

# 低杂铅电解液连续电解制备高纯铅<sup>①</sup>

唐志波<sup>1</sup>, 王文军<sup>2,3</sup>

(1.水口山有色金属有限责任公司,湖南 衡阳 421534; 2.中南大学 粉末冶金国家重点实验室,湖南 长沙 410083; 3.邵阳学院 高效动力系统智能制造湖南省重点实验室,湖南 邵阳 422000)

**摘要:**以精铅锭、氟硅酸、双氧水、骨胶、 $\beta$ -萘酚为原料制备了低杂铅电解液,开展了连续14周期电解精炼精铅的试验研究。结果表明:铅电解初期电耗 $52.37\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ ,前2周期可产出6N高纯铅;随着循环电解的进行,电解液中杂质含量和铅离子质量分数逐渐升高,氟硅酸质量浓度逐渐降低,导致析出铅含杂逐渐升高,2周期后析出铅中Cu、Ag、Fe、Al等杂质含量陆续升高,析出铅符合5N但低于6N高纯铅标准。同时,电耗逐渐升高,但各周期电耗均维持在 $50\sim 70\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ 的较低水平。

**关键词:**低杂电解液;循环电解;精炼;杂质;高纯铅;电耗;炼铅

中图分类号:TF812

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2024.04.048

文章编号:0253-6099(2024)04-0247-06

## Preparation of High Purity Lead by Continuous Electrolysis of Low Impurity Lead Electrolyte

TANG Zhibo<sup>1</sup>, WANG Wenjun<sup>2,3</sup>

(1. Shuikoushan Nonferrous Metals Co., Ltd., Hengyang 421534, Hunan, China; 2. State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 3. Hunan Provincial Key Laboratory of Efficient Power System and Intelligent Manufacturing, Shaoyang University, Shaoyang 422000, Hunan, China)

**Abstract:** A kind of low-impurity lead electrolyte was prepared with lead ingots, fluorosilicic acid, hydrogen peroxide, bone glue, and  $\beta$ -naphthol as raw materials, and then was used in an experimental research on 14 consecutive cycles of electrolysis to produce refined lead. It is shown that the initial power consumption of lead electrolysis was  $52.37\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ , and 6N high-purity lead was produced in the first two cycles; as the cyclic electrolysis process proceeded, the impurity content and lead ion content in the electrolyte gradually increased, while the mass concentration of fluorosilicic acid gradually decreased, resulting in an increase in the impurity content of precipitated lead. Therefore, the content of Cu, Ag, Fe, Al and other impurities in the precipitated lead all gradually increased after two cycles of electrolysis, and the precipitated lead met the standard for 5N but did not meet the standard for 6N high-purity lead. Furthermore, the power consumption also gradually increased, but remained at a low level of  $50\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{t}$  to  $70\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{t}$  for each cycle.

**Key words:** low-impurity electrolyte; cyclic electrolysis; refining; impurity; high-purity lead; power consumption; lead refining

铅作为我国不可或缺金属材料,具有熔点低、耐腐蚀性好、延展性好、可塑性强等优点,被广泛应用于通信、交通、能源、冶金等领域<sup>[1-3]</sup>。多年来,我国铅产量稳居世界首位,但以杂质含量较高的初级铅锭产品为主,难以满足核工业、半导体、航天航空等高科技领域对高纯铅的需求,制约着我国科技的发展<sup>[4]</sup>。

近年来,公开报道的高纯铅制备技术<sup>[5]</sup>主要有真空蒸馏法、区域熔炼法、电解法等。真空蒸馏法对高沸点金属杂质的除杂效果较好,但难以实现低沸点金属杂质的深度分离,同时具有能耗高、直收率低等缺点,制约着该技术的发展和应用<sup>[5-7]</sup>。区域熔炼法对大部分杂质的去除效果较好,但难以实现碲、硒等的深度除

① 收稿日期:2024-03-08

作者简介:唐志波(1977—),男,湖南永州人,硕士,高级工程师,主要从事有色冶金方面的研究。E-mail:tz7722@163.com

杂,同时存在设备投资大、金属直收率低、能耗高等缺点,难以实现规模化<sup>[8-9]</sup>。电解法对 Cu、Ag、Sb、As 等除杂效果较好,且具有能耗低、直收率高等优点,近年来备受关注<sup>[1,10-11]</sup>;文献[4]通过自主制备电解液,研究了关键技术参数对电解法制备高纯铅的影响,在适宜条件下实现了一次电解制备 6N 高纯铅,但电解液在长周期循环铅电解中的行为机理仍不明确。

为了突破电解法制备高纯铅关键技术,实现高纯铅的长期批量制备,本文以铅锭、氟硅酸、双氧水、骨胶、β-萘酚为试验原料制备了低杂铅电解液,通过分析析出铅含杂、电解液主成分、电解液含杂、电解能耗以研究低杂电解液长周期循环电解制备高纯铅的行为和机理。

## 1 试验

### 1.1 试验原料

试验原料为符合 GB/T 469—2023 中 Pb99.996 标准的铅锭<sup>[12]</sup>,其杂质含量如表 1 所示。

表 1 铅锭杂质含量(质量分数)  $10^{-6}$

Mg	Al	Zn	Fe	Cd	Ni
0.15	2.05	1.87	2.94	1.97	4.01
Sn	Sb	Bi	As	Cu	Ag
0.13	2.04	18.87	3.98	3.05	4.11

试验辅助试剂包括氟硅酸(工业级试剂,氟硅酸质量分数 37.79%, F<sup>-</sup> 质量分数 0.14%, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 质量分数 0.16%)、双氧水(分析纯试剂, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 质量分数 30%)、骨胶(工业级试剂)、β-萘酚(工业级试剂),试验用水为去离子水(电导率低于 1 MΩ·cm)。

### 1.2 试验设备

采用井式炉将铅锭熔化后进行阳极铸造;采用电解槽、2507 双相钢阴极、直流电源、循环泵、万用表及通电导线进行铅电解试验。

采用万用表测试槽电压;采用 ICP 法检测铅电解液中 Pb<sup>2+</sup> 和游离 H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> 质量浓度;采用 ICP-MS 检测电解液中金属杂质质量浓度;采用辉光放电质谱仪检测析出铅杂质质量浓度。

### 1.3 试验方法及试验原理

低杂铅电解液制备工艺流程如图 1 所示。

将铅锭加入井式炉中升温至 500 ℃ 后保温 20 min,对熔化铅液进行阳极浇铸,制得阳极有效尺寸为 170 mm × 100 mm × 20 mm。

在电解槽中以氟硅酸、双氧水、去离子水配制 H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> 质量浓度 203.50 g/L、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 质量浓度 19.75 g/L

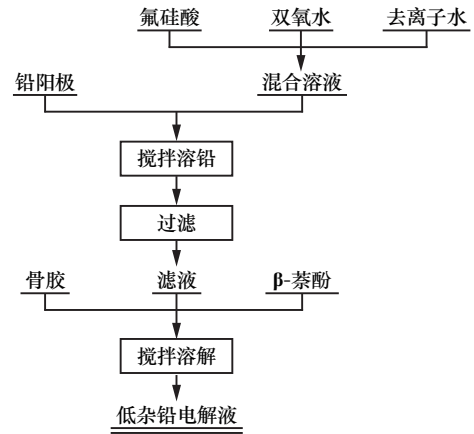
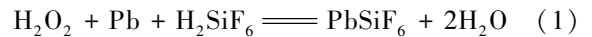


图 1 低杂电解液制备工艺流程

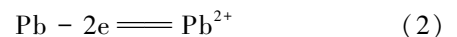
的混合溶液 8.1 L,于 25 ℃ 将两片阳极加入 H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> 和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 的混合溶液中,在搅拌速度 300 r/min 下搅拌 72 h 使铅金属逐渐溶解,获得 H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> 和 PbSiF<sub>6</sub> 混合溶液,其主要反应式为:



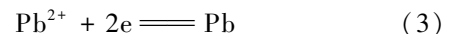
将 H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> 和 PbSiF<sub>6</sub> 混合溶液过滤并加入电解槽中,往滤液中加入定量骨胶和 β-萘酚,于搅拌速度 300 r/min 下搅拌 6 h,获得由游离 H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> 质量浓度 120 g/L、Pb<sup>2+</sup> 质量浓度 120 g/L、骨胶质量浓度 0.8 g/L、β-萘酚质量浓度 0.01 g/L 组成的低杂铅电解液。

铅电解反应:在阳极上套涤纶滤布袋,将阳极和阴极放入电解槽中,开启循环泵和直流电源,在电流密度 120 A/m<sup>2</sup>、同极间距 100 mm、阴阳极出槽周期 2 d、电解液循环速度 90 mL/min 条件下进行铅电解试验。主要反应式<sup>[4]</sup>为:

在阳极发生铅金属溶解反应:



在阴极发生铅沉积反应:



铅电解过程中,比铅电位更负的大部分阳极杂质金属会随铅一起失去电子并溶于溶液,仅少量在阴极析出;比铅电位更正的大部分杂质金属以阳极泥形式残留在滤布袋中,仅少量溶于溶液并在阴极析出,从而实现高纯铅的制备。

铅电解期间,采用内循环的方法,定期补充适量去离子水以维持电解液体积。采用万用表每 3 h 检测槽电压,阴阳极出槽、装槽时对其进行称重,同时定期对析出铅和电解液进行取样检测。总计进行 14 个周期铅电解试验,获取低杂电解液在 14 个铅电解周期中电解液主成分、电解液含杂、析出铅含杂及电耗等变化情况。

## 2 结果与讨论

### 2.1 低杂电解液成分分析

低杂铅电解液中游离  $\text{H}_2\text{SiF}_6$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  和杂质质量浓度如表2所示。由表2可知,制备的铅电解液中游离  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  质量浓度为 120.71 g/L、 $\text{Pb}^{2+}$  质量浓度为 119.51 g/L,与理论游离  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  质量浓度(120 g/L)和  $\text{Pb}^{2+}$  质量浓度(120 g/L)偏差较小。同时,电解液中除了 Fe、Bi 和 Al 杂质质量浓度稍高外,其余杂质质量浓度均低于 0.1 mg/L,其中 Cu、Ag、Mg、Cd、Ni 质量浓度仅 0.01 mg/L,说明用  $\text{H}_2\text{O}_2$  氧化法制备的电解液杂质质量浓度较低。

表2 低杂铅电解液游离  $\text{H}_2\text{SiF}_6$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  及杂质质量浓度 mg/L

$\text{H}_2\text{SiF}_6$	$\text{Pb}^{2+}$	Mg	Al	Zn	Fe	Cd
120.71	119.51	0.01	0.43	0.06	0.21	0.01
Ni	Sn	Sb	Bi	As	Cu	Ag
0.01	0.05	0.08	0.17	0.10	0.01	0.01

### 2.2 电解液主成分变化分析

低杂电解液新液和各周期结束时铅电解液中游离  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  和  $\text{Pb}^{2+}$  质量浓度随周期数的变化曲线如图2所示。由图2可知,随着循环电解的进行,电解液中游离  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  质量浓度逐渐降低, $\text{Pb}^{2+}$  质量浓度逐渐升高。14个周期结束时,电解液中  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  质量浓度为 113.42 g/L、 $\text{Pb}^{2+}$  质量浓度为 124.43 g/L。

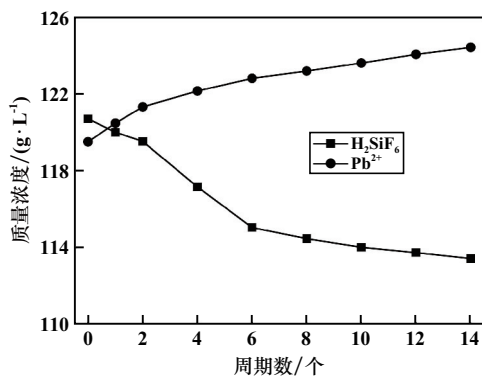


图2 低杂电解液新液和各周期结束时铅电解液中游离  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  和  $\text{Pb}^{2+}$  质量浓度

电解液中游离  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  质量浓度的降低主要与电解液中  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  的分解及阴阳极出槽时部分溶液被夹带有关:一方面, $\text{H}_2\text{SiF}_6$  化学性质不稳定,电解液中少量  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  分解成气体  $\text{SiF}_4$  和 HF,其中, $\text{SiF}_4$  气体脱离液面排至空中,而 HF 溶于溶液生成  $\text{F}^-$  和  $\text{H}^+$ ,由于电解液中  $\text{Pb}^{2+}$  质量浓度较高, $\text{F}^-$  易与  $\text{Pb}^{2+}$  生成  $\text{PbF}_2$  沉

淀沉于电解槽,这与电解过程中溶液表面有明显刺激性气味、电解槽底部有少量沉淀生成的现象相符;另一方面,阴阳极出槽时,阴阳极表面残留的部分溶液会降低酸度。电解液中  $\text{Pb}^{2+}$  质量浓度的升高主要与铅电解电流效率有关:电解液中含有有机物骨胶、 $\beta$ -萘酚,电解过程中有机物在直流电的作用下发生分解<sup>[13]</sup>,消耗了少量电子,使铅电解的电流效率低于 100%,即电解中阳极溶解于溶液的金属质量大于沉积至阴极的金属质量,使溶液中  $\text{Pb}^{2+}$  质量浓度逐渐升高。工业生产中,为了把电解液中游离  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  和  $\text{Pb}^{2+}$  质量浓度维持在合理范围内,使铅电解工艺稳定,需定期对电解液补充  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  和降低  $\text{Pb}^{2+}$  质量浓度。

### 2.3 电解液杂质含量变化分析

电解液新液及各周期结束时铅电解液中杂质质量浓度如图3所示。由图3可知,电解新液各杂质质量浓度及杂质总量较低。随着循环电解周期增加,除 Mg、Ag 外,其他杂质质量浓度均有不同程度富集。

比 Pb 电位负的杂质金属 Al、Zn、Fe 在循环电解中富集较明显,经 14 个周期电解后,电解液中 Al、Zn、Fe 质量浓度分别为 2.79 mg/L、1.40 mg/L、4.97 mg/L。其原理如下:阳极中 Fe、Al、Zn 质量浓度较高,且在电解时阳极中 Al、Zn、Fe 失去电子生成离子态的  $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ ,在氟硅酸溶液中溶解性较好。

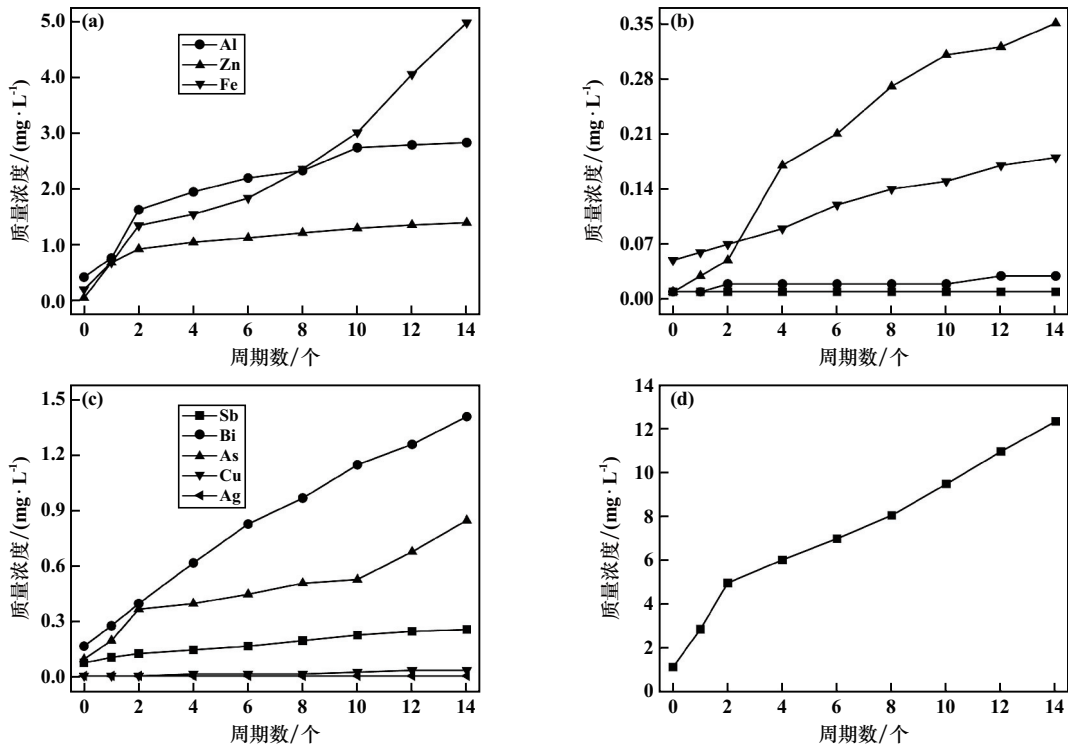
杂质金属 Mg 在电解液中经 14 个周期电解后无富集,质量浓度为 0.01 mg/L,这是由于原料中 Mg 质量浓度较低且  $\text{Mg}^{2+}$  在氟硅酸溶液中的溶解性较差。

原料中 Cd 和 Ni 质量浓度较高,但  $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$  在氟硅酸溶液中溶解性较差,经 14 个周期电解后仅轻微富集,Cd、Ni 质量浓度分别为 0.03 mg/L、0.35 mg/L。

$\text{Sn}^{2+}$  在氟硅酸溶液中溶解性较好,但原料中 Sn 质量浓度较低,且 Sn 的电位与 Pb 接近<sup>[1]</sup>,在电解中易与 Pb 共同沉积至阴极,在电解液中经 14 个周期电解后仅轻微富集,质量浓度为 0.18 mg/L。

原料中 Ag 和 Cu 质量浓度较高,但在循环电解中 Ag 无富集,Cu 仅轻微富集,电解液经 14 个周期电解后 Cu 质量浓度为 0.04 mg/L,这是因为:一方面, $\text{Ag}/\text{Ag}^+$  电位(+0.799 5 V)和  $\text{Cu}/\text{Cu}^{2+}$  电位(+0.344 8 V)远大于  $\text{Pb}/\text{Pb}^{2+}$  电位(-0.127 V),在铅电解过程中,阳极中的 Ag 和 Cu 大部分以阳极泥形式残留在阳极滤布袋中,这与试验过程中阳极滤布袋中明显残留阳极泥的现象相符;另一方面,Ag 和 Cu 会在阴极优先析出。

比 Pb 电位正的杂质金属 Sb、Bi、As 在循环电解过程中均有不同程度富集,经 14 个周期电解后,Sb、Bi、



(a) Al、Zn 和 Fe; (b) Mg、Cd、Ni 和 Sn; (c) Sb、Bi、As、Cu 和 Ag; (d) 杂质总量

图3 电解液新液及各周期结束时铅电解液中杂质质量浓度

As 质量浓度分别为 0.26 mg/L、1.41 mg/L、0.85 mg/L, 且各周期均呈现质量浓度  $Bi > As > Sb$  的趋势, 这与原料中 Bi、As、Sb 质量浓度大小趋势一致, 表明原料对循环电解时电解液中 Bi、As、Sb 的富集速率有直接影响。

此外, 前 2 个周期电解液杂质的富集速率较快, 第 1 周期和第 2 周期电解液杂质总质量浓度分别为 2.87 mg/L 和 4.98 mg/L, 而后 12 个周期的杂质总质量浓度富集速率较稳定, 整体呈线性走势, 经 14 个周期电解后, 杂质总质量浓度为 12.34 mg/L。

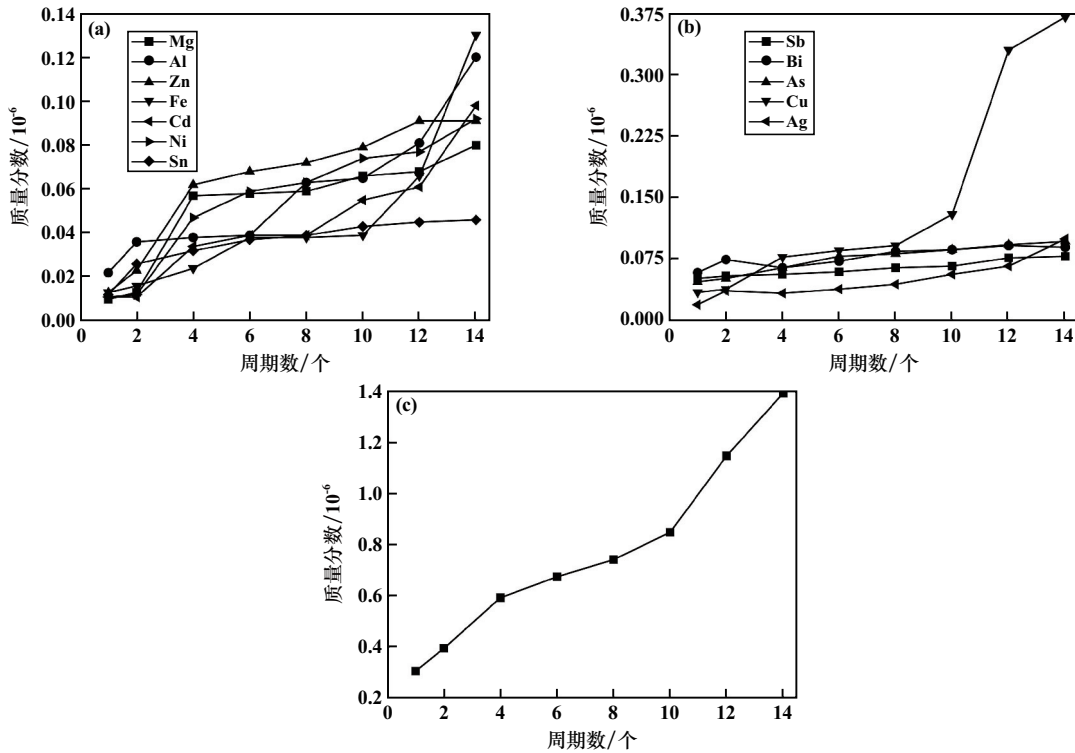
#### 2.4 析出铅含杂变化分析

低杂电解液循环电解各周期的析出铅含杂情况如图 4 所示。由图 4 可知, 在电流密度  $120 \text{ A/m}^2$ 、同极间距 100 mm、电解时间 48 h/周期、电解液循环速度 90 mL/min 条件下, 电解初期各周期杂质质量浓度及杂质总质量浓度较低, 随着循环电解周期增加, 各杂质质量浓度及杂质总质量浓度均呈逐渐升高的趋势。

电解液中 Al 质量浓度低于 2.79 mg/L、Fe 质量浓度低于 4.05 mg/L 时, 析出铅中 Al、Fe 质量浓度达到 6N 高纯铅标准; 电解液中 Al 质量浓度 2.79~2.83 mg/L 时, 析出铅中 Al 质量浓度达到 5N 高纯铅标准; 电解液中 Fe 质量浓度 4.05~4.97 mg/L 时, 析出铅中 Fe 质量浓度达到 5N 高纯铅标准<sup>[14]</sup>。第 1 周期后, 析出铅中 Sn 质量分数为  $0.012 \times 10^{-6}$ , 随着电解液循环周期增

加, 析出铅中 Sn 质量分数逐渐上升, 在 14 个周期时达到  $0.046 \times 10^{-6}$ , 均符合 6N 高纯铅标准<sup>[14]</sup>。电解液 Sn 质量分数低于 0.18 mg/L 时, 析出铅中 Sn 质量分数达到 6N 高纯铅标准<sup>[14]</sup>。

电解 1 周期后, 比 Pb 电位正的杂质金属 Sb、Bi、As 在析出铅中的质量分数分别为  $0.052 \times 10^{-6}$ 、 $0.059 \times 10^{-6}$ 、 $0.048 \times 10^{-6}$ , 随着电解液循环周期增加, 析出铅中 Sb、Bi、As 质量分数缓慢上升, 经 14 个周期后, 析出铅中 Sb、Bi、As 质量分数分别为  $0.079 \times 10^{-6}$ 、 $0.090 \times 10^{-6}$ 、 $0.097 \times 10^{-6}$ , 均符合 6N 高纯铅标准<sup>[14]</sup>。电解液中 Sb 质量浓度低于 0.26 mg/L、Bi 质量浓度低于 1.41 mg/L、As 质量浓度低于 0.85 mg/L 时, 析出铅中 Sb、Bi、As 质量分数达到 6N 高纯铅标准<sup>[14]</sup>。电解 1 周期后, 析出铅中 Ag 质量分数为  $0.020 \times 10^{-6}$ , 随着电解液循环周期增加, Ag 质量分数逐渐升高, 但在前 10 个周期内增幅较小, 其中前 8 个周期符合 6N 高纯铅标准; 第 12~14 周期内增幅较大, 且符合 5N 高纯铅标准<sup>[14]</sup>。第 1 周期后析出铅中 Cu 质量分数为  $0.035 \times 10^{-6}$ , 随着电解液循环周期增加, 析出铅中 Cu、Ag 质量分数逐渐升高, 在前 8 个周期增幅较小, 其中前 2 周期符合 6N 高纯铅标准, 10~14 周期增幅较大, 且均符合 5N 高纯铅标准<sup>[14]</sup>。电解液中 Cu 质量浓度低于 0.01 mg/L 时, 析出铅中 Cu 质量分数达到 6N 高纯



(a) 比Pb 电位负的杂质金属; (b) 比Pb 电位正的杂质金属; (c) 杂质总量

图4 各周期析出铅杂质含量

铅标准。电解液中 Cu 质量浓度 0.01~0.40 mg/L 时,析出铅中 Cu 质量分数达到 5N 高纯铅标准<sup>[14]</sup>。

第 1、2 周期杂质总质量分数为  $0.306 \times 10^{-6}$ 、 $0.395 \times 10^{-6}$ ,各杂质质量分数指标均符合 6N 高纯铅标准。随着电解液循环周期增加,析出铅中杂质质量分数逐渐升高;第 4~8 周期时,杂质 Cu 质量分数超出 6N 高纯铅标准但符合 5N 高纯铅标准,其余杂质质量分数均符合 6N 高纯铅标准;第 12~10 周期时,杂质 Cu、Ag 质量分数超出 6N 高纯铅标准但符合 5N 高纯铅标准,其余杂质质量分数均符合 6N 高纯铅标准;第 14 周期时,杂质总质量分数为  $1.393 \times 10^{-6}$ ,杂质 Cu、Ag、Fe、Al 质量分数超出 6N 高纯铅标准但符合 5N 高纯铅标准,其余杂质质量分数均符合 6N 高纯铅标准<sup>[14]</sup>。综上,采用  $H_2O_2$  氧化法制备低杂铅电解液,经 14 周期循环电解可依次获得 6N 高纯铅和 5N 高纯铅。

### 2.5 铅电解重要指标分析

各周期铅电解重要指标见表 3。由表 3 可见,随着电解液循环周期增加,除金属直收率稳定在 99.30% 左右外,平均槽电压、析出铅质量、电流效率、电耗均呈逐渐上升的趋势。

槽电压对铅电解电耗有直接影响<sup>[1,15]</sup>。随着槽电压升高,铅电解电耗呈上升趋势。槽电压由 0.202 V 升至 0.261 V 时,铅电解电耗由  $52.59 \text{ kW} \cdot \text{h/t}$  升至

$67.67 \text{ kW} \cdot \text{h/t}$ 。电流效率对铅电解电耗也有一定影响,低杂电解液的 14 个周期电解中,第 1 周期电流效率为 99.30%,随着循环周期增加,电流效率呈小幅上升的趋势。

表 3 各周期铅电解重要指标

周期	电流密度/ ( $A \cdot m^{-2}$ )	平均 槽电压/V	析出铅 质量/g	金属 直收率/%	电耗/ ( $\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{t}^{-1}$ )	电流 效率/%
1	120	0.202	1 087.85	99.23	52.59	99.30
2	120	0.206	1 088.18	99.29	53.61	99.33
4	120	0.208	1 088.62	99.41	54.11	99.37
6	120	0.213	1 089.27	99.33	55.38	99.43
8	120	0.217	1 090.70	99.30	56.34	99.56
10	120	0.223	1 091.14	99.26	57.88	99.60
14	120	0.261	1 092.34	99.37	67.67	99.71

总之,在低杂电解液的持续循环电解过程中,电流效率和电耗均呈逐渐上升的趋势,但由于初始电解液中杂质含量较低,且随着循环电解的进行,电解液中氟硅酸、铅离子和杂质质量浓度整体变化较小,使各周期铅电解电耗维持在较低水平,仅  $50 \sim 70 \text{ kW} \cdot \text{h/t}$ ,远低于工业粗铅铅电解电耗<sup>[1,11]</sup>。

## 3 结 论

1) 制备的电解液中杂质含量较低且导电性较好,

铅电解前2个周期所析出铅杂质质量分数符合6N高纯铅标准,且铅电解初期电耗较低,仅52.37 kW·h/t。

2) 随着循环电解的进行,电解液中金属杂质逐渐富集,析出铅含杂呈逐渐升高的趋势,电解析出铅符合5N但低于6N高纯铅标准。

3) 随着循环电解铅电解液中氟硅酸质量浓度逐渐降低和铅离子质量浓度逐渐升高,铅电解电耗呈逐渐升高的趋势,但各周期铅电解电耗均维持在较低水平,仅50~70 kW·h/t。

#### 参考文献:

- [1] 彭容秋. 铅锌冶金学[M]. 北京:科学出版社, 2003.
- [2] 许健明,李颖. 2020—2035年全球铅供需格局分析[J]. 中国矿业, 2021,30(2):14-20.
- [3] WU Y Z, CHEN Z, YU Q, et al. Preparation of high-purity lead carbonate and lead oxide from spent lead paste[J]. Journal of Cleaner Production, 2022,372:133786.
- [4] 高和欣,王文军,伍秋美,等. 柏兹法电解制备6N高纯铅研究[J]. 湖南有色金属, 2023,39(6):73-76.
- [5] 程柯柯. 金属铅真空气提提纯研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2022.
- [6] SUN J H, LI W J, YI J F, et al. A novel method for extracting crude Pb from lead-acid battery grid alloy by vacuum distillation[J]. Separation and Purification Technology, 2024,338:126559.

- [7] 徐俊杰,许帅,孔令鑫,等. 真空蒸馏法回收铅锡合金中铅和锡的研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2017,42(4):9-13.
- [8] 田庆华,何志强,郭学益,等. 区域熔炼制备高纯金属研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2023,33(10):3321-3332.
- [9] 刘文胜,刘书华,马运柱,等. 区域熔炼技术的研究现状[J]. 稀有金属与硬质合金, 2013,41(1):66-71.
- [10] FAN Y Y, LIU Y, NIU L P, et al. High purity metal lead recovery from zinc direct leaching residue via chloride leaching and direct electrolysis[J]. Separation and Purification Technology, 2021,263:118329.
- [11] DAI F S, HUANG H, CHEN B M, et al. Recovery of high purity lead from spent lead paste via direct electrolysis and process evaluation[J]. Separation and Purification Technology, 2019,224:237-246.
- [12] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 铅锭:GB/T 469—2023[S]. 北京:中国标准出版社, 2023.
- [13] 钟勇,高和欣,王文军. 骨胶对铅电解行为的影响研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(6):140-143.
- [14] 中华人民共和国工业和信息化部. 高纯铅:YS/T 265—2012[S]. 北京:中国标准出版社, 2012.
- [15] 董铁广,张梅,黎学坤,等. 铅电解阴极极化电化学实验研究[J]. 云南冶金, 2021,50(4):63-66.

引用本文: 唐志波,王文军. 低杂铅电解液连续电解制备高纯铅[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):247-252.

(上接第246页)

- [12] 曾婧滢. 天然矿物组合材料渗透反应墙修复地下水重金属污染研究[D]. 湘潭:湘潭大学, 2015.
- [13] MENG J, CUI J, YU J, et al. Preparation of green chelating fibers and adsorption properties for Cd(II) in aqueous solution[J]. Journal of Material Science, 2018,53:2277-2289.
- [14] 何春彦,莫伟,黄钰华,等. 剥离型膨润土对水中共存Pb<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup>的吸附研究[J]. 非金属矿, 2022,45(6):80-85.
- [15] 黄雁飞,陈桂芬,黄玉溢,等. 田间条件下不同钝化剂对水稻镉吸收累积的影响及其时效性[J]. 农业环境科学学报, 2023,42(4):787-798.
- [16] 于珍珍,杨一帆,高航,等. 锰负载炭化土壤对重金属的吸附性能及机理[J/OL]. 中国环境科学, 1-12[2024-02-06]. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20240015.004>.
- [17] GANGULY P, SARKHEL R, DAS P. Synthesis of pyrolyzed biochar

and its application for dye removal: batch, kinetic and isotherm with linear and non-linear mathematical analysis[J]. Surface of Interfaces, 2020,20:100616.

- [18] 徐应明,梁学峰,孙国红,等. 海泡石表面化学特性及其对重金属Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup>和Cu<sup>2+</sup>吸附机理研究[J]. 农业环境科学学报, 2009,28(10):2057-2063.
- [19] 赵巍. 水钠锰矿吸附Pb<sup>2+</sup>微观机理的研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2009.
- [20] 朱德强,梁成华,杜立宇,等. 含方解石物质对土壤镉赋存形态的影响[J]. 水土保持学报, 2016,30(1):326-330.

引用本文: 宋冰冰,邓武军,曾婧滢,等. 天然矿物修复剂筛选及其对镉固持性能研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):241-246.