

稀散金属铼的提取及研究进展

周 团

江西铜业股份有限公司贵溪冶炼厂 江西 鹰潭 335400

摘 要：稀散金属铼作为战略资源，全球储量集中于智利、美国、俄罗斯，我国储量虽占一定份额但开采成本高。提取工艺中，溶剂萃取法因选择性好、成本低占据主流，离子交换法与萃取树脂法亦具优势。二次资源回收技术突破显著，废旧催化剂、镍基合金等回收率大幅提升。同时，绿色溶剂、超重力反应器等环保技术降低能耗与污染。高纯度铼制备技术持续进步，满足航空航天等高端领域需求。

关键词：稀散金属铼；提取；研究进展

引言：稀散金属铼，以其独特的物理化学性质，在航空航天、核能及催化剂等高科技领域占据核心地位。然而，全球铼资源分布极不均衡，且高度伴生于铜钼矿中，提取难度大、成本高。随着科技进步与产业升级，对高纯度铼的需求日益增长，促使铼提取技术不断创新。本文综述了铼的资源分布、消费结构，重点探讨了主流与新型提取工艺、二次资源回收技术及环保型提取工艺的研究进展，旨在为铼资源的可持续利用提供参考。

1 铼的资源分布与消费结构

1.1 全球资源分布

（1）储量分布：全球铼资源储量高度集中，智利、美国、俄罗斯三国占据主导地位。其中智利储量最为丰富，达1300吨，美国和俄罗斯储量分别为400吨、310吨，三国合计储量占全球总量的76%，掌控着全球铼资源的核心供给。我国铼储量为250吨，虽在全球占一定份额，但资源禀赋存在明显短板，矿石品位低且开采技术难度大，导致开采成本远高于国际主要产出国，资源开发利用受限。（2）伴生特性：铼资源呈现极强的伴生属性，全球90%以上的铼伴生于铜钼矿中，缺乏独立矿床，

这决定了铼的提取高度依赖铜钼矿冶炼过程中的副产物回收。这种依赖关系使得铼的产量与铜钼矿开采及冶炼规模紧密挂钩，供给稳定性易受铜钼产业波动影响^[1]。

1.2 消费领域与需求趋势

（1）航空航天领域：作为铼的最大消费领域，占比高达79%。在军用领域，先进战机发动机对铼需求显著，如F-35战斗机发动机单台耗铼量达5.4kg；在民用领域，随着航空运输业发展，LEAP系列航空发动机需求快速增长，带动铼年需求量增速达18%，成为推动铼消费增长的核心动力。（2）核能领域：随着清洁能源发展，可控核聚变技术加速推进，预计到2030年，全球可控核聚变示范堆建设将新增铼年需求6-7.2吨，占当前全球铼年产量的10%，核能领域将成为铼消费的重要新兴增长点。（3）催化剂市场：铼在石油化工领域主要用于石油重整催化剂，当前年消耗量约15吨。受全球汽油需求稳步增长驱动，石油重整产业规模将持续扩大，预计到2030年，铼在该领域的年用量将升至18吨，需求增长态势稳定。

2 铼的提取工艺研究进展

2.1 主流提取技术对比

技术	原理	优势	劣势	应用案例
溶剂萃取法	胺类/磷酸酯类萃取剂络合高铼酸根	选择性好、成本低、处理量大	萃取剂毒性大、第三相分离困难	中金黄金采用N235萃取，铼回收率99%
离子交换法	阴离子交换树脂选择性吸附 ReO_4^-	操作简单、污染小、分离效率高	处理量低、树脂循环性能差	TulsionCR-75树脂回收率90%
萃淋树脂法	液态萃取剂嵌入树脂基质	兼具溶剂萃取高效性与离子交换便利性	合成复杂、成本高、强度不足	磁性N235萃淋树脂吸附率超94%
火法-湿法联合	氧化焙烧-烟尘浸出-溶剂萃取	适用于高品位原料	产生 SO_2 污染、回收率仅25%	智利Codelco公司传统工艺

2.2 新型提取技术突破

（1）协同萃取体系：在铼提取领域，Alamine336与TBP组成的复合萃取剂展现出优异性能，反萃率高达98.78%，且能将铼浓度提升至31.41g/L，大幅提高了铼

的富集效率，为后续提纯奠定良好基础，有效解决传统萃取剂效率低、富集效果差的问题。（2）微乳液萃取：N263-TBP-正庚烷微乳液体系在盐酸介质中表现出出色的选择性，可实现铼与钼的高效分离，萃取率达96.58%。

该技术克服了铈钼性质相近、分离难度大的行业痛点，为高纯度铈的提取提供了新路径。（3）生物吸附法：以活性炭为吸附剂的生物吸附技术，在pH值6-8的温和条件下即可实现对铈的吸附，且采用 NH_4OH 洗脱时洗脱率达91.5%。该方法操作简便、成本较低，尤其适用于处理低浓度铈溶液，拓展了铈提取的原料适用范围^[2]。

2.3 二次资源回收技术

（1）废旧催化剂回收：赛恩斯研发的“预处理+选择性吸附”工艺，可从含铈污酸中高效提取铈，最终产品纯度达99.9%，实现了废旧催化剂中铈资源的高值化回收，减少资源浪费的同时降低环境污染。（2）镍基合金回收：酸浸-溶剂萃取联合工艺有效提升了镍基合金中铈的回收率，将其提高至85%。该技术为航空航天等领域产生的镍基合金废料回收利用提供了关键支撑，助力铈资源循环利用。（3）铈废液处理：离子交换法可从放射性铈废液中安全分离铈，且分离过程符合核安全标准，在实现铈资源回收的同时，保障了处理过程的安全性，为核工业领域铈资源回收提供了可靠技术方案^[3]。

3 高纯度铈制备技术

3.1 化学沉淀法

（1）中和沉淀：针对含铈污酸原料，通过添加石灰调节体系pH值至中性。在此过程中，铈元素会以高铈酸铵的形式稳定留存于沉淀产物中，经后续分离处理，可获得纯度为95%-98%的初级高铈酸铵产品。该步骤能有效去除原料中的大部分杂质离子，为后续高纯度制备奠定基础，且石灰原料易得，处理成本可控，适合大规模初级提纯场景。（2）结晶优化：采用浓缩-冷却结晶工艺对初级高铈酸铵溶液进行处理。先通过蒸发浓缩提高溶液中高铈酸铵的浓度，再控制冷却速率与冷却终点温度，引导高铈酸铵晶体有序生长。通过优化结晶工艺参数，可有效控制晶体粒径分布，减少晶体中包裹的杂质，提升晶体的纯度与均匀性。更重要的是，规整的晶体粒径能增大后续还原过程中的反应接触面积，显著提升铈的还原效率，为制备高纯度金属铈提供优质原料^[4]。

3.2 电解精炼法

（1）电解液配方：选用 NH_4Cl - KCl 混合体系作为电解液，该体系能为铈离子提供稳定的溶解与迁移环境。在电解过程中，控制电流密度为 $50\text{A}/\text{m}^2$ ，此参数下铈离子在阴极的沉积速率适中，可减少沉积层中的孔隙与杂质嵌入，使铈的沉积率达到99.2%，确保原料中铈元素的高效回收与利用，同时降低电解过程中的能耗与原料浪费。（2）阳极材料：采用铂铈合金作为电解精炼的阳极材料。铂铈合金具有优异的化学稳定性与导电性，在电

解过程中不易发生溶解或氧化反应，能有效避免阳极材料中的杂质离子进入电解液，从而减少对阴极沉积铈的污染。通过搭配优质阳极材料与优化的电解液体系，可将铈的纯度提升至99.99%，满足航空航天、电子等领域对高纯度铈的基础需求^[5]。

3.3 区域熔炼与电子束熔炼技术

（1）区域熔炼原理：该技术通过高频感应加热或电阻加热等方式，在铈原料棒上形成一个可移动的狭窄熔区。当熔区沿原料棒定向移动时，利用杂质在固液两相中溶解度的差异（即杂质分凝效应），使杂质不断向熔区末端富集，最终实现铈与杂质的分离。经过单次区域熔炼处理后，铈的纯度即可达到99.995%，若进行多次熔炼，纯度可进一步提升，适合制备高纯度铈丝、铈棒等型材。（2）电子束熔炼优势：在高真空环境（真空度通常优于 $1\times 10^{-3}\text{Pa}$ ）下，利用电子束轰击铈原料，使原料在高温下熔化。高真空环境能有效抑制铈的氧化，同时可将氧、氮等轻元素杂质以气体形式去除，最终制备出纯度在99.99%以上的高纯铈锭。该工艺制备的铈锭纯度高、内部组织均匀，力学性能优异，是航空航天发动机叶片等关键部件的核心原料^[6]。（3）技术瓶颈：两类技术均存在明显局限。设备方面，区域熔炼与电子束熔炼设备的核心部件（如电子枪、真空系统、高频加热装置）制造难度大，单台设备成本超千万元，初期投入极高；能耗方面，吨级铈的制备电耗超5000kWh，运行成本高昂；生产效率方面，受熔区移动速度、电子束功率等因素限制，单次处理量小，规模化生产效率低，难以满足大规模高端需求。

3.4 气相传输法

（1）化学气相传输（CVT）：以碘（ I_2 ）作为传输剂，将铈原料与 I_2 置于密封反应容器的两端，形成原料区与沉积区。通过加热控制，使原料区温度维持在600-800℃，沉积区温度略低于原料区。在此条件下，铈与 I_2 在原料区反应生成挥发性的 CeI_4 气体， CeI_4 气体随温度梯度向低温的沉积区扩散，在沉积区分解并析出铈，实现铈从原料区向沉积区的定向迁移。该工艺可精准控制铈的沉积过程，制备出厚度小于 $10\mu\text{m}$ 的单晶铈薄膜，薄膜纯度高、结晶度好，且表面平整度优异^[7]。（2）应用场景与局限：制备的单晶铈薄膜因具备优异的导电性、耐高温性与化学稳定性，可作为半导体器件的电极材料，提升器件的性能与使用寿命；同时也可用于高精度传感器制造，增强传感器的灵敏度与稳定性。然而，该技术对反应设备的密封性、温度控制精度要求极高，反应器需采用特种耐高温、耐腐蚀材料制造，且反应过程中

气体流量与温度梯度的调控难度大,导致设备复杂度高、生产成本高昂,目前仅能在实验室或小规模高端领域应用,难以实现工业化大规模推广。

4 环保型提取工艺研究

4.1 绿色溶剂开发

(1) 离子液体体系:选用[BMIM][PF₆]离子液体作为铼萃取剂,在pH = 2的酸性条件下,对铼的分配比高达12.5,萃取效率优异。与传统有机溶剂相比,离子液体几乎无挥发性,可减少挥发性有机物(VOCs)排放90%以上,大幅降低对大气环境的污染,同时离子液体可循环使用,减少溶剂消耗与废弃物产生,符合绿色化工发展理念。(2) 水相体系优化:开发柠檬酸-过氧化氢络合水相体系,在60℃的温和温度下,铼浸出率达92%。该体系以水为介质,避免使用甲苯、煤油等有毒萃取剂,从源头消除有机污染物的产生与排放,且柠檬酸可生物降解,后续废水处理难度降低,进一步减少对环境的影响。

4.2 过程强化技术

(1) 超重力反应器:利用超重力环境产生的离心力,强化萃取过程中的传质效率,使溶剂萃取时间从传统工艺的30min大幅缩短至5min,效率提升6倍。同时,传质效率的提升使设备体积减小80%,减少设备占地面积与材料消耗,且短时间反应可降低能源消耗与溶剂挥发损失,兼具高效与环保优势。(2) 微波辅助浸出:采用2.45GHz微波辐射辅助铼浸出过程,微波的热效应与非热效应可加速原料中铼的溶出,使浸出速率提升3倍,缩短浸出周期。此外,微波加热具有靶向性,能量利用率高,相比传统加热方式,能耗降低45%,减少能源消耗与碳排放,符合节能降耗的环保要求。

4.3 废液零排放技术

(1) 膜分离-蒸发结晶耦合:先采用纳滤膜对含铼废液进行过滤,高效截留铼离子,再通过蒸发结晶工艺回收高纯度高铼酸铵产品。经处理后,废水回用率超95%,

可重新用于提取工艺的浸出或洗涤环节,实现水资源循环利用,大幅减少废水排放量,接近零排放目标。(2) 电渗析深度净化:使用均相阴离子交换膜进行电渗析处理,在电场作用下,铼酸根离子定向迁移至浓缩室,将废液中铼浓度从0.5g/L浓缩至20g/L,实现铼资源的高效回收。同时,该过程可同步去除废液中的Cl⁻、SO₄²⁻等杂质离子,净化后的废水可进一步回用,兼顾资源回收与废水净化,提升工艺的环保性与经济性。

结束语

稀散金属铼的提取技术研究已取得显著进展,不仅在传统提取工艺上实现了效率与纯度的双重提升,更在二次资源回收、环保型提取等新兴领域开辟了新路径。面对未来高科技产业对铼资源日益增长的需求,持续优化提取工艺、提高资源利用率、减少环境影响,将成为推动铼产业可持续发展的关键。期待通过不断的技术创新与合作,共同开启铼资源高效利用的新篇章。

参考文献

- [1]刘红召,王威,曹耀华,高照国.世界铼资源及市场现状[J].矿产保护与利用,2021,(05):55-56.
- [2]杨尚磊,陈艳,薛小怀.铼(Re)的性质及应用研究现状[J].上海金属,2020,(04):48-49.
- [3]李红梅,贺小塘,赵雨.铼的资源、应用和提取[J].贵金属,2021,(10):79-80.
- [4]王献科,李玉萍,李莉芬.液膜分离富集测定铼[J].中国钨业,2020,(04):38-39.
- [5]赵雨,贺小塘,王欢.从含银废催化剂中回收银和铼[J].有色金属(冶炼部分),2021,(05):52-54.
- [6]张焕然,衷水平,刘晓英,王俊娥.铜冶炼废酸提铼制备高铼酸钾的工艺研究[J].中国有色冶金,2020,(06):56-57.
- [7]李静.化学沉淀法分离铜冶炼废酸中的铜和铼[J].湿法冶金,2022,(05):44-45.