doi：10.3969/j.issn.1005-7854.2022.05.009

碱熔预脱杂—氯盐电解精炼粗锑新工艺

张坤坤 揭晓武 张永禄 江培海
（矿冶科技集团有限公司，北京 100160）

摘 要：针对传统粗锑精炼工艺存在能耗高、锑金分离效果差和环境污染严重等问题，根据粗锑组元标准电极电位差异，提出“碱熔预脱杂—氯盐电解”精炼新工艺。结果表明：粗锑添加 2%碳酸钠、3%粉煤，在 850 ℃下熔化除杂 30 min，浇铸得到的锑阳极板 As 含量可降低至 0.07%，之后以 NaCl ～150 g/L、盐酸 ～40 g/L、Sb^{3+} ～40 g/L 混合液为电解液，在电流密度 200 A/m²和电解温度 45 ℃优化工艺条件下电解，得到的阴极锑满足标准 GB/T 1599—2014(Sb 99.70)质量要求，富金阳极泥 Au 含量达 7 076 g/t。既可实现粗锑的综合回收，又显著增加产品附加值。

关键词：粗锑；氯盐体系；电解精炼；锑金分离
中图分类号：TF818；TF831 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-7854(2022)05-0056-08

A novel refining process of crude antimony by alkali melting—chloride electrolysis

ZHANG Kun-kun JIE Xiao-wu ZHANG Yong-lu JIANG Pei-hai
(BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China)

Abstract: In view of the present process existing shortcomings of high energy consumption, poor separation effect of antimony with gold and unfriendly environment, a novel refining technology for crude antimony of “alkali melting－chloride electrolysis” was proposed according to the differences among standard electrode potential. The results show that the As content in casted antimony anode plate was decreased to 0.07% when crude antimony was smelted for 30 min at 850 ℃ with the ratio of 2% Na_2CO_3 and 3% coal powder. Then under the optimum conditions of current density of 200 A/m² and temperature of 45 ℃, the cathode antimony meeting the quality requirements of GB/T 1599—2014(Sb 99.70)and the Au rich anode slime (7 076 g/t) could be obtained in the electrolyte of NaCl(＜150 g/L), HCl(＜40 g/L) Sb^{3+}(＜40 g/L) solution. The comprehensive recovery of crude antimony has been realized, and the added value of products has been increased significantly.

Key words: crude antimony; chloride system; electrolytic refining; separation of gold and antimony

粗锑/毛锑是锑金精矿火法“挥发熔炼/焙烧—还原熔炼”工艺和湿法“硫化钠浸出—电沉积”工艺产出的中间锑产品，其中往往夹杂砷、铅及铁等杂质，需进一步精炼后才能满足商品锑的质量要求[1,2]。此外，由于金与锑具有良好亲和性[3]，造成大量金分散在粗锑中，因此在精炼脱除杂质的同时，需将其中高价值的金分离回收。

粗锑精炼现行主流工艺是灰吹—还原熔炼[4]，粗锑挥发熔炼得到锑氧粉，再经还原得精锑产品，金则富集于灰吹底液贵锑中，该方法可取得较好杂质脱除效果，但存在能耗高和锑、金分离效果差的问题。有学者采用熔盐电解[5]、真空精炼[6]技术处理粗锑，虽有较好的分离富集效果，

收稿日期：2022-06-15
基金项目：国家重点研发计划项目(2019YFC1908301)；矿冶科技集团有限公司青年科技创新基金资助项目(04-2127)
第一作者：张坤坤，硕士，助理工程师，研究方向为有色金属冶金。E-mail：zhangkk101@163.com
通信作者：揭晓武，硕士，正高级工程师；E-mail：jiexiaowu002@163.com

但由于原料适用性差、能耗及运行成本高等问题，尚未规模化应用。由于锑的氟化物在水中溶解度高且其价格低廉，粗锑的水溶液电解精炼主要采用硫酸-氢氟酸电解体系[7]，但其毒性大且易挥发使得环境污染严重。采用氟化氨代替氢氟酸，虽然在一定程度上可降低电解液毒性[8]，但依然存在较高的环境风险。硫化钠-氢氧化钠电解体系在锑金精矿浸出—电积处理中得到工业应用，但处理粗锑时，金会以 Na_3AuS_2 形式进入溶液并在阴极析出，造成贵金属损失[9]。其它诸如酒石酸、柠檬酸-柠檬酸盐等有机酸电解体系，由于试剂消耗高、价格昂贵，工业应用受限[1]。电解精炼具有能耗低、锑金分离效果好等优势，但环境压力大、生产成本高等问题使得其工业应用较少。与氟化物类似，锑的氯化物在水中具有较高溶解度，但其毒性较锑的氟化物弱很多[1]，且氯盐价格低廉。“盐酸＋氯化钠”体系在铜、铅、铋、锑等矿物的矿浆电解已实现工业化应用[10,11]。本文以某典型粗锑为原料，采取“碱熔预脱杂—氯盐电解”精炼工艺提纯粗锑并富集金，考察碱熔熔铸、锑阳极盐酸＋氯化钠体系电解精炼过程工艺条件对杂质脱除及金分离效果的影响，为该技术的产业化应用提供支撑。

1 试验

1.1 原料

试验用粗锑来自山东某冶炼厂，其主要成分见表 1。粗锑原料含 Sb 为 91.43%，含金达 114.5 g/t，主要杂质 S 和 Na 分别为 1.12%和 1.9%，还包含少量 As、Fe 等杂质，为典型的锑金精矿经硫化碱浸—电积工艺产出的粗锑。

表 1 粗锑原料的主要成分

Table 1 Composition of crude antimony /%

元素	Sb	Na	S	As	Fe	Pb	Cu	Bi	Au[1)]
含量	91.43	1.9	1.12	0.13	0.072	0.005	0.008	＜0.005	114.5

注：1)单位为 g/t，下同

1.2 试验方法

粗锑中杂质主要包括 S、Na 及少量 As、Fe，其中 S 和 Na 主要来自电积过程 Na_2SO_4 等碱性钠盐的黏附，其在熔融过程可直接进入浮渣除去。在氯盐电解过程，Fe 的标准电极电位较锑更负，发生电氧化溶解进入电解液，Au 具有相当高的正电位，直接掉落至电解槽内形成阳极泥而得到富集，As 与锑电位相近，转入电解液后会在阴极还原沉积，影响阴极锑产品质量，因此在熔铸锑阳极板的同时加入碳酸钠预先将 As 脱除。As 被空气氧化后再与碳酸钠作用生成砷酸钠和亚砷酸钠，形成浮渣[1]。反应如式 1 或式 2。

$$2As+2.5O_2+3Na_2CO_3=2Na_3AsO_4+3CO_2 \quad (1)$$

$$2As+1.5O_2+3Na_2CO_3=2Na_3AsO_3+3CO_2 \quad (2)$$

将粗锑和碳酸钠混匀后移入预先称重的刚玉坩埚，在物料表面覆盖一层粉煤保护层，然后将其移入马弗炉。按照设定好的升温程序进行熔炼，熔炼完成后将熔体倒入石墨模具铸造成阳极板，对阳极板选点取样并进行成分分析。

氯盐电解在自制电解装置中进行，锑阳极板与钛阴极在电解槽中按照一定极距排布。将配制好的电解液充入电解槽，并将电解槽放入恒温水浴装置内，待温度升高至设定值时，接通电源开始电解。电解达到设定时长后，断电，取出阴极板、阳极板，清洗烘干后称重，利用差减法得到阴极锑质量并计算阴极电流效率，电解液经过滤得到富金阳极泥。

2 结果及讨论

2.1 碱熔预除杂

碱熔熔铸的主要目的是浇筑适合电解精炼的阳极板，同时预先脱除部分杂质。锑属于易挥发金属，为抑制熔融过程锑的氧化挥发，加入一定量粉煤保护。

2.1.1 碱熔温度和碱熔时间的影响

锑的蒸气压随温度升高而增加，900 ℃后急剧上升[1]，因此碱熔温度应控制在 900 ℃以内。在粗锑 200 g、粉煤占比 3%(与粗锑的质量百分比，下同)、碳酸钠占比 1%条件下，探究碱熔温度分别在 750、800、850、900 ℃和碱熔时间分别为 10、30、60、90 min 时，碱熔温度和碱熔时间对碱熔熔铸过程锑直收和杂质砷脱除的影响，结果分别如图 1 和图 2 所示。

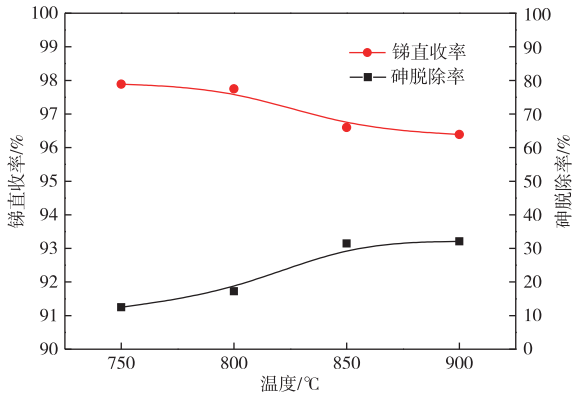


图 1　碱熔温度对锑直收率和砷脱除率的影响
(碱熔时间：30 min)

Fig. 1　Effects of alkali melting temperature on recovery ratio of Sb and remove ratio of As (Alkali melting time: 30 min)

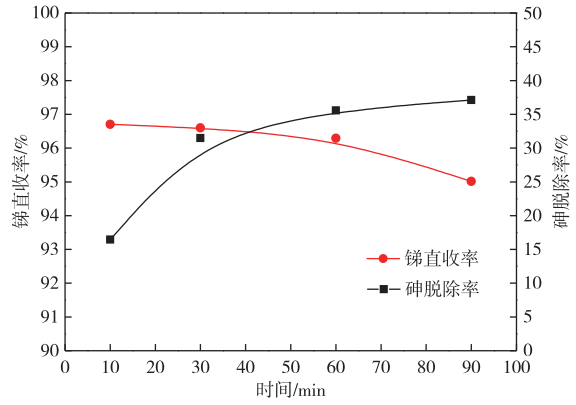


图 2　碱熔时间对锑直收率和砷脱除率的影响
(碱熔温度：850 ℃)

Fig. 2　Effects of alkali melting time on recovery ratio of Sb and remove ratio of As (Alkali melting temperature: 850 ℃)

从图 1 可以看出，随着碱熔温度的升高，锑直收率缓慢降低，砷脱除率逐渐上升。说明升高碱熔温度对砷脱除有一定益处，但同时锑的氧化损失相对增加。从图 2 可以看出，随着碱熔时间的延长，锑直收率缓慢降低，而砷脱除率的增加速率先快后慢，碱熔 90 min 时增加至 37%。试验过程中发现，随着碱熔时间的延长，渣率逐渐由 6%增加至 10%，说明延长时间，锑和砷均逐渐氧化进入渣相。综合二者对碱熔过程锑直收和砷脱除的影响，选择适宜的碱熔温度为 850 ℃，碱熔时间为 30 min。

由于试验研究中发现砷脱除效果始终较差(<40%)，分析原因发现碳酸钠加入量较低，同时粉煤加入量过高，造成熔融过程处于强还原氛围，不利于杂质的脱除，为此研究了碳酸钠加入量对碱熔过程的影响。

2.1.2　碳酸钠加入量的影响

在粗锑 200 g、碱熔温度 850 ℃、碱熔时间 30 min、粉煤占比 1%、碳酸钠占比 1%～5%试验条件下，研究碳酸钠加入量碱熔熔铸过程锑直收和杂质砷脱除的影响，结果如图 3 所示。

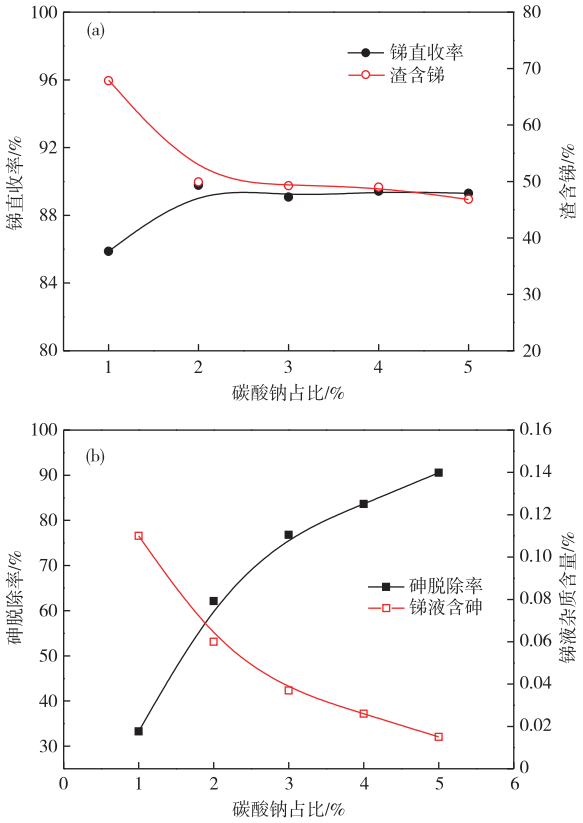


图 3　碳酸钠加入量对锑直收率和砷脱除率的影响

Fig. 3　Effects of Na_2CO_3 ratio on recovery ratio of Sb and remove ratio of As

由图 3 可知，随着碳酸钠占比的增加，锑直收率略微上升，而砷脱除率大幅度增加。当碳酸钠占比由 1% 增至 2%，锑直收率由 85% 增加至 89.18%，试验发现此时渣率由 14.31% 增加至 17.19%，说明产生的浮渣起到一定保护锑的作用。继续增加碳酸钠加入量，锑直收率基本保持不变。砷脱除率在研究范围内从 33.29% 逐渐升高至 90.57%，锑液中砷含量可降低至 0.015%，当 Na_2CO_3 加入量为 2%时，锑液中砷含量为 0.06%，满足 GB/T 1599—2014 对杂质砷质量要求(As≤0.1%)。因此，选择适宜碳酸钠占比为 2%。

2.1.3　粉煤加入量的影响

试验中发现粉煤加入量降低后，锑直收率降低，始终有～10%锑氧化挥发后损失于渣中，为此，探究粉煤加入量对碱熔熔铸过程的影响。其他试验条件为：粗锑 200 g、温度 850 ℃、时间

30 min、粉煤占比 1%～5%、碳酸钠占比 2%，试验结果如图 4 所示。

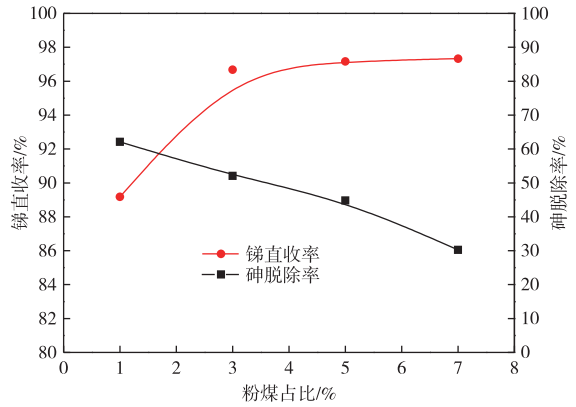


图 4　粉煤占比对锑回收率和砷脱除率的影响

Fig. 4　Effects of coal powder ratio on recovery ratio of Sb and remove ratio of As

从图 4 可以看出，增加粉煤占比，锑直收率明显上升，但砷脱除率逐渐降低。整体来看，锑直收率先是快速上升至 96.60%后，增加变缓，而砷脱除率则是由 62.12%直线下降至 30.27%，同时发现金属相锑品位也是逐渐降低，粉煤占比为 7%时，虽然锑直收率可达 97.33%，但金属相锑品位仅为 98.16%，说明粉煤的加入虽可抑制锑的氧化损失，但过多粉煤会造成熔炼过程还原强度增强，不利于杂质的脱除。因此，适宜粉煤占比选择为 3%。

2.1.4　碱熔熔铸综合试验

综合锑直收率及杂质砷的脱除效果，碱熔熔铸综合试验条件确定为：粗锑 1 kg、温度 850 ℃、时间 30 min、碳酸钠占比 2%、粉煤占比 3%，浇注得到的锑阳极板成分见表 2。由表 2 可知，浇注得到的锑阳极板含锑可达 99.45%，含 Au 为 140.64 g/t，As 含量降低至 0.07%，同时其它杂质含量少，说明其他杂质均得到一定程度的脱除。

表 2　锑阳极板的主要成分

Table 2　Composition of antimony anode plate　/%

元素	Sb	As	Fe	S	Cu	Pb	Au[1)]
含量	99.45	0.07	0.044	0.025	0.013	0.011	140.64

2.2　氯盐电解

将锑阳极板在“盐酸＋氯化钠”电解液中进行电解，进一步脱除锑阳极板中的 Fe 和 Pb 等杂质，并分离富集其中的贵金属金，制得合格商品锑和富金阳极泥，考察盐酸浓度、电流密度及电解温度对电解过程的影响。

2.2.1　“盐酸＋氯化钠”电解液及其 LSV 曲线

根据“盐酸＋氯化钠”体系在锑金精矿矿浆电解方面相关研究[12-14]，初步确定了“盐酸＋氯化钠”电解液主要成分为：氯化钠浓度 150 g/L、Sb^{3+} 浓度 40 g/L、盐酸浓度 40 g/L。对该成分“盐酸＋氯化钠”电解液进行线性伏安扫描分析，揭示该电解体系的电化学行为(采用三电极体系，参比电极选择饱和甘汞电极，辅助电极为石墨电极，工作电极为钛片)。试验研究所用阳极为可溶性阳极，因此只进行了阴极还原研究，结果如图 5 所示。

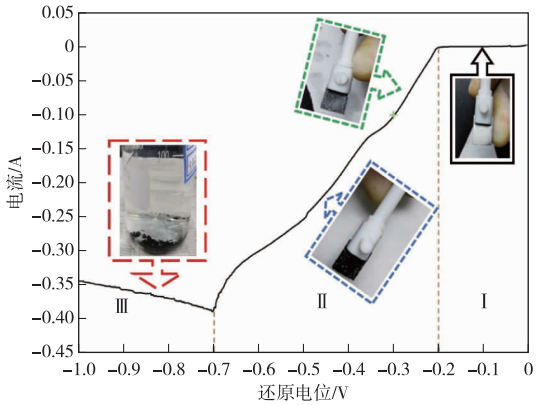


图 5　“盐酸＋氯化钠”电解液的 LSV 曲线

(扫描速度：1 mV/s；极板面积：1 cm^2)

Fig. 5　The LSV curve of “HCl＋NaCl” electrolyte

(Scan speed: 1 mV/s; Plate area: 1 cm^2)

从图 5 可以看出，随着还原电位的逐渐增强，盐酸＋氯化钠”的 LSV 曲线可分为三个阶段：第Ⅰ阶段(0～－0.2 V)电流为零，表明此时没有化学反应产生；第Ⅱ阶段(－0.2～－0.7 V)有还原电流产生且逐渐增强，说明此时开始有 Sb(Ⅲ)还原反应产生，同时钛片上可观察到银灰色金属析出，还原电位增强至－0.35 V 后产物转变为蓬松黑色物质，原因主要是此时电流密度较高(>1 000 A/m^2)，锑生成速度过快，造成粉末锑形成；第Ⅲ阶段(－0.7～－1 V)电化学反应速率过快，远大于 Sb^{3+} 的迁移速率，浓差极化增大造成还原反应速率减慢，同时可观察到表面粉末锑逐渐沉入电解池。综上，“盐酸＋氯化钠”电解体系可以实现锑的还原沉积，但还原电位较高时，还原电流过大，对阴极锑晶型有不利影响。

2.2.2　盐酸浓度的影响

三氯化锑易溶于水，但在较稀溶液中易发生水解沉淀析出氯氧化锑[1]，因此电解液需保持一定酸度，防止锑的水解。探究盐酸浓度对氯盐电解过程的影响。基本试验条件：电流密度 200 A/m^2、温度 45 ℃、异极距 25 mm、盐酸浓度 20～50 g/L，试验结果如图 6 所示。

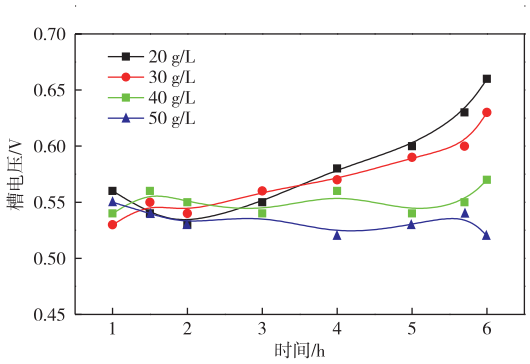


图 6　盐酸浓度对电解过程的影响

Fig. 6　Effects of the concentration of HCl on electrolysis

从图 6 可以看出，随着盐酸浓度的增加，槽电压总体呈逐渐降低趋势，盐酸浓度≥40 g/L 时，整个电解过程槽电压稳定，总体差别不大，此时阴极电流效率和电耗基本保持不变，阴极电效大于 99.5%，吨锑电耗约为 390 kW·h；当盐酸浓度<40 g/L 时，随着电解的进行，槽电压逐渐上升。通过对阳极表面(图 7)观察发现，在盐酸浓度较低时，阳极表面会逐渐出现一层黑色阳极泥层，难以脱落，造成槽电压升高。对该黑泥取样进行 XRD 衍射分析，发现其组成物相主要为 Sb_2O_3 和 $Sb_8O_{11}Cl_{12}$，说明盐酸浓度较低时，锑离子在电解液中的溶解度小，阳极锑发生电氧化后发生了水解反应。因此选择适宜盐酸浓度为 40 g/L。

2.2.3　电流密度的影响

LSV 曲线显示，当电流密度较大时，阴极锑以粉末状生成，探究电流密度对氯盐电解过程的影响。其他试验条件为：温度 45 ℃、异极距25 mm、盐酸浓度 40 g/L、电流密度 100～300 A/m^2，试验结果如图 8 所示。

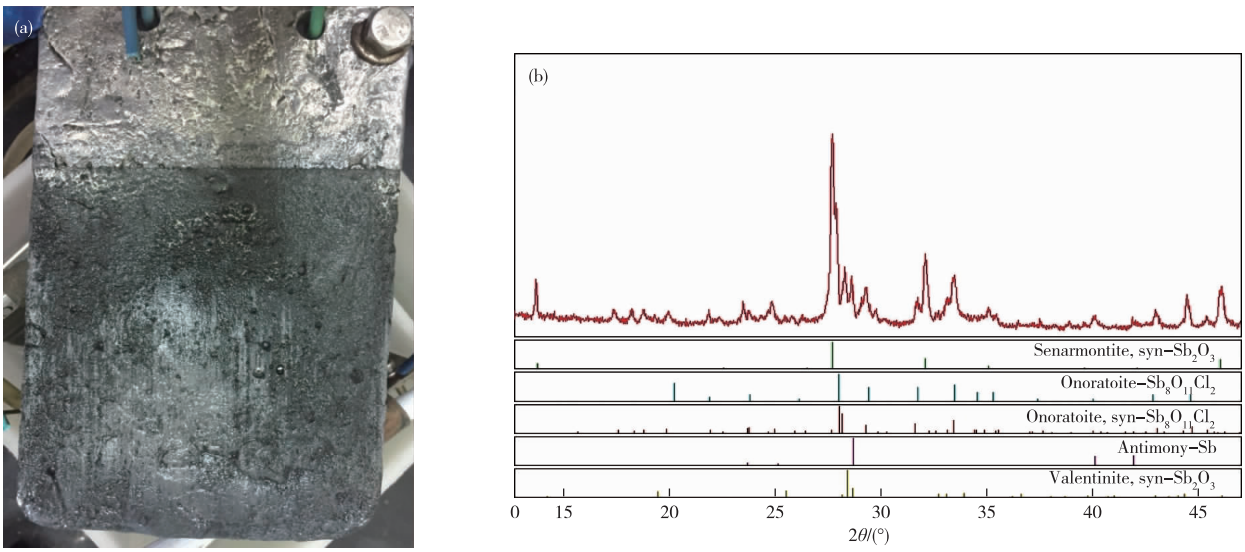


图 7　20 g/L HCl 浓度阳极表面照片及其表面物质的 XRD 图谱

Fig. 7　Photo of anode surface at 20 g/L HCl and XRD pattern of black slime)

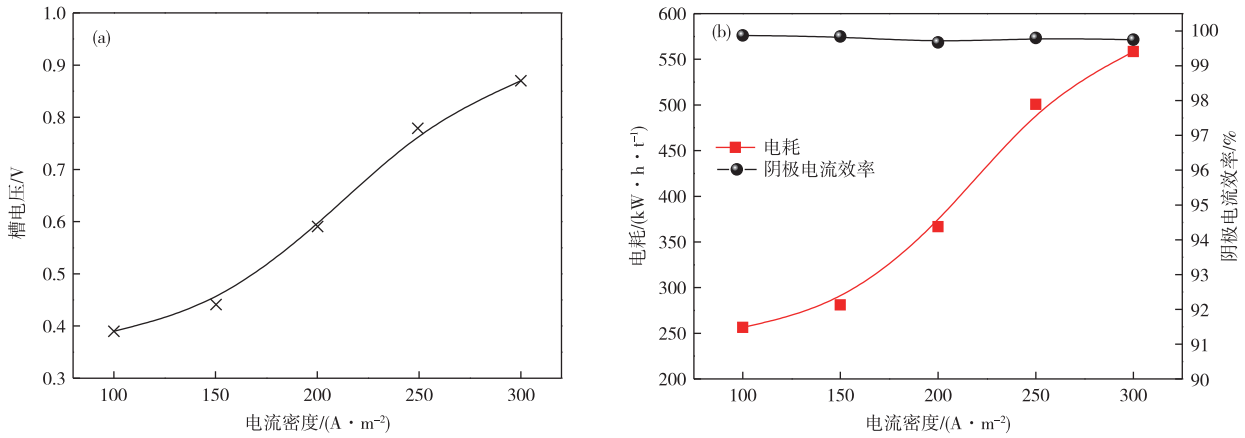


图 8　电流密度对电解过程的影响（图 a. 槽电压；图 b. 电耗和阴极电流效率）

Fig. 8　Effects of current density on electrolysis (Fig. a: Cell voltage; Fig. b: Power consumption and current efficiency)

从图 8 可以看出，随着电流密度的增加，槽电压逐渐升高，在考察的电流密度范围内，电流密度对电流效率无明显影响（均大于 99.5%）。

不同电流密度阴极锑表面照片及其 SEM 图像如图 9 所示。从图 9 可以看出，电流密度对阴极锑的表面形貌影响较大，电流密度较低时，锑呈球形析出在阴极板上且颗粒均匀致密；电流密度较大时，阴极板上锑呈堆积状生长，使得锑金属结节、枝状生长，容易造成极板间短路及电流下降等问题。综合考虑电耗及锑生长形态，选择适宜电流密度为 200 A/m^2。

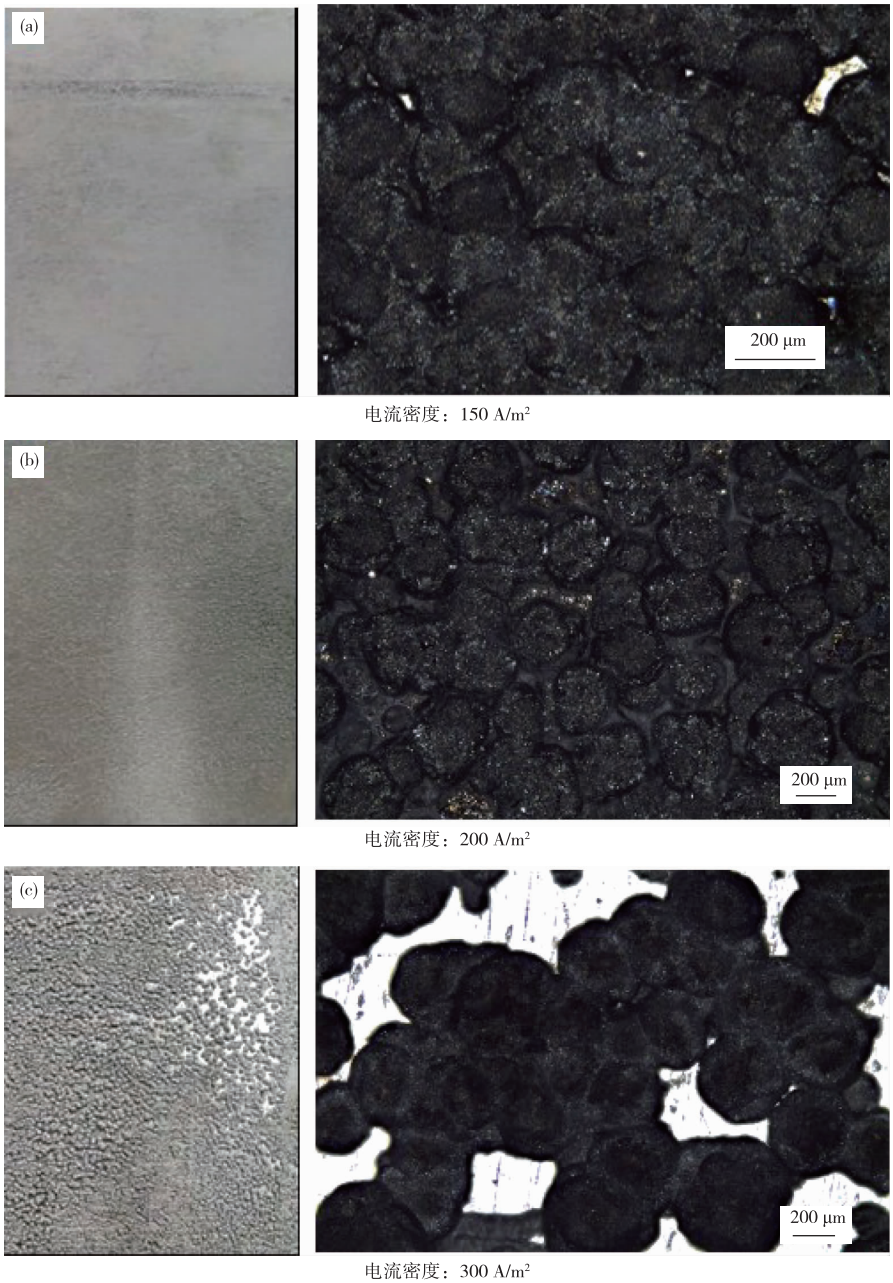


图 9　不同电流密度阴极锑表面照片及其 SEM 图像

Fig. 9　Surface photos and SEM images of the cathode antimony at different current density

2.2.4　电解温度的影响

在电流密度 200 A/m^2、异极距 25 mm、盐酸浓度 40 g/L、温度 25～55 ℃试验条件下，电解温度对氯盐电解过程槽电压和电耗的影响结果如图 10 所示。

从图 10 可以看出，在 25～55 ℃，槽电压及电耗随着温度的升高均呈小幅下降趋势，原因主要是升高温度可以加快电解液中离子的迁移，降低电解液电阻，增强电解液导电性。但在实际生产中，温度过高会造成电解液挥发量大、车间环境恶化等问

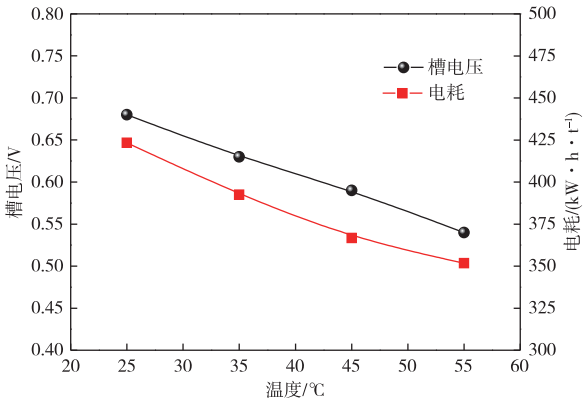


图 10 温度对槽电压和电耗的影响

Fig. 10 Effects of temperature on cell voltage and power consumption

题，因此试验优化温度选择为 45 ℃。

2.2.5 综合试验及金的分离

确定氯盐体系电解试验优化条件为：盐酸浓度 40 g/L、电流密度 200 A/m²、温度 45 ℃、异极距 25 mm，在此条件下进行 72 h 试验，对应的平均槽电压为 0.59 V，电耗为 367 kW·h/t，平均阴极电流效率为 99.92%，阳极泥产率约为 1.2%，电解得到阴极锑的表面外观照片及 SEM 图像如图 11 所示。

从图 11 可以看出，锑在阴极板上呈球形颗粒状析出，且长板均匀致密。对阴极锑和电解液过滤得到的阳极泥分别进行成分分析，结果见表 3。由表 3 可知，氯盐电解过程溶入电解液的砷部分水解形成不溶性盐而进入阳极泥[15]，阴极锑砷含量降低至 0.042%，锑品位达 99.85%，金含量为 0.52 g/t，其它杂质均得到了有效脱除，达到 GB/T 1599—2014(Sb 99.70)标准要求。阳极泥中金富集至 7 076 g/t，较原料粗锑富集 62 倍，金和锑得到了有效的分离和富集。

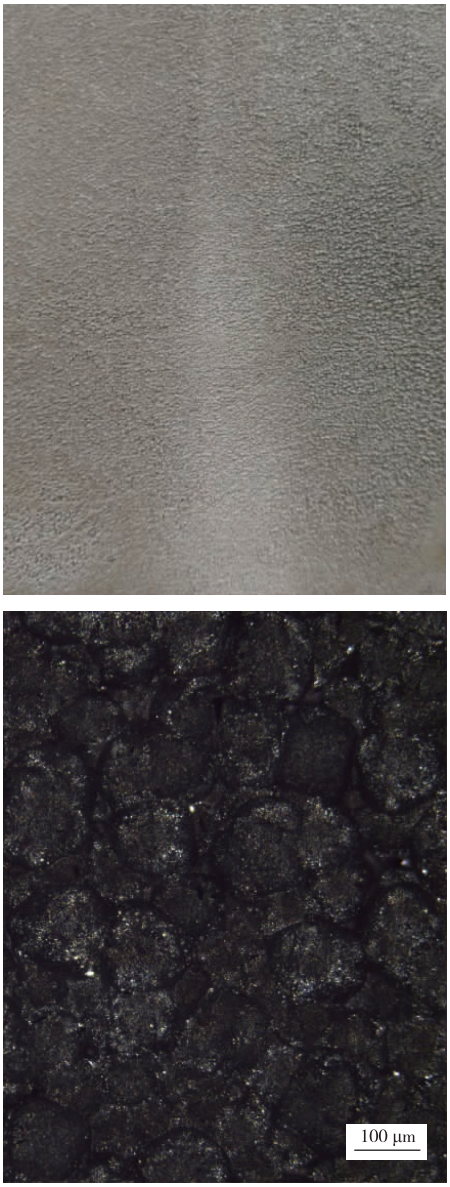


图 11 阴极锑表面照片及其 SEM 图像

Fig. 11 Surface photo and SEM image of the cathode antimony

表 3 阴极锑和阳极泥成分

Table 3 Compositions of cathode antimony and anode slime /%

	元素						
	Sb	As	Fe	S	Cu	Pb	Au[1)]
阴极锑	99.85	0.042	0.002	0.04	0.006	0.002	0.52
阳极泥	66.00	2.490	0.270	0.03	0.860	<0.050	707 600

3 结论

1)采用“碱熔预除杂—氯盐电解”精炼粗锑新工艺，在粗锑熔铸阳极板过程中加入碳酸钠预先脱除 As 等杂质，再根据粗锑各组元标准电极电位差异，将锑阳极板在“盐酸＋氯化钠”电解液中电解，在制备合格商品锑的同时可实现金的分离富集。

2)碱熔过程中，碳酸钠加入量越高，杂质 As 脱除效果越好；粉煤的加入虽可抑制 Sb 的氧化损失，但过多粉煤则影响杂质 As 的脱除。碱熔优化条件为：碳酸钠占比 2%、粉煤占比 3%、温度 850 ℃、时间 30 min，在此条件下浇铸制得锑阳极板含锑可达 99.45%，As 含量可降低至 0.07%。

3)氯盐电解过程中，电流密度过大，阴极锑会呈堆积状生长，不利于电解过程的进行；盐酸浓度较低，阳极会发生 Sb^{3+} 的水解反应，造成槽电压升高。电解优化条件为：电流密度 200 A/m^2、温度 45 ℃、异极距 25 mm，优化后的电解液成分为：Sb^{3+} 浓度～40 g/L、氯化钠浓度～150 g/L、盐酸浓度 40～g/L，在此条件下电解得到的阴极锑达到 GB/T 1599—2014(Sb 99.70)标准要求，阳极泥中金含量为 7 076 g/t，较原料粗锑富集了 62 倍。

参考文献

[1] 赵天从. 锑[M]. 北京：冶金工业出版社，1987.
ZHAO T C. Antimony[M]. Beijing：Metallurgical Industry Press，1987.

[2] 王宪忠，张绍辉，李明亮，等. 含锑金精矿碱性硫化钠浸出锑研究与工业实践[J]. 贵金属，2019，40(1)：42-46.
WANG X Z，ZHANG S H，LI M L，et al. Research and industrial practice of leaching antimony by alkali sodium sulfide from antimony gold concentrate[J]. Precious Metals，2019，40(1)：42-46.

[3] 刘英俊. 元素地球化学[M]. 北京：科学出版社，1984.
LIU Y J. Elemental geochemistry[M]. Beijing：Science Press，1984.

[4] 杨雅历. 取消锑金冶炼灰吹熔炼工序措施探讨[J]. 科技与生活，2013(1)：148-149.
YANG Y L. Discussion on the measures to cancel the ash blowing smelting process of antimony gold smelting[J]. Technology and Life，2013(1)：148-149.

[5] 赵应黔，王良栋，李武斌，等. 一种两段熔盐电解法生产高纯锑的方法：CN201410372843. 4[P]. 2015-01-28.
ZHAO Y Q，WANG L D，LI W B，et al. A method for producing high-purity antimony by two-stage molten salt electrolysis：CN201410372843. 4[P]. 2015-01-28.

[6] ZHANG X，FRIEDRICH S，FRIEDRICH B. Separation behavior of arsenic and lead from antimony during vacuum distillation and zone refining[J]. Journal of Materials Research and Technology，2020，9(3)：4386-4398.

[7] SCHLAIN D，PRATER J D，RAVITZ S F. Electrolytic refining of antimony bullion[J]. Journal of the Electrochemical Society，1949，95(3)：145-160.

[8] 崔焱，林艳，谢刚，等. H_2SO_4-NH_4F-SbF_3 粗锑电解精炼体系研究[J]. 黄金，2014，35(4)：50-57.
CUI Y，LIN Y，XIE G，et al. Study on H_2SO_4-NH_4F-SbF_3 electrolyte system for crude antimony electro-refining process[J]. Gold，2014，35(4)：50-57.

[9] AWE S A，ÅKE S. Electrowinning of antimony from model sulphide alkaline solutions[J]. Hydrometallurgy，2013，137：60-67.

[10] 邱定蕃. 矿浆电解[M]. 北京：冶金工业出版社，1999.
QIU D F. Slurry electrolysis[M]. Beijing：Metallurgical Industry Press，1999.

[11] ZHANG Y L，WANG C Y，MA B Z，et al. Extracting antimony from high arsenic and gold-containing stibnite ore using slurry electrolysis[J]. Hydrometallurgy，2019，186：284-291.

[12] 张永禄，王成彦，揭晓武，等. 矿浆电解盐酸＋氯化钠体系 $SbCl_3$ 溶解性能研究[J]. 有色金属(冶炼部分)，2020(7)：1-4.
ZHANG Y L，WANG C Y，JIE X W，et al. Study on $SbCl_3$ solubility in hydrochloric acid and sodium chloride system of slurry electrolysis[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)，2020(7)：1-4.

[13] 杨永强，王成彦，陈永强，等. 高砷锑金精矿矿浆电解小型试验研究[J]. 矿冶，2014，23(5)：56-60.
YANG Y Q，WANG C Y，CHEN Y Q，et al. Lab-scale test study on slurry electrolysis of As-rich antimonic gold concentrate[J]. Mining and Metallurgy，2014，23(5)：56-60.

[14] 张永禄，王成彦，郜伟，等. 锑金精矿矿浆电解阳极区选择性氧化浸出研究[J]. 有色金属(冶炼部分)，2020(8)：63-67.
ZHANG Y L，WANG C Y，GAO W，et al. Study on selective oxidation leaching in anode area of slurry electrolysis of antimony gold concentrate[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)，2020(8)：63-67.

[15] 孔德颂，罗劲松，王有维，等. 铜电解阳极钝化及漂浮阳极泥控制技术研究进展[J]. 中国有色冶金，2021，50(1)：1-8.
KONG D S，LUO J S，WANG Y W，et al. Research progress of copper electrolysis anode passivation and floating anode slime control technology[J]. China Nonferrous Metallurgy，2021，50(1)：1-8.

（编辑：王爱平）