

从二次资源中回收铱的研究进展^{*}

李冬云¹, 李骞¹, 董海刚², 姜涛¹, 徐斌¹, 杨永斌¹

(1. 中南大学 资源加工与生物工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 昆明贵金属研究所 稀贵金属综合利用新技术国家重点实验室, 云南 昆明 650106)

摘 要: 铱(Ir)是一种珍贵的铂族金属,在高新技术和军工技术领域中的应用十分广泛。我国金属铱的储量极其有限,含铱废料成为重要的铱资源,从这些二次资源中回收 Ir 的研究备受关注。本文对铱二次资源的来源进行了介绍,并对回收铱的方法如感应熔化、氧化蒸馏、化学沉淀、萃取、吸附等进行了详细的论述。感应熔化法、氧化蒸馏法等方法步骤繁琐、能耗高、回收效率低、污染环境,现今应用较少。化学沉淀法、萃取法、吸附法等方法简便、周期短,但其无法一步完成,需进行二次回收。要实现金属铱二次资源绿色可持续利用,生物法是一个重要的发展方向。

关键词: 铱;二次资源;物化法;生物法

中图分类号: TF834 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0076(2019)03-0173-06

DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2019.03.026

Research Progress in the Recovery of Iridium from Secondary Resources

LI Dongyun¹, LI Qian¹, DONG Haigang², JIANG Tao¹, XU Bin¹, YANG Yongbin¹

(1. School of Mineral Processing & Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2. Kunming Institute of Precious Metals, State Key Laboratory of New Technology for Comprehensive Utilization of Rare and Precious Metals, Kunming 650106, China)

Abstract: As a precious platinum group element, iridium (Ir) is widely used in the fields of high-tech and military technology. The reserves of the metal iridium in China are extremely limited and the waste containing iridium has become an important resource of iridium. Therefore, the study of recovering Ir from these secondary resources has attracted much attention. In this paper, the secondary resources of iridium were introduced, and the methods of recovering iridium such as induction melting, oxidation distillation, chemical precipitation, extraction, adsorption and so on were discussed in detail. Due to the cumbersome steps, high energy consumption, low efficiency, and environmental pollution, methods such as induction melting and oxidative distillation were less used today. Although chemical precipitation, extraction, adsorption and other methods were simple and short, they could not be completed in one step, which meant the secondary recovery was needed. From this, bio-method will be an important development direction which can realize the sustainable use of Ir in secondary resources.

Key words: iridium; secondary resources; biological process

* 收稿日期: 2019-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(51574284); 云南省科技计划项目(2018ZE001)

作者简介: 李冬云, 女, 在读硕士研究生, 研究方向: 生物冶金, E-mail: 1258456385@qq.com。

通信作者: 李骞, 男, 博士, 教授, 研究方向: 复杂矿综合利用, E-mail: csuliqian@126.com。

1 前言

铂族金属[Pt(铂)、Pd(钯)、Rh(铑)、Ir(铱)、Ru(钌)、Os(锇)]由于具有某些独特和卓越的物理化学特性如高熔点、高化学稳定性、高强度、良好的延展性、抗氧化性、耐腐蚀性、高催化活性以及良好的导电性,而广泛应用于微电子、电极材料、光电材料、燃料电池、气敏元件、航空航天等高新技术和军工技术领域,被誉为现代工业的“维它命”^[1]。而就目前探明的铂族金属,世界储量的99%都集中在南非、美国、加拿大、俄罗斯、澳大利亚等国。2014年全球铂族金属总供应量为535.8 t,其中30.7%来自二次资源回收^[2]。我国铂族金属(PGMs)矿产储藏资源极其贫乏,远景储量仅350 t,仅占世界工业总储量的0.77%,远景储量的0.44%,产出甚微,仅为2.5 t/a^[2,3]。我国铱矿储藏主要分布在甘肃、云南、四川、黑龙江、河北和新疆等省区^[4],主要富集在甘肃金川铜镍硫化物矿床(元素Ir含量为 $0.7 \times 10^{-9} \sim 67.7 \times 10^{-9}$)^[5]、云南大红山铁铜矿床(元素Ir含量为 $0.7 \times 10^{-8} \sim 2.3 \times 10^{-8}$)^[6]、云南滇西金宝山富铂钯岩体岩浆源区(元素Ir含量为 0.7×10^{-9})^[7]、四川攀西地区铂族金属矿床(元素Ir背景值为0.0698 $\mu\text{g/g}$)^[8]等矿区。

据相关统计数据显示,我国2018年产汽车2 780.92万辆,按每辆汽车需新催化剂1~2 kg计算,未来五年,随着汽车的更新换代,每年更换的废催化剂有3~5万t,铂族金属的二次资源量有40~65 t^[3,9]。另外铱在电致发光材料、均相催化剂和金属有机化学气相沉积(MOCVD)的前驱体化合物的合成中充当非常重要的角色,而合成的这些前驱体化合物又是精细化工和表面工程中不可或缺的部分^[10]。

随着我国工业水平的不断提升,铱的应用需求量只会不断上升,从二次资源中回收铱使金属铱得到有效的循环利用既可以节约铱资源、提高铱资源的利用率,又可以减少进口量,降低生产成本。

2 铱二次资源的主要来源

铱二次资源主要为废的铱配合物和废的铱催化剂以及生产铱配合物和铱催化剂过程中产生的含铱废料,如淘汰的磷光铱配合物、纳米铱催化剂、铱涂层^[11]和保护膜层等;另外工业中废弃的铱有机化合物或聚合物,如失活失效的1,5-环辛二烯铱、1,5-

环辛二烯氯化铱二聚体等也是铱废液的重要来源。

2.1 铱配合物

铱配合物可以分为固态和液态,固态主要为铱磷光配合物,分为中性铱磷光配合物和离子型铱磷光配合物两大类;液态铱配合物主要为乙酰丙酮铱、乙酰丙酮铱二聚体等有机铱化合物。

铱磷光配合物:近些年,铱磷光配合物已经发展成为性能最优异的电致发光材料。其中中性铱磷光配合物已经在OLED产业中得到了应用,同时离子型铱磷光配合物成为有机光电分子材料中的明星分子^[12-14]。而在合成这些配合物的过程中会生成大量的含铱副产物。马晓宇等^[15]设计合成绿色磷光铱(III)配合物Ir(MDP)₂(PMP)和Ir(MDP)(PMP)₂的过程中3.53 g水合三氯化铱参与反应,最终合成配合物C₄₈H₃₈IrN₃ 2.54 g,铱的有效利用率只有27%,整体收率只有50%。所以绝大部分的水合三氯化铱在反应过程变成了含铱废料。Nazeeruddin, M. K.等^[16,17]合成橙红色配合物C₃₉H₃₅F₆IrN₅OP、C₃₈H₃₁F₆IrN₅OP和C₄₁H₃₀F₆IrN₆OP的过程中其合成收率分别为41%、61%和69%,纯化过程中损失的配合物以及生成的铱副产物等废料中含有的铱占参与反应底物铱总量的30%~60%左右。Frey, J.等^[18]利用[Ir(ppy)₂(acac)]和[Ir(diFppy)₂(acac)]合成化合物[Ir(ppy)(diFppy)(acac)]₂的过程中收益仅为44%,两种反应底物的合成产率为80%左右。故在此总反应过程中仍有大量的铱流入废料。

乙酰丙酮铱:在四氢呋喃介质中合成,1,5-环辛二烯氯化铱(I)二聚体([Ir(cod)Cl]₂)与乙酰丙酮加热回流,一步合成了1,5-环辛二烯(乙酰丙酮)铱(I)[Ir(acac)(cod)]^[19],其合成率为88.6%,所以合成过程中产生了含铱的副产物,及铱废液。

2.2 铱催化剂

工业中常用的铱基催化剂有纳米铱、醋酸铱等,所以铱催化剂领域的铱二次资源主要来源于纳米铱和醋酸铱。

纳米铱:化学反应的速率在工业水平上控制着经济的命脉,铱基催化剂能够用于水的裂解、启动新的反应、检测、吸附材料和燃料电池等,铱也是生产智能催化剂的最佳原料^[20]。现在Ir纳米材料的催化活性已被用于航天航空、尾气处理以及化学反应

的选择性催化等方面^[21]。纳米铱催化剂应用过程中金属铱会有所损耗,提高反应速率的同时也会不断产生铱废料^[22]。

醋酸铱:别名乙酸铱,主要用作化工(煤、石油、醋酸等)领域中的活性催化剂。醋酸铱是甲醇羰基化生产醋酸中最有发展前景的活性催化剂^[23]。西安瑞鑫科金属材料有限责任公司^[24]发明了一种一步反应合成醋酸铱的方法,使醋酸铱的转化率从传统方法的50%左右上升到95%左右,产品的纯度也大大提高,但是反应过程中还是有4%左右的铱进入到废液中,产业化生产时含铱废液就会大量产生。

2.3 耐高温耐腐蚀性保护膜层

迄今为止,金属铱是被人类发现的自然界存在的密度最高的铂族金属元素,金属铱在高温条件下具有抗氧化和耐腐蚀的性能,所以常用作耐高温耐腐蚀性材料-保护膜层,如航空航天发动机和导弹巡洋舰上的核心部件(如涡轮叶片、喷嘴等)以及汽车及其它气体涡轮增压发动机的高温结构件表面等^[25]。我国国防实力不断增强,铱在航空、航天、航海等高新技术领域应用前景更加广阔^[26]。但是随着涡轮叶片、喷嘴等核心部件的老化、更换、淘汰,铱二次资源便累积得越多。

3 铱的回收方法

目前,金属铱二次资源的分离回收方法主要分为火法与湿法^[9]。固相中金属铱主要用火法富集,其方法有:感应熔化法、焚烧、焙烧、微波法、还原法等;而液相中铱离子分离主要通过湿法获取,其主要方法有:离子交换法^[27]、化学沉淀法^[28]、电渗析法、氧化蒸馏法、萃取法和吸附法等。

3.1 感应熔化法

感应熔化法是一种在真空条件下进行金属与合金熔炼的特种熔炼技术。可以使得几种可选择的金属或合金与铱渣熔合,然后通过酸浸或碱浸能得到纯铱粉。

从硬金属废料中回收铱的工艺中应用了感应熔化法使铱与铜或铝在真空感应炉中熔融成铱合金^[29]。然后用酸或碱处理分离得到了直径2~50 μm的精细铱粉。用铜/铝与铱熔融回收铱回收率较高,但含铝的铱粉会发生化学吸附,吸入大量的氧,氧会与铝粉末结合形成亲铱的 Al_2O_3 ,所以由此

反应得到的铱粉末在各种压力下加热时具有强烈不稳定性,易爆。

布·赫什马特鲍尔等^[30]从废料和残渣中回收铱,通过研究合金的硬度、柔软性和其在酸中的浸出速率及最终所得铱粉的粒度和纯度,发现Mn-(10-30)Ir和Mn-20Cu-20Ir合金是铱渣的比较好的溶剂。Mn-Cu-Ir合金很软,并产生纯度为95%左右的铱粉。Mn-Ir合金稍硬且脆,但产生纯度为98%~99%的细铱粉(-10目)。

感应熔化法处理回收铱的优势在于简化了后续加工工艺,降低水化精炼的成本,而且能够产生较细较纯的铱粉;而其缺点就是要求高温,在高温熔融过程中铱会挥发造成绝对损失,同时也会对环境造成污染。

3.2 氧化蒸馏法

氧化蒸馏法主要通过向蒸馏反应容器中的水浸液和渣中加入酸调节pH值,然后加入强氧化剂(如硝酸等)进行蒸馏反应,溶液中的某些成分会被氧化生成蒸气,实现分离。

浙江特力再生资源有限公司^[31]发明了一种回收利用铱铑矿中贵金属的方法,主要技术工艺为原料调配高温碎化(铱铑矿、锌、铝混合碎化构成原料)→酸浸(去除贱金属)→碱熔水浸→氧化蒸馏除铑和钨(加入硝酸,氢氧化钾吸收四氧化铑蒸汽;加氯酸钠,盐酸吸收四氧化钨蒸汽)→铱的提纯,滤液浓缩(氯化铵-水合肼-硫化铵-双氧水-硝酸-氯化铵依次处理)→合格氯铱酸铵沉淀→过滤烘干。其回收过程中应用了多种分离方法,但主要应用的是氧化蒸馏法。

氧化蒸馏法的优点是进行多次蒸馏过滤,提高了回收率和纯度;但其缺点就是氧化蒸馏步骤繁琐,耗时长,药品消耗多,能耗高,而且得与其他分离方法协同操作,无法独立完成铱的回收。

3.3 化学沉淀法

化学沉淀法是一种利用离子水解法或难溶盐沉淀法进行溶液组分分离和富集的方法。主要是向待处理废液中投加某些化学物质,使它和废液中欲去除的成分发生直接的化学反应,生成难溶于水的沉淀物过滤除去而达到分离的效果。

贺小塘等^[32]在从铂-铱合金废料中回收铂铱的新工艺中采用2种氧化剂并分两步氧化,通过控制调控氧化电位,使铱的沉淀率达到了98%。因为

离子交换后铂铱溶液中四价铱不稳定,部分被还原成三价铱形成 Ir(III) 和 Ir(IV) 的一种动态平衡,所以氧化过程中使用了 H_2O_2 和 HNO_3 两种氧化剂,氧化还原电位保持在 1 000 mV,先用 H_2O_2 进行氧化,然后用 HNO_3 氧化,既没有引入新的金属离子,又便于后续添加氯化铵沉淀铱。

化学沉淀法的优点是操作简便、反应快、周期短;但同样存在缺点就是对料液离子浓度要求较高,料液浓度不能过高或过低。

3.4 萃取法

萃取法是利用物质在互不相溶的两溶剂体系中溶解度的差异,利用金属铱与萃取剂结合生成易溶于有机溶剂的螯合物而把铱从水相转移到有机相中,以达到分离或富集的目的。常见的金属铱萃取剂有含磷萃取剂和胺类萃取剂。含磷类萃取剂主要有磷酸三丁酯(TBP)^[33,34,35]、三辛基氧化膦(TOPO)^[36,37]、三烷基氧化膦(TRPO)^[38]和三苯基氧化膦(TPPO)等,胺类萃取剂主要有伯胺、仲胺、叔胺和季胺盐等。

王永录^[39]在贵金属研究所冶金研究五十年中总结铱早期的萃取分离主要用 TBP,后改用 TOPO、TRPO 等。利用 P204 选择性萃取可以除去贱金属,然后用 TRPO 萃取,有机相再经 NaOH 反萃,接着通过 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 净化和氯化铵沉淀,最后煅烧还原得铱粉。铱精矿溶解液则改用 N235 萃取除贵金属杂质,然后添加氧化剂进行氧化水解,使溶液中的铱转化为四价态,接着用 N235 萃取 Ir(IV) 最后通过反萃和沉淀便得到了纯度为 99.95%~99.99% 的 Ir。

付光强等^[40]在贵金属二次资源回收技术现状及展望中提到利用 N-n-辛基苯胺二甲苯溶液萃取 Ir(III) ,调节溶液 pH 值至 8.5 便可以实现 98% 以上的萃取率,实现铱的高效回收。

萃取法的优点是可以在萃取级数少的情况下获得高萃取率,而且萃取的设备简单、操作便捷、具有选择性,易于实现自动化。但是萃取法的缺点就是要求料液浓度不能太高,而且铱的反萃取率只能达到 90%^[41]。

3.5 吸附法

吸附法是一种通过使用天然或人工合成的特定的吸附剂从废液中吸附分离出欲分离的一种或几种成分,从而达到分离目的的方法。

王进华^[42]等发明一种用于吸附铱的含磷多孔材料,将含磷多孔材料放入铱浓度为 1 至 10 000 ppm 的废液中进行吸附。能够将废液中的铱含量吸附至 1 ppm 以下。与现有的大多数吸附树脂相比较,含磷生物物质经过碳化之后可以在有机溶剂体系进行吸附,且能够从多种贵金属混合液中实现对金属铱进行选择性吸附,然后再通过碱洗脱附。但脱附不彻底,需对吸附铱后的含磷多孔材料焚烧灰化进行金属铱的二次回收。

吸附法的优点是操作便捷、环保、具有选择性;但其缺点就是料液浓度不能太高,无法一步完成,且无法彻底脱附,需进行二次回收。

3.6 生物法

生物法分为生物浸出和生物吸附,生物浸出是利用微生物分解掉二次资源中的废弃成分,然后再利用微生物或其代谢产物与溶液中的金属发生氧化、还原、吸附等反应,将待回收金属转化成易回收状态,从而实现分离回收。生物吸附是利用生物物质上的某些官能团与金属阴阳离子发生络合或离子交换作用而达到吸附分离的效果。

英国伯明翰大学研究了电子废料中贵金属的回收。他们最初将电子废料浸在硝酸和盐酸的混合溶液中,然后通入装有细菌的反应器,金属会逐渐沉积在细菌细胞壁上,通过分离细菌便可以回收金属,与一般化学回收方法相比,温度要求低,药品消耗小,速度提高了 50%,回收效率也达到了 90% 左右,回收到的铂族金属纯度更高。接着应用联合技术,将湿法冶金、电化学和生物电化学相结合实现一次反应同步回收贵金属、铜和焊锡,且不需要二次分离。相比于火法冶金回收工艺,生物法不仅耗能少,而且不会造成高温使铅等重金属离子挥发入空气中污染环境^[43]。

日本小西康裕研究团队提出,Shewanella 细菌具有很强的还原和吸附铂族金属离子的能力。对这些功能加以利用,可以创制出常温下高速、高效回收铂族金属的装置。Shewanella 细菌可以在常温常压下进行吸附还原,非病原菌,对人体无害,易培养,成本低,且不会污染环境^[44]。

生物法的优点是操作简便,且高效、节能、环保;但其不足就是其研究集中在金属铂跟金属钯的回收上,而在铱等金属的回收方面应用报道较少。

4 总结与展望

(1) 铂族金属铱作为地球地壳中最稀有的元素之一,现铱矿产资源无法满足市场需求。因此从二次资源回收铱可扩大铱的来源,调节铱的供需矛盾。

(2) 国内在铱二次资源回收方面主要采用物理、化学法。感应熔化法、氧化蒸馏法等由于操作复杂、步骤繁琐,能耗高、耗时长,药品消耗多,且回收效率不高、污染环境、可持续性也不强,现今应用较少。化学沉淀法、萃取法、吸附法等方法简便、周期短、符合环保要求,目前应用较多,不过其对料液离子浓度要求较高,无法一步完成,需进行二次回收。

(3) 生物法具有效率高、成本低、能耗少、污染小等众多优点在其它铂族金属回收方面崭露头角,若将能分解或降解废水中有机物的新功能菌应用于含铱废料中铱的回收,铱二次资源的利用率将大大提升,我国铱资源进口压力也能得到有效缓解,并实现真正意义上的可持续利用。

参考文献:

- [1] 常桥稳,刘伟平,张妮,等. 乙酰丙酮铂族金属有机配合物的合成现状及用途[J]. 贵金属,2009,30(01):63-68,77.
- [2] 赵雨. 资源有限循环无限——贵研资源公司积极推进贵金属资源再生产业健康可持续发展[J]. 中国有色金属,2016(8):62-63.
- [3] Reviews of metallurgical technology to recovery platinum group metals from secondary resource in China[J]. Precious metals, 2012, 33(S1): 18-23.
- [4] 张蓼. 世界铂族金属矿产资源及开发[J]. 矿产勘查,2010,1(2):114-121.
- [5] 曾认宇,赖建清,毛先成,等. 金川铜镍硫化物矿床铂族元素地球化学差异及其演化意义[J]. 中国有色金属学报,2016,26(1):149-163.
- [6] 吴愧,李佑国,金廷福,等. 扬子地块西南缘大红山 IOCG 矿床中铁矿石铂族元素研究[J]. 四川有色金属,2017(3):47-50.
- [7] 卢宜冠,和文言. 滇西金宝山富铂钯岩体岩浆源区研究:铂族元素和 Sr-Nd 同位素约束[J]. 地学前缘,2018,25(6):196-208.
- [8] 赵支刚,刘俊思,杨大宏,等. 四川攀西地区铂族金属矿床成矿地质条件及找矿前景[J]. 四川地质学报,2005(3):141-146.
- [9] 贺小塘,郭俊梅,王欢,等. 中国的铂族金属二次资源及其回收产业化实践[J]. 贵金属,2013,34(2):82-89.
- [10] 贺小塘,刘伟平,吴喜龙,等. 从有机废液中回收铱的工艺[J]. 贵金属,2010,31(2):6-9.
- [11] Yuping Wu, Zhaofeng Chen, Yong Liu. Iridium coating deposited by double glow plasma technique - effect of glow plasma on structure of coating at single substrate edge [J]. Plasma science and technology, 2012, 14(10): 909-914.
- [12] 陈力,晏彩先,常桥稳,等. 离子型黄光铱磷光配合物的合成、结构及光物理性能研究[J]. 贵金属,2018,39(4):18-24.
- [13] 晏彩先,侯文明,李杰,等. 阳离子型铱配合物的合成、表征及光物理性能测试[J]. 功能材料,2018,49(11):11209-11214.
- [14] 晏彩先,李艳琼,李杰,等. 新型铱配合物的合成[J]. 合成化学,2018,26(12):927-929.
- [15] 马晓宇,梁洁,叶玲,等. 混合配体型铱(III)配合物的合成及电致发光性能[J]. 高等学校化学学报,2018,39(10):2129-2135.
- [16] Nazeeruddin, M. K., Scopelliti, R., Shavaleev, N. M., et al. Phosphorescence of iridium(III) complexes with 2-(2-pyridyl)-1,3,4-oxadiazoles[J]. Inorganica chimica acta, 2013, 394: 295-299.
- [17] Nazeeruddin, M. K., Scopelliti, R., Shavaleev, N. M., et al. How to blue-shift phosphorescence color of iridium(III) complexes[J]. Inorganica chimica acta, 2013, 396: 17-20.
- [18] Frey, J., Tavernelli, I., Gritzel, M., et al. Acid-induced degradation of phosphorescent dopants for OLEDs and its application to the synthesis of tris-heteroleptic iridium(III) bis-cyclometalated complexes[J]. Inorganic chemistry, 2012, 51(1): 215-224.
- [19] 侯文明,李艳琼,陈兴飞,等. 1,5-环辛二烯(乙酰丙酮)铱(I)的合成及结构表征[J]. 贵金属,2017,38(S1):124-126.
- [20] Imran Ali, Khalaf AlGhamdi, Fahd T. Al-Wadaani. Advances in iridium nano catalyst preparation, characterization and applications[J]. Journal of molecular liquids, 2019(280): 274-284.
- [21] 崔玛琳. 贵金属铱纳米材料的制备、性质及其在分析检测领域的应用研究[D]. 无锡,江南大学,2017.
- [22] 苏州大学. 一种催化光控原子转移自由基聚合的铱盐催化剂的分离回收方法:201711144163.7[P]. 2018-04-17.
- [23] 郑修成,张守民,黄唯平,等. 甲醇羰基化制醋酸铱基催化剂体系的研究[J]. 有机化学,2003(6):613-618.

- [24] 西安瑞鑫科金属材料有限责任公司. 一种醋酸铱的合成方法:201810265727.0[P]. 2018-08-17.
- [25] 王玉天. 化学气相沉积用铂、铱金属有机化合物的合成及其应用研究[D]. 昆明, 昆明理工大学, 2016.
- [26] 潘水艳. MOCVD 制备铱膜层工艺研究[D]. 长沙, 国防科学技术大学, 2004.
- [27] Anna Wolowicz, Zbigniew Hubicki. Polyacrylate ion exchangers in sorption of noble and base metal ions from single and tertiary component solutions[J]. Solvent extraction and ion exchange, 2014, 32(2): 189-205. DOI: 10.1080/07366299.2013.838494.
- [28] 申月娇. 含铱废料的综合回收工艺[J]. 中国资源综合利用, 2012, 30(6): 31-32.
- [29] 章爱铀. 从硬金属废料中回收铱的工艺[J]. 金属再生, 1991(5): 23-25.
- [30] 布·赫什马特鲍尔, 许孙曲. 从废料和残渣中回收铱[J]. 矿产保护与利用, 1986(2): 47-50.
- [31] 浙江特力再生资源有限公司. 一种铱铑矿中贵金属回收利用方法:201810979518.2[P]. 2018-12-21.
- [32] 贺小塘, 韩守礼, 吴喜龙, 等. 从铂-铱合金废料中回收铂铱的新工艺[J]. 贵金属, 2010, 31(3): 56-59.
- [33] 赵西丹, 卢艳敏, 杨延钊. 微乳液萃取铱的研究[J]. 山东大学学报(理学版), 2010, 45(9): 109-112.
- [34] 用磷酸三丁酯浸渍树脂从硝酸介质中提取铱(VI)[J]. 中国有色金属学报(英文版), 2012, 22(1): 206-214. DOI: 10.1016/S1003-6326(11)61162-X.
- [35] Xidan Zhao, Yanmin Lu, Yanzhao Yang. The extraction of gallium by microemulsions[C]. School of chemistry and chemical engineering, Shandong University, Jinan, P. R. . 2008: 1-8.
- [36] 曹钊蓉, 张维霖, 阮孟玲. 溶剂萃取分离 Rh、Ir 的新方法[J]. 贵金属, 1981(3): 1-10.
- [37] 马亮帮, 宁丽荣, 范必威, 等. 氯化亚锡活化-TOPO 溶剂萃取分离铑铱及机理研究[J]. 分析测试学报, 2009, 28(4): 483-488. DOI: 10.3969/j.issn.1004-4957.2009.04.024.
- [38] 周丽, 李明玉. TRPO-TBP 混合体系对碱性氰化液中金的萃取[J]. 矿冶工程, 2010, 30(3): 86-89, 92. DOI: 10.3969/j.issn.0253-6099.2010.03.023.
- [39] 王永录. 贵金属研究所冶金研究五十年[J]. 贵金属, 2012, 33(3): 48-64, 72.
- [40] 付光强, 范兴祥, 董海刚, 等. 贵金属二次资源回收技术现状及展望[J]. 贵金属, 2013, 34(3): 75-81.
- [41] 李耀星, 张邦安. 从溶液中萃取分离 Pt、Pd、Ir 和 Rh 的试验研究[J]. 中国资源综合利用, 2011, 29(3): 19-21.
- [42] 王进华, 邓生财, 侯建峰. 一种吸附铱的吸附剂及脱附方法:108579695A[P]. 2018-09-28.
- [43] 林晓, 曹宏斌, 李玉平, 等. 电子废料中的贵金属回收技术进展[J]. 现代化工, 2006(6): 12-16.
- [44] 利用微生物回收稀贵金属[J]. 金属功能材料, 2017, 24(6): 62.

引用格式: 李冬云, 李骞, 董海刚, 等. 从二次资源中回收铱的研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(3): 173-178.

LI Dongyun, LI Qian, DONG Haigang, et al. Research progress in the recovery of iridium from secondary resources[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2019, 39(3): 173-178.

投稿网址: <http://kcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn