

废液和废水中分离回收钯研究进展

陈柳州, 赵泉林, 叶正芳*

(北京大学 环境科学与工程学院 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100871)

摘 要: 贵金属钯在工业生产中应用广泛, 然而资源稀缺, 价格昂贵, 从二次资源中回收钯变得尤为重要。而冶金、电镀、PCB 制造和核工业等工业活动中产生的含钯废液和废水是钯的一种占比较大的二次资源。不同来源的含钯废液和废水在钯含量、成分组成和其他特性等方面差异较大。基于 40 多篇国内外相关文献的分析, 总结了从废液和废水中分离回收钯的已有技术, 包括沉淀/置换法、萃取法、吸附法和生物法, 对各种方法的原理、应用以及优缺点进行了简要介绍。对各种方法的近期研究进展进行了对比, 未来研究方向进行展望, 为废液和废水中钯的分离回收提供参考。

关键词: 废液废水; 钯; 分离; 回收

中图分类号: TF836 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2022)04-0097-06

Research progress on separation and recovery of palladium from waste liquid and wastewater

CHEN Liu-zhou, ZHAO Quan-lin, YE Zheng-fang*

(Key Laboratory of Water & Sediment Science, Ministry of Education,

Department of Environmental Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The precious metal palladium is widely used in industrial production, but the resources are scarce and expensive, so it is particularly important to recover palladium from secondary resources. The waste liquid and wastewater containing palladium produced in industrial activities such as metallurgy, electroplating, PCB manufacturing and nuclear industry are a relatively large secondary resource of palladium. There are great differences in palladium content, composition and other characteristics of waste liquid and wastewater from different sources. Based on the analysis of more than 40 related literatures at home and abroad, the existing technologies for the separation and recovery of palladium from waste liquid and wastewater were summarized in this review, including precipitation/replacement method, extraction method, adsorption method and biological method. The principle, application, advantages and disadvantages of these methods were briefly introduced. The recent research progress of various methods was compared and the future research direction was prospected in order to provide reference for the separation and recovery of palladium from waste liquid and wastewater.

Key words: waste liquid and wastewater; palladium; separation; recovery

钯是一种具有光泽、良好耐腐蚀、高稳定性以及其他特殊性能的贵金属材料, 而广泛应用于珠宝、航空航天、医药、电子和各种化工过程等领域^[1]。钯的需求随着经济的显著增长而不断增加, 然而自然

资源中存在的钯矿较少, 且钯的价格昂贵。在各种工业活动中, 部分钯进入溶剂和水体, 形成含钯废液和含钯废水。从废液和废水中回收再利用钯对于解决钯资源短缺、降低生产成本等具有重大意义。

收稿日期: 2022-03-15

第一作者: 陈柳州, 女, 硕士研究生。研究方向: 水处理工程。E-mail: chenlz2020@stu.pku.edu.cn

*通信作者: 叶正芳, 男, 教授。研究方向: 水处理工程。E-mail: zhengfangye@163.com

1 含钯废液和废水的来源

冶金行业中,从铜镍硫化矿等矿石中提取钯,一般需要经过加压氧化酸浸出、加压氰化浸出和从碱性氰化液中提取 3 个步骤,使得浸出液中含有大量的游离氰化物和贱金属,而未完全提取的钯和这些物质共同存在^[2]。这种废液中钯的含量约为 0.07~0.38 g/m³,多以离子形式存在,其他杂质金属离子较多,不利于直接沉淀和离子交换提取,但是废液量是含钯废液中最大的一类^[3]。

电镀行业中,钯通常起到防腐的作用,在加工过程中很容易排放到废水中^[4]。含钯电镀废水主要是各种活化和钝化过程中的副产物,其中钯浓度约为 10 mg/L,且钯在电镀废水中以络合状态、胶体状态、离子状态和单一金属的形式共同存在,而普通的离子交换技术和吸附技术不能分离回收离子状态以外的其他状态下的钯^[5]。这种电镀废水主要来源有电镀废液、电镀清洗水和其他废水,成分多样且重金属含量高^[4]。

印刷电路板(PCB)制造中,作为电子设备的重要部件,最关键的一个工序是孔金属化工艺过程,需在非金属导体基材上吸附一层具有催化活性的金属导体中心,用以诱发后续的化学镀^[6],这个重要环节主要用含钯活化液。活化废液中钯浓度低,其中既含有大量的重金属化合物又含有合成高分子有机物及多种有机添加剂,这些金属离子和有机物的含量变化大、浓度高、成分复杂且形态不一,为 PCB 活化废液中钯的分离回收增加困难^[7]。

核工业中,乏燃料后处理产生的高浓度液体废物(HLLW)中含有大量的非挥发性裂变产物(FPs)、铀、微量的钍和钷。钯作为一种主要的 FPs,并没有通过 PUREX 溶剂萃取过程和 U 以及 Pu 一起提取出来,而是留在 HLLW 中^[8]。这种废液具有高放射性、高酸度(1~3 mol/L,甚至高达 6 mol/L),每吨可回收约 1 kg 的钯^[9]。此类废水的分离回收方法中使用的材料需要在酸性介质中具有高稳定性、高选择性及在分离过程中有承受强辐射的优异耐受性。

医药和化工等行业中,许多钯基材料是加氢反应、重整反应、氧化反应、异构化反应等有机反应的高效催化剂,尤其是在以 Suzuki、Heck 和 Negishi 等为代表的著名有机化学反应中起着至关重要的催化作用。含钯催化剂常伴随着反应进行部分进入到废液和废水中。这种含钯废液和废水中含有多种有机物,包括溶剂、添加剂、反应物和钯催化剂^[10],

钯的含量较低。

本文通过查阅近期相关国内外文献,总结了从含钯废液和废水中分离回收钯的常见方法,并对各种方法进行了介绍、对比和分析,以期对废液和废水中钯的分离回收提供参考。

2 沉淀法

通过投加化学试剂,使废液/水中的钯离子形成沉淀,从而实现分离,主要包括沉淀和共沉淀。向含钯废液/水中加入过量沉淀剂,使钯形成难溶化合物,与微量及常量杂质分离。Yousif^[11]采用氯化铵沉淀法,从车用催化转化器的浸出液中回收了 96%的钯,纯度达到 99.3%。

此外,废液/水中的钯离子很容易通过金属间的置换反应被贱金属置换出来,形成沉淀,起到富集和初步提纯的作用。锌、镁、铝、铁常用作置换剂。Umeda 等^[12]发现铁粉、铝粉、锌粉都可以回收精炼废水中的钯,其中铁粉和铝粉效果优于锌粉,回收率可分别达到 96%和 99.5%。

共沉淀法是指当一种物质沉淀时,另一种物质可以通过包藏、表面吸附以及生成结晶等作用与其产生共沉淀现象^[13],是一种在石墨炉原子吸收光谱法测定痕量重金属中重要的预富集技术^[14]。Ozturk 等^[15]利用 Cu^{2+} /1,5-二苯基碳酸酯共沉淀钯(II),在 pH 4.5 的条件下加入 3.75 mg 1,5-二苯基碳酸酯和 1 mg Cu^{2+} 形成沉淀。

沉淀法操作简单,采用合适的沉淀剂可以达到较高的沉淀效率,但同时也会存在固液分离困难、污泥量大且成分复杂、易对环境产生污染等缺点,并且沉淀法只适用于钯含量较高的废液和废水。

3 萃取法

3.1 传统溶剂萃取

对于溶剂萃取法,萃取剂的选择是萃取能否高效的关键性因素。根据萃取剂的结构、官能团和含有元素等差异,将用于钯的主要萃取剂分为含硫萃取剂、含氮萃取剂和含磷萃取剂。这 3 类萃取剂主要分别通过 S、N 和 P 原子与含钯离子配位。Huang 等^[16]合成了一组新的不对称支链烷基亚砷,实验数据表明水相中盐酸浓度对 Pd(II)的萃取机理服从低酸度下配体取代机理,高酸度下离子缔合机理,并且在低浓度盐酸中更有利于 Pd(II)和 Pt(IV)的分离。Rudik 等^[17]选取了三辛胺(TOA)和甲基三烷基氯化

铵(MTAA), 利用旋转螺旋柱溶剂萃取法从氯化物溶液中分离 Pd(II)、Pt(IV)和 Rh(III), 结果表明用 TOA 和 MTAA 在甲苯体系中萃取可以在整个研究的酸度范围内实现对 Pd(II)和 Pt(IV)的定量萃取。Truong 和 Lee^[18]通过溶剂萃取实验, 研究了在 0.5~9 mol/L 的盐酸溶液中对 Pt(IV)和 Pd(II)的选择性萃取条件, 发现酸性有机磷溶剂 Cyanex301 对 Pd(II)的选择性高于 Pt(IV), 并且即使在 9 mol/L 的 HCl 溶液中也完全萃取 Pd(II)。溶剂萃取可以有效的提取分离混合物中的钯, 得到产物的纯度较高, 但反萃取也成为该技术的难点, 限制了其工业应用。

3.2 离子液体萃取

离子液体萃取机理包括阴离子或阳离子交换和离子配对, 在实际的萃取过程中通常是多种萃取机理联合作用、相互关联的^[19]。Jin 等^[20]合成了 3 种新的磷基离子液体, 包括 TBEHPB、TOEHPB 和 TOUPB, 并首次用于 Pd(CN)₄²⁻的回收。结果表明随着阳离子中烷基链长度的增加, Pd(II)的萃取率增加。在最佳条件下, TOUPB 体系对 Pd(II)的萃取率大于 99.0%, 且在含铁和钴的混合溶液中对 Pd(II)表现出良好的选择性。离子液体萃取的选择性更强、萃取率更高, 但离子液体制备繁琐、价格较高且由于钯和离子液体间发生离子交换和离子配对, 使得离子液体难以实现重复使用。

3.3 固相萃取

Cellex-T、Amberlite IRA-400、Amberlite IRA-410、Dowex 1 和 Dowex 2 等材料都可以通过固相萃取从含氯酸性溶液中分离钯^[21]。Afzali 等^[22]通过两轴静电纺丝技术在优化的条件下制备了尼龙-66/5-(4-二甲氨基苯亚甲基)罗丹宁复合纳米纤维, 考察了溶液 pH、洗脱液种类及体积、接触时间等对固相萃取和解吸过程的影响, 结果表明当钯浓度为 5 g/L 时, 富集倍数可以达到 187.5。Hasegawa 等^[23]使用由 GL Sciences(日本东京)提供的 AnaLig PM 系列和 AnaLig PD 系列的柱填充固相萃取系统, 可以从酸性基质中选择性分离金、钯和铂, 该系统成功维持了 100 个周期的固相萃取操作。固相萃取能够较好的预富集少量样品中的痕量钯, 但是对于大量含钯废液、废水的应用较为困难。

4 吸附法

利用吸附法分离回收钯的作用机理主要有静电吸引、离子交换、络合/螯合作用。在应用时, 主要

挑选对钯具有良好亲和力的吸附材料, 例如活性炭、生物质材料以及树脂材料。

4.1 活性炭和生物质材料吸附

Wojnicki 等^[24]研究了活性炭对 PdCl₄²⁻配离子的吸附过程, 发现 Freundlich 吸附等温线模型更好地描述这一过程, 并且在 323K 下, 活性炭的表观吸附量为 67 mg/g。由于活性炭材料价格较高, 生物质吸附材料逐渐成为低成本和环境友好的替代品^[25]。通过将柿子单宁(PT)固定在 Fe₃O₄@SiO₂ 微球上, Fan 等^[26]制备了一种新型核壳纳米磁性生物基复合材料, 并利用该材料吸附回收 Pd(II), 当柿子单宁质量分数仅为 1.00 %时, Fe₃O₄@SiO₂@PT 对 Pd(II)的最大吸附量为 96.46 mg/g。Zhang 等^[27]以稻草为原料合成了一种低成本的生物吸附剂, 系统考察了 PdCl₄²⁻的初始浓度、吸附时间和盐酸浓度对吸附效果的影响, 结果表明, 该吸附剂对 PdCl₄²⁻的饱和吸附量为 122.49 mg/g, 平衡吸附时间为 60 min, 吸附符合 Langmuir 等温线模型和准二级动力学模型, 并且较低的盐酸浓度可以提高吸附的选择性。活性炭和一些生物质材料对废液/水中的钯具有一定的吸附能力, 但是吸附容量较低且选择性吸附的能力较弱, 从而影响了此类材料的工业应用。

4.2 离子交换树脂吸附

现阶段已经有较多的商用离子交换树脂用来分离铂、钯、铑等贵金属, 包括 Amberlite 树脂、Amberlyst 树脂、Lewatit 树脂、Purolite 树脂和 Dowex 树脂等。Nagireddi 等^[28]利用两种商品阴离子交换树脂 Lewatis TP-214 和 Amberlyst A21 从合成化学镀溶液中回收 Pd(II), 通过批量吸附实验考察了 pH 值、吸附时间、吸附剂投加量等因素对吸附效果的影响, Lewatit TP-214 树脂具有较好的吸附和解吸性能。Sayin 等^[29]设计了一种成本低、易合成的 1,3,5-三嗪五乙烯六胺(TAPEHA)树脂, 该树脂具有高耐酸性、高亲和力、高密度的胺和三嗪官能团, 将其应用于从含氯溶液中回收钯(II)离子, 发现吸附过程主要是通过配体交换机制进行的, 且 Pd(II)在 TAPEHA 颗粒上的单层吸附容量最高为 517.2 mg/g。贡洁等^[30]用硝酸钴和 2-甲基咪唑合成金属有机框架材料 ZIF-67, 将 PVDF 超滤膜经 PEI、ZIF-67 和 PAA 浸渍, 层层自组装制备得到 ZIF-67/PVDF 杂化膜。该杂化膜对钯具有较强的吸附能力, 可以多次反复使用。树脂材料在吸附法中应用广泛, 吸附容量高, 解吸性能好, 已在工业中广泛应用, 但仍存在着成本较高的问题。

5 生物法

生物法是通过细菌、病毒和植物等生物,通过生物氧化、生物还原、生物沉淀、生物浸出、生物混凝和生物复选等机理吸附回收废水中微量的贵金属^[31]。

5.1 细菌、真菌和藻类

细菌能够在受控条件下生长,在广泛的环境条件下保持稳定,以及可接受的吸附能力等特性使其成为一种有前途的吸附剂。而真菌最显著的优点是无致病性、大的键合能力和对金属的高吸附能力(由不同的官能团产生)和高选择性^[32],使得各种结构的真菌,包括单细胞酵母菌和形成的复合体(如菌丝体和多态真菌),都可用于贵金属回收。而高吸附能力、光合作用不产生毒素、不需要大量营养物质是藻类生物吸附剂的优点^[31]。Cui 等^[33]探讨了典型革兰氏阳性菌粪肠球菌(*E.faecalis*)对 Pd(II)的生物吸附机理,发现羧基、羟基和胺基是参与生物吸附的主要官能团,并且证实了静电相互作用、Pd(II)在细胞上形成络合物和胞内吸收是生物吸附的作用力,吸附的 Pd(II)的生物还原是通过甲酸钠的水解和氧化传递电子来实现的。Saitoh 等^[34]发现一种面包酵母(*Saccharomyces Cerevisiae*)可以在厌氧条件下,以甲酸盐为电子供体,60 min 内将 pH 7.0 的 Na_2PdCl_4 溶液中浓度为 1.0 mol/m^3 的 Pd(II)还原为 Pd(0)。Ju 等^[35]发现单细胞红藻(*Galdieria Suluraria*)可以通过生物吸附选择性地从金属废水中回收 90% 以上的金和钯,硫脲、盐酸和氯化铵等为洗脱溶液。利用细菌、真菌和藻类对废液、废水中的钯进行分离回收,仍处于理论研究阶段,离工程实际应用还有一段距离。

5.2 植物

植物修复是最新的金属回收方法之一。根据去除金属的机理,植物修复可分为植物提取、植物稳定、植物根际过滤、植物转化、植物刺激和植物挥发六大类^[36]。目前用于吸附水溶液中金、银和铂离子的研究较多^[37-39],而钯离子相对较少,更多的是利用植物吸附钯后进行功能性催化材料的制备。Garel 等^[40]描述芥菜、多花黑麦草可以通过根滤有效地积累钯,然后将其制备为生态催化剂。Harumain 等^[41]对适合田间应用的品种包括芥菜、芒果,以及 16 个柳树品种进行了试验,这些物种能够从合成尾矿和矿源尾矿中生长并吸收钯,但是这些物种中钯的积累水平低于商业上可获得的 3% 钯碳催化剂所

需的水平。植物生长条件较严苛,且修复周期长,吸附效率慢,难以满足对大量含钯废液和废水的快速处理。

6 结语

现阶段,已有许多用于废液和废水中回收钯的技术,包括化学沉淀法、溶剂萃取法、吸附法和生物法等,它们都存在或多或少的缺点,化学沉淀法只适用于高浓度含钯废水;溶剂萃取法易产生有机溶剂二次污染;吸附材料价格昂贵;生物吸附性能低等。针对某种特定的含钯废液和废水,根据各种方法的特点,以选择某种或多种技术来进行综合处理,改进已有技术的同时发展新技术和新材料是未来研究者的重心。

参考文献:

- [1] AN S, KIM Y I, JO H S, et al. Silver-decorated and palladium-coated copper-electroplated fibers derived from electrospun polymer nanofibers[J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 327: 336-342.
- [2] CHEN M, WU S, HUANG Z, et al. Separation and recovery of Pd(II) and Pt(II) from cyanide liquors of Pd-Pt flotation concentrate via solvent extraction[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2017, 92(7): 1699-1709.
- [3] FEDOROV S A, AMDUR A M. Review of man-made and secondary raw materials of platinum-group metals and their classification[J]. Metallurgist, 2021, 65(7/8): 808-814.
- [4] LIU H, NING S, ZHANG S, et al. Preparation of a mesoporous ion-exchange resin for efficient separation of palladium from simulated electroplating wastewater[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, 10: 106966.
- [5] XIE Q, LIANG G, LIN T, et al. Selective chelating precipitation of palladium metal from electroplating wastewater using chitosan and its derivative[J]. Adsorption Science and Technology, 2020, 38(3/4): 113-126.
- [6] 余翔, 张念椿, 刘彬云, 等. 纳米钯活化液的制备及其性质表征[J]. 贵金属, 2013, 34(2): 44-47.
- [7] YU X, ZHANG N C, LIU B Y, et al. Preparation and characterization of nano-palladium activator[J]. Precious Metals, 2013, 34(2): 44-47.
- [7] KIM D I, GWAK G, DORJI P, et al. Palladium recovery through membrane capacitive deionization from metal

- plating wastewater[J]. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 2018, 6: 1692-1701.
- [8] WU H, KUBOTA M, OSAWA N, et al. Adsorption and separation behavior of palladium(II) on a silica-based hybrid donor adsorbent from simulated high-level liquid waste[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2020, 326: 1323-1331.
- [9] WU P, LIU H, SUN M, et al. Covalent triazine frameworks for the selective sorption of palladium from highly acidic radioactive liquid wastes[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2021, 9: 27320.
- [10] SUNSANDEE N, PHATANASRI S, PANCHAROEN U. Separation of homogeneous palladium catalysts from pharmaceutical industry wastewater by using synergistic recovery phase via HFSLM system[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2021, 14: 103024.
- [11] YOUSIF A M. Recovery and then individual separation of platinum, palladium, and rhodium from spent car catalytic converters using hydrometallurgical technique followed by successive precipitation methods[J]. *Journal of Chemistry*, 2019, 9: 2318157.
- [12] UMEDA H, SASAKI A, TAKAHASHI K, et al. Recovery and concentration of precious metals from strong acidic wastewater[J]. *Materials Transactions*, 2011, 52(7): 1462-1470.
- [13] 王晶晶. 两步交联壳聚糖纤维对 Se(IV)、Pt(IV)、Pd(II) 的竞争吸附研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- WANG J J. Study on the competitive adsorption of Se(IV), Pt(IV) and Pd(II) onto two-step crosslinked chitosan fiber[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [14] SOYLAK M, TUZEN M. Coprecipitation of gold(III), palladium(II) and lead(II) for their flame atomic absorption spectrometric determinations[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 152: 656-661.
- [15] OZTURK N, BULUT V N, DURAN C, et al. Coprecipitation of palladium(II) with 1,5-diphenylcarbazite-copper(II) and determination by flame atomic absorption spectrometry[J]. *Desalination*, 2011, 270: 130-134.
- [16] HUANG Y, TONG Y, WANG C, et al. Solvent extraction of palladium(II) with newly synthesized asymmetric branched alkyl sulfoxides from hydrochloric acid[J]. *RSC Advances*, 2015, 5: 66376.
- [17] RUDIK I S, KATASONOVA O N, MOKHODOEVA O B. Separation of Pt(IV), Pd(II), and Rh(III) from chloride solutions by multistage extraction using nitrogen-containing extractants[J]. *Inorganic Materials*, 2019, 56(14): 1374-1378.
- [18] TRUONG H T, LEE M S. Separation of Pd(II) and Pt(IV) from hydrochloric acid solutions by solvent extraction with Cyanex 301 and LIX 63[J]. *Minerals Engineering*, 2018, 115: 13-20.
- [19] SCHAEFFER N, PASSOS H, BILLARD I, et al. Recovery of metals from waste electrical and electronic equipment (WEEE) using unconventional solvents based on ionic liquids[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2018, 48(13/15): 859-922.
- [20] JIN C, CHEN M, FAN M, et al. Hydrophobic phosphonium-based ionic liquids as novel extractants for palladium(II) recovery from alkaline cyanide solutions[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2021, 33, 116358.
- [21] KINSKA K, SADOWSKAM, KOWALSKA J, et al. Search for effective eluent for Pd separation on ion-exchange sorbent before voltammetric determination[J]. *Chemosphere*, 2021, 262, 127699.
- [22] AFZALI M, SHAMSPUR T, MOSTAFAVI A, et al. Electrospun nylon-66/5-(4-dimethylaminobenzyliden) rhodanine composite nanofibres for solid phase extraction of palladium ions from wastewater samples[J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2019, 99(4): 328-342.
- [23] HASEGAWA H, BARUA S, WAKABAYASHI T, et al. Selective recovery of gold, palladium, or platinum from acidic waste solution[J]. *Microchemical Journal*, 2018, 139: 174-180.
- [24] WOJNICKI M, SOCHA R P, PEDZICH Z, et al. Palladium(II) chloride complex ion recovery from aqueous solutions using adsorption on activated carbon[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2018, 63: 702-711.
- [25] GAO M, WANG Z, YANG C, et al. Novel magnetic graphene oxide decorated with persimmon tannins for efficient adsorption of malachite green from aqueous solutions[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2019, 566: 48-57.
- [26] FAN R, MIN H, HONG X, et al. Plant tannin immobilized Fe₃O₄@SiO₂ microspheres: A novel and green magnetic bio-sorbent with superior adsorption capacities for gold and palladium[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 364: 780-790.
- [27] ZHANG B, MA Z, YANG F, et al. Adsorption properties of

- ion recognition rice straw lignin on PdCl_4^{2-} : Equilibrium, kinetics and mechanism[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2017, 514: 260-268.
- [28] NAGIREDDI S, GOLDER A, UPPALURI R, et al. Role of protonation and functional groups in Pd(II) recovery and reuse characteristics of commercial anion exchange resin-synthetic electroless plating solution systems[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2018, 22: 227-238.
- [29] SAYIN M, CAN M, IMAMOGLU M, et al. 1,3,5-triazine-pentaethylenhexamine polymer for the adsorption of palladium(II) from chloride-containing solutions[J]. *Reactive & Functional Polymers*, 2015, 88: 31-38.
- [30] 贡洁, 陈文轩, 邹宇洲, 等. ZIF-67/PVDF 杂化膜的制备及其提取钯的性能研究[J]. *贵金属*, 2020, 41(4): 21-26.
- GONG J, CHEN W X, ZOU Y Z, et al. Study on preparation of ZIF-67/PVDF hybrid membrane and its Pd extraction performance[J]. *Precious Metals*, 2020, 41(4): 21-26.
- [31] GHOMIA A G, KOLUR N A, SHARIFIAN S. Biosorption for sustainable recovery of precious metals from waste water[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020, 8: 103996.
- [32] BINDSCHEDLER S, BOUQUET V, THI Q T, et al. Fungal biorecovery of gold from E-waste[M]// SARIASLANI S, GADD G M. *Advances in Applied Microbiology*. Academic Press, 2017: 53-81.
- [33] CUI J, ZHU N, KANG N, et al. Biorecovery mechanism of palladium as nanoparticles by enterococcus faecalis: From biosorption to bioreduction[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 328: 1051-1057.
- [34] SAITOH N, FUJIMORI R, YOSHIMURA T, et al. Microbial recovery of palladium by baker's yeast through bioreductive deposition and biosorption[J]. *Hydrometallurgy*, 2020, 196, 105413.
- [35] JU X, IGARASHI K, MIYASHITA S, et al. Effective and selective recovery of gold and palladium ions from metal wastewater using a sulfothermophilic red alga, *Galdieria sulphuraria*[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 211: 759-764.
- [36] MAHMOUD R H, HAMZA A H M. Phytoremediation application: Plants as biosorbent for metal removal in soil and water [C]// *Phytoremediation: Management of Environmental Contaminants*, vol 5, Springer International Publishing, Cham 2017: 405-422.
- [37] SHAH K R, TIPRE D R, DAVE S R. Characterization, kinetics and thermodynamics of Ag(I) sorption using novel sorbent: Dry wheatgrass[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2016, 18: 1202-1208.
- [38] ASZTEMBORSKA M, STEBOROWSKI R, KOWALSKA J, et al. Piotrowska accumulation of platinum nanoparticles by *Sinapis alba* and *Lepidium sativum* plants[J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2015, 226, 126.
- [39] PATIL Y, BHAT V, RAO P. An innovative model of managing silver metal from electronic scrap using a combination of chemical leaching followed by biosorption and biodegradation[J]. *Advanced Materials Research*, 2015, 1130: 697-700.
- [40] GAREL C, RENARD B, ESCANDE V, et al. C-C bond formation strategy through ecocatalysis: Insights from structural studies and synthetic potential[J]. *Applied Catalysis A: General*, 2015, 504: 272-286.
- [41] HARUMAIN Z, PARKER H, GARCIA A, et al. Toward financially viable phytoextraction and production of plant-based palladium catalysts[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51: 2992-3000.