

无机化工中稀有金属的分离与回收技术

张晓扬

励福(江门)环保科技股份有限公司 广东 江门 529000

摘要: 无机化工中,稀有金属常混杂于复杂体系,其分离与回收需依体系特点和金属种类选适配技术,常用技术有溶剂萃取法、离子交换法、沉淀法等,新型技术也在推广。分离与回收效率受溶液pH值、反应温度、试剂浓度等因素影响。当前该技术面临资源赋存复杂、成本高、环境风险管控难等挑战,可通过强化基础研究、加大创新投入、完善环保举措、推动产学研协同等策略应对,未来技术优化方向为提升分离材料性能、优化工艺流程、强化过程控制。

关键词: 无机化工;稀有金属;分离技术;回收技术

引言:在无机化工领域,稀有金属因独特的物理化学性质,在高端制造、新能源等众多行业发挥着不可替代的关键作用。然而,稀有金属在生产过程中常与杂质金属、非金属元素混杂于复杂体系,其赋存状态复杂多样,给分离与回收带来极大挑战。当前,溶剂萃取法、离子交换法、沉淀法等传统技术,以及膜分离法、吸附法、电化学法等新型技术,在稀有金属分离与回收中各有应用,但也存在效率、成本、环境等方面的局限。深入探究这些技术的原理、影响因素,剖析面临的挑战并提出应对策略与技术优化方向,对实现稀有金属高效回收与资源化利用具有重要意义。

1 无机化工中稀有金属分离与回收的常用技术概述

在无机化工生产的复杂场景之下,稀有金属的赋存状态颇具特殊性。它们通常并非以纯净单一的形式存在,而是与杂质金属、非金属元素相互混杂,共同分布于酸性废液、碱性废渣以及熔融态物料等复杂体系之中。鉴于各类稀有金属在原子半径、电负性、氧化还原电位等物理化学性质方面存在显著差异,这就决定了在对其进行分离与回收时,必须依据不同的体系特点以及金属的具体种类,精准地挑选出适配的技术手段。目前,在稀有金属分离与回收领域应用较为广泛的技术主要有溶剂萃取法、离子交换法和沉淀法。溶剂萃取法是利用稀有金属离子在两种互不相溶的溶剂中分配比的差异,实现从溶液中对稀有金属的选择性萃取,该方法具有分离效率高、操作可连续化等显著优势,尤其适用于处理大规模、低浓度的含稀有金属溶液。离子交换法则是借助离子交换树脂对稀有金属离子的选择性吸附与解吸作用,达成分离和富集的目的,对于痕量稀有金属的回收具有独特优势。沉淀法是通过向溶液中添加合适的沉淀剂,促使稀有金属以沉淀的形式析出,该方法操作相对简便,成本也较低。除了上述这些传统且成熟的技

术之外,膜分离法、吸附法、电化学法等新型技术也在逐步推广应用。膜分离法基于膜的选择透过性实现分离,具有能耗低、无二次污染等优点;吸附法利用吸附剂对稀有金属的特异性吸附进行分离;电化学法通过控制电极电位实现稀有金属的选择性沉积或溶解。在实际生产过程中,为了达到最佳的分离与回收效果,常常会采用单一技术独立应用,或者将多种技术进行巧妙组合的方式,充分发挥各技术的优势,从而实现稀有金属的高效回收与资源化利用^[1]。

2 主要分离与回收技术的原理及应用

2.1 溶剂萃取法

溶剂萃取法基于溶质(稀有金属离子)在互不相溶的水相与有机相中溶解度的差异,实现稀有金属离子从水相到有机相的转移,进而完成分离与回收。该技术的核心是筛选适配萃取剂——萃取剂需能与稀有金属离子形成稳定络合物,且络合物在有机相中的溶解度远高于水相。在无机化工领域,溶剂萃取法多用于多种稀有金属的分离回收。操作时,先将含有稀有金属离子的水相与含有萃取剂的有机相充分混合,使稀有金属离子转移至有机相;随后通过添加反萃取剂,调节相关条件,使稀有金属离子从有机相返回水相,得到高浓度的稀有金属溶液,经后续处理即可获得稀有金属产品。该技术的优势在于分离效率高、选择性好、易实现连续操作,适用于大规模工业化生产;但存在萃取剂成本高、部分萃取剂有毒性易造成二次污染、有机相易乳化影响分离效果等局限性。

2.2 离子交换法

离子交换法利用离子交换树脂中的可交换离子,与溶液中稀有金属离子发生交换反应,使稀有金属离子吸附于树脂上;再通过洗脱剂解吸树脂上的稀有金属离子,实现分离与回收。离子交换树脂按可交换离子类型

分为阳离子交换树脂、阴离子交换树脂与螯合树脂，其中螯合树脂对特定稀有金属离子的选择性极高，在分离回收中应用尤为广泛。该技术常用于含多种轻稀有金属的无机化工废液处理。操作时，将含有稀有金属离子的废液通入装有离子交换树脂的设备中，废液中的稀有金属离子与树脂上的可交换离子发生交换并被吸附；之后用洗脱剂对树脂进行洗脱，得到高纯度的稀有金属溶液，经蒸发结晶、电解等工艺可制备稀有金属或其化合物产品。离子交换法的优点是选择性高、分离效果好、树脂可重复使用，适合低浓度稀有金属溶液处理；但存在树脂再生流程复杂、处理量较小、树脂易受杂质污染失效等问题，在高浓度复杂体系中的应用受限。

2.3 沉淀法

沉淀法通过向含稀有金属的溶液中添加沉淀剂，使稀有金属离子与沉淀剂发生化学反应，生成难溶性沉淀物；经过滤、洗涤、干燥分离沉淀物后，对沉淀物进一步处理即可回收稀有金属。根据沉淀反应类型，可分为氢氧化物沉淀法、硫化物沉淀法、碳酸盐沉淀法等，沉淀剂的选择需结合稀有金属离子性质与溶液体系特点确定。在无机化工中，沉淀法多用于伴生稀有金属的分离回收，以及部分高熔点稀有金属的初步分离。操作时，向含有稀有金属离子的溶液中加入适宜的沉淀剂，调节溶液条件，使稀有金属离子与沉淀剂反应生成沉淀物；将沉淀物过滤、洗涤后，通过焙烧、还原等工艺处理，即可得到稀有金属或其氧化物产品。该技术操作简单、成本低、设备投资少，适合小规模生产或对分离精度要求较低的场景；但选择性较差，易与杂质离子共沉淀导致产品纯度低，且会产生大量沉淀废渣，处理不当易造成二次污染^[2]。

3 影响稀有金属分离与回收效率的关键因素

3.1 溶液pH值

溶液pH值作为影响稀有金属分离与回收的关键参数，对分离过程起着至关重要的作用。它能够直接左右稀有金属离子在溶液中的存在形态，诸如离子种类、水合程度以及络合状态等，而这些形态的改变会显著影响稀有金属离子与各类分离试剂（如萃取剂、离子交换树脂、沉淀剂等）之间的相互作用效果，是决定分离与回收效率的核心要素之一。以溶剂萃取回收某类稀有金属为例，若溶液pH值过高，该稀有金属离子会因溶液环境的影响，难以与萃取剂形成稳定且具有良好选择性的络合物，进而导致萃取效率大幅降低；反之，若pH值过低，该稀有金属离子可能会发生水解反应，转化为沉淀物，无法顺利进入有机相，同样会对分离效果产生严重

的负面影响。因此，在实际操作过程中，必须通过严谨的实验来确定最佳pH值范围，保证稀有金属离子以适宜的形态参与反应，从而有效提升分离与回收效率。

3.2 反应温度

反应温度在稀有金属分离与回收过程中扮演着极为关键的角色，它对反应速率、平衡常数以及物质溶解度均有着显著的影响。从反应速率角度来看，依据阿伦尼乌斯方程，升高温度能够为反应体系提供更多的能量，使更多的反应物分子成为活化分子，从而加快反应速率，有效缩短稀有金属分离与回收所需的时间，提高生产效率。然而，温度并非越高越好，过高温度往往会带来一系列负面效应。在离子交换法中，过高的温度会破坏离子交换树脂内部的三维网状结构，导致树脂的交换容量大幅下降，使用寿命显著缩短。在沉淀法里，温度升高会使沉淀物的溶解度增大，造成沉淀不完全，使得部分稀有金属仍残留在溶液中，进而降低回收效率。因此，在实际操作中，必须根据所采用的具体技术和工艺要求，精准且合理地控制反应温度，在保障反应速率和回收效率的同时，避免对设备和试剂造成不必要的损伤。

3.3 试剂浓度

在稀有金属的分离与回收流程中，萃取剂、沉淀剂、洗脱剂等各类试剂的浓度，是影响整个过程效果的关键因素，直接关乎稀有金属离子的反应充分程度以及最终产品的纯度。当试剂浓度处于较低水平时，其与稀有金属离子的接触和反应机会减少，反应无法充分进行，这就会造成稀有金属分离或回收不完全，导致资源浪费和回收率降低。反之，若试剂浓度过高，不仅会造成试剂的过度消耗，增加生产成本，还可能引入新的杂质，对产品纯度产生负面影响。以溶剂萃取法为例，萃取剂浓度过低时，有机相对稀有金属离子的萃取能力大打折扣，使得萃取率低下；而浓度过高则会增加有机相的粘度，减缓两相分离的速度，还可能使杂质离子被共萃取，降低分离的选择性。因此，必须通过严谨的优化实验，精准确定试剂的最佳浓度，以此实现经济效益与分离回收效率的完美平衡^[3]。

4 无机化工中稀有金属分离与回收技术面临的挑战与应对策略

4.1 面临的挑战

在当下无机化工领域，稀有金属分离与回收技术的应用正遭遇多重核心挑战。（1）稀有金属资源赋存状态日益复杂。随着工业发展，含稀有金属的废弃物来源广泛，成分繁杂，杂质含量极高。现有的分离技术面对如此复杂的体系，往往难以精准且高效地将稀有金属从众

多杂质中分离出来,进而导致回收效率低下,回收所得产品的纯度也难以达到理想标准,无法满足高端制造业等对高纯度稀有金属的需求。(2)部分技术成本居高不下。像新型分离材料的制备,需要先进的工艺和特殊的原料,使得制备成本大幅增加;复杂工艺所需的设备投资巨大,且运行过程中的能耗、维护等费用也相当可观,这些因素严重限制了相关技术的大规模工业化推广应用。(3)环境风险管控难度颇大。在分离与回收过程中,可能会出现萃取剂泄漏、废渣处理不彻底等情况,这些问题极易引发二次环境污染,对生态环境造成严重破坏。

4.2 应对策略

为有效应对当前无机化工中稀有金属分离与回收技术面临的挑战,可从以下四个关键方面制定切实可行的应对策略。(1)强化基础研究。深入剖析稀有金属在复杂体系中的存在形态、迁移规律以及与其他物质的相互作用机制,为研发新型分离技术和材料筑牢理论根基,使后续技术创新更具方向性和针对性。(2)加大技术创新投入。集中力量开发低成本、高性能的分离材料与工艺。比如,通过优化合成工艺参数、探索新的制备路线,降低新型功能材料的生产成本;对现有技术组合进行优化升级,减少工艺能耗与运行成本,提升整体经济效益。(3)完善环保举措。积极研发无毒、可降解的绿色分离试剂,从源头上减少环境污染风险。同时,强化对分离回收过程中产生的废渣、废液、废气的处理与监测,确保实现污染物零排放或达标排放,切实守护生态环境。(4)推动产学研深度协同。加强企业、高校与科研机构之间的合作交流,加速科研成果向实际生产力的转化,加快先进技术在工业生产中的推广应用步伐^[4]。

4.3 技术优化方向

从技术优化的层面审视,未来稀有金属分离与回收技术需着重聚焦于三个关键方向。(1)着力提升分离材料性能。当前复杂体系中稀有金属离子的分离面临诸多

难题,研发具备高选择性、高吸附容量且易于再生的新型材料迫在眉睫。这类材料能够在众多杂质离子中精准识别并高效吸附稀有金属离子,同时可多次循环使用,显著增强分离效果,降低分离成本。(2)大力优化工艺流程。通过简化操作步骤、减少中间环节的物料损耗,可大幅提升技术的经济性与实用性。例如,开发一体化分离设备,将稀有金属离子的吸附、解吸、提纯等操作集成于一体,实现连续化生产,提高生产效率,缩短生产周期。(3)强化过程控制。引入先进的精准调控技术,对溶液pH值、反应温度、试剂浓度等关键参数进行实时监测与动态调整。确保分离与回收过程始终处于稳定高效的状态,有效提升产品质量的稳定性和一致性,满足高端领域对稀有金属产品的严苛要求。

结束语

无机化工中稀有金属分离与回收技术意义重大且挑战诸多。当前,复杂资源赋存、高成本及环境风险管控难等问题,制约着技术发展与应用。不过,通过强化基础研究、加大技术创新投入、完善环保举措、推动产学研协同等应对策略,可有效化解难题。未来,技术优化方向明确,提升分离材料性能、优化工艺流程、强化过程控制将成为关键。随着这些举措的逐步推进与落实,稀有金属分离与回收技术将不断突破瓶颈,实现更高效、环保、经济的资源化利用,为高端制造业等领域提供坚实支撑,推动无机化工行业迈向新的发展高度。

参考文献

- [1]何俊峰.岩矿中稀有金属元素化学分析方法研究[J].世界有色金属,2024,(03):41-43.
- [2]廖兰科.岩矿中稀有金属元素化学分析探析[J].现代盐化工,2023,50(05):24-25+75.
- [3]路文利.绿色化工技术与绿色化工设计的相关问题研究和工艺危害[J].化工设计通讯,2022,48(5):181-183.
- [4]孙志敏.新工科背景下稀有金属冶金学的课程教学改革[J].教育观察,2020,9(42):54-56.