCl \rightleftharpoons SbCl_3 + Li_2O \quad (13)$$

式中 K_2 为式(13)的反应平衡常数。

式(10)的平衡势可以表示为：

$$E = E^2 + \frac{2.303RT}{2F} pO^{2-} \quad (14)$$

绘制了 923 K 时 Li-Sb-O-Cl 体系的 E-pO^{2-} 图，如图 1 所示。

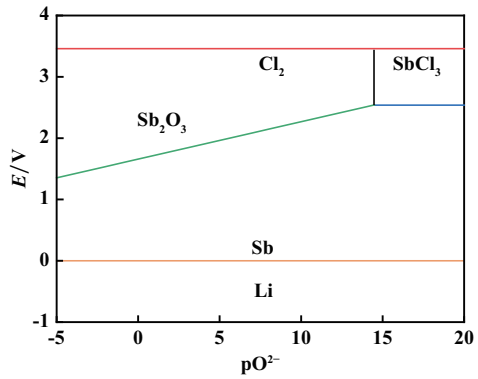


图 1 923 K 时 Li-Sb-O-Cl 体系的 E-pO^{2-} 图

Fig. 1 E-pO^{2-} diagram of Li-Sb-O-Cl system at 923 K

2.2 电化学实验

Sb_2O_3 的循环伏安曲线如图 2 所示。在反应条件下，Sb_2O_3 的电化学反应相对简单。氧化锑通常存在二氧化锑(SbO_2)和三氧化锑(Sb_2O_3)两种状态。由图 1 和表 1 的计算结果可知，Sb_2O_3 可以在 1.65 V(vs. Li/Li^+)下被还原。图 2 结果表明，在 1.0 V(vs. Li/Li^+)左右有明显的还原峰，此处可能为锂和锑的合金峰；在 1.5 V(vs. Li/Li^+)左右有不明显的还原峰，此处对应的可能是氧化锑的还原峰。总体而言，氧化锑容易被还原为金属锑。

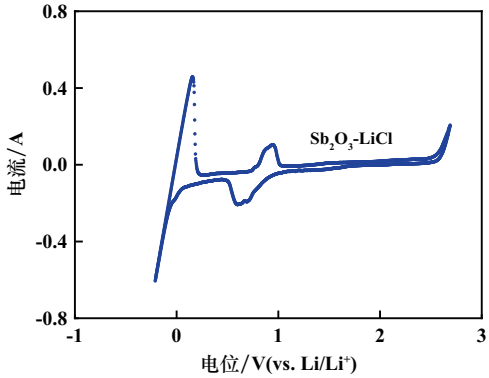


图 2 LiCl 熔盐中 Sb_2O_3 的循环伏安曲线

Fig. 2 Cyclic voltammogram of Sb_2O_3 in molten LiCl

Sb_2O_3 的还原产物 Sb 在反应温度下是液态的。反应结束、温度降至室温后，产物金属 Sb 形成了具有银白色金属光泽的金属锭，这使得它很容易从氯化锂盐中分离出来。电解还原产物 XRD 图谱如图 3 所示。结果表明，产物的 XRD 图谱与金属锑标准图谱一致，表明还原产物为金属锑。

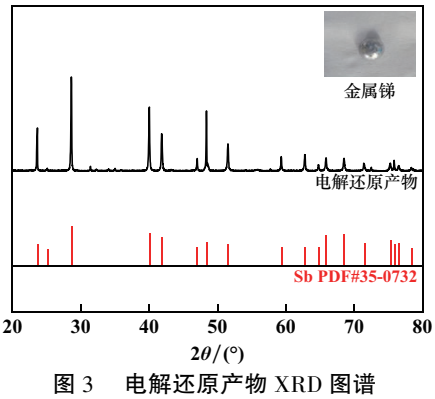


图 3 电解还原产物 XRD 图谱

Fig. 3 XRD pattern of reduction product

923 K 时，Sb_2O_3 电解还原数据如表 2 所示。负电位有利于 Sb_2O_3 的电脱氧。然而，在 0.44 V(vs. Li/Li^+)电位下，得到黑色固体，这可能是锂锑合金。从表 2 可以看出，目前 Sb_2O_3 的最佳还原电位为 0.94 V(vs. Li/Li^+)，

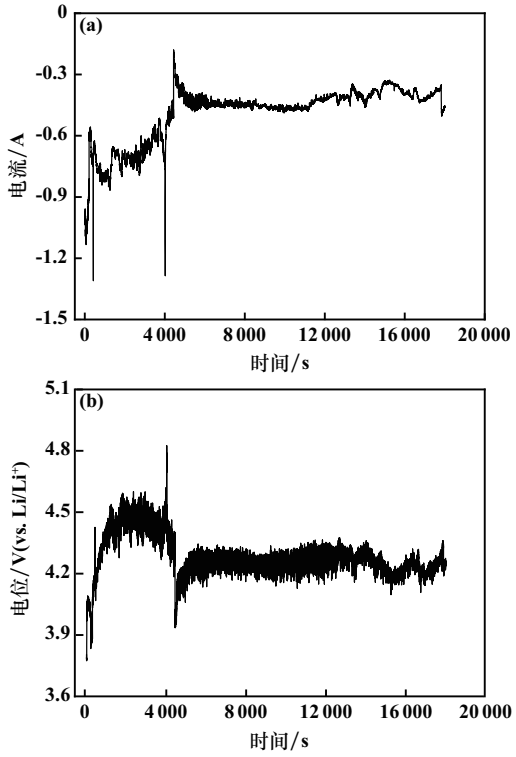
且还原速率随着电解电量增大而逐渐增大。在此反应条件下,4 g 的 Sb_2O_3 粉末可转化为2.74 g的金属 Sb,还原率为 82.0%。

表 2　923 K 时 Sb_2O_3 电解还原数据

Table 2　Data about electrolytic reduction of Sb_2O_3 at 923 K

Sb_2O_3 质量/g	还原电位/V	电解时间/h	Sb 质量/g	还原率/%
2	0.44	3.5	黑色固体	—
2	1.44	3.5	0.74	44.3
2	1.44	6.0	0.84	50.3
4	1.44	6.0	0.95	28.4
4	0.94	3.5	1.56	47.7
4	0.94	6.0	2.74	82.0

图 4 为 0.94 V(vs. Li/Li^+)、电解时间 6.0 h 时工作电极电流和对电极电位随时间的变化趋势。



(a) 工作电极电流;(b) 对电极电位

图 4　工作电极电流和对电极电位随时间的变化

Fig. 4　Variation of working electrode current and counter electrode potential with time

由图 4 可知,由于电势的突然施加,双电层发生充电,出现初始电流峰值,导致电压峰值减小。这是各种固体氧化物电解过程中的常见现象[14-15]。随后,电流逐渐降低到-0.4 A 左右的低水平,并在此平台上保持约 2.3 h,最后逐渐降至-0.3 A 左右。对电极电位由 3.8 V 逐渐跃升至4.6 V,电解 4 000 s 后保持在 4.2 V 左右。

2.3　锂热还原实验

2.3.1　实验条件设置

Sb_2O_3 浸在 LiCl 中可能发生如下反应:

$$Sb_2O_3 + 2LiCl \longrightarrow 2SbOCl + Li_2O \quad (15)$$

$$Sb_2O_3 + Li_2O \longrightarrow 2LiSbO_2 \quad (16)$$

通过热力学计算可得,式(15)在 923 K 下的 ΔG 为 172.52 kJ,这表明该反应在热力学上是不可能的;式(16)由于缺乏 $LiSbO_2$ 的热力学数据,其 ΔG 无法获得。但是,文献[16]在 723 K 下将 Sb_2O_3 与 Li_2O 粉末混合,成功制备了 $LiSbO_2$,因此在反应过程中有可能产生这种副产物。

923 K 下,锂热还原实验条件如表 3 所示。

表 3　锂热还原实验条件

Table 3　Experimental conditions for lithothermal reduction

编号	物料质量/g			盐类型	还原时间/h
	Sb_2O_3	盐	Li		
A-1	2	45	0	LiCl	24
A-2	2	45	0	8%Li_2O-LiCl	24
B-1	2	40	0.08	LiCl	8
B-2	2	40	0.15	LiCl	8
B-3	2	40	0.3	LiCl	8
B-4	2	40	0.6	LiCl	8
B-5	2	40	1.2	LiCl	8
C-1	2	40	0.3	LiCl	2
C-2	2	40	0.3	LiCl	4
C-3	2	40	0.3	LiCl	6
C-4	2	40	0.3	LiCl	8
S-1	2	0	0.3	LiCl	6
S-2	2	2	0.3	LiCl	6
S-3	2	8	0.3	LiCl	6
S-4	2	16	0.3	LiCl	6
S-5	2	30	0.3	LiCl	6

A-1 和 A-2 实验所得锂热还原产物的 XRD 图谱如图 5 所示。在纯 LiCl 中浸泡 24 h 后,产物 Sb_2O_3 呈

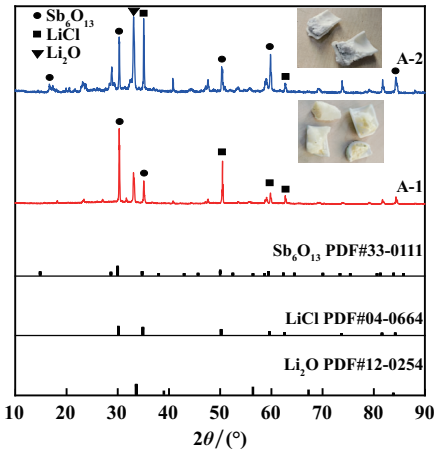


图 5　锂热还原反应产物 XRD 图谱

Fig. 5　XRD patterns of lithothermal reduction products

淡黄色,这可能是 Sb_2O_5 的颜色。Sb_2O_3 在 8% Li_2O-LiCl 盐中浸泡后呈灰白色,可以推测 Li_2O 的掺入对其有一定影响。Sb_2O_3 在 923 K 下分别浸入纯 LiCl 和 8% Li_2O-LiCl 中 24 h 时,虽然产物在 Sb/O 物质的量比上有一定变化,例如 30°和 34°对应的特征峰表明 Sb 氧化物的主要形态变为 Sb_6O_{13},但 2 组实验均未观察到 SbOCl 和 $LiSbO_2$ 的生成,表明 Sb_2O_3 浸没在 LiCl 盐中的还原过程基本不与盐发生化学反应,其组成相对稳定。

2.3.2 反应当量的影响

锂热还原反应式为:$Sb_2O_3 + 6Li = 2Sb + 3Li_2O$。根据化学计量计算,还原 2 g Sb_2O_3 理论上需消耗大约 0.3 g Li 金属,该用量定义为锂金属的 1 倍理论反应当量。Li 金属反应当量对还原率的影响见图 6。B-3 锂热还原产物 XRD 图谱见图 7。

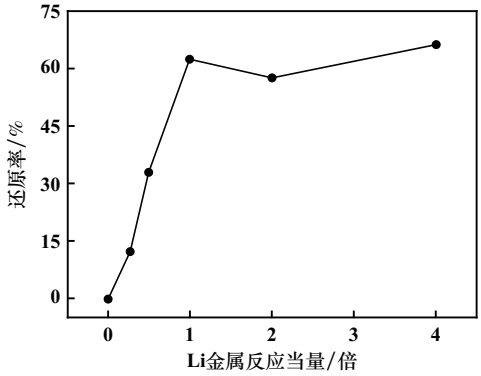


图 6 Li 金属反应当量对还原率的影响

Fig. 6 Effect of Li reaction equivalent on reduction rate

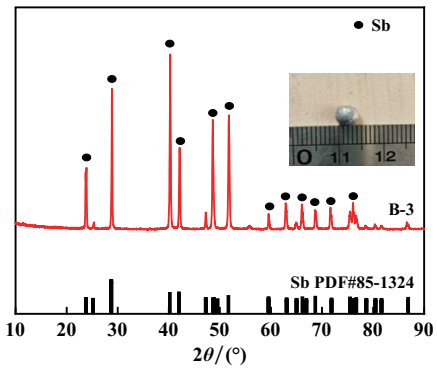


图 7 B-3 锂热还原产物 XRD 图谱

Fig. 7 XRD pattern of reduction product of B-3

由图 6 可知,Li 金属反应当量小于 1 倍时,还原率随着反应当量增加而增加;反应当量超过 1 倍后,还原率基本在 61%上下浮动,说明此时 Li 金属反应当量对还原率的影响已达到上限。结合热力学数据可以推断,无论在热力学上还是动力学上,Li 还原 Sb_2O_3 正向反应趋势均较大,还原反应的逆反应很难进行,同时通过增加反应物量来推进反应正向进行的作用有限。综合考虑,Li 金属反应当量取 1 倍为宜。

由图 7 可见,还原产物为银白色光亮的金属球颗粒。XRD 图谱中 28°、40°、48°和 52°处都有 Sb 的强吸收峰,整个图谱中只存在 Sb 金属峰,一方面可以说明,由Li 金属还原 Sb_2O_3 生成 Sb 金属时不会产生 Li-Sb 合金,另一方面,该产物可视为 100%纯 Sb 金属。

2.3.3 反应时间的影响

反应时间对还原率的影响如图 8 所示。随着反应时间延长,锂热还原率先大幅升高后小幅升高再降低,反应时间 6 h 时达到峰值。适宜的反应时间为 6 h。

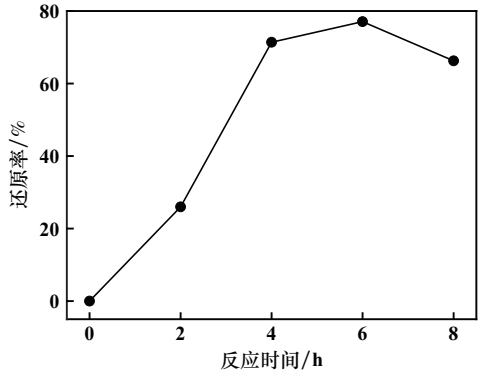


图 8 反应时间对还原率的影响

Fig. 8 Effect of reaction time on reduction rate

2.3.4 盐用量的影响

盐用量对还原率的影响如图 9 所示。随着盐用量增加,还原率整体呈上升趋势。盐用量小于 16 g 时,Sb_2O_3、Li 和所用盐均消失并造成不同程度的坩埚破碎。盐量 16 g 时,坩埚完好无损,破碎后结果显示,盐和产物的状态与 A 组和 B 组实验结果相同。

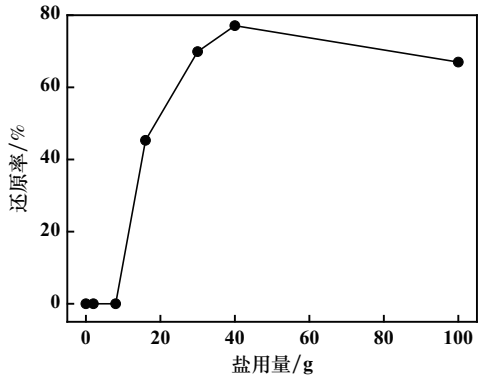


图 9 盐用量对还原率的影响

Fig. 9 Effect of salt dosage on reduction rate

2.3.5 锂热还原放大实验

在 Sb_2O_3 质量 10 g、采用 LiCl 为熔盐(质量 100 g)、

Li 金属质量 1.5 g、反应温度 923 K、反应时间 6 h 条件下进行了放大实验,还原率达到 77.0%。

3　结语

1) 使用含有少量氧化锑粉末的金属钼空腔电极作为阴极,得到了氧化锑在高温熔盐中的电位;循环伏安曲线表明,Sb_2O_3/Sb 的电位与 Li^+/Li 的电位相差较大,在氯化锂熔盐体系中氧化锑可以被还原。在随后的电解还原中,获得了金属锑,在测试条件下,还原率达到 80%以上。

2) 923 K 下,采用锂热还原法还原 Sb_2O_3,反应生成纯金属锑和氧化锂,未出现合金化现象。由于锑及其氧化物的挥发性,有必要控制反应时间和熔盐的加入量。放大实验中 Li 金属加入量为理论用量时还原率达到了 77.0%。

3) 与锂热还原法相比,电解还原法具有较高的还原率,熔盐可以重复使用,并且不需要额外搅拌。未来的研究中,可以进一步优化反应条件以提高还原率。总之,两种工艺都具有反应温度适中、锑回收简单、废弃物量较少、对设备要求低等特点。研究结果为氧化锑的还原研究提供了一定借鉴。

参考文献(References):

[1] HANSELL C. All manner of antimony[J]. Nature Chemistry, 2015, 7(1):88.

[2] 卿仔轩. 我国锑工业现状及行业发展趋势[J]. 湖南有色金属, 2012,28(2):71-74.
QING Zixuan. The present situation and developing trend of antimony industry in China[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2012,28(2):71-74.

[3] 吕超飞,王宪忠,张绍辉,等. 提高某含锑金矿锑浸出率的实验研究与实践[J]. 矿冶工程, 2020,40(2):101-104.
LYU Chaofei, WANG Xianzhong, ZHANG Shaohui, et al.Experimental research and practice of increasing antimony leaching rate from an antimony-bearing gold ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020,40(2):101-104.

[4] ZHU Q, YANG J G, NAN T X, et al. Antimony extraction from sulfide concentrates by direct electrolytic desulfurization in molten salt[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2024,12(20): 7844-7857.

[5] 欧阳臻,陈艺锋,唐朝波,等. Sb_2S_3-ZnO-C 体系热力学分析及应用[J]. 矿冶工程, 2019,39(1):72-75.
OUYANG Zhen, CHEN Yifeng, TANG Chaobo, et al. Thermodynamic analysis of Sb_2S_3-ZnO-C system and its application[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019,39(1):72-75.

[6] 马登,李东波,陈学刚,等. 锑精矿冶炼技术研究进展[J]. 中国有色冶金, 2020,49(2):49-54.
MA Deng, LI Dongbo, CHEN Xuegang, et al. Research progress of antimony concentrate smelting technology[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2020,49(2):49-54.

[7] 马登,李东波,陈学刚,等. FeO-SiO_2-Na_2O 渣系锑氧粉电热还原新工艺试验研究[J]. 中国有色冶金, 2020,49(6):75-80.
MA Deng, LI Dongbo, CHEN Xuegang, et al. Experimental research on reduction smelting of antimony oxide with FeO-SiO_2-Na_2O slag system by electric heating[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2020, 49(6):75-80.

[8] LI J F, WANG M Y, TU J G, et al. Facile electrochemical preparation of Al-Sm alloys in molten calcium chloride[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2018,165(11):E616-E621.

[9] PANIGRAHI M, SHIBATA E, IIZUKA A, et al. Production of Fe-Ti alloy from mixed ilmenite and titanium dioxide by direct electrochemical reduction in molten calcium chloride[J]. Electrochimica Acta, 2013,93:143-151.

[10] CHEN G Z, FRAY D J, FARTHING T W. Direct electrochemical reduction of titanium dioxide to titanium in molten calciumchloride[J]. Nature, 2000,407(6802):361-364.

[11] ROINE A. Outokumpu HSC chemistry for windows: Chemical reaction and equilibrium software with extensive thermochemical database[M]. Pori: Outokumpu Research Oy, 1994.

[12] SHEN Y X, ZHANG J S. E-pO^{2-} diagram for rare earth elements in molten salt[J]. Journal of Rare Earths, 2017,35(2):187-192.

[13] KADO Y, GOTO T, HAGIWARA R. Thermodynamics of the O_2/O^{2-} redox couple in molten (LiCl+KCl+Li_2O) systems[J]. The Journal of Chemical Thermodynamics, 2010,42(10):1230-1233.

[14] HYSLOP D J S, ABDELKADER A M, COX A, et al. Electrochemical synthesis of a biomedically important Co-Cr alloy[J]. Acta Materialia, 2010,58(8):3124-3130.

[15] XU H Y, XU S L, WANG H, et al. Characterization of hausmannite Mn_3O_4 thin films by chemical bath deposition[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2005,152(12):C803.

[16] DE LAUNE B P, BAYLISS R D, GREAVES C. $LiSbO_2$: Synthesis, structure, stability, and lithium-ion conductivity[J]. Inorganic Chemistry, 2011,50(16):7880-7885.

引用本文:任广治,徐纪瑭,姚本林,等. 熔融氯化锂中氧化锑的电解还原与锂热还原比较[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):232-237.
REN Guangzhi, XU Jitang, YAO Benlin, et al. Comparison between electrolytic reduction and lithothermal reduction of antimony oxide in molten lithium chloride[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3): 232-237.