

## 含铱废料回收技术研究进展

段顺飞, 赵家春, 吴跃东, 童伟锋, 董海刚\*

(昆明贵金属研究所, 贵研铂业股份有限公司 稀贵金属综合利用新技术国家重点实验室, 昆明 650106)

**摘要:** 铱由于其物理、化学性质稳定, 被广泛应用于航空、电子、催化等高新技术行业, 铱二次资源回收意义重大。基于对 40 多篇文献的分析, 介绍了含铱废料的来源, 综述了从不同废料中回收提纯铱的工艺, 从铱金属和合金废料中回收铱包括溶解和精炼等工序, 溶解的方法主要有碎化活化溶解, 碱熔融预处理等; 精炼的工艺主要有沉淀法、离子交换法、萃取法、氢还原法、高温氧化挥发法等。根据原料成分以及对铱纯度的要求, 各种除杂的方法可以联合使用。

**关键词:** 铱; 富集回收; 提纯

**中图分类号:** TF834 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2021)02-0093-06

### Research progress on recovery technology of iridium containing waste

DUAN Shun-fei, ZHAO Jia-chun, WU Yue-dong, TONG Wei-feng, DONG Hai-gang\*

(Kunming Institute of Precious Metals, State key Laboratory of Advanced Technology of Comprehensive Utilization of Platinum Metals, Sino-platinum Metals Co. Ltd., Kunming 650106, China)

**Abstract:** Iridium is widely used in aviation, electronics, catalysis and other high-tech industries because of its stable physical and chemical properties. The secondary resource recovery of iridium is of great significance. Based on the analysis of more than 40 literatures, the secondary resources of iridium-containing materials were introduced, and the processes of recovering and purifying iridium from different waste materials were reviewed. The recovery of iridium from iridium metal and alloy wastes includes dissolution and refining methods. The dissolution methods mainly consists of crushing, activation and dissolution, alkali melting pretreatment, etc. The refining processes mainly include precipitation, ion exchange, extraction, hydrogen reduction, high-temperature oxidation volatilization method, etc. According to the composition of raw materials and the requirements of iridium purity, various impurity removal methods can be used in combination.

**Key words:** iridium; enrichment and recovery; purification

铱是铂族金属之一, 在地壳中的仅含千万分之一, 我国储量尤其稀少<sup>[1-2]</sup>。铱化学性质非常稳定, 是铂族金属中最耐腐蚀的金属; 其熔点高达 2410°C, 在空气中加热到 2000°C 也不会被氧化<sup>[3]</sup>。铱及其合金、化合物主要应用在工业催化, 热电偶, 触点材料, 铱坩埚, 保护涂层材料<sup>[4]</sup>, 电致发光材料等<sup>[5]</sup>, 广泛应用于航空、航天、电子等领域。由于铱的化学性质十分稳定, 几乎不溶于所有的无机酸, 并且

能在熔融硅酸盐或者其他熔融金属中保持稳定<sup>[6]</sup>, 经活化处理后的海绵状铱能缓慢地溶解于热王水中, 致密紧实的铱在沸腾的王水也不会遭到腐蚀<sup>[7]</sup>。国内铱矿产资源十分有限, 从废料回收提纯铱, 在经济发展、科学研究、环境保护等方面都具有重大意义。基于对 40 余篇文献的分析, 本文对含铱废料的来源、从不同二次资源物料中回收铱的技术, 并对不同处理工艺的特点进行分析。

收稿日期: 2020-11-03

基金项目: 云南省重大科技专项(202002AB080001, 2018ZE001)

第一作者: 段顺飞, 男, 硕士研究生, 研究方向: 贵金属冶金。E-mail: 1592138653@qq.com

\*通信作者: 董海刚, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 稀贵金属冶金。E-mail: donghaigang0404@126.com

## 1 含铱废料的来源及分类

铂族金属在高新技术产业、军工、航天航空等尖端技术领域虽然用量不大,但却起着不可或缺的作用<sup>[8]</sup>。铱的废料来源十分广泛,凡是在加工或者是使用过程中,都有可能产生废料。含铱废料的的存在形式主要有:

1) 金属和合金废料。包括废铱坩埚,耐高温涂层材料,电接触材料,汽车发动机火花塞点火电极等,多为被其他元素污染的合金,或者断裂、报废的元器件,加工过程产生的边角废料等<sup>[9]</sup>。

2) 含铱催化剂。铱基催化剂主要应用在制备肼分解催化剂<sup>[1, 10-12]</sup>和不饱和碳烃化合物加氢、脱氢、裂解反应的催化剂<sup>[1, 13-17]</sup>。近些年来, IrPt、IrRh、PtSnIr、IrSn 等复合纳米催化剂被逐渐开发<sup>[17]</sup>,并用于催化甲酸、乙醇、氨的氧化。催化剂最大的一个问题就是其稳定性和任何催化活性下降都将导致催化剂失去催化活性,在使用过程和生产过程中都会产生大量的含铱废料。

3) 含铱有机废液。铱有机化合物应用广泛,甲醇羰基化制醋酸的催化剂醋酸铱<sup>[18]</sup>、化学气相沉积法制作镀层保护材料的乙酰丙酮铱<sup>[19]</sup>、有机发光二极管(OLED)领域的磷光铱配合物<sup>[20]</sup>等。铱的有机配合物合成产率不高,在生产过程中会有大量的含铱有机废料<sup>[21]</sup>。

## 2 金属和合金废料中铱的回收

从金属和合金中回收铱的流程包括废料溶解和精炼等步骤。铱金属及其合金溶解的方法有贱金属碎化活化、碱熔融预处理、电化学溶解等<sup>[22]</sup>。从溶液中净化和提纯铱的方法有沉淀法、离子交换法和萃取法等。碎化活化、碱熔融处理工艺比较成熟,应用比较广泛。

### 2.1 铱金属废料的回收

布·赫什马特鲍尔等<sup>[23]</sup>用感应熔化法,将几种可选择的金属或合金按不同配比,与铱渣废料熔炼成不同的熔体,如 Ni-Ir、Cu-Ir、Mn-Cu-Ir 等合金;再用酸溶去除贱金属,得到粗铱粉。此类方法称为“合金碎化法”。

布·赫什马特鲍尔等分别从合金硬度、延展性、熔点、铱的回收率、产物粒度等方面比较系统的比较了不同金属及合金作碎化剂的优劣势。研究发现

Mn-(10~30Ir)、Mn-20Cu-20Ir 合金是比较好的溶剂。Mn-Ir 合金易溶于盐酸,盐酸溶解锰比较彻底,酸溶后得到纯度为 98%~99%的粒度较细的铱粉。Mn-Cu-Ir 合金经酸溶后得到的铱粉粒度均匀,纯度为 95%左右。Mn-Ir 合金、Mn-Cu-Ir 合金熔点较低,形成的熔体易溶于稀盐酸并且产生粒度均匀的精细铱粉,简化了后续精炼的步骤。

张邦安<sup>[24]</sup>等从含铱 70%的废铱坩埚中回收铱,先将铱坩埚粉碎成颗粒状或片状物料,分别用铈、锡、铝作碎化剂熔炼。实验表明用铝作碎化剂,酸溶除铝后溶解效果好。熔体急冷后用无机酸溶去贱金属,余下的不溶物再用王水浸出,铱浸出率只有 30%左右;不溶物再配入适量过氧化钠熔炼,碱熔融后铱浸出率可达到 90%以上,不溶渣可再次返回碱熔融处理。合并两次王水浸出液,采用化学沉淀法除杂。用氯化铵沉淀出铱,再将氯铱酸铵还原成易溶于水的氯亚铱酸铵,用硫化铵沉淀除杂,得到纯净的氯铱酸铵晶体。经煅烧,氢还原后得到纯度大于 99.95%的铱粉。铱直收率大于 85%,总回收率大于 95%。

赵家春等<sup>[25]</sup>从含铱废料直接制备高纯铱粉。将粉状含铱废料配入一定量的过氧化钠与氢氧化钠在 750℃下焙烧 3 h,水浸去除钠盐和贱金属杂质,再用王水浸出获得氯铱酸溶液,经氯化铵沉淀、硫化铵净化后获得纯净的氯铱酸铵溶液,再次加入氯化铵得到氯铱酸铵,经煅烧、氢还原、酸洗、水洗后得到纯度大于 99.999%的高纯铱粉。

因采用碎化剂活化会引入新的贱金属杂质,后续精炼常采用经典的氯化铵沉淀除去贱金属,除杂工序需要反复多次操作,比较复杂。一些清洁高效的溶解技术如电化学溶解、微波加压溶解<sup>[26]</sup>不会引入杂质,可以降低后续除杂的成本。但目前这些溶解技术尚处在实验室阶段,因处理量太小、溶解缓慢没有实现产业化应用。张健等<sup>[27]</sup>采用交流电化学溶解铂铱合金,将合金片制成电极,在盐酸介质中使电流密度保持在 2 A/cm<sup>2</sup>进行电化溶解。朱利亚等<sup>[28]</sup>用微波密闭消解处理铈、铱粉,用盐酸加硝酸或双氧水为消解剂,微波消解处理 1 h 左右,铈、铱溶出率可达 100%,但处理量小只用于化学分析。

### 2.2 铂铱合金废料的回收

李富荣<sup>[29]</sup>从铂铱合金中回收分离铱。将铂铱合金用锡碎化后用王水溶解转入溶液,赶硝后用氢氧化钠调节 pH=3~4,再用水合肼还原得到铂黑粉末,铱则留在溶液中,铂与铱初步分离。再用氯化铵沉

淀出溶液中的铱与少量的铂,利用  $\text{Ir}^{3+}$  和  $\text{Ir}^{4+}$  可以在一定条件下相互转化以及  $(\text{NH}_4)_2\text{IrCl}_6$  与  $(\text{NH}_4)_3\text{IrCl}_6$  溶解度的差异精制铱。用弱还原剂将  $(\text{NH}_4)_2\text{IrCl}_6$  沉淀还原为可以溶解的  $(\text{NH}_4)_3\text{IrCl}_6$ , 而  $(\text{NH}_4)_2\text{PtCl}_6$  不被还原为  $(\text{NH}_4)_2\text{PtCl}_4$ , 进一步分离铂铱。根据不同金属离子在溶液中形成硫化物沉淀由易到难的顺序为<sup>[30]</sup>:  $\text{Cu} > \text{Fe} > \text{Ni} > \text{Ag} > \text{Au} > \text{Os} > \text{Ru} > \text{Pd} > \text{Pt} > \text{Rh} > \text{Ir}$ , 用硫化铵作硫化剂在室温下沉淀出溶液中的铂与贱金属离子使铱溶液净化。纯净的  $(\text{NH}_4)_3\text{IrCl}_6$  溶液再添加双氧水, 盐酸之后加热, 使  $\text{Ir}^{3+}$  氧化为  $\text{Ir}^{4+}$ , 沉淀出的  $(\text{NH}_4)_2\text{IrCl}_6$  经过滤、洗涤后, 在管式炉中煅烧, 成黑色粉末, 通氢还原后得到海绵铱。

贺小塘等<sup>[31]</sup>提出铂铱不分离的方法回收铂铱。因为铂铱具有相似的化学性质, 用氯化铵共沉淀沉出铂和铱。对于 Pt-Ir 合金、Pt-Ir-Cu 合金、Pt-Ir 碎屑混合的废料, 采用铝碎化活化, 盐酸除铝得到具有高活性的铂铱粉末。用新配制的王水溶解不溶渣, 铂铱溶解率均高于 99.5%。溶液中的贱金属阳离子用阳离子交换树脂吸附, 吸附条件为铂和铱混合浓度 20~40 g/L, 流速控制在 500~800 mL/min, pH=0.5~1.5, 交换 3 次后得到纯净铂铱溶液, 加入氧化剂, 使铱保持+4 价, 用氯化铵共沉铂铱, 铂沉淀率大于 99%, 铱沉淀率大于 98%, 沉淀经煅烧, 氢还原得到纯度大于 99.95% 的铂铱粉末。与以往的方法相比, 铂铱不分离的回收方法流程短, 效率高, 去除贱金属时铂铱基本不分散。产出的铂铱粉末可以用来制造铂铱合金材料。铂铱分离比较困难, 采用铂铱不分离的方式回收铂铱合金废料缩短了精炼的流程, 而且铂铱回收率高。因此, 对于只含有铂铱、不含铑、钌等杂质的废料采用不分离的回收方式比较适合。

### 2.3 铑铱合金废料的回收

铑铱废料主要来源于铑铱系热电偶加工过程中产生的废料, 以及热电偶在使用过程中所产生的废料。铑和铱的溶解与分离是铂族金属中最困难的<sup>[32]</sup>。早期工业生产主要是用氯化铵反复沉淀  $(\text{NH}_4)_2\text{IrCl}_6$  进行分离, 但是由于共沉淀和沉淀微溶, 不能达到很好的分离效果<sup>[33]</sup>。

溶剂萃取<sup>[34]</sup>在铑铱的分离方面研究较多, 常用于铑铱分离的萃取剂有含磷萃取剂如磷酸三丁脂 (TBP)、烷基氧化膦(TAPO), 胺类萃取剂伯、仲、叔和季胺盐等, 其中使用最多的是含磷萃取剂。铑和铱具有多种氧化态, 为萃取分离提供了条件。陈丁

文等<sup>[35]</sup>研究了在盐酸介质中 TBP 和混合 TAPO 对铱氯水配合物的萃取行为,  $\text{Ir}^{4+}$  氯水配合物的萃取率随水相中盐酸浓度增加呈现先增大后减小的趋势, 萃取率在盐酸浓度 3~6 mol/L 内出现峰值。曹钊蓉等<sup>[36]</sup>用三正辛基氧化膦(TOPO)萃取分离铑铱, 在盐酸浓度 5 mol/L 条件下经 3 级萃取后, 铱中含铑 0.005%, 铑中含铱 0.01%, 铑铱可实现定量分离。

徐泽济等<sup>[37]</sup>从铑铱合金块、丝、废屑等废料中分离提纯制取铑粉和铱粉。将铑铱合金锡碎化后用硝酸溶解转入溶液, 再从溶液体系中分离铑铱。利用铑和铱的氯络酸铵盐、亚硫酸铵盐的溶解度的差异初步完成分离。再用硫化铵沉淀法精制铱, TBP 萃取精制铑。分别制出纯度为 99.95% 的铱粉和铑粉。汪云华等<sup>[38]</sup>研究了在常压下用氢还原的方法分离铱溶液中微量铑, 在溶液中铑浓度低于 0.05 g/L 时, 在温度 70°C、氢气压 101.33 kPa、溶液 pH=2、氢气流量 400 mL/min 条件下, 氢还原 90 min, 铑还原率 99.5%, 而铱几乎不会被还原, 铑和铱的分离较彻底。

## 3 从废催化剂中回收铱

对于粉末状、颗粒状的含铱催化剂, 目前通常采用碱熔融预处理。熔融的过氧化钠可以使铱转变为铱的氧化物, 氢氧化钠可以使催化剂中难溶的  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  转变为偏铝酸钠。初始物料采用焙烧预处理可以有效去除催化剂表面附着的积碳、有机物。

专利<sup>[39]</sup>公布了一种从铱催化剂中回收铱的方法, 包括焙烧、酸浸、高温氧化、三氧化铱分解、还原、酸洗和水洗 6 个步骤。先将废催化剂在 400°C~600°C 下焙烧 4~6 h, 除去催化剂中的碳和有机物; 将焙烧过的催化剂用酸浸泡去除贱金属, 得到铱的富集物; 铱在 1100°C 下被强氧化剂  $\text{O}_3$  氧化生成挥发性的三氧化铱, 收集三氧化铱达到分离除杂的效果; 三氧化铱在温度低于 1000°C 时自动分解成二氧化铱和氧气; 二氧化铱通氢还原获得铱粉, 铱粉酸洗、水洗后纯度大于 99.95%。直收率 86.21%, 总回收率高于 96%。该工艺利用三氧化铱的挥发特性, 达到铱与其他杂质的分离, 避免了溶解造液与水化精炼, 极大缩短了提取铱的流程。

## 4 从有机废液中回收铱

对于有机铱催化剂中回收铱, 大多采用蒸馏其中的有机物成分, 蒸馏渣通过焚烧去除残余有机物,

铱转变为单质或者氧化物留在灰分中。然后通过活化剂活化、碱熔融等处理后将铱转入溶液。在焚烧处理过程中,会有一小部分铱会随着烟气而损耗掉。针对只含有含铱而不含其他铂族金属的有机废液,

用焚烧去除有机物的方法不仅会造成铱的损失,而且焚烧渣中铱或铱的氧化物溶解困难。强氧化剂氧化有机物则比较简单,在去除有机物的同时完成了铱溶液介质转型,缩短流程的同时提高了铱的回收率。贺小塘等<sup>[40]</sup>提出一种新的处理方式,首先利用王水氧的强氧化性破坏废液中的有机物结构,去除有机物后,含铱溶液经过盐酸赶硝、离子水稀释后水解除杂、净化,净化后的溶液浓缩结晶得到氯铱酸,直接高温下煅烧、再用氢气还原可以得到纯度大于 99.95%的铱粉,直收率 93.06%。该方法主要包括王水氧化破坏有机物、水解除杂、蒸发浓缩、煅烧、氢还原等步骤。避免了铱溶解困难,从溶液体系沉淀铱不完全等问题,是一种从有机废液中回收铱的有效方法。

## 5 结语

铱的物理、化学性质比较稳定,在使用过程中绝对损失少,随着各行业使用量增加,铱的二次资源也会逐渐积累。铱的矿物资源储量不大且品位较低,从二次资源中回收铱可以实现资源循环利用,调节供需矛盾。

铱金属与合金废料中贵金属含量高,回收工艺相对复杂,主要是因为溶解比较困难,需要采用碎化活化或者碱熔融预处理,会引入新的杂质。电化学溶解,微波消解等溶解技术处理量太小还没有实现产业化应用。除杂工艺如沉淀法、离子交换法、萃取法等由于相互夹带需要重复多次操作。合金废料如铂铱在回收过程中可使用铂铱不分离的回收方法,回收的铂铱可用于制造新的牌号的铂铱合金。含铱催化剂中铱分散于载体上,采用强氧化剂  $O_3$  氧化使铱生成挥发性的三氧化铱,再从挥发物中富集回收铱,回收流程短,铱回收率高。含铱有机废液采用硝酸氧化有机物可实现溶液介质转型,避免溶解造液困难和引入杂质,可减少操作流程,提高铱的回收率。

含铱废料的来源较多,不同来源的含铱废料杂质元素各不相同。为了更好的回收含铱废料中的铱,改进现有的回收工艺,在废料收集时应该分类,针对不同的含铱废料制定不同的回收方法,开发出从含铱废料中直接制备铱产品的新工艺。

## 参考文献:

- [1] 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.  
HE X T, GUO J M, WANG H, et al. Reviews of platinum group metals secondary resource and recycling industries in China[J]. Precious Metals, 2013, 34(2): 82-89.
- [2] 张莓. 世界铂族金属矿产资源及其开发[J]. 世界有色金属, 2009(11): 72-75.  
ZHANG M. Resources and development of platinum group metals in the world[J]. Mineral Exploration, 2009(11): 72-75.
- [3] 王祝堂. 铱(Ir)的提取和应用(上)[J]. 金属世界, 1994(5): 8.
- [4] WU W P, CHEN Z F, LIU Y. 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.
- [5] 冯青月. 金属铱配合物的合成、表征及其应用[D]. 福州: 福州大学, 2016.  
FENG Q Y. Synthesis, characterization and applications of Iridium(III) complexes[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2016.
- [6] HUNT L B. A history of iridium[J]. Platinum Metals Review, 1987, 31(1): 32-40
- [7] 储建华. 提取铱的冶金热力学分析[J]. 贵金属, 1983, 4(4): 12-19.  
CHU J H. Metallurgical thermodynamic analysis of iridium extraction[J]. Precious Metals, 1983, 4(4): 12-19.
- [8] 唐会毅, 吴保安, 刘庆宾, 等. 铂铱合金的制备技术及应用[J]. 材料保护, 2016(S1): 162-163.  
TANG H Y, WU B A, LIU Q B, et al. Preparation technology and application of platinum iridium alloy[J]. Materials Protection, 2016(S1): 162-163.
- [9] 肖雨辰, 唐会毅, 吴保安, 等. 铂铱合金的应用现状[J]. 功能材料, 2020, 51(5): 5053-5059.  
XIAO Y C, TANG H Y, WU B A, et al. Application status of platinum-iridium alloys[J]. Journal of Functional Materials, 2020, 51(5): 5053-5059.
- [10] BALCON S, MARY S, KAPPENSTEIN C, et al. Monopropellant decomposition catalysts[J]. Applied Catalysis: A General, 2000, 196(2): 179-190.
- [11] JOFRE J, NETO T, DIAS F F, et al. Evaluation of Ir/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ir-Ru/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Ru/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst performance in a 5N satellite thruster[J]. Acta Astronautica, 2013, 85: 41-50.
- [12] REYES P, AGUIRRE M C, PECCHI G, et al. Crotonaldehyde hydrogenation on Ir supported catalysts[J]. Journal of Molecular Catalysis: A Chemical, 2000, 164(1): 33-40.

- [13] JOSEF C, DANIELA G, YUJI Y, et al. Effect of the preparation of Ir-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sulfide catalyst on activity and HDN/HDS selectivity[J]. *Applied Catalysis: A General*, 2003, 255(2): 321-329.
- [14] REYES P, ROJAS H, PECCHI G, et al. Liquid-phase hydrogenation of citral over Ir-supported catalysts[J]. *Journal of Molecular Catalysis: A Chemical*, 2002, 179(1): 293-299.
- [15] OKUMURA M, MASUYAMA N, KONISHI E, et al. CO oxidation below room temperature over Ir/TiO<sub>2</sub> catalyst prepared by deposition precipitation method[J]. *Journal of Catalysis*, 2002, 208(2): 485-489.
- [16] 张雄伟. 贵金属铱催化剂的制备、表征及其性能研究[D]. 成都: 四川大学, 2005.  
ZHANG X W. Investigation of the preparation, characterization and catalytic performance of iridium catalysts[D]. Chengdu: Sichuan University, 2005.
- [17] 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.  
ZHENG X C, ZHANG S M, HUANG W P, et al. Study on iridium-based catalyst system for the production of acetic acid by methanol carbonylation[J]. *Chinese Journal of Organic Chemistry*, 2003(6): 613-618.
- [18] 胡昌义, 李靖华, 高逸群, 等. CVD 在铱涂层和薄膜制备中的应用[J]. *贵金属*, 2002, 33(1): 53-56.  
HU C Y, LI J H, GAO Y Q, et al. Application of CVD technique in preparation of iridium coatings and iridium films[J]. *Precious Metals*, 2002, 33(1): 53-56.
- [19] 张小伟, 陈连清, 杨楚罗, 等. 几类有机铱化合物的合成及发光性能研究[A]//中国化学会. 中国化学会第十三届金属有机化学学术讨论会论文摘要集[C]. 中国化学会, 2004: 1.
- [20] 刘时杰. 铑铱金属及其它难溶贵金属物料的溶解[J]. *贵金属*, 2013(S1): 47-51.  
LIU S J. Dissolution of rhodium, iridium metals and other insolvable precious metals materials[J]. *Precious Metals*, 2013(S1): 47-51.
- [21] MARY S, KAPPENSTEIN C, BALCON C, et al. Mono-propellant decomposition catalysts: I. Ageing of highly loaded Ir/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts in oxygen and steam. Influence of chloride content[J]. *Applied Catalysis: A General*, 1999, 182(2): 98
- [22] 刘杨, 范兴祥, 董海刚, 等. 铝活化剂对铑溶解的影响[J]. *湿法冶金*, 2014, 33(1): 42-46.  
LIU Y, FAN X X, DONG H G, et al. Influence of aluminium activator on rhodium dissolution[J]. *Journal of Hydrometallurgy*, 2014, 33(1): 42-46.
- [23] 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.  
HIRSHMATBAUER B, XU S Q. Recovery of iridium from waste materials and residue[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 1986(2): 47-50.
- [24] 张邦安, 李富荣. 废铱坩埚提纯铱工艺研究[J]. *中国资源综合利用*, 2006(10): 5-9.  
ZHANG B A, LI F R. Technological study on purification of iridium from waste iridium crucible[J]. *Chinese Journal of Comprehensive Utilization of Resources*, 2006(10): 5-9.
- [25] 赵家春, 吴跃东, 马媛, 等. 含铱废料直接制备高纯铱粉的研究[J]. *贵金属*, 2020, 41(4): 27-30.  
ZHAO J C, WU Y D, MA Y, et al. Study on direct preparation of high-purity iridium powder from iridium-containing scraps[J]. *Precious Metals*, 2020, 41(4): 27-30.
- [26] 刘杨, 范兴祥, 董海刚, 等. 贵金属物料的溶解技术及进展[J]. *贵金属*, 2013, 34(4): 65-72.  
LIU Y, FAN X X, DONG H G, et al. Dissolving techniques of precious metals materials and their development[J]. *Precious Metals*, 2013, 34(4): 65-72.
- [27] 张健, 徐颖. 从 Pt-Ir 合金废料中分离提纯铂和铱[J]. *贵金属*, 1991, 12(3): 32-36.  
ZHANG J, XU Y. Separation and purification of platinum and iridium from scraps of Pt-Ir alloys[J]. *Precious Metals*, 1991, 12(3): 32-36.
- [28] 朱利亚, 刘云, 胡秋芬, 等. 微波消解技术在难处理贵金属合金 PtPdRhIr 分析中的研究与应用[J]. *分析试验室*, 2005(9): 63-66.  
ZHU L Y, LIU Y, HU Q F, et al. Research and application of microwave-assisted digestion technique for analysis of Rh, Ir, Pt, Pd in difficultly decomposed precious metals and their materials[J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2005(9): 63-66.
- [29] 李富荣. 铂铱合金的分离与提纯[J]. *中国资源综合利用*, 2001(8): 12-14.  
LI F R. Separation and purification of platinum iridium alloy[J]. *Chinese Journal of Comprehensive Utilization of Resources*, 2001(8): 12-14.
- [30] 余建民. 贵金属分离与精炼工艺学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.  
YU J M. Separation and refining technology of precious metals[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.

- [31] 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.  
HE X T, HAN S L, WU X L, et al. A new technology for recovery Pt and Ir from Pt- Ir alloy scrap[J]. Precious Metals, 2010, 31(3): 56-59.
- [32] 刘志斌. 贵金属铑、铱的分离与富集[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2006.  
LIU Z B. Separation and enrichment of precious metals rhodium and iridium[D]. Kunming: Kunming University of Technology, 2006.
- [33] 王永录. 铑、铱分离评述[J]. 贵金属, 1979(2): 32-44.  
WANG Y L. Review on separation of rhodium and iridium[J]. Precious Metals, 1979(2): 32-44.
- [34] 刘志斌, 张锦柱, 英迪, 等. 溶剂萃取分离铑铱综述[J]. 矿业快报, 2006(10): 30-32.  
LIU Z B, ZHANG J Z, YING D, et al. Review of separation of rhodium and iridium by solvent extraction[J]. Express Information of Mining Industry, 2006(10): 30-32.
- [35] 陈丁文, 董守安, 李楷中, 等. 盐酸溶液中铱(IV)氯水配合物的萃取行为研究[J]. 贵金属, 2001, 22(3): 1-7.  
CHEN D W, DONG S A, LI K Z, et al. Study on the extraction behavior of aqua-chloroiridate (IV) complexes in the hydrochloric acid solution[J]. Precious Metals, 2001, 22(3): 1-7.
- [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, 2(3): 1-10.  
CAO G R, ZHANG W L, YUAN M L. A new method for separation of rhodium and iridium by solvent extraction[J]. Precious Metals, 1981, 2(3): 1-10.
- [37] 徐泽济, 谭昌蓉. 铑铱合金废料再生处理的工艺实验[J]. 贵金属, 1981, 2(1): 18-21.  
XU Z Q, TAN C R. Experimental study on regeneration of iridium rhodium alloy waste[J]. Precious Metals, 1981, 2(1): 18-21.
- [38] 汪云华, 关晓伟, 陆跃华. 铱溶液中氢还原分离微量铑的研究[J]. 贵金属, 2006, 27(2): 35-38.  
WANG Y H, GUAN X W, LU Y H. Separation of trace rhodium from iridium solution by hydrogen[J]. Precious Metals, 2006, 27(2): 35-38.
- [39] 李红梅, 熊庆丰, 贺小塘, 等. 一种从含铱废催化剂中分离回收铱的方法: CN106337132A[P]. 2017-01-18.  
LI H M, XIONG Q F, HE X T, et al. A method of separation and recovery on iridium from spent iridium catalyst: CN106337132A[P]. 2017-01-18.
- [40] 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.  
HE X T, LIU W P, WU X L, et al. Recovery of iridium from organic waste water [J]. Precious Metals, 2010, 31(2): 6-9.

\*\*\*\*\*

## 《贵金属》著作权使用声明

作者投稿如被接受在本刊发表, 即代表作者同意将该论文的部分著作权转让给《贵金属》编辑部。

作者保证该论文为原创作品, 无抄袭问题, 不存在一稿多投, 符合学术道德规范要求; 作者承诺, 论文不涉及泄密, 符合所在工作单位保密要求。若发生侵权或泄密问题, 责任由作者承担。

凡本刊登载的文章, 将同时被中国知网、万方

数据-数字化期刊群、维普中文科技期刊数据库和超星期刊域出版平台等以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文, 并供本刊授权和合作媒体使用。本刊支付的稿酬已包含作者著作权使用费。所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。如有异议, 请在投稿时说明, 以便另行处理。