

中南工业大学学术著作丛书

有色冶金应用基础研究

傅崇说 著

科学出版社

1993 年

傅崇说,1919年1月15日生,原籍浙江绍兴,1942年毕业于交通大学唐山工学院,1949年后,历任南昌大学冶金教研室主任,中南工业大学有色冶金系主任,现任中南工业大学教授、博士导师,是国务院学位委员会第二届学科评议组成员,先后多次应邀作为访问教授赴美、澳、德等国进行学术交流,是澳大利亚墨尔本大学提取冶金中心学术顾问委员会海外通讯委员。作者长期从事有色金属冶金和冶金过程理论的教学和科研工作,著有《炼铜学》、《有色冶金原理》、《冶金溶液热力学原理与计算》、《湿法冶金原理》等,译著有《有色重金属冶金学》、《炼铅学》、《铜镍冶金实验》,并合译《铜镍冶金学》和译校《提取冶金速率过程》等教学用书及参考书。

80年代以来的10多年期间,主要科研方向为有色冶金基础与工艺开发,这次将其中部分论文集成《有色冶金应用基础研究》一书由科学出版社出版。

目 录

1 有色提取冶金基础研究的进展

- 1.1 铋湿法冶金的基础研究(Ⅰ)——关于爆铋及其形成 1
- 1.2 铋湿法冶金的基础研究(Ⅰ)——爆铋中氯化物的 X 射线光电子能谱研究 12
- 1.3 辉铋矿浸出动力学研究 22
- 1.4 无机物胶体超微粒子体系的制备过程研究 28
- 1.5 镍硫化物在酸性氯化物水溶液中的腐蚀溶出(Ⅰ)—— Ni_3S_2 溶出 36
- 1.6 镍硫化物在酸性氯化物水溶液中的腐蚀溶出(Ⅱ)——镍钨溶出 44
- 1.7 在酸性氯化物水溶液中同时浸出海洋锰结核与镍钨 53
- 1.8 氯化物体系中 Ni-MnO_2 同时电积 60
- 1.9 形成爆铋的条件及其中氯化物形态的研究(英文) 68
- 1.10 在盐酸溶液中用镍钨还原浸出海洋锰结核(英文) 78
- 1.11 海洋锰结核湿法处理新方法(英文) 87
- 1.12 关于稀土精矿的分解过程(英文) 97

2 关于有色金属-配位体-水系及硫化矿物-配位体-水系平衡研究的新见解

- 2.1 关于 $\text{Cu-Cl}^--\text{H}_2\text{O}$ 系的热力学分析及电位-pH 图 119
- 2.2 铜-氯离子-水系反应的化学计量分析 136
- 2.3 铅氯络合离子生成反应的平衡常数 147

2.4	关于铅-氯离子-水系在高离子强度及升温条件下的平衡研究	154
2.5	关于氯化物溶液中铅、银结晶分离的理论分析	166
2.6	$\text{PbS}-\text{Cl}^--\text{H}_2\text{O}$ 系的 $E-\log[\text{Cl}^-]$ 图及其应用	176
2.7	关于金属-配位体-水系的平衡及其通用电算程序	187
2.8	关于铅-氯离子-水系中平衡图应用的讨论(英文)	199
2.9	锑湿法冶金的基础研究(Ⅲ)—— $\text{Sb}_2\text{S}_3-\text{Cl}^--\text{H}_2\text{O}$ 系中的平衡研究(英文)	208

3 各种高温冶金体系中组元活度计算及测定的新方法

3.1	三元和多元体系中一阶和二阶活度相互作用参数的求算	215
3.2	由两组元的活度积计算体系组元的活度	224
3.3	由包晶二元系相图计算活度的新方法	231
3.4	由共晶二元系相图计算活度的新方法	241
3.5	由共晶三元系相图计算活度的方法	250
3.6	由两组元的活度比计算三元及多元体系中各组元活度的新方法(英文)	260
3.7	浓度线性规则在偏摩尔量恒定条件下的扩展(英文)	268
3.8	直接测定熔铈中硫化物组元活度的新方法(英文)	277

Contents

1 Advances in fundamentals studies of extractive metallurgy for nonferrous metals

1. 1 Fundamental studies on hydrometallurgy of antimony (I)——About the so-called explosive antimony and its formation 1
1. 2 Fundamtentall studies on hydrometallurgy of antimony (II)——A study by XPS method on the chloride in explosive antimony 12
1. 3 A study on the leaching kinetics of stibnite 22
1. 4 An investigation on the preparation process of the inorganic ultramicro colloid system 28
1. 5 Cell-couple corrosion dissolution of nickel sulphides in the acidic chloride solution(I)—— Ni_3S_2 dissolution 36
1. 6 Cell-couple corrosion dissolution of nickel sulphides in the acidic chloride solution(II)——Nickel matte dissolution 44
1. 7 Leaching of manganese nodules with nickel matte in acidic chloride solution 53
1. 8 An investigation on the simultaneous electro-deposition of Ni-MnO_2 in chloride system 60
1. 9 An investigation on the conditions of forming explosive antimony and the form of chloride in it 68

1. 10 Reduction leaching of manganese nodules by nickel matte
in hydrochloric acid solution 78
1. 11 A novel hydrometallurgical process for the treatment of
ocean manganese nodule 87
1. 12 Decomposition processes of rare earths concentrates. 97
- 2 New ideas on the equilibrium studies in nonferrous metal-ligand-water system and sulphide mineral-ligand-water system**
2. 1 Thermodynamic analysis on the $\text{Cu-Cl}^- \text{-H}_2\text{O}$ system
and its potential -pH diagrams 119
2. 2 A stoichiometrical analysis on chemical reactions in the
copper-chloride ion-water system 136
2. 3 Equilibrium constants for the formation reactions of lead
(II) — chloro complexes 147
2. 4 Equilibrium study on the lead-chloride ion-water system
at high ionic strength and elevated temperatures 154
2. 5 A theoretical analysis on the crystallization separation of
lead and silver in chloride solution 166
2. 6 $E\text{-log} [\text{Cl}^-]$ diagrams in the $\text{PbS-Cl}^- \text{-H}_2\text{O}$ system and
their applications 176
2. 7 Equilibria in metal-ligand-water systems and a general-
ized computer program for their calculations 187
2. 8 A discussion on the applications of equilibrium diagrams
in the lead-chloride ion-water system 199
2. 9 Fundamental studies on hydrometallurgy of antimony
(III) — Equilibria in the $\text{Sb}_2\text{S}_3\text{-Cl}^- \text{-H}_2\text{O}$

3 Novel methods for calculating and measuring activity of component in various pyrometallurgical systems

- 3. 1 A method for measuring and calculating the first and second order interaction parameters for activity in ternary and multicomponent system 215
- 3. 2 A method for calculating the activity of components from an activity product of two components in the ternary and multicomponent systems 224
- 3. 3 New methods for calculating activity of component from phase diagram of binary peritectic system 231
- 3. 4 New methods for calculating activity of component from phase diagram of binary eutectic system 241
- 3. 5 New methods for calculating activity of component from phase diagram of ternary eutectic system 250
- 3. 6 A new method for calculating activities of components of ternary and multicomponent system from known activity ratio of two components 260
- 3. 7 Extension of linear concentration rules at constant partial molar quantity 268
- 3. 8 A novel method for directly measuring the activity of sulphide component in molten mattes 277

1 有色提取冶金基础研究的进展

1.1 锑湿法冶金的基础研究(I)

——关于爆锑及其形成

许多研究结果均已表明,用酸性氯化铁水溶液浸出硫化锑精矿,可以得到很高的锑浸出率^[1~5]。从浸出液中提取锑,电积法是可供选择的一种方法。然而,三氯化铁浸出-电积法至今还未能得到工业应用。其主要原因之一是人们担心氯化锑水溶液电解时会析出爆锑。所谓爆锑,是一种呈无定形的产物,当用硬物击打、研磨、接触电火花或加热到 120℃ 以上时,会爆炸放热,逸出白烟。显然,具有这种性质的锑,在工业上不仅无用且有危险。因此,研究爆锑的形成条件从而采取相应的措施以避免爆锑的形成,在锑湿法冶金的发展中是一个很有意义的课题。

早在 19 世纪中叶,人们已经发现爆锑的存在,随后有一些人对爆锑的性质及对爆锑形成的影响因素进行过研究,其中以 Cohen^[6] 和 Strengers^[7] 的研究较为详细。但是,他们的研究均以形成了的爆锑作为对象,并以爆锑中 SbCl_3 含量的多少作为指标,研究各种因素对爆锑形成的影响。以后的一些研究爆锑的人也都仿效他们的做法,或直接引用他们的数据。这样,长时期以来人们对爆锑的形成条件仍然不甚明了,对在什么条件下可以避免爆锑形成这样一个十分重要的问题,仍然没有得出明确的答案。

本文作者抛开电积产物中 SbCl_3 含量这一指标,采用更加灵敏而实用的参数反映诸因素对于爆锑形成的影响,进而确定爆锑形成的临界条件。

爆锑的制取与检测

采用 500ml 的烧杯作为制取爆锑的电解槽。为保持电解过程中电解液的浓度不变,采用可溶阳极电解。阳极是用分析纯锑粉铸成直径约 15mm 的锑棒。为了防止阳极电流密度增大时可能在阳极表面生成五价锑的碱式盐,采用了四根阳极棒置于阴极的两侧,以增大阳极表面积。阴极用纯铜制备。为使阴极表面粗糙度可能产生的影响减小到最低限度,每次试验均对平整光滑的铜片用金相砂纸抛光至表面光亮如镜。阴、阳极距为 35mm,电解槽底部装有磁力搅拌器。整个电解槽置于自制的恒温水浴槽中,温度的测量和控制精确到 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$,电解过程通过 WYJ-15A 型直流稳压电源供电。

电解液用分析纯 Sb_2O_3 和盐酸配制。用 HCl 、 NaCl (或 FeCl_2) 和 HClO_4 共同调节溶液的酸度和总氯离子浓度。

为防止电积产物爆炸损失,控制电解时间使沉积物的厚度不超过 2mm,并在电解后将整个阴极置于冰-水混合物中,用手指轻轻弯折电极,这样可以剥下完整的沉积物薄片。剥下的阴极沉积物置于真空干燥箱内,在 $30\sim 40^{\circ}\text{C}$ 条件下真空干燥后送检测。

试验证明,差热分析是检测爆锑的一种比较灵敏的方法。当以纯锑粉作为参照物时,所有爆锑均在 120°C 下出现一个明显的特征放热峰。而且,根据差热分析原理,当峰宽一定时,差热曲线上特征放热峰的峰高与爆锑爆炸放出的热量成正比,从而与电积产物中爆锑的含量成正比。所以,通过差热分析不仅可以确认电积产物中是否有爆锑,而且还可以确定其中爆锑的含量。

临界温度与临界电流密度

探索试验发现,在爆锑形成的所有影响因素中,温度的影响最

为敏感,温度变化 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 便可由析出爆锑转变为析出正常锑。当然,溶液中 Sb^{3+} 和 Cl^{-} 的总浓度对爆锑的形成也有很大的影响。但考虑到电解液实际上来自浸出过程,其成分一般不能大幅度变动,而温度和电流密度却是可加控制和调节的参数,因而,在我们的研究工作中,引进“临界温度 t_c ”和“临界电流密度 i_c ”两个概念,并作为基本参数,用以考虑 Sb^{3+} 、 Cl^{-} 、 H^{+} 和 Fe^{2+} 等离子浓度以及其它诸因素对爆锑形成的影响,并在此基础上为避免爆锑形成提供理论依据和选择条件。

所谓临界条件,就是形成正常锑与形成爆锑之间的条件分界线。临界温度 t_c 的定义是,当温度高于 t_c 时形成正常锑;当温度低于 t_c 时形成爆锑。临界电流密度 i_c 的定义是,当电流密度低于 i_c 时形成正常锑;当电流密度高于 i_c 时形成爆锑。根据这些定义阴极锑的,在 $t=t_c$ 或 $i=i_c$ 时的条件,就是既有正常锑也有爆锑形成的条件。精确的临界条件不容易确定。本文从实用角度并考虑到实验误差,认为选定电积产物中含爆锑 3~5% 时的电解条件作为临界条件是恰当的。

图 1-1 是不同温度下电解时所得阴极锑的差热曲线。图中曲线 1 为爆锑标样(阴极产物含爆锑 100%)的差热曲线。若取曲线 1 的特征性峰高为 100 单位,则峰高为 3~5 个单位的差热曲线 4 所对应

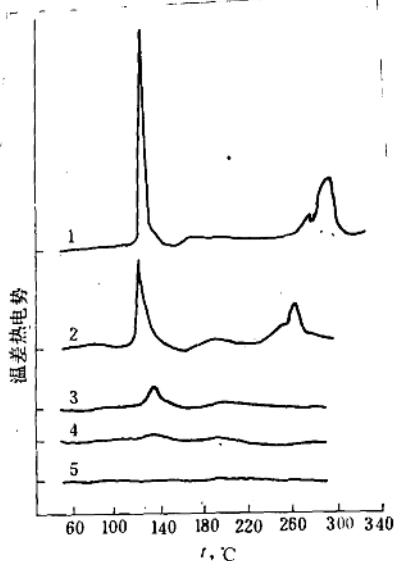


图 1-1 不同温度下析出的阴极锑的差热曲线

1— 25°C ; 2— 38°C ; 3— 39.5°C ;
4— 40°C ; 5— 41°C

的电解条件即为临界条件,此时,阴极产物中爆锑的含量为3~5%。试验查明,当 $t=t_c+\Delta t$ (或 $i=i_c-\Delta i$)时,所得阴极锑全部为正常锑,对应的差热曲线为一直线(见曲线5)。当 $t=t_c-\Delta t$ (或 $i=i_c+\Delta i$)时,所得差热曲线峰高为10个单位,说明产物中爆锑的含量约为10%(见曲线3)。这里, Δt 一般为0.5~1.0℃,而 Δi 为0.05~0.1*i_c*。

应该指出,对其它电解条件来说,由于事先并不知道临界点的数值,故实际做法是采用0.618优化法,根据峰高的数值逐步缩小寻查区间,直至区间间距小于或等于2 Δt (或2 Δi),然后取区间中点为临界点,并验证其特征峰高是否为3~5单位。

根据实验已知表面光亮的沉积物即为爆锑,而表面较粗糙、无光泽的浅灰色沉积物则是正常锑,从而为了减轻差热分析的负担,先根据光亮部分的多少和加热后爆炸的剧烈程度预估爆锑的含量,缩小寻查区间,直至区间间距小于或等于4 Δt (或4 Δi)时,才开始用差热分析法确定临界点。

结果与讨论

1. 锑离子浓度的影响

在电流密度 $i=250\text{A/m}^2$ 、电解液中 H^+ 的浓度为1.815mol/L和 $[\text{Cl}^-]_T>5.00\text{mol/L}$ 的条件下,临界温度随锑离子总浓度 $[\text{Sb}(\text{III})]_T$ 变化的关系列于图1-2和表1-1。

由图1-2可见,临界温度随电解液中 $[\text{Sb}(\text{III})]_T$ 增大而升高。 $t_c-[\text{Sb}(\text{III})]_T$ 曲线将图划分成两个区域:区域I是形成正常金属锑区域;区域II是形成爆锑的区域。此图表明,如果电解过程中电流密度和温度(例如 $t=t_1$)保持不变,当电解液中起始 $[\text{Sb}(\text{III})]_T$ 相当于 c_1 所示数值时,随着电解的进行, $[\text{Sb}(\text{III})]_T$ 逐渐下降,在恒温下电解条件沿水平直线向左移动,始终落在区域I中,所得电积产物全部是致密平整的正常锑;当电解液中起始 $[\text{Sb}(\text{III})]_T$ 相当于 c_2

时,电解条件从 b 点开始,不可避免地会析出爆锑,只有当 $[\text{Sb(III)}]_T$ 随着电解的进行不断降低到 c 点以下,才有可能析出正常锑。但是,由于爆锑呈无定形态,要在其上面形成正常锑的晶体并长大是困难的,所以此时即使有条件析出正常锑,也只能在电极的某些点上进行,最终产物部分是爆锑和部分呈瘤状结构的正常锑。当电解液中 $[\text{Sb(III)}]_T$ 的起始值为 c_2 时,要获得正常

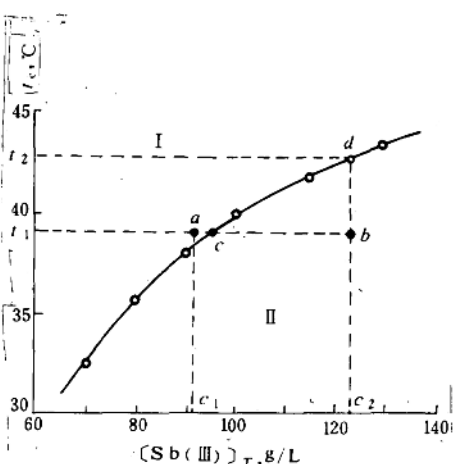


图 1-2 不同锑浓度下的临界温度

锑,必须将温度提高到 d 点所对应的 t_2 以上,使电解条件由区域 II 进入区域 I 才有可能。可见, t_c - $[\text{Sb(III)}]_T$ 关系曲线对于实际电解条件的控制具有重要的意义。

表 1-1 不同锑浓度下的临界温度

$[\text{Sb(III)}]_T, \text{g/L}$	70	80	90	100	115	130
$t_c, ^\circ\text{C}$	32.5	35.8	38.0	40.0	41.8	43.5

2. 温度对临界电流密度的影响

温度对另一个临界条件即临界电流密度的影响是很大的,不同 H^+ 浓度下它们之间的关系如图 1-3 所示。 i_c - t_c 曲线亦将图 1-3 分成两个区域;区域 I 是形成爆锑的区域;区域 II 是形成正常锑的区域。此图表明,在一定的电解液成分下电解时,降低电流密度或提高温度均可避免爆锑的形成。 i_c - t_c 曲线反映了电流密度和温度

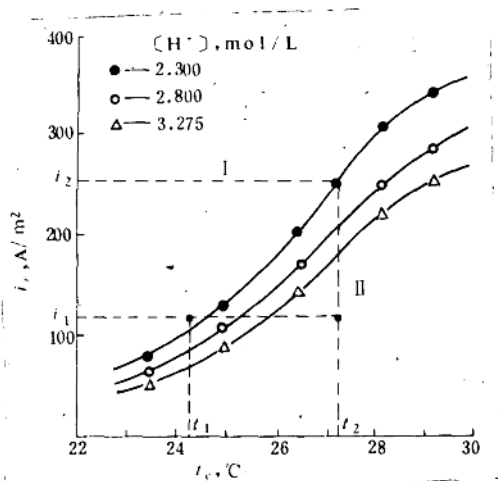


图 1-3 不同 H^+ 浓度下临界电流密度与临界温度的关系

对爆铈形成的共同影响。但从 i_c-t_c 曲线可以看出, 温度每升高 $2.5^\circ C$, 临界电流温密度大约可以增大一倍, 所以相对而言, 温度对爆铈形成的影响比电流密度更为重要, 是最最重要的一个操作参数。

3. 氯离子浓度的影响

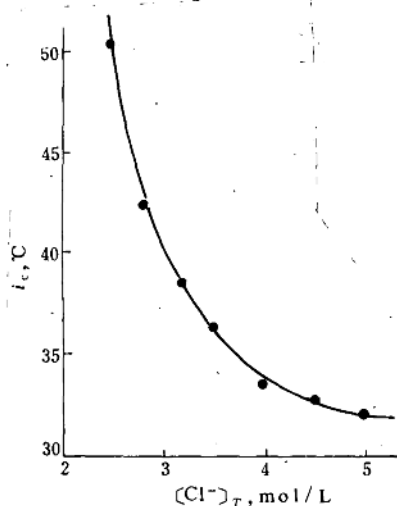


图 1-4 临界度与 $[Cl^-]_T$ 的关系

临界温度与氯离子总浓度的关系如图 1-4 所示。试验表明, 在 $[Cl^-]_T$ 较低时, 随着 $[Cl^-]_T$ 的降低 t_c 急剧升高。但当 $[Cl^-]_T$ 高于 4 mol/L 时 (此时 $[Cl^-]_T : [Sb(III)]_T > 6.96$), t_c 随 $[Cl^-]_T$ 变化就很小。可以认为, 对一般的浸出

液而言,由于 $[\text{Cl}^-]_T$ 足够高, $[\text{Cl}^-]_T$ 对 t_c 的影响可以忽略不计。

图 1-5 表示临界电流密度与 $[\text{Cl}^-]_T$ 的关系。在 38.6℃ 的温度下,当 $[\text{Cl}^-]_T$ 较低时, i_c 随 $[\text{Cl}^-]_T$ 的变化很显著,但当 $[\text{Cl}^-]_T$ 高于 5mol/L 时, i_c 随 $[\text{Cl}^-]_T$ 的变化便趋于平缓。这一规律与 t_c - $[\text{Cl}^-]_T$ 关系相似。

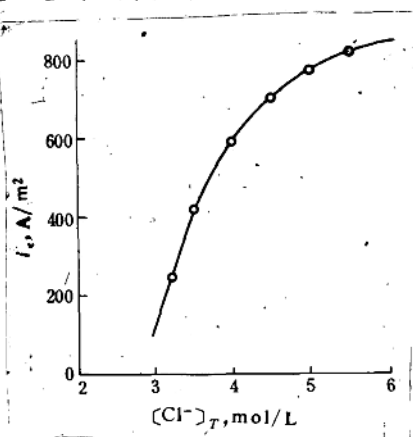


图 1-5 临界电流密度与 $[\text{Cl}^-]_T$ 的关系

因此,对一般的氯化浸出液而言,其中氯离子浓度的变化对爆锑形成的影响是不大的。

4. FeCl_2 浓度的影响

在 $[\text{Sb}(\text{III})]_T=100\text{g/L}$, $i=250\text{A/m}^2$ 条件下,临界温度与电解液中 FeCl_2 浓度的关系示于图 1-6。 FeCl_2 浓度的增大实际上伴随着 Cl^- 浓度的增大,故图 1-6 同时划出了 $[\text{Cl}^-]_T$ 的坐标。图 1-6 表明,随着 FeCl_2 浓度的增大,临界温度略有下降。结合图 1-4,可以认为, FeCl_2 浓度变化对临界温度的影响主要是由于 $[\text{Cl}^-]_T$ 变化引起的, Fe^{2+} 对爆锑的形成几乎没有什么影响。因此,在一定的温度和电流密度,为保证电解液具有足够高的 Cl^- 浓度以避免爆锑形成和防止氯化锑溶液的水解,添加

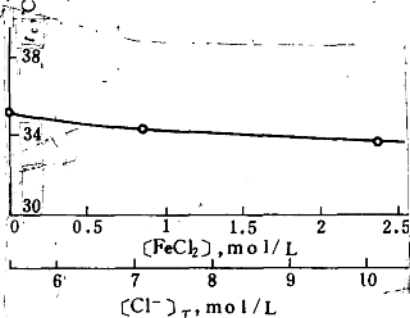


图 1-6 临界温度与 FeCl_2 浓度的关系

FeCl_2 比添加 NaCl 更有利,因为 NaCl 的加入对于 Cl^- 浓度的提高

是有限的。

5. 电解液酸度的影响

在 $[\text{Sb(III)}]_T = 70\text{g/L}$, $[\text{Cl}^-]_T = 5.00\text{mol/L}$ 的条件下, 电解液中 H^+ 浓度对临界温度和临界电流密度的影响分别示于图 1-7 和图 1-8。从图中可以看出, t_c 随 $[\text{H}^+]$ 增大而升高, 而 i_c 则随 $[\text{H}^+]$ 增大而下降, 但当 $[\text{H}^+] > 3.25\text{mol/L}$ 时, t_c 和 i_c 随 $[\text{H}^+]$ 的变化都很小。与图 1-4 和图 1-5 相比较可以看到, $[\text{H}^+]$ 对临界条件的影响与 $[\text{Cl}^-]_T$ 的影响正好相反, 而且当 $[\text{H}^+]$ 和 $[\text{Cl}^-]_T$ 足够高时, 二者对于爆梯形成的影响均可忽略。这就是 Cohen 等人^[6] 过去认为电解液中 HCl 浓度变化对爆梯形成影响不大的原因。

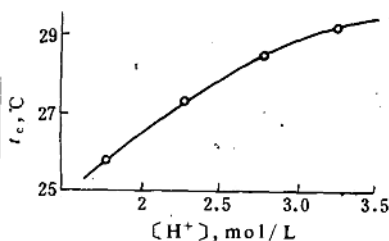


图 1-7 临界温度与 $[\text{H}^+]$ 的关系

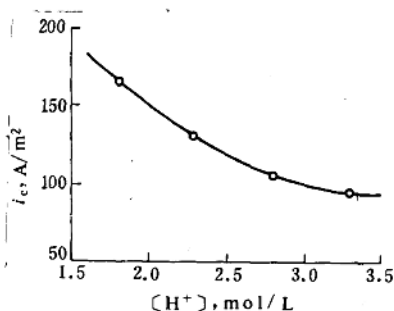


图 1-8 临界电流密度与 $[\text{H}^+]$ 的关系

6. 搅拌强度的影响

试验发现, 电解液的搅拌强度对临界温度有一定的影响, 随着搅拌强度的增大, t_c 值增高。为了在尽可能恶劣的情况下考察爆梯的形成条件, 上述试验结果均系在搅拌强度最大(即进一步增大搅拌器转速对 t_c 已无影响)的情况下得到的。表 1-2 和表 1-3 分别列出了最大搅拌强度下和溶液静止时 t_c 随 $[\text{Sb(III)}]_T$ 和 $[\text{Cl}^-]_T$ 变化的

数据。其关系分别示于图 1-9 和图 1-10。

表 1-2 不同搅拌强度下的 t_c -[Sb(III)]_T 关系

[Sb(III)] _T , g/L	70	80	90	100	115	130
t_c (搅拌), °C	32.5	35.8	38.0	40.0	41.8	43.5
t_c (静止), °C	25.8	29.5	32.4	34.2	36.5	37.1
Δt_c , °C	6.7	6.3	5.6	5.8	5.3	6.4

表 1-3 不同搅拌强度下的 t_c -[Cl⁻]_T 关系

[Cl ⁻] _T , mol/L	2.5	2.8	3.2	3.5	4.0	4.5	5.0
t_c (搅拌), °C	50.5	42.5	38.6	36.5	33.5	32.8	32.0
t_c (静止), °C	40.3	38.3	35.0	33.0	30.5	29.8	29.2
Δt_c , °C	10.2	4.2	3.9	3.2	3.0	3.0	2.8

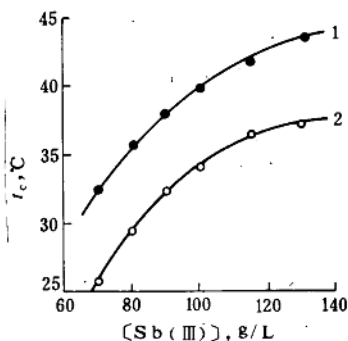


图 1-9 搅拌对 t_c -[Sb(III)]_T 关系的影响

1——溶液搅拌; 2——溶液静止

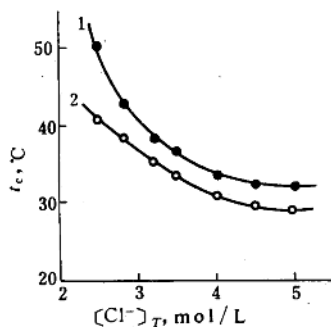


图 1-10 搅拌对 t_c -[Cl⁻]_T 关系的影响

1——溶液搅拌; 2——溶液静止

图 1-9 和图 1-10 说明, 不论溶液的搅拌强度如何, t_c 随

$[\text{Sb(III)}]_T$ 和 $[\text{Cl}^-]_T$ 变化的规律是相似的。在实际电积过程中,电解液的流动不可能像试验时那样强烈,因为实际电解过程的临界温度均会稍低于这里所列举的各个 t_c 搅拌值。

7. 阴极材料的影响

在 $[\text{Sb(III)}]_T=100\text{g/L}$, $[\text{H}^+]=1.815\text{mol/L}$ 和 $i=250\text{A/m}^2$ 条件下,采用铜片、不锈钢板和钛板作为阴极材料,测定的临界温度分别为 $t_c(\text{铜})=40.0^\circ\text{C}$ 、 $t_c(\text{不锈钢})=37.0^\circ\text{C}$ 和 $t_c(\text{钛})=33.0^\circ\text{C}$ 。可见,从避免爆锑形成的角度考虑,用钛或不锈钢作阴极材料比用铜好。但遗憾的是,在上述所有试验温度下,钛阴极上的沉积物均呈鳞片状,极易脱落,不锈钢阴极在 38°C 以上的温度下电积时,产物极易开裂脱落,只有用铜片作为阴极材料,才有可能得到厚的致密平整的阴极锑,产物不会自动脱落。

钛或不锈钢阴极之所以不适用于氯化锑水溶液电积,也许是由于阴极表面致密的氧化膜妨碍了金属锑附着的缘故。

结 论

全面系统地考察了温度、电流密度、电解液中锑、氯和氢离子浓度、搅拌强度以及电极材料等因素对爆锑形成的影响。过高的电流密度,高的锑、氢离子浓度,低温和低氯离子浓度以及搅拌强烈,均有利于爆锑的形成。反之,则可避免形成爆锑。根据临界温度和临界电流密度与其它影响因素之间的定量关系研究结果,影响爆锑形成的最重要因素是温度和电解液中锑离子的浓度。电流密度的影响只有在临界温度附近才能显示出来。在由硫化锑精矿的 $\text{FeCl}_3\text{-HCl}$ 浸出液制备的电解液中,氯离子浓度和酸度对爆锑形成的影响可以忽略,当氯离子浓度较低时其影响才比较显著。在实际电积过程中,只要将电解液的温度保持在阴极液起始锑浓度所对应的临界温度以上 $3\sim 5^\circ\text{C}$,完全可以避免爆锑的形成。我们认为,在爆锑的问题解决以后,实际电解槽中隔膜材料的性质以及与此