DOI：10.19666/j.rlfd.202508071

从退役晶硅光伏电池片提取银和铝技术研究

李子菡，刘　展，王洪亮，刘向辉，江清潘，周凤翔，
刘明辉，张弘锦，赵　晶，杨春振，何发泉
（国能龙源环保有限公司，北京　100039）

［摘　　要］退役晶硅光伏电池资源化回收对于材料的循环和新能源绿色健康发展具有重要意义。目前，主流退役光伏组件回收企业多聚焦于铝边框回收技术，而晶硅电池片中高价值银和铝资源尚未实现有效回收。为此，提出了液碱浸铝−硝酸浸银−液相还原制备银粉湿法回收工艺。通过优化实验参数，在氢氧化钠浓度 1.0 mol/L、温度 20 ℃、液固比 10:1（mL/g）、反应时间 40 min 条件下，退役晶硅光伏电池铝的浸出率达到 98.88%，同时硅浸出损失率仅为 0.46%；在硝酸浓度 4.0 mol/L、温度 70 ℃、液固比 5:1（mL/g）、反应时间 60 min 条件下，银的浸出率达到 98.00%。以抗坏血酸作为还原剂，在抗坏血酸与银离子摩尔比 1.25:1.00、温度 30 ℃、搅拌速度 250 r/min 的条件下成功制备了纯度 99.9%以上的银粉。该工艺具有回收率高、产品纯度高等特点，为退役光伏组件中晶硅电池片的资源化利用提供了有效途径。

［关　键　词］晶硅光伏组件；晶硅电池片；浸出；银；铝；回收

［引用本文格式］李子菡，刘展，王洪亮，等. 从退役晶硅光伏电池片提取银和铝技术研究[J]. 热力发电，2026，55(1)：85-91.
LI Zihan，LIU Zhan，WANG Hongliang，et al. Study on recovering silver and aluminium from retired crystalline silicon solar cells[J]. Thermal Power Generation，2026，55(1)：85-91.

Study on recovering silver and aluminium from retired crystalline silicon solar cells

LI Zihan，LIU Zhan，WANG Hongliang，LIU Xianghui，JIANG Qingpan，ZHOU Fengxiang，
LIU Minghui，ZHANG Hongjin，ZHAO Jing，YANG Chunzhen，HE Faquan
(CHN Energy Longyuan Environmental Protection Co.，Ltd.，Beijing 100039，China)

Abstract: The resource-recycling of retired crystalline-silicon photovoltaic cells is of great significance for the recycling of materials and the green and healthy development of renewable energy. Currently，most recyclers of decommissioned photovoltaic modules mainly focus on the recycling of aluminium frames，while aluminium resources in crystalline-silicon solar cells have not been effectively recycled，leaving valuable silver within the cells. Therefore，a wet-recycling process for preparing silver powder was proposed，which involves leaching aluminum with liquid alkali，leaching silver with nitric acid，and liquid-phase reduction. By optimizing the experimental parameters，under the conditions of a sodium-hydroxide concentration of 1.0 mol/L，a temperature of 20 ℃，a liquid-to-solid ratio of 10:1 (mL/g)，and a reaction time of 40 min，the leaching rate of aluminum from the retired crystalline-silicon photovoltaic cells reached 98.88%，and the leaching-loss rate of silicon was only 0.46%. Under the conditions of a nitric-acid concentration of 4.0 mol/L，a temperature of 70 ℃，a liquid-to-solid ratio of 5:1 (mL/g)，and a reaction time of 60 min，the leaching rate of silver reached 98.00%. Using ascorbic acid as a reducing agent，silver powder with a purity of over 99.9% was successfully prepared under the conditions of a molar ratio of ascorbic acid to silver ions of 1.25:1.00，a temperature of 30 ℃，and a stirring speed of 250 r/min. This process achieves high recovery rates and product purity，offering a practical pathway for crystalline silicon solar cell wafers recycling.
Key words: silicon PV module; silicon solar cell; leaching; silver; aluminum; recovery

收 稿 日 期：2025-08-31　**修 回 日 期：**2025-10-13　**接 受 日 期：**2025-10-15
第一作者简介：李子菡（1999），女，硕士，主要从事新能源固废资源化利用工作，1098082725@qq.com。
通信作者简介：何发泉（1970），男，博士，正高级工程师，主要从事节能环保、固废资源化利用等工作，faquan.he@chenergy.com.cn。

过去 15 年我国光伏新能源产业实现了跨越式发展，目前，我国光伏发电装机容量已突破 9.45 亿千瓦。光伏组件设计寿命为 20~25 年，同时因自然灾害、政策驱动等原因，每年大约有 1%的光伏组件由于损坏或迭代而退役[1-4]。从 2030 年左右开始，光伏组件将进入密集报废期，2035 年后每年将超过 100 万吨退役量，2040 年将有超过 200 万吨退役量[5]。

退役晶硅光伏组件拆解后得到玻璃、焊带、电池片等组分，其主要的回收价值来自铝边框、焊带中的铜、电池片中的银[6-9]，如果不对电池片和焊带中的金属进行妥善处置，银、铜等重金属元素会通过理化作用逐渐渗漏至土壤中，进而对土壤、地下水等环境和植被、动物等生态要素造成危害和污染，直至通过生物富集作用从而危害人类自身的生命健康[10]。晶硅光伏电池片采用单晶硅或多晶硅电池片作为光吸收器，表面覆有银栅线，光伏组件的银质量分数为 0.02%~0.05%，均值为 0.035%[11-12]。银因在新能源与高科技产业的不可替代性、供给刚性缺口及国家政策管控，已被明确列为战略资源和高风险等级供应金属[13]，白银正从传统贵金属转向“光伏血液”与“AI 芯片关键材料”，我国白银进口依存度超 40%。

目前，关于从退役晶硅光伏电池片中提取银及铝的方法包括物理法[14-17]和湿法[18-21]。常见的物理法包括低温捕集技术、超声波清洗技术等。湿法即用浸出剂将银和铝溶解，再沉淀或还原为产品。董莉等[18]提出了一种利用盐酸、硝酸溶液、硝酸-氢氟酸混酸依次溶解浸出光伏电池中的铝、银及氮化硅减反射膜的工艺。李佳艳等[14]采用氢氧化钠溶液去除铝背电场，超声清洗剥离银电极，氢氟酸溶液去除氮化硅膜，实现了电池片中铝和银的完全去除。上述研究并未对浸出的铝和银做进一步反应 和回收，存在氢氟酸使用过程中的环境污染问题。国外研究聚焦于采用更绿色温和的溶剂对非晶硅电池片上的金属进行有选择性的靶向提取和回收[22-25]。莱斯特大学的 Zante 等人[24]利用氯化胆碱配制低共熔溶剂成功提取银，该工艺成本低廉，经济性较高，实现了 95%的银回收率和 98%的产品纯度。该项研究采用氯化铝溶液或者氯化铁溶液来去除电池片上的铝层，实现了铝的完全去除。国外对电池片的回收技术虽然环保性较高，但也存在反应时间长、能耗大等问题[25]。

本文为实现退役晶硅光伏电池片中银和铝的系统性回收和资源化利用，采用液碱和硝酸分步浸出电池片背板上的铝和表面银栅线中的银，用盐酸沉铝法制得氢氧化铝，再以抗坏血酸为还原剂制备银粉，并确定了最佳工艺参数。

1 实验方法

1.1 实验原料

实验原料为退役晶硅光伏组件经过拆解和层压件分离后所得电池片，其主要化学成分见表 1。电池片中主要元素为 Si，占 90.22%；主要有价金属为 Al 和 Ag，分别占 8.70%和 0.56%。这 3 种元素在电池片中主要以单质形式存在。将电池片放入超声波中清洗 10 min 以去除电池片表面的灰尘（超声温度为 25 ℃，超声功率为 80 W），将清洗后的电池片放入真空干燥箱中恒温 60 ℃烘干至恒重。实验用到的主要化学试剂包括氢氧化钠（分析纯）、盐酸（分析纯）、硝酸（分析纯）、氯化钠（分析纯）、氨水（优级纯）、抗坏血酸（分析纯）、聚乙烯吡咯烷酮（K16-18）。

表 1 退役晶硅光伏电池片主要元素及质量分数
Tab.1 Major elements and their mass fractions in retired crystalline silicon photovoltaic cells

成分	Si	Al	Ag	Pb	Cu	Fe
质量分数/%	90.22	8.70	0.56	0.08	0.01	0.01

1.2 实验方法与原理

首先，采用液碱浸泡电池片，去除其表面的铝电极，再向铝浸出液中加入盐酸得到氢氧化铝沉淀，该过程发生的主要反应见式(1)、式(2)。

$$2Al+2NaOH+2H_2O=2NaAlO_2+3H_2\uparrow \quad (1)$$

$$NaAlO_2+HCl+H_2O=Al(OH)_3\downarrow+NaCl \quad (2)$$

然后，采用稀硝酸浸泡电池片，去除其表面的银栅线，该过程发生的主要反应式见(3)。

$$3Ag+4HNO_3=3AgNO_3+NO\uparrow+2H_2O \quad (3)$$

最后，向银浸出液中加入氯源（氯化钠）将银选择性沉淀出来，将氯化银用氨水溶解，以抗坏血酸为还原剂，通过液相还原法从银氨溶液中制备银粉。该过程主要化学反应见式(4)—式(6)。

$$AgNO_3+NaCl=AgCl\downarrow+NaNO_3 \quad (4)$$

$$AgCl+2NH_3\cdot H_2O\rightarrow [Ag(NH_3)_2]^++Cl^-+2H_2O \quad (5)$$

$$2[Ag(NH_3)_2]OH+C_6H_8O_6\rightarrow 2Ag\downarrow+C_6H_6O_6+4NH_3+2H_2O \quad (6)$$

1.3 分析方法

采用 Thermo Scientific 电感耦合等离子体发射光谱仪（ICP-OES），使用硝酸在 220 ℃下加热 40 min 消解银粉，测定溶液中金属离子浓度及制得银粉纯度，并计算金属浸出（或沉淀）率，计算公式为：

$$\eta_i = \frac{m_1 \times w_{i1}}{m_0 \times w_{i0}} \times 100\% \tag{7}$$

式中：η_i 为金属 i（i 代表铝、银等）的浸出（或沉淀）率，%；m_1 为生成物的质量，g；w_{i1} 为生成物中金属 i 的质量分数，%；m_0 为反应物的质量，g；w_{i0} 为反应物中金属 i 的质量分数，%。

采用 X 射线衍射仪 Bruker D8 Advance 分析产物的物相组成，采用日本 JEOL 扫描电镜（SEM）对电池片进行表面形貌分析和 Oxford X-aCT 能谱系统（EDS）对电池片进行表面元素分布表征。

2 结果与讨论

2.1 液碱浸出实验

2.1.1 氢氧化钠浓度对铝浸出率的影响

在电池片用量 10 g，反应温度 20 ℃，液固比 10:1（10 mL:1 g，下同），浸出时间 40 min 的条件下，考察氢氧化钠浓度对铝浸出率的影响，实验结果如图 1 所示。由图 1 可知，铝浸出率随着氢氧化钠浓度增大而明显上升，在氢氧化钠浓度为 1.0 mol/L 时，达到了 98.88%，而后出现拐点。

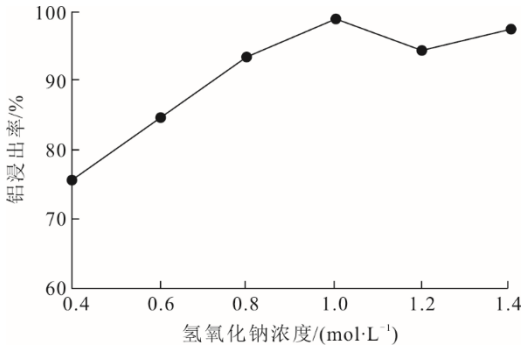


图 1 氢氧化钠浓度对铝浸出率的影响
Fig.1 Effect of sodium hydroxide concentration on aluminum leaching rate

电池片的含铝量恒定，采用低浓度氢氧化钠浸泡时，提高氢氧化钠浓度能明显提升反应速率和铝的浸出率；当氢氧化钠浓度达到一定值后，单位体积溶液中参与铝反应的氢氧化钠活化分子数恒定，因此再提高氢氧化钠溶液浓度对铝的反应影响不大，反而会提高硅和氢氧化钠的反应；在氢氧化钠浓度为 1.0 mol/L 时，铝浸出率出现拐点，这是由于样品差异，铝涂层较薄的地方率先露出硅，此时溶液中同时存在铝和硅与碱的反应，影响了氢氧化钠与铝的反应。综合考虑，选择 1.0 mol/L 的氢氧化钠浓度较为合适。

反应过程中有黑色悬浮物漂浮在溶液上层，对该黑色悬浮物粉末进行 XRD 分析，结果如图 2 所示。由图 2 可见，特征峰主要由硅和铝单质的衍射峰组成。XRD 分析表明，黑色粉末是脱落的 Al-Si 共熔区的 Al-Si 合金。铝与氢氧化钠反应放热并伴随大量 H_2 气泡生成，这些气泡使电池片上烧结的铝背场与硅片分开并形成黑色粉末。

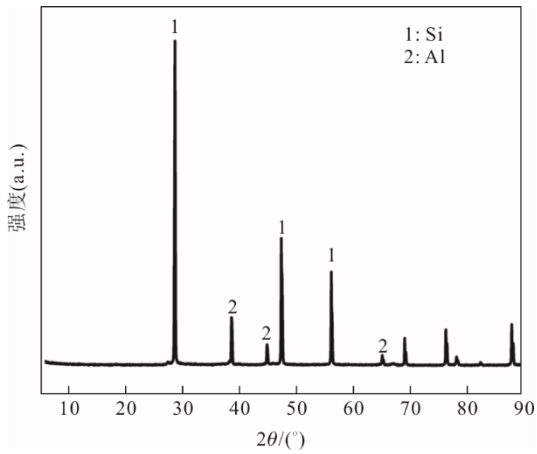


图 2 铝浸出过程产生的黑色粉末 XRD 图
Fig.2 XRD patterns of the black powder generated during the aluminum leaching process

2.1.2 反应温度、氢氧化钠浓度对硅损失率的影响

电池片铝背场和碱反应（式(1)）为放热反应。在液碱浸铝过程中，硅随着铝的浸出逐渐暴露在碱液中，发生副反应：

$$Si + 2NaOH + H_2O = Na_2SiO_3 + 2H_2\uparrow \tag{8}$$

在电池片用量 10 g，液固比 10:1，浸出时间 40 min，氢氧化钠浓度分别为 1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 mol/L 时，考察反应温度对铝浸出过程中硅损失率的影响，实验结果如图 3 所示。由图 3 可知，提高反应温度和氢氧化钠浓度会提高硅的损失率，控制低温 20 ℃反应能够有效抑制副反应硅的浸出，硅损失率仅为 0.46%。因此，碱浸温度应控制在 20 ℃左右，工业产线需要添加冷却水循环装置。

2.1.3 浸出时间对铝浸出率的影响

在电池片用量 10 g，氢氧化钠浓度 1.0 mol/L，液固比 10:1，反应温度 20 ℃的条件下，考察浸出时间对铝浸出率的影响，实验结果如图 4 所示。由

图 4 可知，铝浸出率随反应进行而上升，反应进行到约 40 min 时，铝浸出率趋近平稳，最终在第 60 min 达到 98.63%。综合考虑生产效率，最佳的浸出时间为 40 min。

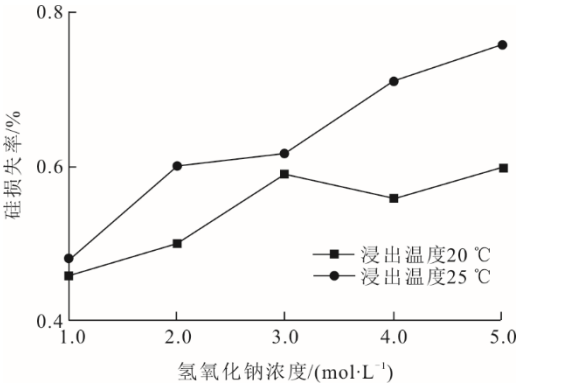


图 3 反应温度、氢氧化钠浓度对硅损失率的影响
Fig.3 Effects of reaction temperature and sodium hydroxide concentration on silicon loss rate

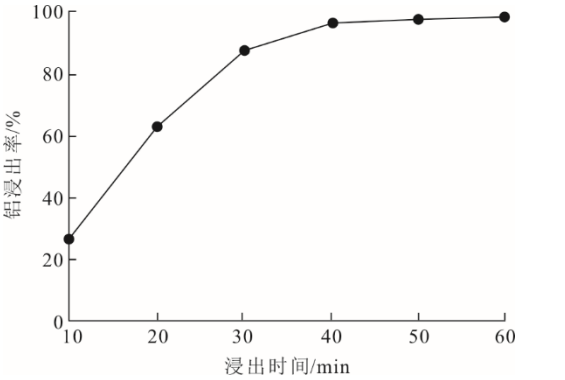
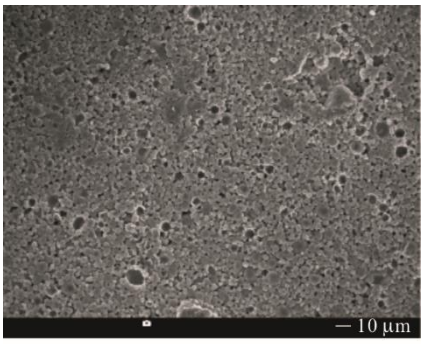
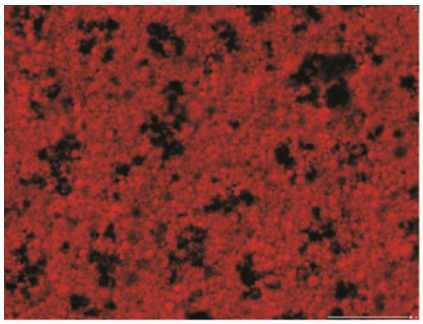


图 4 浸出时间对铝浸出率的影响
Fig.4 Effect of leaching time on aluminum leaching rate

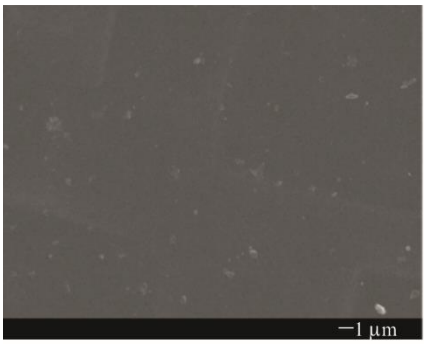
对浸出前、后电池片表面铝背场进行 SEM-EDS 分析，结果如图 5 所示。由图 5 可知，经过 1.0 mol/L 氢氧化钠溶液在 20 ℃下浸泡 40 min 后，电池片表面铝质量分数由 70.95%减小为 0.50%，可以认为电池片上的铝元素已全部浸出。



a) 原始电池片



b) 原始电池片Al元素



c) 1.0 mol/L氢氧化钠浸出40 min后电池片



d) 1.0 mol/L氢氧化钠浸出40 min后Al元素

图 5 碱浸前、后电池片表面铝背场 SEM 图及 Al 元素 mapping 图
Fig.5 SEM images of aluminum back surface fields before and after sodium hydroxide leaching, and the mapping of Al element

2.2 硝酸浸出实验

2.2.1 硝酸浓度对银浸出率的影响

银和稀硝酸常温下反应缓慢，需加热促进反应。在电池片用量 10 g，液固比 5:1，浸出温度 70 ℃，反应时间 60 min 的条件下，考察硝酸浓度对于银浸出率的影响，结果如图 6 所示。由图 6 可知，银浸出率随着硝酸浓度增加而增加。硝酸浓度从 2.0 mol/L 到 3.0 mol/L，银浸出率明显增大，硝酸浓度为 4.0 mol/L 时银的浸出率最高，为 98.00%，之后随着硝酸浓度的增长，银浸出率下降，原因可能是硝酸浓度过量，阻碍了硝酸和金属反应，导致银浸出率下降。

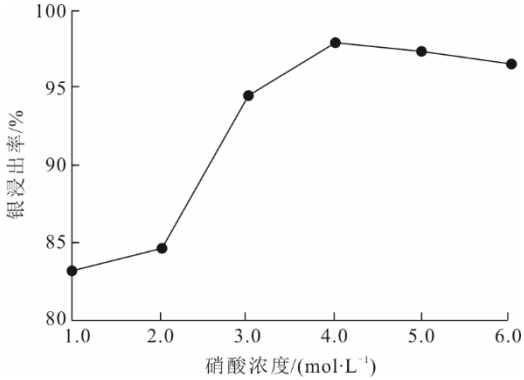
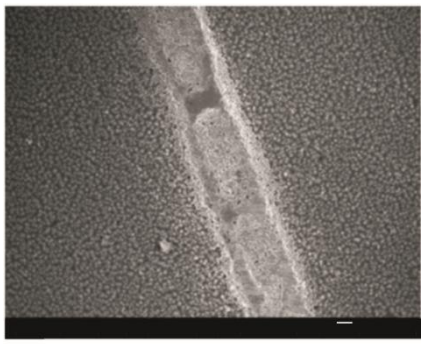
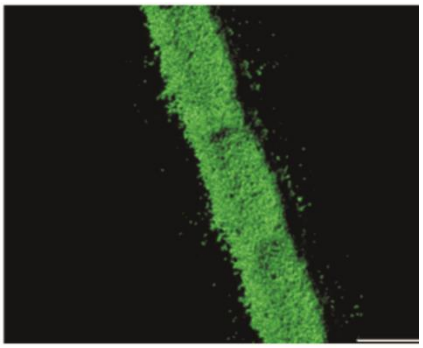


图 6 硝酸浓度对银浸出率的影响
Fig.6 Effect of nitric acid concentration on silver leaching rate

对浸出前、后电池片表面银栅线位置处进行 SEM-EDS 分析，结果如图 7 所示。由图 7 可知，经过 4.0 mol/L 的硝酸浸泡后，电池片表面银的质量分数由 21.73%减小为 0.32%，可以认为银栅线上的银全部浸出。



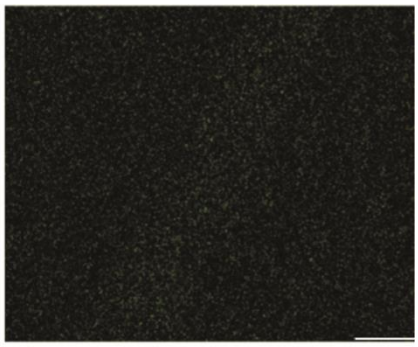
a) 原始电池片



b) 原始电池片Ag元素



c) 4.0 mol/L硝酸浸出后银栅线



d) 4.0 mol/L硝酸侵出后Ag元素

图 7 硝酸浸出前、后电池片表面银栅线 SEM 图及 Ag 元素 mapping 图
Fig.7 SEM images of silver grid lines before and after nitric acid leaching, and the mapping of Ag element

2.2.2 浸出时间对银浸出率的影响

在电池片用量 10 g，硝酸浓度 3.0 mol/L，液固比 5:1，浸出温度为 70 ℃的条件下，考察浸出时间对银浸出率的影响，实验结果如图 8 所示。由图 8 可知，随着时间推移，浸出液中银离子浓度不断升高，在 60 min 时达到 95.28%，之后银浸出率基本保持不变。考虑到浸出效率，浸出时间选择 60 min。

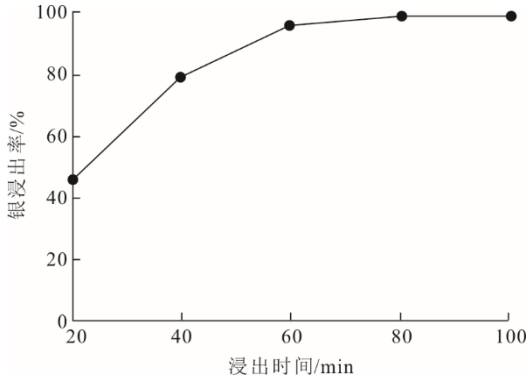


图 8 浸出时间对银浸出率的影响
Fig.8 Effect of leaching time on silver leaching rate

2.3 液相还原制备银粉实验

通过向银浸出液中加入氯源实现银的选择性沉淀。取 5 g 氯化银固体，将其溶于 140 mL 氨水，通过液相还原反应制备银粉。在反应温度 30 ℃，搅拌速度 250 r/min 的条件下，考察还原剂浓度对银沉淀率以及银粉纯度的影响，结果如图 9 所示。如图 9 可知，当还原剂抗坏血酸与银离子摩尔比为 1.25:1.00 时，银沉淀率和银粉纯度水平综合最优，银沉淀率为 94.81%，银粉纯度达到 99.91%。

在液相还原制备银粉的过程中，向反应器中加入适量分散剂聚乙烯吡咯烷酮（PVP），对制得银粉

的形貌进行 SEM 分析，结果如图 10 所示。由图 10 可知，该工艺条件下制得的银粉颗粒呈球状，表面光滑。

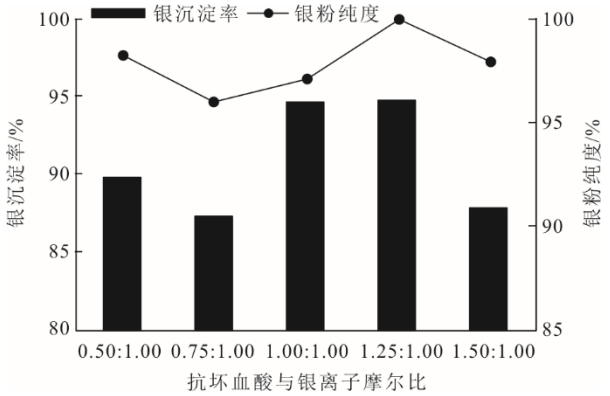


图 9 抗坏血酸与银离子摩尔比对银沉淀率及银粉纯度影响
Fig.9 Effect of molar ratio of ascorbic acid to silver ions on silver precipitation rate and purity of silver powder

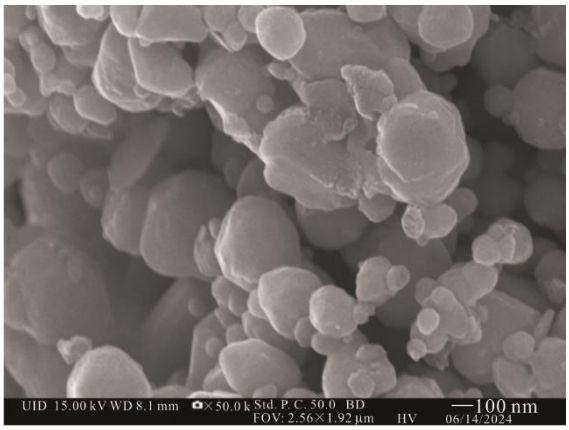


图 10 液相还原法制备银粉 SEM 图
Fig.10 SEM image of the silver powder prepared by liquid-phase reduction method

3 结 论

本文以退役晶硅光伏电池片为原料，采用液碱浸出铝，稀硝酸浸出银，以及抗坏血酸作为还原剂制备银粉的提取工艺。该工艺具有回收效率高、产品纯度高的特点，为退役光伏组件中晶硅电池片的资源化利用提供了有效途径。分别考察了试剂浓度、反应温度、时间等参数对提取结果的影响，得到以下主要结论。

1）碱浸出铝实验中在氢氧化钠浓度 1.0 mol/L，温度 20 ℃，液固比 10:1，反应时间 40 min 条件下，铝的浸出率达到 98.88%。通过控制反应温度 20 ℃，在保证铝浸出效率的同时能有效抑制硅的损失，硅损失率仅为 0.46%。

2）稀硝酸浸出银实验中通过将反应温度升至 70 ℃提高浸出效率，采用 4.0 mol/L 硝酸，在液固比 5:1，反应时间仅为 60 min 条件下，银的浸出率达到 98.00%。

3）以抗坏血酸作为还原剂，在抗坏血酸与银离子摩尔比 1.25:1.00，温度 30 ℃，搅拌速度 250 r/min 的条件下，银的沉淀率达到 94.81%，制备出球状银粉，表面光滑，纯度达到 99.91%。

[参 考 文 献]

[1] 赵江英, 王刚. 废旧晶硅太阳能组件回收技术的发展现状[J]. 再生资源与循环经济, 2018, 11(6): 3.
ZHAO Jiangying, WANG Gang. Development status of recycling technology for waste crystalline silicon solar modules[J]. Renewable Resources and Circular Economy, 2018, 11(6): 3.

[2] 马昀锋, 韩金豆, 何银凤, 等. 晶硅光伏组件回收中硅材料提纯产业化研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(1): 5.
MA Yunfeng, HAN Jindou, HE Yinfeng, et al. Study on industrialization technology of silicon material purification in recovery of crystalline silicon PV modules[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(1): 5.

[3] FU M, ZHOU H, HUA K W, et al. Aging characteristics of crystalline silicon solar cells[J]. Electronic Components and Materials, 2017, 36(12): 79-83.

[4] 王敏, 胡中发, 白冰, 等. 退役晶硅光伏组件解离与资源化研究进展[J]. 煤炭学报, 2024, 49(10): 4188-4202.
WANG Min, HU Zhongfa, BAI Bing, et al. A review on dissociation and resource utilization of decommissioned crystalline silicon photovoltaic modules[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(10): 4188-4202.

[5] 李林, 张英婷, 李龙, 等. 报废晶硅光伏组件回收研究进展浅析[J]. 广州化工, 2023, 51(9): 10-12.
LI Lin, ZHANG Yingting, LI Long, et al. Research progress on recycling of discarded crystalline silicon PV modules[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2023, 51(9): 10-12.

[6] MCDONALD N C, PEARCE J M. Producer responsibility and recycling solar photovoltaic modules[J]. Energy Policy, 2012, 38(11): 7041-7047.

[7] KLUGMANN R E, OSTROWSKI P, DRABCZYK K, et al. Experimental validation of crystalline silicon solar cells recycling by thermal and chemical methods[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2010, 94(12): 2275-2282.

[8] PARK J, PARK N. Wet etching processes for recycling crystalline silicon solar cells from end-of-life photovoltaic modules[J]. RSC Advances, 2014, 4(66): 34823-34829.

[9] FTHENAKIS V M. “End-of-Life” management and recycling of PV modules[J]. Energy Policy, 2000, 28(14): 1051-1058.

[10] DENG R, CHANG N L, OUYANG Z, et al. A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 109: 532-550.

[11] HOSENUZZAMAN M, RAHIM N A, SELVARAJ J, et al. Global prospects, progress, policies, and environmental

impact of solar photovoltaic power generation[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 41: 284-297.

[12] WURFEL P, WURFEL U. Physics of solar cells: from basic principles to advanced concepts[M]. 3rd ed. Germany: Wiley-VCH, 2016: 5-20.

[13] 梁扬扬, 刘丽丽, 贺克斌, 等. “双碳”目标下我国新能源行业关键金属供应分析[J]. 中国工程科学, 2024, 26(3): 131-141.
LIANG Yangyang, LIU Lili, HE Kebin, et al. Supply of key metals for China’s new energy industries under the carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(3): 131-141.

[14] 李佳艳, 蔡敏, 武晓玮, 等. 多晶硅太阳能电池片的回收再利用研究[J]. 无机材料学报, 2018, 33(9): 6.
LI Jiayan, CAI Min, WU Xiaowei, et al. Recycling polycrystalline silicon solar cells[J]. Journal of Inorganic Materials, 2018, 33(9): 6.

[15] QING L, MING S R, ZI Y L. Study and market of front-side silver paste for silicon solar cell[J]. Information Recording Materials, 2012, 13(2): 39-46.

[16] BOMBACH E, RVER I, MÜLLER A, et al. Technical experience during thermal and chemical recycling of a 23 year old PV generator formerly installed on Pellworm island[C]//Proceedings of the 21st. European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2006: 2048-2053.

[17] ZHANG L, CIFTJA A. Recycling of solar cell silicon scraps through filtration, Part I: experimental investigation[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2008, 92(11): 1450-1461.

[18] 董莉, 冯晋尧, 刘景洋, 等. 废晶硅太阳能电池资源化分类回收技术研究[J]. 环境污染与防治, 2020, 42(6): 5.
DONG Li, FENG Jinyao, LIU Jingyang, et al. Research on classification and recycling technology of waste crystalline silicon solar cells[J]. Environmental Pollution and Prevention and Control, 2020, 42(6): 5.

[19] 张宏涛, 王红雪, 董宪姝, 等. 退役晶硅光伏太阳能电池中有价组分的回收工艺研究[J]. 湿法冶金, 2024, 43(5): 583-591.
ZHANG Hongtao, WANG Hongxue, DONG Xianshu, et al. Recycling process of valuable components from decommissioned crystalline silicon photovoltaic solar cells[J]. Hydrometallurgy of China, 2024, 43(5): 583-591.

[20] 杨迪菲. 废旧晶体硅太阳能电池中金属回收研究[D]. 上海: 上海第二工业大学, 2019: 33-62.
YANG Difei. Research on metal recycling from waste crystalline silicon solar cells[D]. Shanghai: Shanghai Second Polytechnic University, 2019: 33-62.

[21] 罗淼思. 退役晶硅太阳电池片中银的湿法高效回收及银粉制备工艺研究[D]. 长沙: 中南大学, 2022: 20-34.
LUO Miaosi. Hydrometallurgical efficient recovery of silver from retired crystalline silicon solar cell wafers and preparation process of silver powder[D]. Changsha: Central South University, 2022: 20-34.

[22] WONGNAREE N, KRITSARIKUN W, MA U N, et al. Recovery of silver from solar panel waste: an experimental study[J]. Materials Science Forum, 2020, 1009: 137-142.

[23] CHUNG J, SEO B, LEE J, et al. Comparative analysis of I2-KI and HNO_3 leaching in a life cycle perspective: towards sustainable recycling of end-of-life c-Si PV panel[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 404: 123989-123996.

[24] ZANTE G, RIVERA R M, HARTLEY J, et al. Efficient recycling of metals from solar cells using catalytic etchants[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 370: 133552.

[25] LUO F, PENG X C, WU Y Y, et al. Research progress of waste crystalline solar cells recycling and dismantling[J]. Environmental Science and Management, 2014, 39(12): 160-163.

（责任编辑　杨嘉蕾）