

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.119



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



水中有价离子资源回收的核晶造粒技术

黄俊玮, 金鹏康

(西安交通大学 人居环境与建筑工程学院, 西安 710049)

摘要:随着全球资源紧缺以及对资源可持续利用要求的不断提升,高效回收和利用水体中蕴含的战略性资源愈发显得重要。针对水体中战略性资源回收与资源化利用困难的问题,基于造粒混凝机理,提出了投加功能化晶种在过饱和区提供异相成核位点,辅以诱晶剂调控过饱和度,诱导目标离子在晶种表面定向生长,形成高纯度、高密度造粒体的核晶造粒资源化回收技术。以光伏行业废水中氟离子的高效回收,油气田废水中战略性资源(碘、锶、钡)的回收,有色冶炼和新能源行业废水中有价金属离子及稀有金属离子(锰、镁、钴、镍、锂)的高效回收为例,系统阐明了核晶造粒技术在分离富集过程中的作用机制,介绍了其一体化设备在不同废水中的回收效率及应用情况。工业化应用表明,核晶造粒技术可实现氟、锶、钡、锰等水中资源的高纯度($>90\%$)回收,所得颗粒产物无需脱水即可直接利用,具备高效资源回收能力与低成本等优势。

关键词:核晶造粒;工业水处理;资源回收;有价金属;稀有金属

中图分类号:X75 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(XXXX)XX-0001-08

Nucleation crystallization pelleting process for recovering valuable ion resources from water

HUANG Junwei, JIN Pengkang

(School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P. R. China)

Abstract: With the global depletion of natural resources and rising demand for sustainable management, recovering strategic resources from water has become a critical environmental and economic challenge. This study proposes nucleation crystallization pelleting process based on granulation and coagulation mechanisms. In supersaturated zone, functionalized seeds are introduced to provide heterogeneous nucleation sites with crystallization promoters. This induces the target ions to grow directionally on the seed surface, forming high purity and density pellets. The process was applied to recover fluoride from photovoltaic wastewater, extract strategic elements (I, Sr, and Ba) from oil and gas field wastewater, and reclaim valuable and rare metal ions (such as Mn, Mg, Co, Ni, and Li) from non-ferrous metal smelting and new energy industries wastewater. The separation and enrichment mechanisms were systematically analyzed, and the adaptability of the integrated equipment to diverse wastewater types was evaluated. Industrial applications demonstrate that the process can

收稿日期:2025-10-29

基金项目:国家自然科学基金(52230001);陕西省秦创原平台“科学家+工程师”团队项目(2023KXJ-149)

作者简介:黄俊玮(1999-),男,主要从事水污染治理,E-mail:406291476@qq.com。

金鹏康(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:pkjin@xjtu.edu.cn。

Received: 2025-10-29

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52230001); “Scientists + Engineers” Team Project of Qinchuangyuan (No. 2023KXJ-149)

Author brief: HUANG Junwei (1999-), main research interest: water pollution control, E-mail: 406291476@qq.com.

JIN Pengkang (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: pkjin@xjtu.edu.cn.

achieve high purity (over 90%) recovery of F, Sr, Ba, and Mn. The products can be directly utilized without dewatering, showcasing high recovery efficiency and low cost.

Keywords: nucleation crystallization pelleting; industrial wastewater treatment; resource recovery; valuable metals; rare metals

21 世纪以来,随着全球工业化进程的加速以及新能源产业的迅猛发展,氟、锰、钴、镍、锂等一系列战略性资源的需求持续高速增长:中国萤石消费量占全球总消费量的 60% 以上^[1];预计到 2030 年,中国锰消费量将达到 939 万 t^[2];2017-2022 年,全球锂、钴、镍金属的需求量分别增长了 300%、70%、40%^[3]。然而,中国在部分关键资源上的进口依存度长期处于高位^[4-8]。与此同时,光伏废水、油气田采出水、矿山尾水和盐湖卤水等水体资源中往往大量富含这些战略性资源^[9-12],是重要的“二次矿产资源库”,在此背景下,若能以高效、低成本的技术手段从这些水体中回收对应的有价值元素,不仅能够减轻环境风险,还能在一定程度上缓解对初级矿产的依赖^[13]。

化学沉淀-混凝法流程简洁、设备要求低、运行操作相对简便,已被广泛用于冶金、矿山废水及电镀废水等工业废水的处理^[14-15]。其过程是向体系中投加碳酸盐、氢氧化物等沉淀剂,将溶液推入过饱和区,诱导目标离子金属元素析出为低密度的絮状污泥,并通过“混凝-沉淀-过滤”工艺实现相转移与固液分离,能较为有效地去除部分金属离子^[16]。但是该方法需要持续投加大量药剂以维持高过饱和度驱动力,产生的污泥结构松散且成分复杂,此类污泥沉降性能差、脱水困难,不仅增加了处置成本,也难以实现对战略性资源的针对性回收,并可能引发二次污染^[17]。离子交换法是利用带有特定官能团的树脂,与目标离子发生交换反应,实现资源的浓缩与分离,因其工艺成熟、选择性较好,在低浓度金属离子回收中应用广泛^[18-19]。然而,该方法对进水水质要求较高,在高浊度、高有机物或高盐度水质环境下,树脂表面易遭受有机物、胶体及悬浮颗粒的堵塞或污染,导致交换容量下降和功能衰减^[20]。为恢复树脂性能,需要频繁使用酸、碱或盐溶液进行再生,不仅消耗大量化学药剂,再生过程中产生的废液若未及时达标处理,还可能造成新的环境负担^[21]。膜分离技术具有分离效率高、设备紧凑、易于自动化等优势,其原理是将废水通过特定孔径及表面化学性质的膜材料,在跨膜压力差或浓度差驱动下实现溶质的分离与富集^[22-23]。但实际运行中面对高有机物或高悬浮颗粒的废水时,膜污染难以避免,需定期采用的化学清洗或高压反冲恢复膜性的

能,这不仅提升了运营费用,还可能引入清洗剂残留污染^[24]。此外,膜元件寿命有限,频繁更换会产生大量废弃膜材料,其处置过程若缺乏有效回收利用,也会带来新的固废与微塑料环境问题^[25]。

为有效克服上述工艺的局限,王晓昌^[26]基于造粒混凝和化学结晶原理提出了核晶造粒技术(nucleation crystallization pelleting process),该技术在高盐度、高硬度、多离子共存的复杂废水体系(如盐湖卤水、矿山尾水、锂电池制造废液)中展现出了优异的运行稳定性与离子选择性分离能力^[27-28]。核晶造粒技术通过设计具有特定表面化学性质的晶种材料,将目标离子在特定晶种表面高选择性富集,可实现多种金属(如锂、锰、钴、镍)的定向析出与高纯度回收。该技术生成固体颗粒不含水、纯度高、能直接利用,使用后的晶种经过简单处理也能回收再利用^[29],不仅避免了大量含水污泥的产生与高处置成本,还将废水视为“液态矿山”,在确保污染物去除达标的同时实现了战略性资源的高效回收。核晶造粒技术为工业绿色转型与可持续发展提供了切实可行的技术路径。

1 核晶造粒技术原理

根据结晶学理论,在溶液中,只有在达到一定程度的过饱和时才能形成沉淀,而溶质达到饱和与自发形成沉淀之间存在一个区域,称为“过饱和区”,过饱和度与溶解度之间的关系可以在图 1 说明:图中 AB 曲线为溶解度曲线,CD 线为超溶解度曲线,AB 和 CD 曲线之间的区域是介稳区,当溶质浓度超过其溶解度,达到饱和状态并处于介稳区时,并不会自发沉淀,此时如果施加外部干扰,如添加诱晶剂或晶种进行诱导,降低结晶难度,很容易析出沉淀。

核晶造粒技术机理及晶种表面反应过程如图 2 所示。该技术的核心理念是在水体中引入经功能化改性的晶种颗粒,在其表面构建目标晶相的初始晶层,提供异相成核位点,并辅以诱晶剂调控过饱和度,诱发由“点”向“面”的有序结晶生长,最终诱导目标离子定向结晶为高纯度、可直接利用的固体产物^[30]。与传统均相成核方式相比,该技术显著降低了对体系整体过饱和度的需求,减少药剂消耗的同时可在短停留时间内实现高选择性结晶。同时,

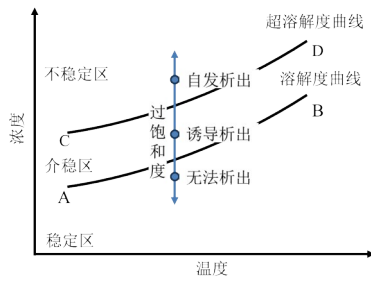


图1 溶解度与过饱和度的关系

Fig. 1 The relationship between solubility and supersaturation

造粒过程中的颗粒在高强度水力剪切作用和容积挤压力作用下不断致密化,通过外延生长逐步排除内部水分,产物结构紧凑、不含水分,无需额外浓缩与脱水即可直接储存、运输或使用。此外,晶种表面生长过程非化学转化反应,晶种并未发生晶格重构或化学键断裂,其原始晶体形貌与晶格结构在多次循环使用中仍能完整保留,经固液分离、清洗及表面活化处理后即可实现重复利用,大幅减少后处理环节与能耗^[31]。

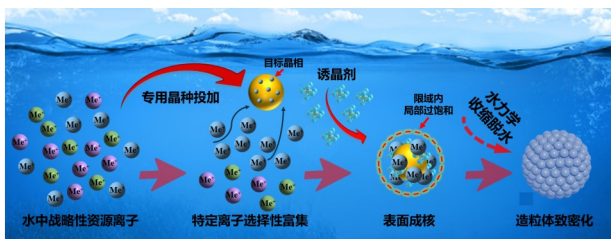


图2 核晶造粒技术原理

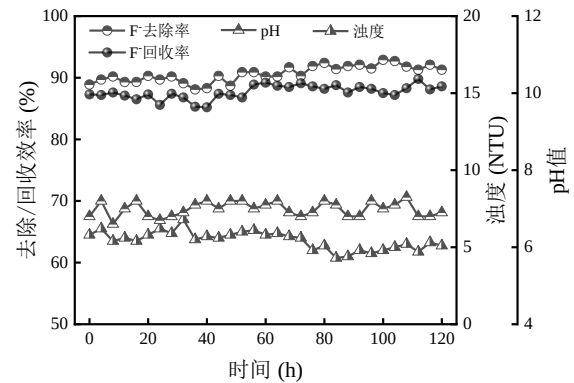
Fig. 2 Mechanism of nucleation crystallization pelleting

2 典型废水中战略性资源的回收

2.1 光伏行业废水中氟离子高效回收

随着光伏产业和新能源储能行业的迅速发展,高酸度、高氟离子浓度(F^-)的含氟废水已成为亟需解决的重要环境与资源化利用问题。传统生化法虽能在一定程度上满足常规排放限值,但难以实现氟的选择性回收与高值利用。同时,生化体系对高酸度的适应性有限,常需前端大量中和与稀释,导致污泥量增加与运行成本攀升。为应对上述挑战,以云南某光伏制造企业的高浓度含氟废水为研究对象,采用镁盐为诱晶剂的核晶造粒工艺,系统分析了水动力条件、停留时间及溶液化学环境对F去除效率的影响^[32]。如图3(a)所示,在诱晶剂 $MgCl_2$ 投加量与F的质量比为4.46:1、进水流速为 $67.8 \times 10^{-4} m^3/h$ 、填料床高度为30%、晶种粒径为80~100目时,F去除率最高能达到90%以上。如图3(b)、(c)所示,在反应过程中, Mg^{2+} 与 F^- 反应生成的氟化镁在晶种表面持续沉积与成长,形成致密的造粒

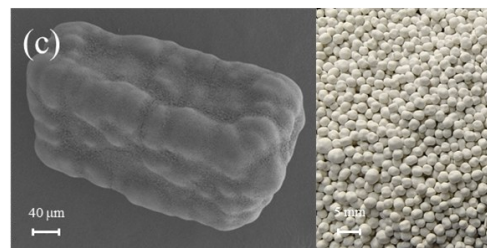
体,造粒体的纯度最终能达到90%以上,实现了含氟资源的颗粒化固定和高纯度回收。



(a) 光伏废水中污染物的去除效果



(b) 除氟专用晶种及SEM图



(c) 氟造粒体及SEM图

图3 光伏废水中核晶造粒回收氟资源的效果^[32]Fig. 3 Recovery efficiency of F resource in photovoltaic wastewater^[32]

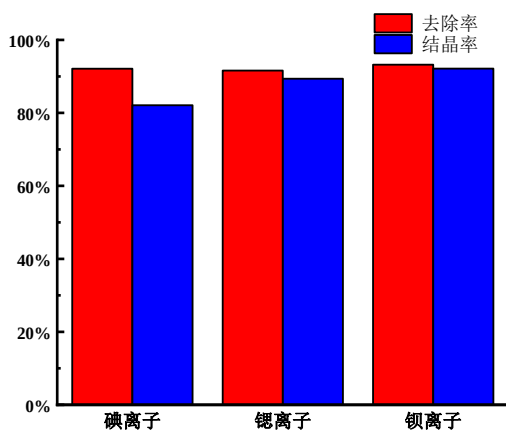
2.2 油气田废水中的战略性资源回收

油气田采出水作为油气开发过程中的主要副产物,具有产量大、成分复杂、时空波动强的特征,是现阶段油气行业最主要的工业废水类型之一。此类废水中通常含有大量具有回收价值的金属与非金属元素,如碘、锶、钡等,具有显著的资源化潜力。然而,目前采出水的主流处置方式仍为处理后回注地层,大量战略性资源未得到有效利用,导致资源浪费严重^[33]。

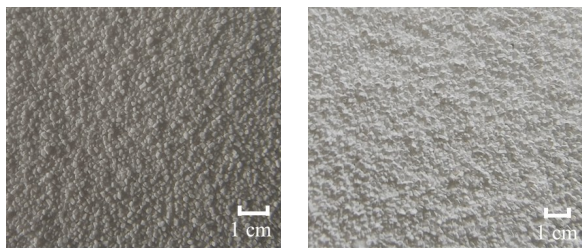
针对采出水中的碘离子(浓度通常为数百 mg/L),采用次氯酸钠将其氧化为碘酸根,再以氯化钡作为诱晶剂,在控制pH值与离子强度的条件下使碘以碘酸钡的晶相形式沉淀,并在晶种表面生长,形成可快速沉降的颗粒产物。实验结果如图4(a)所示,经工艺优化与参数调整后,碘离子的回收率

达到80%以上,生成的高纯度碘酸钡可直接作为工业原料回收,同时促进了钡离子的同步回收。

对于采出水中的锶、钡离子,利用碳酸盐调节溶液碱度与碳酸根浓度,使 Sr^{2+} 、 Ba^{2+} 分别以碳酸锶、碳酸钡形式选择性结晶并生长到晶种表面,分阶段实现Sr、Ba的高效回收。实验结果如图4(a)所示, Sr^{2+} 、 Ba^{2+} 的去除率均可达到90%以上, Sr^{2+} 的平均结晶率超过88%, Ba^{2+} 的平均结晶率超过90%,造粒体产物为高纯度碳酸锶与碳酸钡,如图4(b)、(c)所示,无需额外脱水即可直接工业利用。



(a) 碘、锶、钡离子的去除效果



(b) 碳酸锶造粒体

(c) 碳酸钡造粒体

图4 油气田废水中核晶造粒回收碘、锶、钡资源的效果
Fig. 4 Recovery efficiency of I, Sr and Ba resources in oil and gas field wastewater

值得强调的是,水中锶、钡均可通过调控pH值,使其与 CO_3^{2-} 反应生成碳酸盐沉淀,从而实现分离回收。从固碳角度而言,上述碳酸盐反应路径与 CO_2 资源化具有天然协同:若将 CO_2 作为 CO_3^{2-} 来源,并配合针对油气采出水中价金属离子的 CO_2 固定与富集专用晶种,可在捕集 CO_2 的同时驱动 Sr^{2+} 、 Ba^{2+} 沉淀,兼具固碳与金属回收双重效益,对推动油气田绿色低碳发展具有重要环境与经济价值。

2.3 有色冶炼与新能源废水中稀有金属离子的回收

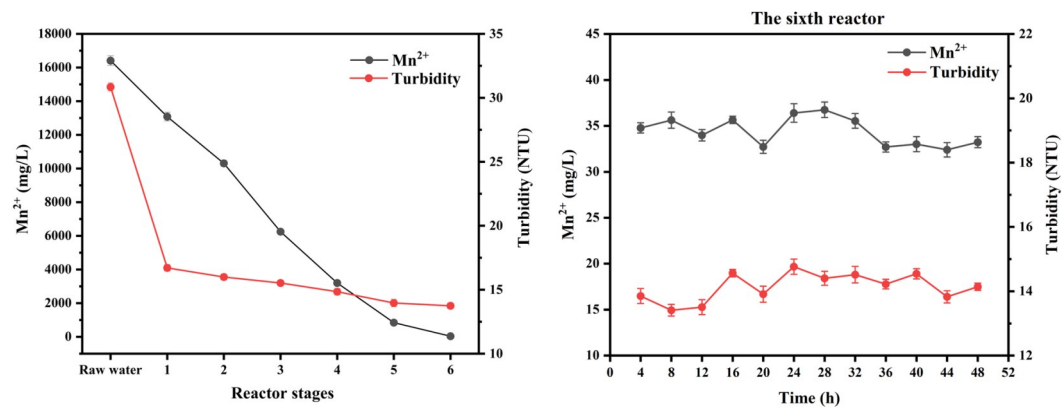
锰、镁资源在新能源材料及特种合金制造中具有重要潜在价值。针对陕西安康地区某电解锰制造企业排放的高浓度含锰、镁废液,提出了多级串

联核晶造粒回收方案。该方案利用碳酸钠和氢氧化钠调节溶液化学条件,形成过饱和环境,促使 Mn^{2+} 和 Mg^{2+} 在专用晶种表面沉积生长。在调控优化初始床层高度、诱晶剂投放量及水力停留时间等参数后,经多级反应器运行处理,运行结果如图5(a)、(b)所示, Mn^{2+} 去除率保持在99%以上, Mg^{2+} 的去除率保持在97%以上,对造粒体的表面形貌与化学成分进行分析(SEM、XRD、XPS等),确认 Mn^{2+} 主要以碳酸锰的形式沉积于晶种表面,所得造粒体由高纯度碳酸锰组成,产品纯度保持在95%以上,溶出率超过95%^[29], Mg^{2+} 造粒体则由高纯度氢氧化镁组成,如图5(c)、(d)所示,实现了锰、镁的高效资源化回收。

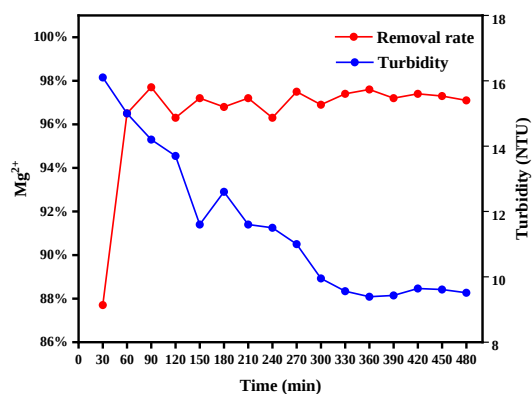
在陕西地区另一新能源材料生产企业中,生产流程会产生大量含有高浓度钴和镍的废液,这些废液具有较高的再利用价值。针对 Co^{2+} 和 Ni^{2+} 两种金属离子的特性,分别设计了不同的表面功能化专用晶种,建立了由四级反应单元串联组成的核晶造粒工艺体系,各经两级实现对Co和Ni的高效回收。实验显示,在优化pH值、水力条件及诱晶剂浓度后,Co的去除率稳定在99%以上、Ni的去除率平均超过98%,所得造粒体产物如图6所示,均为不含水的密实颗粒,可直接用于冶金或储能材料再利用。

在铝电解冶炼环节,熔盐电解仍是当前全球主流的制铝工艺。为优化熔盐电解体系的热力学和传质特性,工业生产中常掺入含锂的氟盐类助熔剂(如氟化锂、氟铝酸锂等),以降低熔体的凝固点、改善导电性和提升能效,而冰晶石(Na_3AlF_6)是废铝电解质的主要成分^[34]。针对该特性,设计并合成了专用于冰晶石回收的功能化晶种,通过向废水中加入铝盐作为诱晶剂,使铝、氟元素以冰晶石的形式沉淀并定向附着于晶种表面。在优化水力学条件后,当溶液中铝氟摩尔比控制在1:6时,氟离子的去除率达到最佳,最高可超过80%。在该条件下对所获得沉淀产物的化学成分分析结果表明,其主要成分为 Na_3AlF_6 ,标志着废水中铝、氟资源实现了高附加值的有效回收。

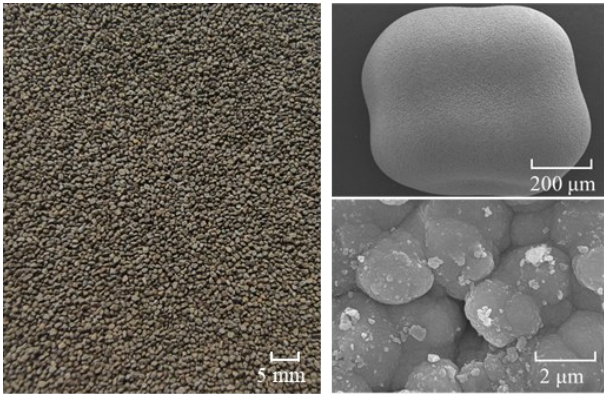
同时,氧化铝原料中常伴生一定比例的含锂矿物或锂离子杂质,这些杂质在矿石破碎和炼制过程中难以全部去除,最终进入电解体系^[35]。对此,研制了针对锂离子回收的专用晶种,并利用核晶造粒技术对含锂废水进行深度处理,实现了对锂离子的高效分离与固化。如图7所示,实测结果表明,锂的回收率稳定在90%以上,造粒体纯度平均维持在90%~95%之间,可直接投入工艺使用。



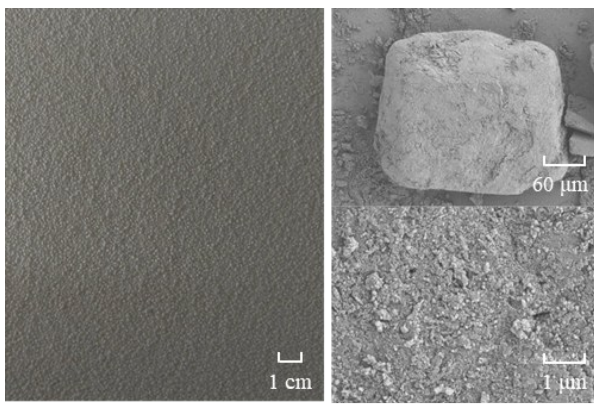
(a) 核晶造粒技术对于锰离子和浊度的去除率



(b) 核晶造粒技术对于镁离子和浊度的去除率



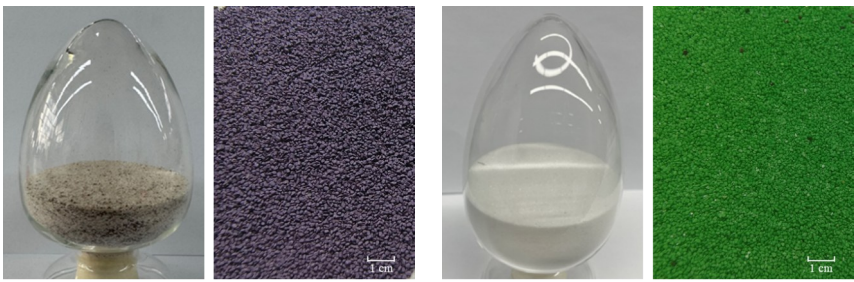
(c) 锰造粒体及SEM图像



(d) 镁造粒体及SEM图像

图 5 电解锰废水中核晶造粒回收锰、镁资源的效果^[29]

Fig. 5 Recovery efficiency of Mn and Mg resources in electrolytic manganese wastewater

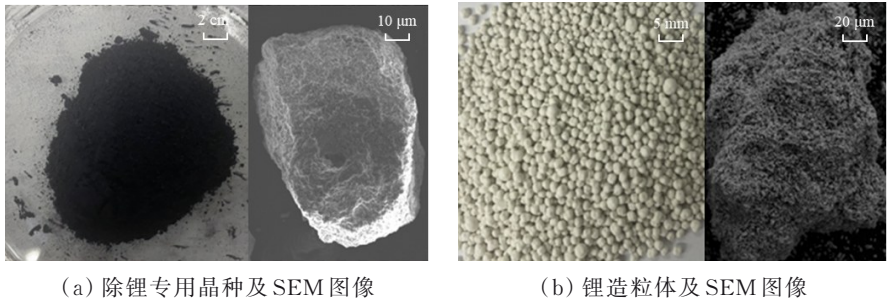


(a) 除钴专用品种及钴造粒体

(b) 除镍专用品种及镍造粒体

图 6 新能源生产废水中核晶造粒回收钴、镍资源的效果

Fig. 6 Recovery efficiency of Co and Ni resources in new energy production wastewater



(a) 除锂专用晶种及 SEM 图像 (b) 锂造粒体及 SEM 图像

图 7 电解废水中核晶造粒回收锂资源的效果

Fig. 7 Recovery efficiency of Li resource in electrolytic wastewater

3 结论与展望

目前,核晶造粒技术已在光伏、油气、矿业及新能源等行业完成工业化应用,可连续稳定运行,实现对氟、锶、钡和锰等水中战略性资源的高纯度回收。如表 1 所示,核晶造粒技术不仅具有较小的占

地面积和优良的稳定运行性能,还具备高效污染物去除与资源回收能力,回收所得的颗粒产物密度高,不含水,性质稳定,纯度可稳定保持在 90% 以上,无需额外脱水或浓缩步骤便可直接外排使用,在显著提高资源利用效率的同时降低处理成本^[36]。

表 1 核晶造粒与传统工艺对比

Table 1 Comparative analysis of nucleation crystallization pelleting and conventional processes

技术对比	占地面积/m ²	额外药剂成本/(元/m ³)	污泥处置费/(元/m ³)	资源回收率/%	运行费用/(元/m ³)
传统工艺	>300	1.04~1.17	1.32~2.55	<25	4.00~20.78
核晶造粒	<80	0.2~0.8	0~0.4	>90	2.05~16.43

理论上元素周期表中凡能以离子、络合物或可沉淀晶相存在于水相体系的元素,例如硼、铝、铜、铬、稀土元素及部分贵金属与放射性元素,均具备通过该技术回收的潜力:通过设计具有特定选择性的晶种、优化诱晶剂种类与配比,并结合动态 pH 调控,精准诱导目标污染物附着到专用晶种上,实现多类资源的分级高效回收。

在低浓度废水处理方面,可先采用预浓缩工艺富集目标污染物,再利用核晶造粒实现固化与回收,以最大化资源利用率。从碳捕集视角出发,若将捕集的 CO₂ 转化为 CO₃²⁻ 用于废水中战略性资源的回收,可同步实现碳减排与资源再生利用,在促进绿色低碳与零排放工艺发展方面具有显著潜力。这不仅意味着核晶造粒技术能够有效应对从工业废水到百万分之一稀溶液的处理挑战,还可能在湿法冶炼、盐湖卤水、油气田采出水及矿山废水等废水处理领域引发工艺革新,推动工业废水近零排放、破解高盐废水处理瓶颈,并在水中战略性资源回收与减污降碳中发挥重要的战略作用。

参考文献

[1] 刘秋颖. 中国萤石资源供需形势分析及对策建议[J]. 矿产勘查, 2023, 14(10): 1798-1804.
LIU Q Y. Analysis of supply-demand situation of fluorite resources in China and suggestions [J]. Mineral

Exploration, 2023, 14(10): 1798-1804. (in Chinese)
[2] 严文泽, 刘思为, 杨柳毅, 等. 锰资源现状及开发利用技术进展[J]. 中国锰业, 2024, 42(2): 16-21, 26.
YAN W Z, LIU S W, YANG L Y, et al. Current status and technological advances in development and utilization of manganese resources [J]. China Manganese Industry, 2024, 42(2): 16-21, 26. (in Chinese)
[3] 成金华, 周文潇, 沈鹏程, 等. 中国新能源关键矿产资源供应安全评价与预警: 以铜、锂、钴、镍为例[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2025, 59(4): 611-623.
CHENG J H, ZHOU W X, SHEN P C, et al. Evaluation and early-warning of critical mineral resource supply security for China's new energy sector: cases of copper, lithium, cobalt, and nickel [J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 2025, 59(4): 611-623. (in Chinese)
[4] 杜春彦, 苑帅, 尉雪菲. 全球萤石资源分布格局与中国产业发展挑战及优化策略研究[J]. 中国矿业, 2025, 34(7): 324-334.
DU C Y, YUAN S, WEI X F. Distribution pattern of global fluorite resources and the challenges and optimization strategies of China's industrial development [J]. China Mining Magazine, 2025, 34(7): 324-334. (in Chinese)
[5] 程超颖. 寻“锰”之路任重道远[J]. 中国海关, 2024(12): 74-75.
CHENG C Y. The long and arduous path to explore manganese. [J]. China Customs, 2024(12): 74-75. (in Chinese)

- [6] 张奇, 刘伯瑜, 黄振月, 等. 市场博弈均衡视角下全球动力电池锂金属贸易格局演化[J]. 资源科学, 2025(7): 1533-1545.
- ZHANG Q, LIU B Y, HUANG Z Y, et al. Evolution of global trade patterns of lithium metal for power batteries from a market game equilibrium perspective [J]. Resources Science, 2025(7): 1533-1545. (in Chinese)
- [7] 易杏花, 王笑笑, 成金华, 等. 清洁能源关键矿产加工产品供需预测及保供措施研究: 以锂、钴、镍为例[J]. 资源与产业, 2025, 27(1): 63-76.
- YI X H, WANG X X, CHENG J H, et al. Supply-demand forecast and supply-securing measures of clean energy mineral processing products based on a case study on lithium, cobalt and nickel [J]. Resources & Industries, 2025, 27(1): 63-76. (in Chinese)
- [8] 张兴. 统筹发展和安全背景下战略性矿产资源保供策略分析[J/OL]. 中国国土资源经济, 2025: 1-12. (2025-09-01). <https://link.cnki.net/doi/10.19676/j.cnki.1672-6995.001252>.
- ZHANG X. Analysis of strategic mineral resources supply assurance strategies under the context of coordinating development and security [J/OL]. Natural Resource Economics of China, 2025: 1-12. (2025-09-01). <https://link.cnki.net/doi/10.19676/j.cnki.1672-6995.001252>. (in Chinese)
- [9] 尚勇. 工业含氟废水联合处理工艺实践研究[J]. 山西化工, 2025, 45(7): 264-266.
- SHANG Y. Practical study on the combined treatment process of industrial fluorine-containing wastewater [J]. Shanxi Chemical Industry, 2025, 45(7): 264-266. (in Chinese)
- [10] 林庆绪, 陈深培, 韦华磊, 等. 含钴和镍离子高铵盐废水的回收处理[J]. 广州化工, 2023, 51(11): 164-166.
- LIN Q X, CHEN S P, WEI H L, et al. Recovery and treatment of high ammonium salt WastewaterContaining cobalt and nickel ions [J]. GuangZhou Chemical Industry, 2023, 51(11): 164-166. (in Chinese)
- [11] 张洪铭. 废水中锰的回收及膜精炼技术研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
- ZHANG H M. Study on the recovery of manganese in wastewater and membrane refining technology [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2023. (in Chinese)
- [12] 王鹏, 刘晓博, 尹中山, 等. 浅谈自贡地区卤水型锂矿水化学特征以及对找矿的意义[J]. 中国井矿盐, 2025, 56(2): 6-8.
- WANG P, LIU X B, YIN Z S, et al. Brief discussion on the hydrochemical characteristics of brine-type lithium ore in Zigong area and its significance for prospecting [J]. China Well and Rock Salt, 2025, 56(2): 6-8. (in Chinese)
- [13] 李超, 林凡昌. 工业废水处理技术存在的问题及创新发展路径研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6(11): 191-193.
- LI C, LIN F C. Research on the problems and innovative development paths of industrial wastewater treatment technology [J]. Leather Manufacture and Environmental Technology, 2025, 6(11): 191-193. (in Chinese)
- [14] NIKKHAH H, DI MARIA A, GRANATA G, et al. Sustainable process design for lithium recovery from geothermal brines using chemical precipitation [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2025, 212: 107980.
- [15] 李金印, 杨曦, 黄维巍, 等. 基于两级强化化学混凝沉淀法的低浓度含氟工业废水深度除氟研究[J]. 水处理技术, 2024, 50(2): 121-124.
- LI J Y, YANG X, HUANG W W, et al. Deep fluoride removal from fluoridated industrial wastewater based on two-stage enhanced chemical coagulation and precipitation method [J]. Technology of Water Treatment, 2024, 50(2): 121-124. (in Chinese)
- [16] XU L Z, JIN X, XU W L, et al. Highly efficient phosphorus removal by a novel prolonged stirring pelleting coagulation for sludge water treatment [J]. Journal of Water Process Engineering, 2024, 64: 105678.
- [17] KARA F, GURAKAN G C, SANIN F D. Monovalent cations and their influence on activated sludge floc chemistry, structure, and physical characteristics [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2008, 100(2): 231-239.
- [18] 陈啸龙, 张宇军, 许振良, 等. PGME痕量金属离子的树脂吸附行为[J/OL]. 应用化工, 2025: 1-8. (2025-11-28). <https://link.cnki.net/doi/10.16581/j.cnki.issn1671-3206.20251127.003>.
- CHEN X L, ZHANG Y J, XU Z L, et al. Resin adsorption behavior of trace metal ions in PGME [J/OL]. Applied Chemical Industry, 2025: 1-8. (2025-11-28). <https://link.cnki.net/doi/10.16581/j.cnki.issn1671-3206.20251127.003>. (in Chinese)
- [19] DENG X M, ZHOU Y J, BIAN Z F, et al. Synergistic photocatalysis-ion exchange strategy enabling high-efficiency recovery of trace rhodium from organic-rhodium wastewater [J]. Applied Catalysis B: Environment and Energy, 2026, 383: 126128.
- [20] 马运娟. 影响离子交换树脂处理性能的原因及措施[J]. 氮肥技术, 2024, 45(3): 43-46.
- MA Y J. Reasons and measures affecting the processing performance of ion exchange resin [J]. Nitrogenous Fertilizer Technology, 2024, 45(3): 43-46. (in Chinese)
- [21] 刘宇, 尤志成, 王怡帆. 乙二醇醛树脂再生工艺中的能耗分析与节能措施研究[J]. 广州化工, 2025, 53(22): 160-163.
- LIU Y, YOU Z C, WANG Y F. Energy consumption analysis and energy-saving measures in regeneration process of ethylene glycol de-aldehyde resins [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2025, 53(22): 160-163.

- (in Chinese)
- [22] RANDHAWA K. Organic membranes in current separation technologies: Materials, fabrication, and economic perspectives [J]. *Inorganic Chemistry Communications*, 2025, 182: 115404.
- [23] 彭义. 平板陶瓷超滤膜去除电镀废水中重金属污染物工艺研究[D]. 北京: 清华大学, 2018.
- PENG Y. Flat-sheet ceramic UF membrane process for removal of heavy metal contaminants from electroplating wastewater [D]. Beijing: Tsinghua University, 2018. (in Chinese)
- [24] ROOZITALAB A, KARGARI A, SOLEIMANI M. Exploring the performance of membrane separation under harsh operating conditions: A green approach to membrane processes [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2025, 40: 104557.
- [25] 谷卫忠, 王振基, 程志, 等. 反渗透膜技术在处理工业废水中的应用研究[J]. *山西化工*, 2025, 45(10): 161-163.
- GU W Z, WANG Z J, CHENG Z, et al. Research on the application of reverse osmosis membrane technology in the treatment of industrial wastewater [J]. *Shanxi Chemical Industry*, 2025, 45(10): 161-163. (in Chinese)
- [26] 王晓昌. 造粒混凝及其对水和废水处理的强化作用再考[J]. *环境科学学报*, 2023, 43(12): 11-15.
- WANG X C. Reconsideration of pelleting coagulation and its role in enhancing water and wastewater treatment [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023, 43(12): 11-15. (in Chinese)
- [27] 辛浩然, 李尧, 金鑫, 等. 核晶凝聚诱导造粒法同步去除硬度和有机物的研究[J]. *给水排水*, 2022, 58(1): 76-82.
- XIN H R, LI Y, JIN X, et al. Study on simultaneous removal of hardness and organic matter by nucleate coagulation induced granulation [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 58(1): 76-82. (in Chinese)
- [28] 商亚博, 张志鹏, 殷伟民, 等. 核晶造粒技术同步去除疏干水中硬度与悬浮物[J]. *中国给水排水*, 2025, 41(11): 56-64.
- SHANG Y B, ZHANG Z P, YIN W M, et al. Nucleation crystallization pelleting(NCP) process for simultaneous removal of hardness and suspended solids in mine drainage water [J]. *China Water & Wastewater*, 2025, 41(11): 56-64. (in Chinese)
- [29] HUANG J W, SHANG Y B, XU Y N, et al. Study on the nucleation crystallization pelleting process for manganese ion recovery from hydrometallurgical tailings water [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2025, 19(7): 98.
- [30] 姚雪纯. 诱导结晶法去除废水中的重金属离子的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2019.
- YAO X C. Study on removal of heavy metal ions in wastewater by induced crystallization [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2019. (in Chinese)
- [31] LI Y, XIN H R, ZONG Y K, et al. A novel nucleation-induced crystallization process towards simultaneous removal of hardness and organics [J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 307: 122785.
- [32] 王亚东, 付桂浩, 周丹姮, 等. 光伏行业废水中高浓度氟离子核晶造粒回收效能与机制研究[J]. *中国环境科学*, 2025, 45(2): 803-809.
- WANG Y D, FU Z H, ZHOU D H, et al. Study on recovery efficiency and mechanism of high concentration fluoride by a nucleation crystallization pelleting process in photovoltaic wastewater [J]. *China Environmental Science*, 2025, 45(2): 803-809. (in Chinese)
- [33] 张勇跃, 程振华, 王利畏, 等. 压裂返排液的深度处理及再利用技术研究进展[J]. *工业水处理*, 2025, 45(8): 1-10.
- ZHANG Y Y, CHENG Z H, WANG L W, et al. Research progress on deep treatment and reuse technology of fracturing flowback fluid [J]. *Industrial Water Treatment*, 2025, 45(8): 1-10. (in Chinese)
- [34] ISHAK R, LAROCHE G, LAMONIER J F, et al. Characterization of carbon anode protected by low boron level: An attempt to understand carbon-boron inhibitor mechanism [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2017, 5(8): 6700-6706.
- [35] 许恩乐, 钟文晨, 祖义涵, 等. 含氟固体废弃物中氟资源回收现状及发展趋势[J]. *生态产业科学与磷氟工程*, 2025, 40(7): 105-113.
- XU E L, ZHONG W C, ZU Y H, et al. Current status and development trends of comprehensive utilization of fluorine resources in fluorine-containing solid waste [J]. *Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering*, 2025, 40(7): 105-113. (in Chinese)
- [36] 金鹏康, 商亚博, 金鑫, 等. 造粒混凝技术原理及其应用[J]. *环境工程学报*, 2025, 19(1): 14-20.
- JIN P K, SHANG Y B, JIN X, et al. Theory of pelleting coagulation and its application [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2025, 19(1): 14-20. (in Chinese)