

稀散金属高效分离提取及高纯化制备

洪德明

江西铜业股份有限公司贵溪冶炼厂 江西 鹰潭 335400

摘要：稀散金属在高端制造领域具有关键作用，其高效分离提取及高纯化制备意义重大。本文详细阐述了溶剂萃取、离子交换、膜分离、沉淀等分离提取技术路径，剖析了原料预处理、目标金属分离、杂质脱除等关键环节。同时，介绍了蒸馏、区域熔炼、电解、化学精制等高纯化制备技术方法，并从工艺参数控制、试剂与材料选用、设备运行要求、过程环境控制等方面探讨了实施条件。为稀散金属的高效利用与产业发展提供技术参考。

关键词：稀散金属；分离提取技术；高纯化制备；工艺参数；实施条件

引言：稀散金属凭借独特物理化学性质，在集成电路、新能源、航空航天等高端领域广泛应用，成为现代科技发展的关键支撑材料。然而，稀散金属在地壳中含量低且常与其他金属伴生，分离提取难度大，高纯化制备要求高。当前，随着高端制造业对稀散金属纯度和质量要求的不断提升，传统分离提取与制备技术面临挑战。因此，深入探究稀散金属高效分离提取及高纯化制备技术，对提高资源利用率、推动产业升级具有重要意义。

1 稀散金属分离提取的主要技术路径

1.1 溶剂萃取分离提取技术

溶剂萃取作为稀散金属分离的核心手段，依托目标金属离子在有机相与水相间分配系数的差异实现选择性富集。该技术通过设计特定官能团结构的萃取剂，可针对不同价态金属离子构建差异化络合体系。例如，含磷类萃取剂对镓、铟等三价离子具有高选择性，而羧酸类萃取剂更适用于锗、硒等四价离子的分离^[1]。萃取过程需严格控制体系酸度、温度及相比参数，通过多级逆流萃取提升分离效率。反萃环节则通过调节pH值或引入竞争配体实现金属离子的定向转移，有机相经皂化处理后可循环使用。近年来，协同萃取体系的发展显著提升了复杂体系中多组分分离能力，通过混合萃取剂的协同效应实现单一萃取剂难以达到的分离效果。

1.2 离子交换分离提取技术

离子交换技术利用树脂功能基团与金属离子的特异性吸附作用实现分离纯化。螯合型树脂通过引入氨基磷酸、亚氨基二乙酸等官能团，可对镓、锗等稀散金属离子形成稳定螯合环结构，显著提升选择性吸附能力。树脂的孔道结构优化是关键技术方向，大孔树脂通过缩短扩散路径提高吸附动力学性能，而超细颗粒树脂则通过增大比表面积增强吸附容量。动态吸附过程中，流速控制直接影响树脂利用率，低流速条件下金属离子与功能

基团充分接触，但过慢会导致处理效率下降。解吸环节常采用酸性或盐类解吸剂，通过竞争置换破坏螯合结构实现金属离子的高效洗脱。

1.3 膜分离提取技术

膜分离技术凭借分子级截留特性在稀散金属分离领域展现独特优势。纳滤膜通过孔径筛分与电荷排斥双重机制，可实现不同价态金属离子的分级分离，尤其适用于低浓度料液中稀散金属的富集。离子交换膜则通过固定电荷基团构建选择性传输通道，在电场驱动下实现目标离子的定向迁移，该技术已成功应用于镓电解精炼过程中的杂质分离。膜材料改性是提升分离性能的关键，通过共混、接枝等手段引入特定功能基团，可显著增强膜对目标金属的选择性识别能力。膜污染控制技术通过优化操作条件与定期反冲洗，有效延长膜组件使用寿命。

1.4 沉淀分离提取技术

沉淀分离技术通过调控溶液化学条件实现金属离子的选择性沉淀。分级沉淀利用不同金属氢氧化物溶度积差异，通过逐步调节pH值实现多组分分步沉淀。对于化学性质相近的元素，常引入配位剂形成差异化配合物，如硫代乙酰胺与锗离子生成稳定络合物，在特定pH条件下优先沉淀。均相沉淀技术通过尿素等缓慢分解剂控制沉淀剂生成速率，避免局部浓度过高导致的共沉淀现象。沉淀形态调控技术通过添加晶种或表面活性剂，可获得特定晶型与粒径分布的沉淀产物，为后续提纯工序创造有利条件。该技术常作为预处理手段与其他分离方法联用，形成优势互补的工艺组合。

2 稀散金属高效分离提取的关键环节

2.1 原料预处理环节

原料预处理环节是稀散金属高效分离提取的基础前提，直接影响后续分离提取的效率与纯度，更是保障整个工艺顺畅推进的重要支撑^[2]。该环节需紧密结合稀散金

属原料的矿物组成、嵌布特性,通过破碎、磨矿、焙烧、浸出预处理等工艺手段,打破原料原有晶体结构与矿物共生关系,使目标金属充分暴露于处理体系中,为后续分离操作创造良好条件。预处理过程需精准调控各项工艺参数,合理优化破碎粒度、焙烧温度与时间,既能避免目标金属因过度加热发生氧化或流失,又能有效去除原料中易处理的大量脉石杂质与干扰组分,显著降低后续分离提取的工艺难度与成本。依托分散金属提取工艺相关行业标准与学术研究成果,预处理环节需兼顾原料利用率与工艺可行性,通过科学合理的处理方式提升原料中目标金属的浸出效率,为后续分离提取工作筑牢基础。

2.2 目标金属分离环节

目标金属分离环节是分散金属高效分离提取的核心所在,核心思路是依托目标金属与体系中其他组分在物理性质、化学性质上的本质差异,实现目标金属的精准分离与富集。该环节需根据原料特性、目标金属种类及含量,筛选适配的分离技术,通过精准调控反应温度、压力、试剂浓度等工艺条件,使目标金属与杂质组分实现有效分离,避免分离不彻底导致后续工艺负荷增加。分离过程需注重工艺的选择性与高效性,在提升目标金属分离效率的同时,严格控制分离过程中的金属损耗,保障工艺的经济性。操作过程需严格遵循分离技术相关规范,精准把控每一项反应条件与操作参数,确保目标金属能够高效、精准分离,为后续杂质脱除与高纯化制备环节奠定坚实基础,进一步提升整个分离提取工艺的实用性与产业化价值。

2.3 杂质脱除环节

杂质脱除环节是提升分散金属分离提取纯度的关键支撑,也是衔接分离环节与后续高纯化制备的重要纽带。该环节需先明确分离后体系中杂质的种类、含量及存在形态,结合杂质与目标金属在化学活性、配位能力等方面的差异,选用针对性强的脱除技术,实现微量杂质的深度去除。脱除过程需严格控制工艺参数,优化脱除试剂用量与反应条件,既能确保杂质脱除彻底,又能减少副反应发生,避免目标金属因参与副反应造成损耗,保障目标金属的回收率。依托分散金属提纯相关技术标准与研究成果,杂质脱除环节需兼顾脱除效果与工艺成本,通过科学调控实现微量杂质的高效脱除,为后续高纯化制备提供纯度合格的中间产物,切实保障最终产品质量达到相关技术要求。

3 分散金属高纯化制备的技术方法

3.1 蒸馏纯化技术

蒸馏纯化技术依托分散金属与杂质间挥发度差异实

现分离提纯,是分散金属高纯化制备中应用广泛的传统技术。该技术以热稳定性为基础,通过精准调控温度、压力等工艺参数,使分散金属与杂质形成挥发速率差异,借助冷凝收集实现目标金属的纯化^[3]。操作过程需严格控制加热速率与体系压力,避免温度过高导致目标金属氧化或分解,同时抑制杂质随蒸汽一同冷凝,保障纯化精度。例如,对于镓的蒸馏纯化,将温度控制在2200-2400℃,压力控制在10-100Pa时,可获得高纯度的镓。蒸馏纯化技术适用于沸点差异显著的分散金属提纯,凭借操作简便、分离效果稳定的优势,在低沸点分散金属高纯化中占据重要地位,符合分散金属提纯工艺的基础技术要求。

3.2 区域熔炼纯化技术

区域熔炼纯化技术基于分散金属中杂质在固液两相间的溶解度差异,通过移动熔区实现杂质的定向迁移与去除。该技术将待纯化分散金属制成棒状原料,利用加热装置形成狭窄熔区,缓慢移动熔区使杂质随熔区向一端富集,从而获得高纯度目标金属。工艺实施需精准控制熔区温度、移动速度及保温时间,确保杂质充分分离,减少目标金属的损耗。一般来说,熔区温度控制在目标金属熔点以上50-100℃,移动速度控制在1-5mm/min时,纯化效果较好。区域熔炼纯化技术可实现深度提纯,能有效去除微量杂质,适用于对纯度要求较高的分散金属制备,是高端分散金属材料生产中的关键纯化技术之一。

3.3 电解纯化技术

电解纯化技术以电化学原理为核心,通过调控电解体系参数实现分散金属的分离与纯化。该技术将粗品分散金属作为阳极,高纯度金属作为阴极,选用适配电解液构建电解体系,利用不同金属离子的电极电位差异,使目标金属离子在阴极优先析出,杂质离子则留在电解液中或在阳极溶解去除。操作过程需严格控制电解电压、电流密度及电解液浓度,维持体系稳定性,避免副反应发生,确保阴极析出金属的纯度。电解纯化技术具有提纯效率高、操作可控性强的特点,适用于多种分散金属的规模化高纯化制备,契合工业生产的实际需求。

3.4 化学精制纯化技术

化学精制纯化技术通过化学反应实现分散金属与杂质的分离,依托目标金属与杂质在化学性质上的差异,采用配位、沉淀、还原等反应将杂质转化为易分离物质,从而提升目标金属纯度。该技术需根据分散金属的化学特性选择合适的反应试剂与工艺条件,确保反应具有选择性,避免目标金属参与副反应造成损耗。反应完成后通过过滤、洗涤等操作分离杂质产物,再对目标产物进行

进一步处理,获得高纯度稀散金属。化学精制纯化技术灵活性强,可针对性去除特定微量杂质,常与其他纯化技术配合使用,实现稀散金属的深度高纯化。

4 稀散金属分离提取与高纯化的实施条件

4.1 工艺参数控制

工艺参数精准调控是保障稀散金属分离提取效率的核心要素。温度控制需贯穿整个工艺流程,例如在浸出环节,溶液温度直接影响矿物溶解速率与金属离子扩散效率,需根据目标金属热力学性质设定最佳反应区间。pH值调节需结合金属氢氧化物溶度积常数,通过添加酸碱试剂实现目标金属与杂质的选择性沉淀或溶解^[4]。反应时间控制需平衡处理效率与产物纯度,过短反应时间导致金属回收率不足,过长则可能引发副反应降低产品质量。对于涉及多相反应的工艺,搅拌强度与物流流速需协同优化,确保反应体系均匀性,避免局部浓度过高引发杂质共沉淀。在蒸馏纯化过程中,加热速率与冷凝温度梯度设计直接影响金属挥发效率与纯度,需通过热力学模拟确定最佳操作参数。

4.2 试剂与材料选用

试剂纯度与材料适配性对分离效果起决定性作用。浸出剂选择需兼顾目标金属溶解能力与杂质稳定性,例如酸性体系常用硫酸或盐酸,碱性体系则采用氢氧化钠或碳酸钠,需根据矿物组成调整试剂浓度与配比。萃取剂需具备高选择性与化学稳定性,有机磷类萃取剂因对稀土金属优异的选择性被广泛应用,而胺类萃取剂更适合从酸性溶液中分离过渡金属。离子交换树脂功能基团类型需与目标金属离子电荷匹配,大孔树脂因传质效率高更适用于处理高粘度料液。设备材料需耐受工艺介质腐蚀,例如含氟体系需采用聚四氟乙烯内衬反应釜,高温蒸馏过程需选用石英或高纯石墨坩埚,避免金属污染。

4.3 设备运行要求

设备性能直接影响工艺稳定性与产品一致性。浸出设备需具备良好的密封性与耐压能力,防止挥发性试剂泄漏,同时需配置高效搅拌系统确保固液充分接触。萃取设备需优化级间分布与流比控制,离心萃取机通过调整

转鼓转速实现两相快速分离,混合澄清槽则需控制停留时间保证传质充分。电解设备需精确调控电流密度与槽电压,采用脉冲电源可抑制枝晶生长提升沉积层质量,阴极材料需具备高导电性与抗腐蚀性。蒸馏设备需配置高效冷凝系统与真空机组,分子泵与扩散泵组合可实现超低真空环境,减少金属挥发过程中的氧化损失。

4.4 过程环境控制

环境条件对稀散金属分离纯度影响显著。洁净度控制需贯穿整个生产流程,空气中的颗粒物可能吸附在金属表面导致污染,千级洁净车间可满足高纯金属制备需求。湿度调控需结合工艺特点,水解敏感金属需在干燥环境中处理,而某些电解体系则需维持特定湿度防止电解液挥发。气氛保护是防止金属氧化的关键,氩气或氮气保护可抑制高温下金属与氧反应,真空环境则适用于热敏性物质处理。噪声与振动控制需关注精密设备运行稳定性,减震基座与隔音罩可降低外界干扰对工艺参数的影响,确保分离过程长期稳定运行。

结束语

稀散金属高效分离提取及高纯化制备技术涉及多学科知识,涵盖多种技术路径与方法。从分离提取的主要技术路径,到关键环节的精准把控,再到高纯化制备技术的合理运用,以及实施条件的严格保障,每个环节都紧密相连、相互影响。只有全面掌握并优化这些技术与条件,才能实现稀散金属的高效、高纯度制备,满足高端制造业的需求,促进稀散金属产业的可持续发展。

参考文献

- [1]常欣怡,郑敬明,孙婉婷,等.膜分离技术在铜冶炼废液中稀散金属富集的应用[J].铜业工程,2025,(4):7-12.
- [2]房孟钊.铜阳极泥中硒的高效分离与回收工艺研究[J].铜业工程,2022,(4):53-56.
- [3]王秋平,关杰仁,汪瑞.真空蒸馏纯化稀散金属的工艺参数优化[J].铜业工程,2025,(6):1-8.
- [4]曾令明,耿志强,张红华,等.某冶炼厂氧化洗净残渣提铍工艺试验研究[J].铜业工程,2022,(4):47-52.