

doi: 10.20237/j.issn.1007-7545.2025.01.013

退役晶硅光伏组件中基于有机酸浸出银的研究

包国英, 王珊, 高德东, 齐祖兴

(青海大学 机械工程学院, 西宁 810016)

摘要: 对退役晶硅光伏组件中贵金属银进行浸出研究, 分别采用甲磺酸-过氧化氢体系和柠檬酸-过氧化氢体系浸出银。结果显示, 在甲磺酸-过氧化氢体系中, 最优工艺条件为: 甲磺酸浓度40%、 H_2O_2 浓度10%、反应温度80℃、反应时间2.5 h, 银的浸出率达到59.97%; 在柠檬酸-过氧化氢体系中, 最优工艺条件为: 柠檬酸浓度6 g/L、 H_2O_2 浓度30%、反应温度80℃、搅拌速度300 r/min, 银的浸出率能达到95.53%; 柠檬酸体系能更有效地浸出银, 反应温度和 H_2O_2 浓度的提高对银的浸出有促进作用。

关键词: 退役晶硅光伏组件; 正交试验; 浸出; 有机酸; 金属银

中图分类号: TF832; TF803.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-7545(2025)01-0092-07

Study on Leaching of Silver Based on Organic Acid from Decommissioned Crystalline Silicon Photovoltaic Modules

BAO Guoying, WANG Shan, GAO Dedong, QI Zuxing

(School of Mechanical Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: The leaching of precious metal silver from decommissioned crystalline silicon photovoltaic module was studied. Silver was leached by methanesulfonic acid-hydrogen peroxide system and citric acid-hydrogen peroxide system respectively. The results show that in the methanesulfonic acid-hydrogen peroxide system, the leaching rate of silver can reach 59.97% under the optimum conditions including methanesulfonic acid concentration of 40%, H_2O_2 concentration of 10%, reaction temperature of 80℃, and reaction time of 2.5 hours; In the citric acid-hydrogen peroxide system, the leaching rate of silver can reach 95.53% under the optimum conditions including citric acid concentration of 6 g/L, H_2O_2 concentration of 30%, reaction temperature of 80℃, and stirring speed of 300 r/min. The results show that the citric acid system can extract silver more effectively, and the increase of reaction temperature and H_2O_2 concentration can promote the leaching of silver.

Key words: decommissioned silicon photovoltaic module; orthogonal test; leaching; organic acid; metallic silver

近年来, 光伏产业发展迅速, 它作为一种新能源产业, 清洁、高效、安全是其独有的优势, 在光伏发电市场中, 目前晶硅光伏组件占据主导地位, 在近几年中, 其产量急剧增长, 占据了绝大部分的市场^[1]。然而, 晶硅光伏组件由于光致衰减效应导致

使用年限不超过25 a, 按最大服役期估算, 在2025年左右, 我国的大量晶硅光伏组件将进入退役阶段^[2]。预计2050年, 我国的退役光伏组件产量将达到2 000万t^[3]。据统计, 2030年, 我国退役的晶硅光伏电池板可以产生110万t玻璃、26万t铝、17万t

收稿日期: 2024-07-26

基金项目: 青海省科技计划资助项目(2022-ZJ-768)

作者简介: 包国英(2000-), 女, 硕士研究生; 通信作者: 王珊(1983-), 女, 硕士, 副教授

铜、5万t硅和0.055万t银^[4]；以银为例，光伏电池板中银含量和高品位的银矿相差无几^[5]，如果可以高效回收，不仅能提高回收经济效益，还能降低对环境的污染^[6]。

当前国内外对于退役晶硅光伏组件银的回收研究较多。KUCZYŃSKA-ŁAŻEWSKA等^[7]使用稀硝酸作浸剂，银的浸出率达到91.54%~99.99%；杨迪菲等^[8]用硝酸作为浸出液，将太阳能电池片中的银进行浸出。JUNG等^[9]通过氯离子沉淀得AgCl，过滤后，再利用碱性溶液将AgCl转化为Ag₂O，再添加水合肼完成还原、精炼程序，最终银的直收率可达到90%；HUANG等^[10]通过电解实现溶液中的有价金属银和铜的回收，回收率分别可以达到74%和83%^[11]；TAO等^[11]在一定条件下，将过氧化氢和硝酸配制为混合酸，成功将退役晶硅光伏组件中的玻璃、EVA、电池片实现了分离；冯晋尧^[12]选取浓度为35%的硝酸作为浸出剂，有效实现了银电极的剥离；金怀东等^[13]25℃下采用硝酸作为浸出剂，两次浸取废硅电池片上的银，通过水合肼和氨水还原得到氯化银粉。康立武等^[14]报道了两种混合浸出工艺回收电池片表面的银栅，银回收率分别为94%和92%。SIMON等^[15]通过硝酸溶解电池片，再依次加入氢氧化钠、水合肼的方法，最终还原银，并提纯获得纯度99.99%的银粉。

综上所述，关于从退役晶硅太阳能电池片中浸出银，近些年国内外都取得了一定的研究成果。以硝酸、盐酸此类传统的无机酸浸出为主，虽然这些传统无机酸的浸出效果较好，但其强烈的刺激性和腐蚀性，给人员的安全构成了很大的威胁，同时，在这类无机强酸的使用和处理过程中会产生大量有毒气体和废液，易造成严重的环境污染。所以为响应国家碳达峰、碳中和的战略目标，选择环保、安全、有效的浸出液尤为重要。而有机酸相较于传统无机酸，具有显著的安全环保优势，因为其含有碳基，通常可以在自然环境中生成或分解，对环境友好，同时，由于有机酸的化学性质较温和且低毒甚至无毒，对人员与设备也较无机酸更为友好。

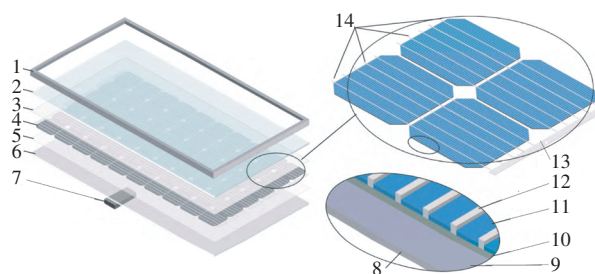
鉴于此，本文针对晶硅太阳能电池片，拟采用甲磺酸和柠檬酸这两种有机酸实现银的高效浸出。首先是对退役晶硅光伏组件进行预处理，完成光伏组件的拆解、分离及电池片的消解，并测定样品中银含量；其次利用两种有机酸浸出银，对比不同因素对银浸出效果的影响，得到浸出银的最佳反应条件。为

未来实现退役晶硅光伏组件中银的绿色、无害化高效浸出提供参考。

1 材料和方法

1.1 样品性质及预处理

试验所用退役晶硅太阳能光伏组件回收于青海某光伏电站。晶硅太阳能电池微观结构如图1所示^[16]。针对退役晶硅太阳能电池的结构特点，首先要进行拆解，通过人工将铝制外框和接线盒拆解下来，之后利用角磨机将电池板切割成块状；随后将电池板放置于石墨烯电热板上，调至温度为200℃，待电池板升温，戴上隔热手套将电池板上的玻璃及汇流带进行分离，同时用美工刀趁热将EVA去除；打开液氮试验机调至-60℃；再将电池放入液氮试验机中进行液氮冷脆；之后取出电池放入托盘，将电池片与背板剥离开来；最后将剥落的电池片用研钵磨成细粉，经100目标准筛分选，收集备用。



1—铝边框；2—玻璃；3—上层EVA；4—太阳能电池；5—下层EVA；6—背板；7—接线盒；8—铝电极；9—电池硅片；10—发射层；11—减反射层；12—银电极；13—汇流条；14—互连条。

图1 晶硅太阳能电池微观结构示意图^[16]

Fig. 1 Microstructure diagram of crystalline silicon solar cell^[16]

1.2 仪器与试剂

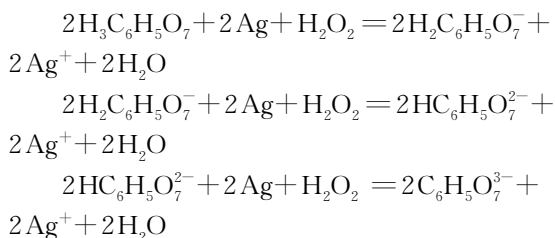
仪器：磁力加热搅拌器(LC-DMS-H)、电感耦合等离子体发射光谱仪(ICAP-6300)、分析电子天平(FA-2004)、石墨烯电热板(DB-3EFS)、液氮试验机(SZLD-F20)、电热鼓风干燥箱(GZX-9023MBE)。

试剂：甲磺酸(分析纯)、柠檬酸(分析纯)、过氧化氢(分析纯)、银标准溶液(1 000 μg/mL)、盐酸，硝酸(分析纯)、去离子水。

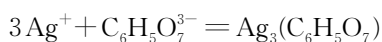
1.3 银的浸出试验

1.3.1 试验机理

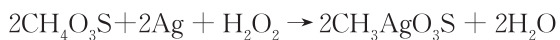
有机酸浸出银试验机理如图2所示。柠檬酸是有机三元弱酸，可与过渡金属离子形成络合物，当柠檬酸作为浸出试剂，过氧化氢作氧化剂浸出时，发生如下反应：



其中银离子与柠檬酸根离子发生反应形成配合物:



当 H_2O_2 作为氧化剂时,甲磺酸与银反应生成甲磺酸银和水。反应式为:



由图2(a)可以看出,一个柠檬酸根离子可以络合三个银离子,这可有效增强浸出效果,而从图2(b)可以看出,一个甲磺酸根离子只可以结合一个银离子。理论上,柠檬酸体系浸出银相比于甲磺酸体系效果要更好。

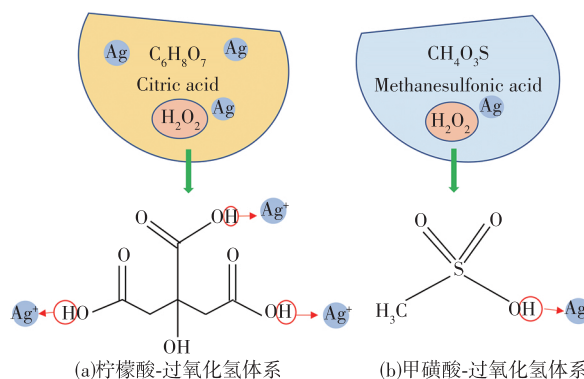


图2 有机酸浸出银机理图

Fig. 2 Experimental mechanism diagram of leaching silver with organic acid

1.3.2 试验流程

试验的完整流程如图3所示。样品经过预处理得到废硅粉后,然后进行2种有机酸体系浸出银试验。准备两个烧杯,分别加入配制好的一定浓度的甲磺酸-过氧化氢溶液和柠檬酸-过氧化氢溶液,再分别加入一定量的废硅粉并放置磁力搅拌器上进行

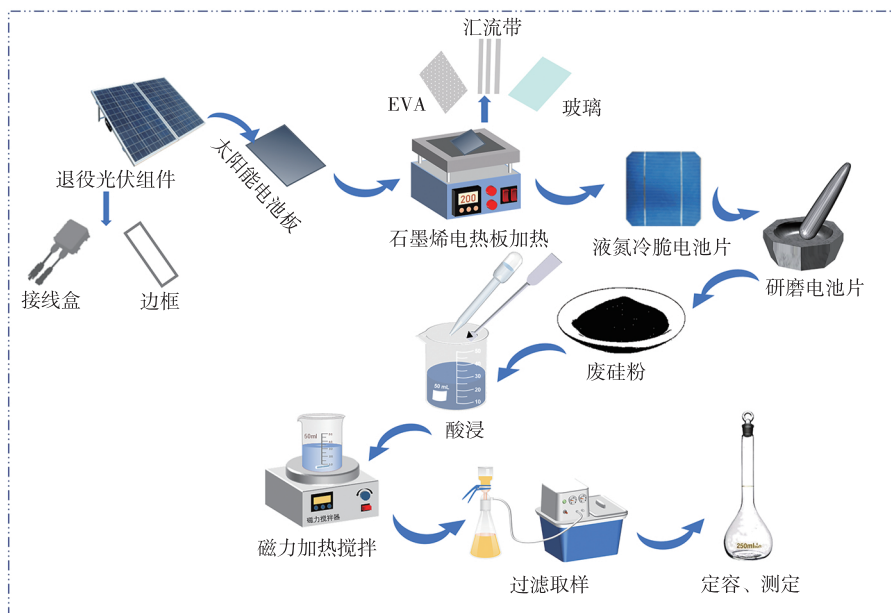


图3 退役晶硅太阳能电池浸出银试验流程图

Fig. 3 Experimental flow chart of leaching silver from decommissioned crystalline silicon solar cells

加热搅拌,反应一定时间后,将悬浊液过滤取样,稀释、定容,最后用ICP-OES分析滤液中银含量。

1.3.3 试验步骤

1) 样品的消解、制备及银含量的测定

样品消解:将硝酸和盐酸按1:3体积比配置成20 mL的王水,并将其固定在磁力搅拌器上,设置搅拌速度(250 r/min),温度(60 °C);再用称量纸称取

0.2 g 经过预处理的电池片粉末,倒入到烧杯中使其进行反应。反应时间2 h;反应结束后,取下烧杯放置冷却,然后用微孔滤膜过滤取样。

待测样品制备:用针管吸取1 mL 消解样品,移至50 mL 容量瓶中,并配制体积分数为5%稀硝酸,将样品稀释定容至刻度,摇匀。

最后用ICP-OES法测定了样品中金属元素

银的含量,样品重复6次,取平均值,银的含量为0.586 55 mg/kg,标准偏差0.006 32 mg/kg,相对标准偏差1.07748%。可以看出,相对标准偏差小于5%,满足精密度要求,所以测定值是可靠的。

2) 甲磺酸-过氧化氢体系浸出银

配制一定浓度的甲磺酸-过氧化氢溶液20 mL,并于溶液中加入磁子后,将烧杯固定在磁力搅拌器上,调至目标搅拌速度600 r/min,并调至一定反应温度后,称取0.2 g的研磨后的电池片粉末倒入烧杯中;待反应2~3 h后,将烧杯取出冷却,然后使用微孔滤膜过滤取样,并于50 mL容量瓶中,样品1:50稀释、定容,最后用ICP-OES分析滤液中银的含量,并计算银浸出率。

3) 柠檬酸-过氧化氢体系浸出银

配制一定浓度的 H_2O_2 溶液,再加入一定剂量的柠檬酸配制成20 mL溶液,同上,将烧杯固定于磁力搅拌器上,控制一定的搅拌速度和反应温度,等待柠檬酸完全溶解后,将预先称取好的0.2 g电池片粉末倒入烧杯中,反应30 min后,将烧杯取出冷却;然后使用微孔滤膜过滤取样,置于50 mL容量瓶,稀释50倍,并完成定容操作,最后用ICP-OES分析滤液中银的含量,并计算银的浸出率。

4) 正交试验

甲磺酸-过氧化氢体系:选取甲磺酸浓度(A)、

H_2O_2 浓度(B)、反应时间(C)及反应温度(D)为考察因素,每种考察因素设立3个水平(H_2O_2 浓度分别取10%、20%、30%;甲磺酸浓度分别取30%、40%、50%;反应时间分别取2、2.5、3 h;反应温度分别取60、70、80 °C),安排 $L_9(3^4)$ 正交试验,并进行分析。

柠檬酸-过氧化氢体系:选取柠檬酸浓度(A)、 H_2O_2 浓度(B)、反应温度(C)及搅拌速度(D)这4因素,且每种分别设立3个水平(H_2O_2 浓度分别取10%、20%、30%;柠檬酸浓度分别取4、6、8 g/L;反应温度分别取60、70、80 °C;搅拌速度分别取300、400、500 r/min),安排 $L_9(3^4)$ 正交试验,并进行分析。

2 结果讨论

2.1 甲磺酸-过氧化氢体系浸出银

由表1正交试验结果可见,最佳反应组合为 $A_2B_1C_2D_3$,即甲磺酸浓度40%、 H_2O_2 浓度10%、反应时间2.5 h、反应温度80 °C,银的浸出率为59.94%。同时,依据 R 的大小可判断,反应温度对银的浸出率影响最大,其次是甲磺酸浓度, H_2O_2 浓度影响最小。

循环浸出试验验证:由正交试验得到的最佳反应条件,进行循环浸出试验,循环浸出3次后,银的浸出率变化趋势较为稳定,平均达59.97%,说明浸出液可循环使用。

表1 甲磺酸-过氧化氢体系正交试验结果

Table 1 Results of orthogonal test of methanesulfonic acid-hydrogen peroxide system

序号	A—甲磺酸浓度/%	B— H_2O_2 浓度/%	C—反应时间/h	D—反应温度/°C	银浸出率/%
1	30	10	2	60	0.94
2	30	20	2.5	70	1.13
3	30	30	3	80	52.72
4	40	10	2.5	80	59.94
5	40	20	3	60	2.17
6	40	30	2	70	4.36
7	50	10	3	70	0.65
8	50	20	2	80	3.84
9	50	30	2.5	60	2.80
K_1	18.26	20.51	3.05	1.97	
K_2	22.16	2.38	21.29	2.05	
K_3	2.43	19.96	18.51	38.83	
R	19.73	18.13	18.24	36.86	

2.2 柠檬酸-过氧化氢体系浸出银

2.2.1 正交试验结果分析

由表2正交试验结果可知,最优组合为 $A_2B_3C_3D_1$,即柠檬酸浓度6 g/L、 H_2O_2 浓度30%、反应温度80 °C、搅拌速度300 r/min。同时,极差 R 的大小反映了各因素对试验结果的影响程度大小,所以

H_2O_2 浓度对银的浸出率影响最大,其次是反应温度,柠檬酸浓度影响最小。

循环浸出试验验证:由正交试验得到的最佳反应条件,进行循环浸出试验,循环浸出3次后,银的浸出率变化趋势较为稳定,平均浸出率达到95.53%,说明浸出液可循环使用且效果较为理想。

表2 柠檬酸-过氧化氢体系正交试验结果

Table 2 Results of orthogonal test of citric acid-hydrogen peroxide system

序号	A-柠檬酸浓度/(g·L ⁻¹)	B-H ₂ O ₂ 浓度/%	C-反应温度/°C	D-搅拌速度/(r·min ⁻¹)	银浸出率/%
1	4	10	60	300	0.51
2	4	20	70	400	24.72
3	4	30	80	500	95.51
4	6	10	70	500	2.70
5	6	20	80	300	84.68
6	6	30	60	400	61.51
7	8	10	80	400	1.55
8	8	20	60	500	7.52
9	8	30	70	300	89.54
K ₁	40.25	1.59	23.18	58.24	
K ₂	49.63	38.97	38.99	29.26	
K ₃	32.87	82.17	60.58	35.24	最优组合 A ₂ B ₃ C ₃ D ₁
R	16.76	80.58	37.40	28.98	

2.2.2 柠檬酸-过氧化氢体系各因素水平对浸出率的影响

由表2可看出,柠檬酸-过氧化氢体系各因素不同水平对浸出率的影响不同,可以以不同水平和银浸出率为横、纵坐标,做不同水平对浸出率影响的效应曲线图。由图4可看出,柠檬酸浓度在6 g/L时,

银浸出效果最好,进一步提高浓度,浸出率反而会下降,这与生成的柠檬酸-金属络合物的溶解度降低有关,使得金属银浸出率降低^[17];而H₂O₂浓度升高,反应温度升高时,皆有利于银的浸出,表明H₂O₂浓度与银浸出效果呈正相关,究其原因为H₂O₂浓度升高,体系氧化能力也得以提高,有利于银的浸出^[18],但同

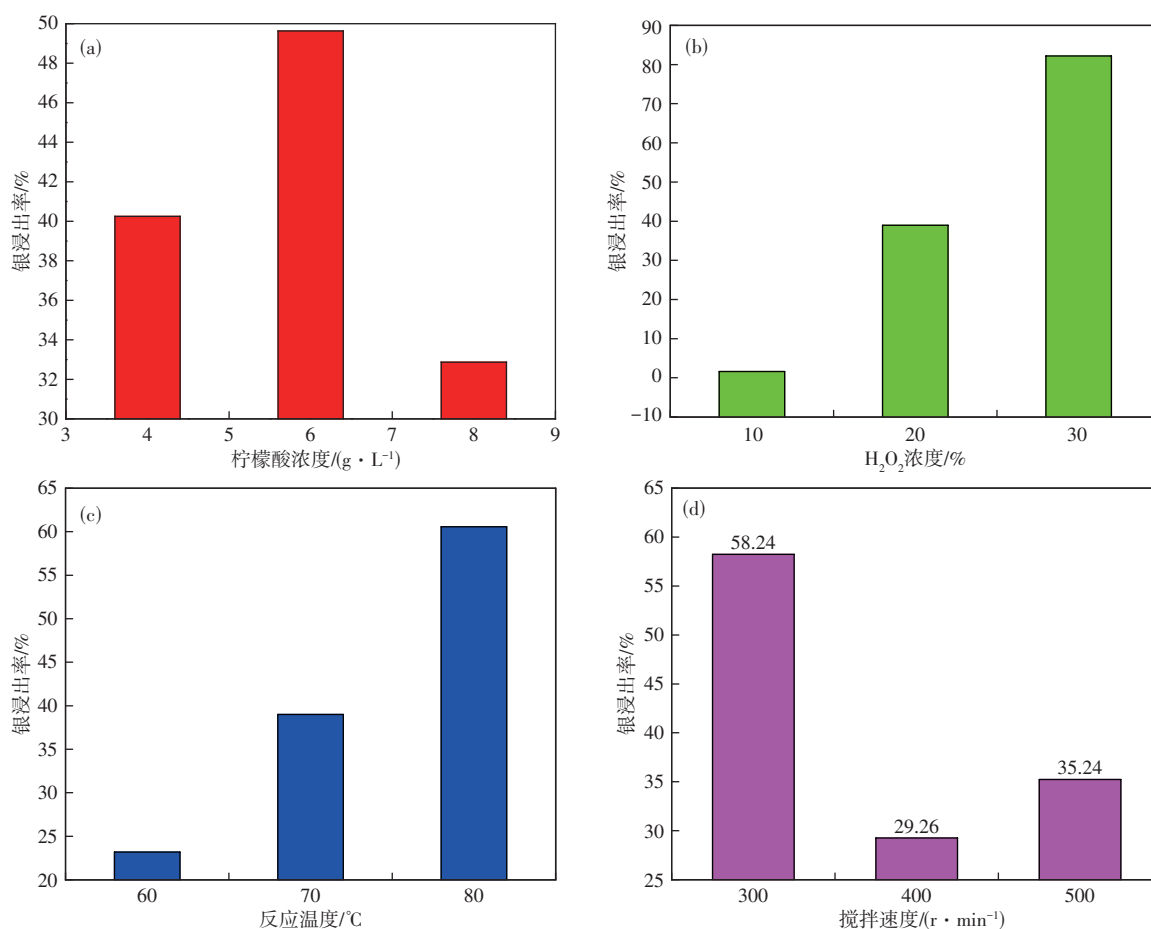


图4 柠檬酸-过氧化氢体系不同因素的水平对银浸出率的影响

Fig. 4 Influence of different factors on silver leaching rate in citric acid-hydrogen peroxide system

时 H_2O_2 浓度过高,会与其他物质反应而引入新杂质,不利于后期进行银的沉积,也会影响银的回收效果,所以 H_2O_2 浓度取30%为宜,银的平均浸出率能达到82.17%;温度升高,反应物活性增强,反应物迁移和扩散速度加快,致使浸出率也提高^[19-20],但同时温度的升高,虽能提高一定程度的浸出率,但也增加了能耗,这与节能减排理念略有相悖,所以温度也不宜过高;当搅拌速度为300 r/min时,银的平均浸出率为58.24%,继续加快搅拌速度至400 r/min时,银的浸出率反而下降,这是由于搅拌速度加快,金属颗粒间相互撞击,一些颗粒随部分浸出液沾于烧杯壁上,使得浸出体系中溶液浓度降低,银的浸出率下降,而当搅拌速度超过400 r/min达到500 r/min时,银的浸出率又有了提高,这是因为搅拌速度为500 r/min时,进一步增加了颗粒碰撞概率与碰撞强度,大部分颗粒碰撞产生了细粉并参与反应,且颗粒表面固体产物层不断剥落,裸露出来了未参与反应的表面,能促进其与浸出液充分接触反应,同时,搅拌速度为500 r/min,也能提高体系的温度,加快了物质由颗粒内部到浸出液的扩散速率,从而提高银的浸出率。

3 结论

1) 退役晶硅太阳能电池板的绿色化预处理。通过人工将铝制外框和接线盒拆解下来,之后利用切割机将电池板切割成块状,再经加热200℃处理去除EVA、汇流带及玻璃,将电池片液氮冷脆,分离电池片和背板。利用ICP-OES法测定样品中金属银的含量为0.586 55 mg/kg。这种冷热耦合光伏组件分离方法相较于传统的热处理法和化学处理法,能耗更低、污染更少,避免了废气与废液的产生,为退役光伏组件绿色化、高效化回收提供一条可参考途径。

2) 对比甲磺酸-过氧化氢体系与柠檬酸-过氧化氢体系浸出银。可看出,柠檬酸-过氧化氢体系浸出银效果更好,其最佳反应条件为柠檬酸浓度6 g/L, H_2O_2 浓度30%,反应温度80℃,搅拌速度300 r/min,银的浸出率能达到95.53%。柠檬酸体系的有效浸出,主要与柠檬酸的自身结构有关,柠檬酸是有机三元弱酸,一个柠檬酸根离子可以络合三个银离子,这增强了浸出效果,同时 H_2O_2 浓度的提高也促进了银的浸出。对于银的浸出,柠檬酸体系更具有安全、环境友好、成本低、高效等优点。

参考文献

- [1] 周哲,孙凯文,蒋良兴,等. 废旧光伏组件回收技术研究进展[J]. 中南大学学报(自然科学版),2020,51(12): 3279-3288.
- ZHOU Z, SUN K W, JIANG L X, et al. Research progress on recycling technology of end-of-life silicon photovoltaic modules[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(12): 3279-3288.
- [2] 刘波,李佳怡,丁云集,等. 报废光伏板回收利用的研究现状[J]. 稀有金属,2019,43(9): 987-996.
- LIU B, LI J Y, DING Y J. et al. Recycling status of scrap photovoltaic panels[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2019, 43(9): 987-996.
- [3] 集邦新能源网. 中国太阳能电池板老化隐忧: 回收利用面临挑战[EB/OL]. [2024-07-06]. <https://www.energytrend.cn/news/20170801-15790.html>.
- Energy Trend. Worries about aging of solar panels in china: challenges in recycling China photovoltaic society[EB/OL]. [2024-07-06]. <https://www.energytrend.cn/news/20170801-15790.html>.
- [4] 陈琛,焦芬,刘维,等. 废旧晶体硅光伏组件资源化回收研究进展[J]. 化工环保,2022,42(5): 511-517.
- CHEN C, JIAO F, LIU W, et al. Research progress on resource recycling of end-of-life spent crystalline silicon photovoltaic modules[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2022, 42(5): 511-517.
- [5] 宋二晓,张承龙,马恩,等. 废弃晶体硅太阳能电池回收处理现状[J]. 上海第二工业大学学报,2017,34(3): 157-162.
- SONG E X, ZHANG C L, MA E, et al. Recovery processing status of waste crystalline silicon solar cell[J]. Journal of Shanghai Polytechnic University, 2017, 34(3): 157-162.
- [6] DIAS P, JAVIMCZIK S, BENEVIT M, et al. Recycling WEEE: extraction and concentration of silver from waste crystalline silicon photovoltaic modules[J]. Waste Management, 2016, 57: 220-225.
- [7] KUCZYŃSKA-ŁAŻEWSKA A, KLUGMANN-RADZIEMSKA E, SOBCZAK Z, et al. Recovery of silver metallization from damaged silicon cells[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2018, 176: 190-195.
- [8] 杨迪菲,王景伟,黄庆,等. 废旧晶体硅太阳能电池资源化现状[J]. 环境工程,2019,37(5): 191-195.
- YANG D F, WANG J W, HUANG Q, et al. Resource utilization status of waste crystalline silicon solar cells[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(5): 191-195.
- [9] JUNG B, PARK J, SEO D, et al. Sustainable system for raw-metal recovery from crystalline silicon solar panels: from noble-metal extraction to lead removal[J]. ACS Sustainable Chemistry &

- Engineering, 2016, 4(8): 4079-4083.
- [10] HUANG W H, SHIN W J, WANG L D, et al. Strategy and technology to recycle wafer-silicon solar modules [J]. Solar Energy, 2017, 144: 22-31.
- [11] TAO J, YU S R. Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaic modules [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2015, 141: 108-124.
- [12] 冯晋尧. 晶体硅太阳能电池片资源化技术研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2018.
- FENG J Y. Research on crystallized silicon solar cell recycling technology [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2018.
- [13] 金怀东, 蒋祥吉, 周雪梅. 废硅电池片表面银的回收[J]. 化工环保, 2013, 33(1): 67-70.
- JIN H D, JIANG X J, ZHOU X M. Recovery of silver from waste silicon solar cell surface [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2013, 33(1): 67-70.
- [14] 康立武, 闵昌松, 彭樟成. 铜阳极泥渣中浸出碲的试验研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2011(6): 3-5, 49.
- KANG L W, MIN C S, PENG Z C. Experimental study on leaching of tellurium from residue of copper anode slime [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2011(6): 3-5, 49.
- [15] SIMON F G, HOLM O, BERGER W. Resource recovery from urban stock, the example of cadmium and tellurium from thin film module recycling [J]. Waste Management, 2013, 33(4): 942-947.
- [16] 吴智朋, 高德东, 王珊, 等. 废旧晶体硅光伏组件回收技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2023, 59(7): 307-329.
- WU Z P, GAO D D, WANG S, et al. A review on recycling technology of end-of-life crystalline silicon photovoltaic modules [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(7): 307-329.
- [17] 王俊杰, 谈定生, 丁家杰, 等. 湿法炼锌渣柠檬酸浸出回收钴、锌和镍[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(2): 137-143.
- WANG J J, TAN D S, DING J J, et al. Recovery of cobalt, zinc and nickel by citric acid leaching of zinc hydrometallurgy residue [J]. Mineral Protection and Utilization, 2021, 41(2): 137-143.
- [18] 黄庆, 邓毅, 郁丰善, 等. 从废旧太阳能电池板中回收银[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(2): 48-53.
- HUANG Q, DENG Y, YU F S, et al. Recovery of silver from used solar panels [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2022(2): 48-53.
- [19] 柳青, 范云峰, 王莉. 太阳能EVA胶膜与玻璃界面粘接力的研究[J]. 中国胶粘剂, 2014, 23(3): 5-9.
- LIU Q, FAN Y F, WANG L. Study on the adhesion of solar EVA adhesive film to glass interface [J]. China Adhesives, 2014, 23(3): 5-9.
- [20] 杨声海, 吴彦增, 孙彦伟, 等. 甲基磺酸体系电沉积铅过程中阳极反应的电化学研究[J]. 湿法冶金, 2018, 37(5): 356-361, 367.
- YANG S H, WU Y Z, SUN Y W, et al. Electrochemical study on anodic reaction during lead electrodeposition in methylsulfonic acid system [J]. Hydrometallurgy of China, 2018, 37(5): 356-361, 367.

~~~~~

(上接第 76 页)

- [11] 郑勇, 彭聪虎, 田大勇, 等. 离子液体阴离子结构对铝沉积形貌的影响[J]. 有色金属(冶炼部分), 2016(8): 60-63, 69.
- ZHENG Y, PENG C H, TIAN D Y, et al. Effect of ionic liquid anion on morphology of aluminum deposits [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2016(8): 60-63, 69.
- [12] GORDON L W, WANG J, MESSINGER R J. Revealing impacts of electrolyte speciation on ionic charge storage in aluminum-quinone batteries by NMR spectroscopy [J]. Journal of Magnetic Resonance, 2023, 348: 107374. DOI: 10.1016/j.jmr.2023.107374.
- [13] ZHENG Y, ZHENG Y J, PENG C H, et al. Electrical double layer in imidazolium chloroaluminate ionic liquids and its influence on the surface morphology of aluminium deposits [J]. International Journal of Electrochemical Science, 2016, 11(11): 9585-9598.